

УДК 536.2:519.6

**А. А. Андрижиевский<sup>1</sup>, А. Г. Лукашевич<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет<sup>2</sup>ГУО «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»

Национальной академии наук Беларуси

**БАЗОВЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МЕТОДА  
АНАЛИЗА ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

В основу предлагаемого метода анализа теплогидравлических характеристик многослойных поверхностей теплообмена положена процедура использования реальной конфигурации этих поверхностей в качестве базовой при расчете предлагаемых к внедрению конструкций. При этом одним из ключевых моментов является практическая реализация описываемого метода в виде базового программного комплекса, включающего несколько модельных блоков, общий интерфейс пользователя и общую информационно-аналитическую базу данных.

Модельные блоки представленного в работе программного комплекса содержат вычислительные шаблоны различной размерности и различной тематической направленности, в том числе: модельный блок анализа трубчатых поверхностей теплообмена; модельный блок анализа пластинчатых теплообменников; модельный блок анализа процессов переноса в системах пристанционного хранения отработанного ядерного топлива. Единая информационно-аналитическая база данных содержит следующие тематические разделы: теплофизические свойства рабочих тел и конструкционных материалов; классификация и конструктивные особенности теплообменных устройств; методы анализа и оптимизации теплотехнических параметров теплообменных устройств; справочную информацию о характеристиках программного комплекса.

Результаты применения программного комплекса свидетельствуют о его эффективности при анализе процессов переноса в областях сложной формы. Программный комплекс открыт для модернизации.

**Ключевые слова:** теплообменные устройства, процессы переноса, моделирование, вычислительные шаблоны.

**А. А. Andrizhievskiy<sup>1</sup>, A. G. Lukashevich<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Belarusian State Technological University<sup>2</sup>Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of National Academy Sciences of Belarus**BASE PROGRAM COMPLEX OF THE METHOD  
OF ANALYSIS OF THERMAL CHARACTERISTICS  
OF HEAT-EXCHANGE SURFACES OF COMPLEX SHAPES**

A method of the analysis of thermal hydraulic parameters of multilayered surfaces of heat exchange is based on the procedure of the use of a real configuration of these surfaces when calculating the introduced constructions. Thus, one of the key moments is realization of a described method in the form of the base program complex including some of modeling blocks, the general user interface and the general information-analytical database.

The described modeling blocks contain some N-dimensional and various thematic orientation computing templates including the modeling block of the analysis of tubular surfaces of heat exchange; the modeling block of the analysis of lamellar heat exchangers; the modeling block of the analysis of processes of the carry of fulfilled nuclear fuel in the storage systems of the atomic power station. The uniform information-analytical database contains the data about thermo physical properties of working bodies and constructional materials; classification and design features of heat-exchange devices; the methods of analysis and optimization of thermal parameters of heat-exchange devices.

The results of application of the program complex indicate its efficiency while analyzing the processes of the carry in areas with the irregular shape. The program complex is supposed to be upgraded.

**Key words:** heat-exchange devices, transfer processes, modeling, computing template.

**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 условий продвижения мощностного ряда теплообменников указанных типов

является аттестация тепловых и гидродинамических параметров данного оборудования.

В настоящее время в связи со строительством белорусской АЭС особый интерес представляют устройства и методы поддержания безопасных термических условий пристанционного хранения отработанного ядерного топлива и оптимизация их теплотехнических характеристик.

Указанное разнообразие форм поверхностей теплообмена требует индивидуальных натуральных и 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 данного типа теплообменных устройств может быть разработка методов расчетного анализа их тепловых и гидродинамических характеристик с использованием образцов теплообменных поверхностей. Подобные методы позволяют значительно сократить весь производственный цикл от проектирования до внедрения.

**Основная часть.** В основу предлагаемого метода анализа теплогидравлических характеристик многослойных поверхностей теплообмена положена процедура использования реальной конфигурации этих поверхностей в качестве базовой при расчете предлагаемых к внедрению конструкций [1].

