



УДК 532.5:621.694

**Багоутдинова А.Г.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

**Золотонос Я.Д.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: zolotonosov@mail.ru

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

### **Визуализация процессов гидродинамики и теплообмена в трубах с винтовой поверхностью теплообмена**

#### **Аннотация**

Статья посвящена компьютерному моделированию теплогидродинамических процессов и визуализации структуры потоков в проточной части труб с винтовой поверхностью теплообмена с использованием программного комплекса SolidWorks Flow Simulation.

Определен характер распределения поля скоростей, температур и давлений в расчетной области и проведен сравнительный анализ теплогидродинамической эффективности исследуемых труб.

Оценены значения коэффициентов теплоотдачи в проточной части каналов и показана перспективность использования труб с винтовой поверхностью теплообмена при проектировании современных энергоэффективных теплообменных аппаратов гравитационного и центробежного типов.

**Ключевые слова:** теплообмен, гидродинамика, численное моделирование, визуализация.

Работы по исследованию процессов теплообмена ведутся на протяжении многих лет, при этом для интенсификации тепломассопереноса предложено множество различных конструкций теплообменных элементов [1-2].

Одним из путей создания эффективных аппаратов теплообмена является использование в них теплообменных элементов с закруткой потока. Благодаря винтовой закрутке теплоносителя возникает циркуляция среды в проточной части каналов, что приводит к интенсивному обмену порций жидкости между пристенным слоем и ядром потока и, как следствие, к интенсификации теплообмена [3]. В работах [4-6] авторами предложены теплообменные элементы по типу «конфузор-диффузор» с винтовой поверхностью теплообмена, а в настоящей работе сделана попытка выполнить компьютерное моделирование теплогидродинамических процессов, протекающих в проточной части каналов.

В качестве объектов исследований были приняты трубы с различным соотношением длин фрагментов ( $l_1 : l_2$ ), формирующих теплообменный элемент (рис. 1).

Компьютерное моделирование исследуемых объектов выполнялось с использованием программного модуля SolidWorks Flow Simulation, основанного на методе конечных элементов.

Выбор в пользу данной программы объясняется тем, что за счет полной интеграции Flow Simulation в SolidWorks имеется возможность моделировать геометрию и выполнять все расчеты и анализы «в одном окне». Это значительно снижает вероятность возникновения ошибок импорта/экспорта геометрии через промежуточный формат данных (например, SAT, IGES и т.д.). Кроме того, SolidWorks имеет стандартный графический пользовательский интерфейс Windows и эффективно взаимодействует с такими Windows-приложениями, как Excel, Word и др.

Комплекс задач, связанных с вопросами гидродинамики и теплообмена, в SolidWorks Flow Simulation решается с помощью дифференциальных уравнений движения, неразрывности, энергии, теплопроводности стенок канала [7]. Для всего диапазона чисел Re расчет чисел Nu и  $\alpha$  проводился с использованием k-ε модели турбулентности.

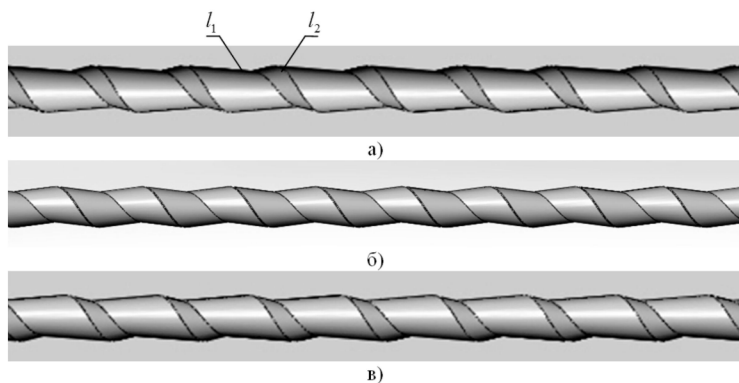


Рис. 1. Трубы с соотношения длин фрагментов  $l_1 : l_2$ : а) 1:2; б) 1:1; в) 2:1

Основными этапами разработки компьютерной модели в SolidWorks Flow Simulation являются: а) создание 3D-модели; б) построение сетки расчетной области; в) наложение граничных условий; г) визуализация полей температур, давления и т.п.