В рамках данного метода предлагается поэтапный алгоритм достижения оптимальных параметров разрабатываемых теплообменных устройств.

Можно выделить следующие взаимосвязанные этапы этого алгоритма:

- проведение и обобщение на основе интегральных зависимостей результатов экспериментальных исследований или тестовых испытаний образцов нового теплообменного оборудования;

- создание электронных аналогов исследуемых конструктивных элементов и профилограмм контактирующих поверхностей теплообмена с последующим их использованием при построении геометрии расчетных областей [2];

- разработка многомерных вычислительных аналогов на основе адаптации вычислительных шаблонов современных программных пакетов к рассматриваемым конструкциям теплообменного оборудования и режимам его эксплуатации;

- уточнение параметров базовых вычислительных моделей на основе решения обратных задач теплообмена с использованием данных экспериментальных исследований или результатов тестовых испытаний промышленных образцов внедряемых поверхностей теплообмена;

- расчетный анализ теплотехнических характеристик модельного ряда теплообменных устройств и, на конечном этапе внедрения но-

вого теплообменного оборудования, планирование аттестационных испытаний этого оборудования или подтверждение декларируемых характеристик с использованием его многомерных вычислительных аналогов.

При этом одним из ключевых моментов является практическая реализация описываемого метода в виде базового программного комплекса, включающего несколько модельных блоков, общий интерфейс пользователя и общую информационно-аналитическую базу данных.

В настоящее время базовый программный комплекс представлен следующими блоками и шаблонами (рис. 1) [3–5]:

- модельный блок анализа трубчатых поверхностей теплообмена (включает шаблоны для биметаллических контактных поверхностей теплообмена и теплообменников «труба в трубе»);

- модельный блок анализа пластинчатых теплообменников (шаблоны для интегральной модели и многомерной модели на базе уравнений сохранения);

- модельный блок анализа процессов переноса в системах пристанционного хранения отработанного ядерного топлива (ОЯТ) (шаблоны для «сухого хранения» ОЯТ и для «бассейна выдержки» ОЯТ).

Единая информационно-аналитическая база данных содержит следующие тематические разделы (рис. 2):

- 1) теплотехнические свойства рабочих тел и конструкционных материалов;

- 2) классификация и конструктивные особенности рассматриваемых теплообменных устройств;

- 3) методы анализа и оптимизации теплотехнических параметров теплообменных устройств;

- 4) справочная информация о характеристиках программного комплекса, системных требованиях к его использованию, ограничениях лицензионного характера; руководство пользователя.

Программный комплекс открыт для модернизации и может быть пополнен новыми модельными блоками и вычислительными шаблонами [6].

**Базовая модель программного комплекса.** В качестве базовой модели процессов переноса выбрана следующая система уравнений сохранения:

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

$$\nabla U = 0;$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + J_T,$$

где  $\rho$  – плотность рабочей среды;  $U$  – компонента скорость потока;  $x$  – пространственная координата;  $\eta$  – ламинарная составляющая турбулентного коэффициента вязкости;

$P$  – гидростатическое давление;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $J_T$  – объемный тепловой источник;  $j$  – индекс проекции на оси координат.

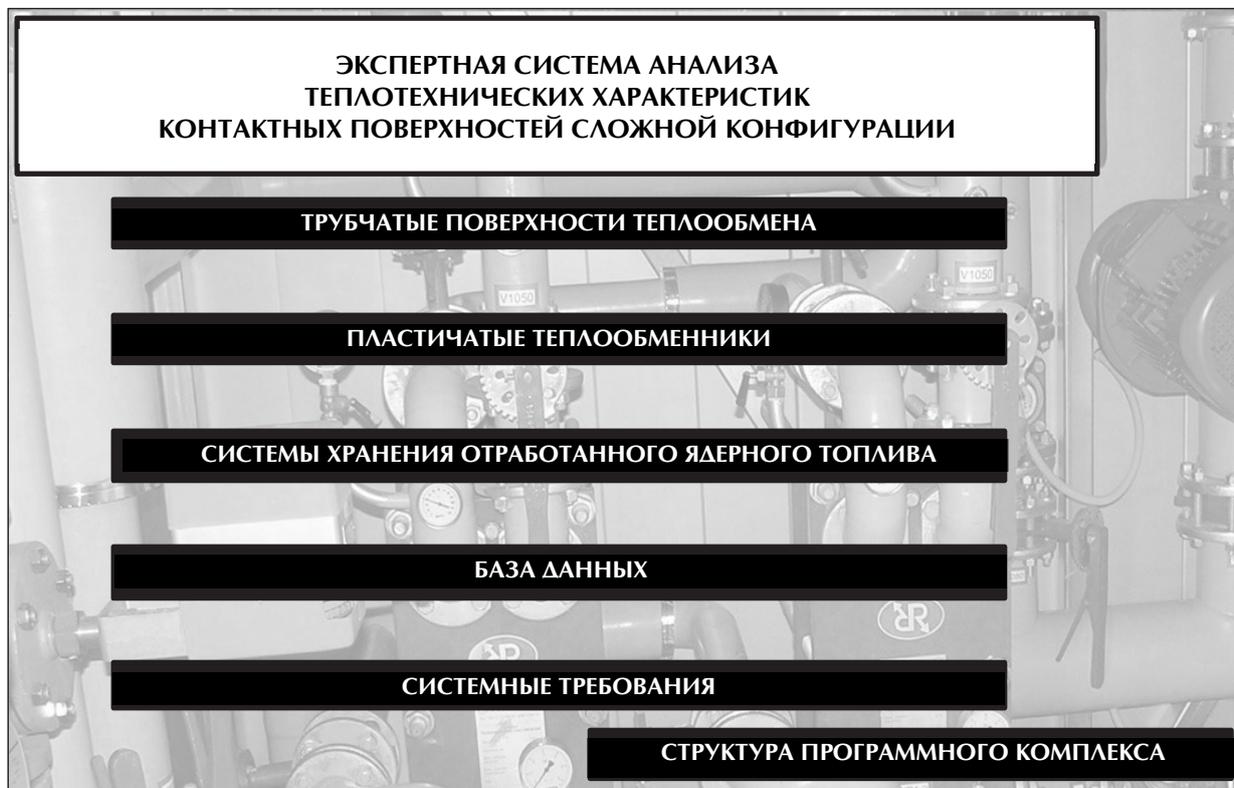


Рис. 1. Главное окно программного комплекса

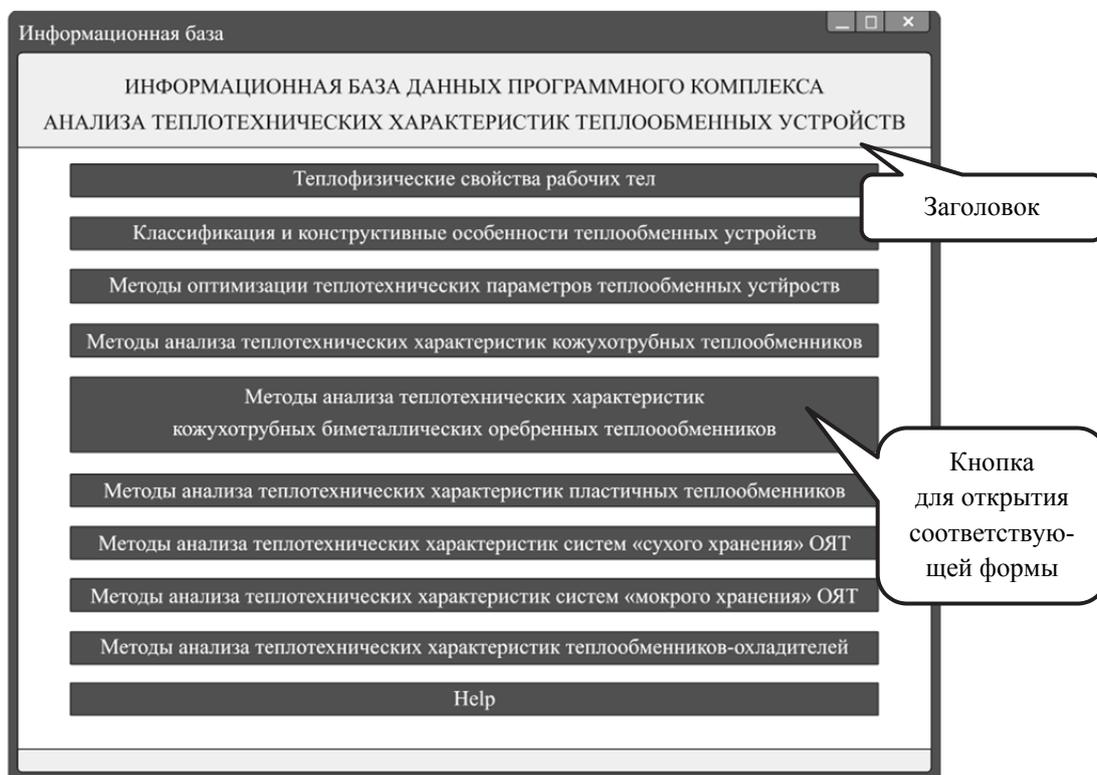


Рис. 2. Единая информационно-аналитическая база данных

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

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

где  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – диссипация турбулентной энергии;  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$  – модельные константы. Значения модельных констант определены на основании экспериментальных данных и находятся в базе данных COMSOL Multiphysics.

При необходимости описания парогазовых систем указанная система уравнений сохранения адаптируется для паровоздушной смеси и дополняется уравнением сохранения массы паровой фазы:

$$\frac{\partial c''}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla c'' = \nabla (D'' \cdot c''),$$

где  $c''$  – концентрация пара;  $D''$  – коэффициент диффузии пара в воздухе.

На границе раздела фаз принимается условие

$$q_{sum} = q_{ev} + q_{con},$$

где  $q_{ev}$  – тепловой поток вследствие испарения;  $q_{con}$  – тепловой поток вследствие конвекции.

Тепловой поток вследствие испарения для одной молекулы газа (предложено Ландау) равен:

$$q_{ev} = k \left( c_s'' - c_{sf}'' \right) \left( \frac{m''}{2\pi K T_{sf}} \right)^{0,5},$$

где  $k$  – скрытая теплота парообразования;  $c_s''$  – концентрация пара насыщения;  $c_{sf}''$  – концентрация пара на границе областей;  $m''$  – масса молекулы пара;  $K$  – постоянная Больцмана;  $T_{sf}$  – температура насыщения.

Ниже представлено описание условий применения входящих в программный комплекс 3D вычислительных шаблонов.

Общий вид расчетных областей моделируемых объектов приведен на рис. 3.

На рис. 3, а представлен 3D вычислительный шаблон, предназначенный для описания процессов переноса в биметаллических оребренных кожухотрубных конструкциях теплообменных устройств. Расчетная область данного

типа теплообменной поверхности в соответствии с постановкой задачи исследования разбита на четыре сопряженные расчетные подобласти:

- 1) область между оребренными трубами (свободная конвекция, воздух);
  - 2) внешняя труба с оребрением (теплопроводность, алюминий);
  - 3) контактная зона между внешней и внутренней трубой (термическое сопротивление);
  - 4) внутренняя труба (теплопроводность, сталь).
- Внешним граничным условием является условие адиабатичности протекания физических процессов.

На рис. 3, б представлен 3D вычислительный шаблон, предназначенный для описания процессов переноса в трубчатом теплообменнике-охладителе.