На рис. 2. представлены основные этапы компьютерного моделирования процессов течения жидкости и теплообмена с использованием среды SolidWorks Flow Simulation.

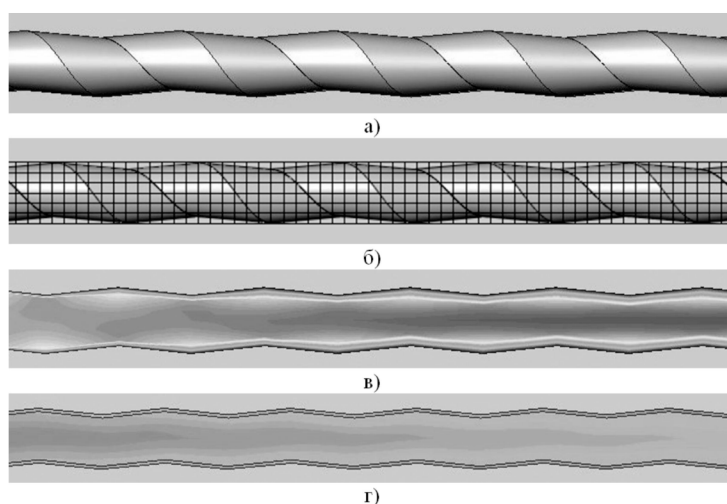


Рис. 2. Основные этапы моделирования в SolidWorks Flow Simulation:  
а) создание 3D-модели; б) построение сетки расчетной области;  
в) распределение поля скоростей; г) распределение поля температур

Численный расчет проводился при следующих допущениях: процессы течения жидкости и теплообмена стационарны; плотность теплового потока на поверхности стенки канала постоянна; в потоке жидкости отсутствуют внутренние источники теплоты; на торцевых поверхностях каналов отсутствует теплообмен.

Для расчетной модели были заданы следующие условия однозначности:

– *физические условия*: в качестве материала трубы выбрана медь, в качестве жидкости – вода;

– *начальные условия*: температура трубы  $T_{нач} = 20^0\text{C}$ ;

– *граничные условия*: температура воды на входе  $t_{вх} = 20^0\text{C}$ , давление на входе  $P_{вх} = 1\text{атм}$ , расход воды на выходе  $G_{воды} = 0,1...0,6\text{кг/с}$ , плотность теплового потока  $q = 30287...1801727\text{Вт/м}^2$ , на стенках канала – условия прилипания;

– *геометрические условия*: длина трубы  $L = 1,1\text{м}$ , толщина стенки  $\delta = 0,001\text{м}$ ; площадь поперечного сечения  $S_{сеч} = 0,000226\text{ м}^2$ .

Исследование проводилось при условии равенства массовых скоростей ( $S_{сеч} = const$ ,  $d_{экв} = var$ ).

Для проверки адекватности компьютерной модели предварительно были проведены теплогидродинамические исследования с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation для гладких цилиндрических труб. Расчеты показали, что погрешность определения коэффициентов сопротивления  $\xi$  и критериев Нуссельта  $Nu$ , с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation и по известным критериальным зависимостям [8], составляет не более 6 % и 8 % в рассматриваемом диапазоне чисел  $Re$ .

Далее были проведены теплогидродинамические исследования в трубах с винтовой поверхностью теплообмена, определены значения распределения скоростей, температур, давления во всей расчетной области и проведен сравнительный анализ эффективности исследуемых труб.

В качестве параметров, характеризующих эффективность исследуемых труб, были выбраны комплексы тепловой  $Nu/Nu_0$ , гидродинамической  $\xi/\xi_0$  и теплогидродинамической  $\eta = (Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$  эффективностей, где индекс «0» означает гладкую цилиндрическую поверхность теплообмена.

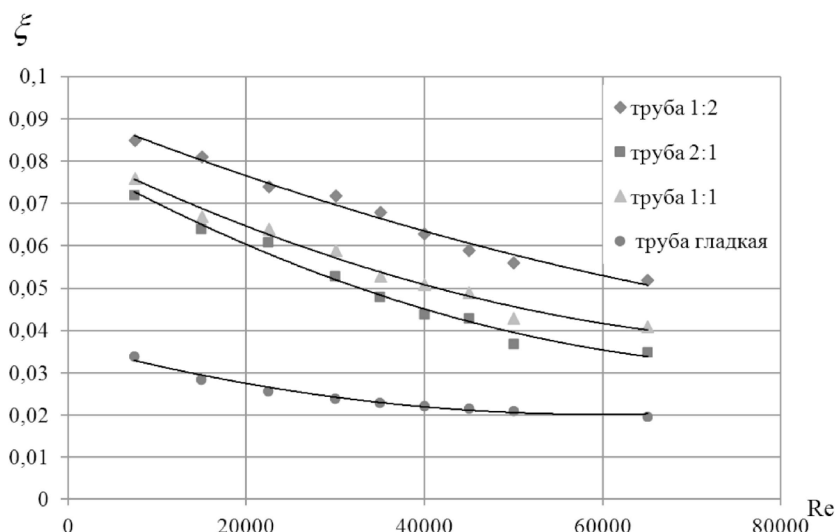


Рис. 3. Зависимость чисел  $\xi$  от числа  $Re$

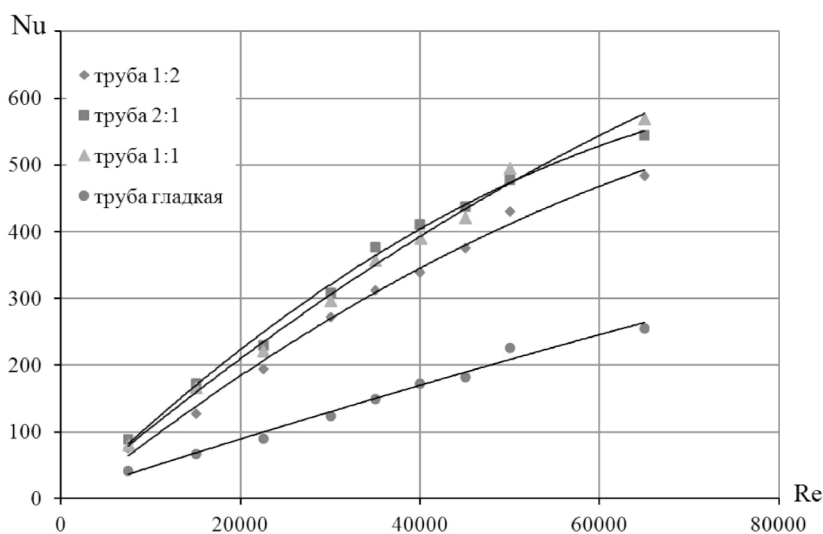


Рис. 4. Зависимость чисел  $Nu$  от числа  $Re$

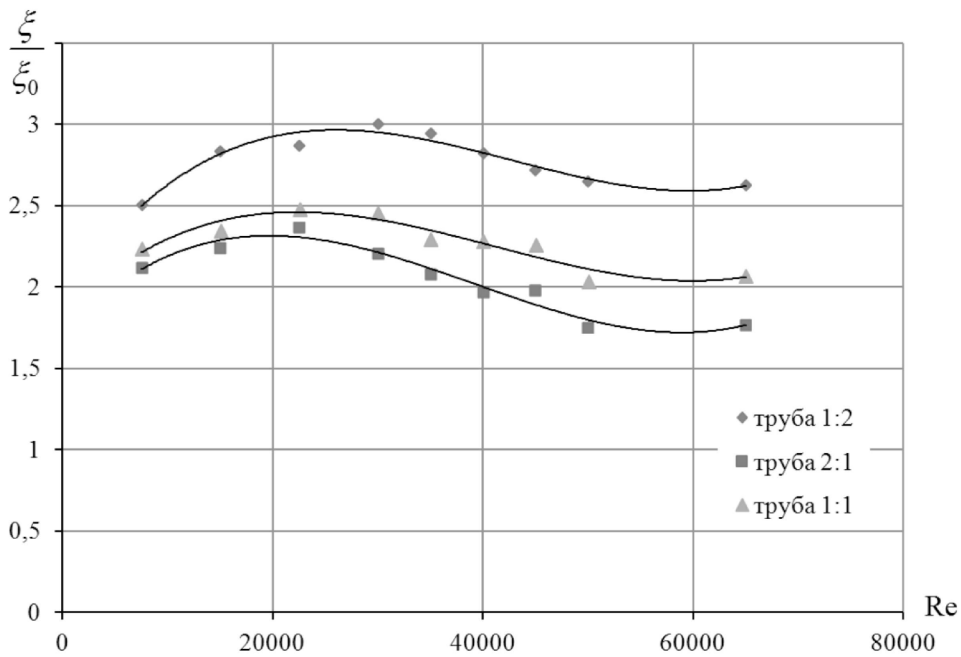


Рис. 5. Комплекс гидравлической эффективности  $\xi/\xi_0$

На рис. 3 показано изменение  $\xi$  в зависимости от  $Re$  для всех исследованных труб. Установлено, что в рассматриваемом диапазоне чисел  $Re$  увеличение коэффициента сопротивления по сравнению с гладкой цилиндрической трубой составляло 1,5-2,8 раза (рис. 4).