При построении данного модельного аналога приняты следующие допущения:

- отложения возникают только на поверхностях теплообменника в кольцевом зазоре, контактирующих с хладоносителем (50%-ным водным раствором пропиленгликоля) и одинаковые как по толщине, так и по составу;
- на поверхности трубы с охлаждаемой жидкостью (водой) формирования отложений не происходит;
- толщина отложений рассматривается в качестве параметра, изменяющегося во времени дискретно или линейно (квазистационарный режим) от 0 до 5 мм;
- природа отложений рассматривается в вариантах: биообрастания (теплопроводность – 0,6 Вт/мК); соли жесткости и продукты коррозии (теплопроводность – 1,2 Вт/мК).

Приведенные выше допущения позволяют рассматривать осесимметричную задачу на установление параметров теплообменника.

На рис. 3, в представлен 3D вычислительный шаблон, предназначенный для описания процессов переноса в системах «сухого» стационарного хранения отработанного ядерного топлива.

Модельный аналог пенала для хранения трех отработанных тепловыделяющих сборок (ОТВС) имел следующие геометрические параметры: высота пенала – 5 м, диаметр – 0,65 м. Размеры ОТВС: высота горячей части – 3,8 м (без хвостовой части), диаметр – 0,468 м.

Было рассмотрено два варианта модели:

- 1) без дополнительных пластин;
- 2) с охлаждающими алюминиевыми пластинами вдоль ОТВС высотой 3,8 м.

Кроме того, был разработан модельный аналог сухого хранилища, представляющий собой помещение прямоугольной формы, который включает в себя отверстия для подачи и отвода охлаждающего газа, а также набор цилиндри-

ческих контейнеров, на поверхности которых могут быть заданы граничные условия, характерные для режимов хранения ОЯТ. Применительно к хранилищам ОЯТ рассматривались несколько способов охлаждения:

- естественная циркуляция воздуха;
- принудительная циркуляция воздуха;
- комбинированный способ охлаждения.

На рис. 3, *г* представлен 3D вычислительный шаблон, предназначенный для описания процессов переноса в системах «мокрого» пристанционного хранения отработанного ядерного топлива. При построении расчетной

модели БВ приняты следующие основные допущения:

- движение газовой фазы описывается в рамках двухкомпонентной паровоздушной смеси;
- физические свойства воды и твердых сред принимаются постоянными, а свойства паровоздушной смеси – зависящими от температуры, давления и относительной влажности воздуха;
- дно и стенки бассейна выдержки считаются теплоизолированными, и вынос теплоты осуществляется только через вентиляционные каналы.