На рис. 4 показано изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ , представленное в виде зависимости  $Nu = f(Re)$ . Из рисунка видно, что увеличение числа  $Nu$  при течении жидкости в трубах с винтовой поверхностью теплообмена по сравнению с гладкой цилиндрической трубой составляло 1,8-2,7 раза в зависимости от геометрических характеристик труб.

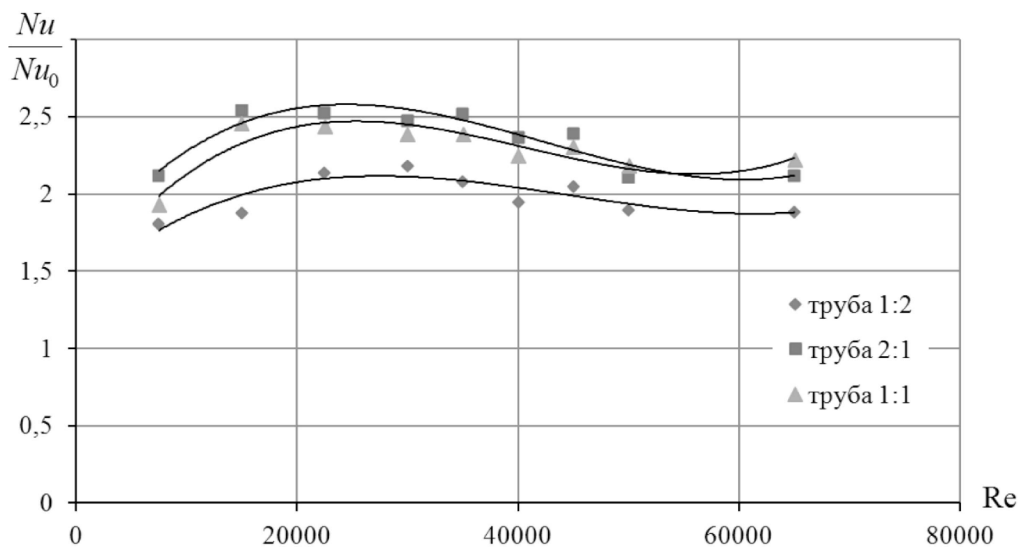


Рис. 6. Комплекс тепловой эффективности  $Nu/Nu_0$

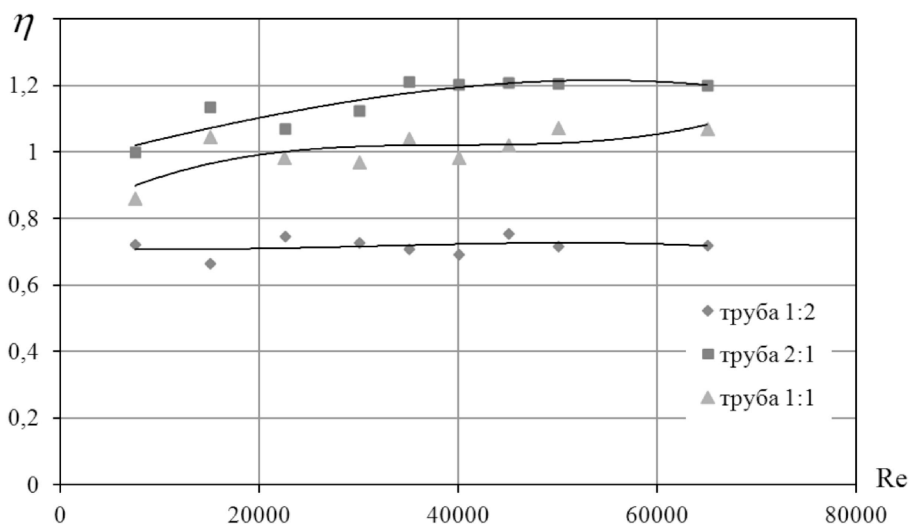


Рис. 7. Теплогидродинамическая эффективность  $\eta = (Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$