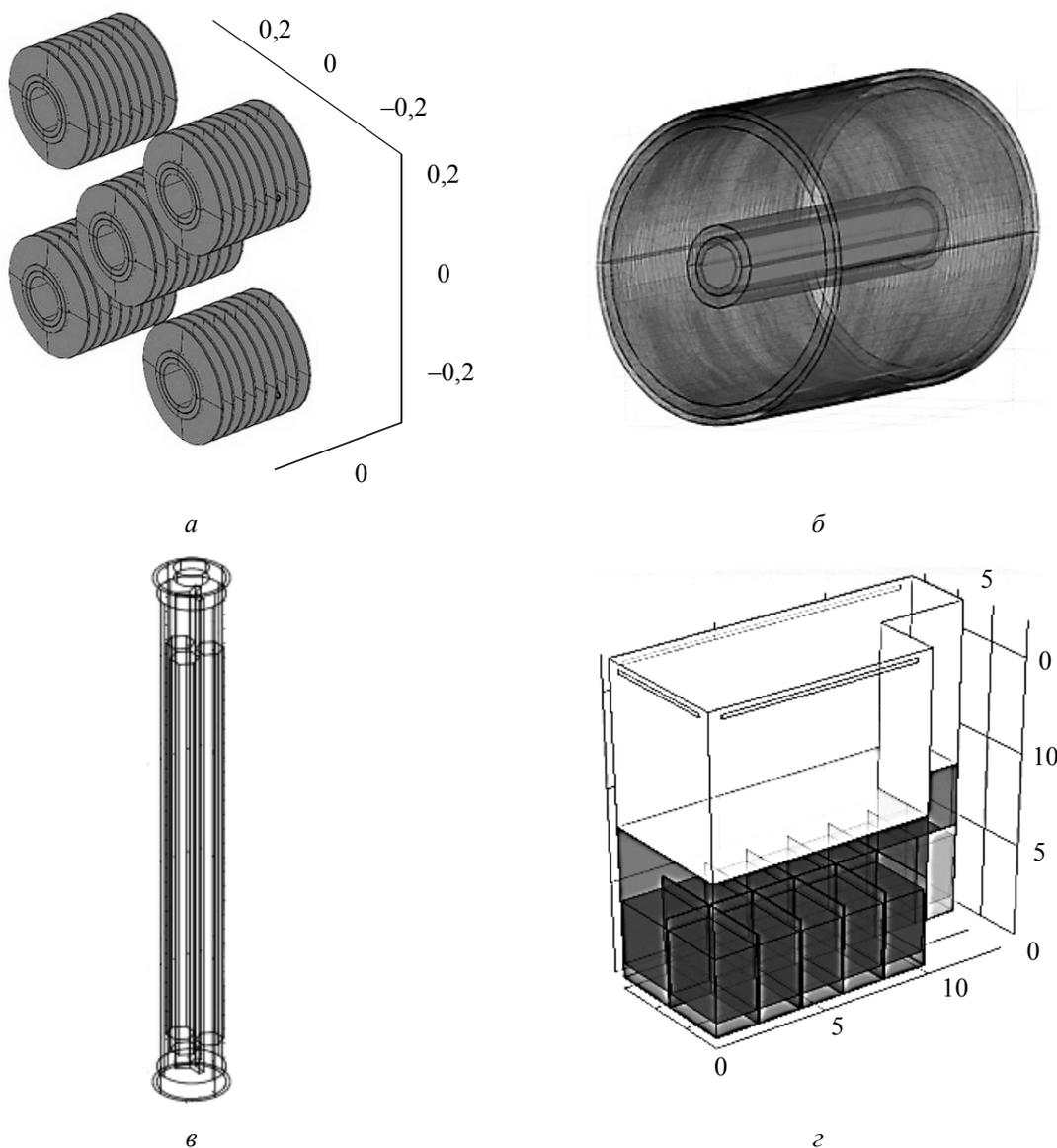


Рис. 3. Модельные аналоги теплообменных систем и поверхностей:  
*а* – биметаллический кожухотрубный теплообменник с внешним оребрением;  
*б* – теплообменник-охладитель типа «труба в трубе»;  
*в* – пенал системы «сухого» пристанционного хранения ОЯТ  
 (без дополнительных пластин,  
 с продольными охлаждающими алюминиевыми пластинами);  
*г* – элемент системы «мокрого» пристанционного хранения ОЯТ в бассейне выдержки

При этом учитываются два механизма теплосъема: за счет конвекции в верхней части БВ и принудительного впрыска и забора воды через дренажный коллектор и через штатный забор вблизи верхнего уровня жидкости. Радиационный теплообмен не рассматривался.

Результаты применения базового программного комплекса метода анализа теплотехнических характеристик промышленных образцов теплообменных систем и поверхностей сложной конфигурации представлены в работах [1–6].

**Заключение.** Разработанный программный комплекс метода анализа теплотехнических характеристик теплообменных поверхностей сложной формы включает несколько модельных блоков, общий интерфейс пользователя и общую информационно-аналитическую базу данных.

Результаты применения входящих в комплекс модельных блоков, включая расчеты полей температур и функций тока в условиях естественной и вынужденной конвекции в областях сложной конфигурации, показали их физическую непротиворечивость и достоверность при описании теплотехнических параметров промышленных образцов теплообменных устройств и систем.

Программная реализация метода экспертного анализа и оптимизации теплотехнических характеристик теплообменных устройств позволит проектировать, планировать испытания и проводить вычислительный анализ параметров промышленных теплообменников и, соответственно, сократить финансовые издержки и ускорить внедрение теплообменного оборудования в практику.

### Литература

1. Андрижиевский А. А., Вороницкая А. П., Лукашевич А. Г. Метод экспертного анализа теплотехнических характеристик промышленных образцов многослойных контактных поверхностей теплообмена // Материалы Минского Международного форума по тепло- и массообмену. Минск, 2012. Т. 1. Ч. 2. С. 665–669.
2. 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. С. 170–175.
3. Андрижиевский А. А., Вороницкая А. П., Лукашевич А. Г. Разработка и верификация пространственного вычислительного аналога биметаллической контактной поверхности теплообмена // Труды БГТУ. 2013. № 3: Химия и технология неорганических веществ. С. 150–155.
4. Андрижиевский А. А., Трифонов А. Г. Компьютерные методы анализа теплотехнических характеристик теплообменника-охладителя типа «труба в трубе» // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганических веществ. С. 98–101.
5. Андрижиевский А. А., Трифонов А. Г., Пронкевич Т. Ю. Многомерная вычислительная модель для анализа тепломассообменных процессов в бассейнах выдержки отработавшего ядерного топлива АЭС с реактором типа ВВЭР-1200 // Труды БГТУ. 2013. № 3: Химия и технология неорганических веществ. С. 145–149.
6. Андрижиевский А. А., Лукашевич А. Г. Трехмерная компьютерная модель развитой контактной поверхности теплообмена сложной конфигурации // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганических веществ. С. 94–97.

### References

1. Andrizhievskiy A. A., Voronitskaya A. P., Lukashevich A. G. The method of expert analysis of thermal characteristics of multilayer contact heat transfer surfaces. *Materialy Minskogo Mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu* [Materials of Minsk International Heat and Mass Transfer Forum], Minsk, 2012, vol. 1, part 2, pp. 665–669 (in Russian).
2. Andrizhievskiy 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* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 3, pp. 170–175 (in Russian).
3. Andrizhievskiy A. A., Voronitskaya A. P., Lukashevich A. G. Development and verification of a spatial computing analog of the bimetallic contact heat transfer surface. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 3, pp. 150–155 (in Russian).
4. Andrizhievskiy A. A., Trifonov A. G. Computer methods for analysis of thermal characteristics of heat exchanger-refrigerant of type «pipe-in-pipe». *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3, pp. 98–101 (in Russian).

5. Andrizhievskiy A. A., Trifonov A. G., Pronkevich T. Y. Multidimensional computational model for the analysis of heat-mass transfer in the cooling pond for spent nuclear fuel of NPP with VVER-1200 reactor. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 3, pp. 145–149 (in Russian).

6. Andrizhievskiy A. A., Lukashevich A. G. A three-dimensional computer model for developed contact heat exchange surface of complex configuration. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3, pp. 94–97 (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. ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (220109, г. Минск, ул. акад. А. К. Красина, 99, Республика Беларусь). E-mail: lag@sosny.bas-net.by

#### **Information about the authors**

**Andrizhievskiy Anatoliy Al'gertovich** – D. Sc. Engineering, professor, Department of Energy-Savings, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: aaandri@mail.ru

**Lukashevich Alexey Gennadievich** – Ph. D. Engineering, Head of the Laboratory for Modeling of Nonlinear Processes in Power Engineering. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of National Academy of Sciences of Belarus (99, academian A. K. Krasin str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lag@sosny.bas-net.by

*Поступила 20.02.2015*