Как видно из рис. 7, при  $Re > 20000$  устанавливается хорошее согласование между приростом теплоотдачи  $Nu/Nu_0$  и увеличением гидравлических потерь  $\xi/\xi_0$  для труб с соотношением  $l_1:l_2 = 2:1$  и  $l_1:l_2 = 1:1$ , при этом комплекс тепловой эффективности  $\eta = (Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0) > 1$ . Сравнительная оценка полученных данных позволяет сделать вывод, что наиболее перспективной с точки зрения тепловых эффектов являются труба с соотношением  $l_1:l_2 = 2:1$ . При этом темп роста эффективности теплоотдачи превышает рост гидравлического сопротивления на 15-20 %.

Визуализация потока жидкости производилась по трем параметрам: распределения поля скоростей, температур и давлений на начальном участке, в средней части канала и в выходном сечении (рис. 7-9).

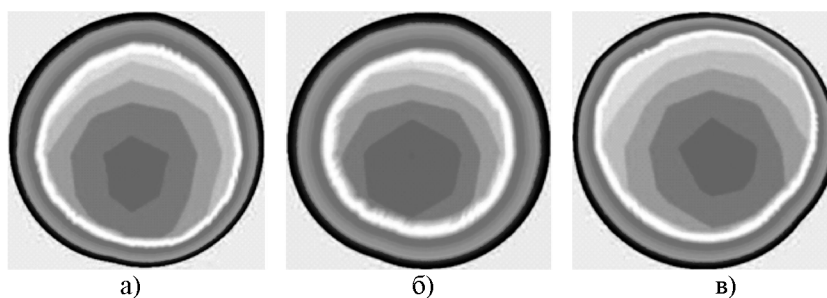


Рис. 8. Поле скоростей ( $Re=35000$ ):  
а) начальный участок; б) средняя часть канала; в) выходное сечение

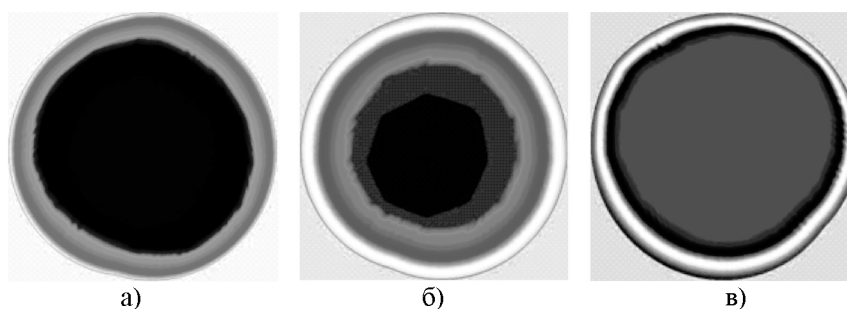


Рис. 9. Поле температуры ( $Re=35000$ ):  
а) начальный участок; б) средняя часть канала; в) выходное сечение

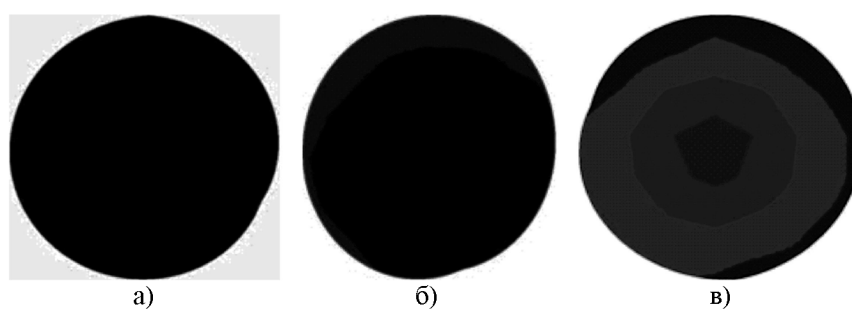


Рис. 10. Поле давлений ( $Re=35000$ ):  
а) начальный участок; б) средняя часть канала; в) выходное сечение

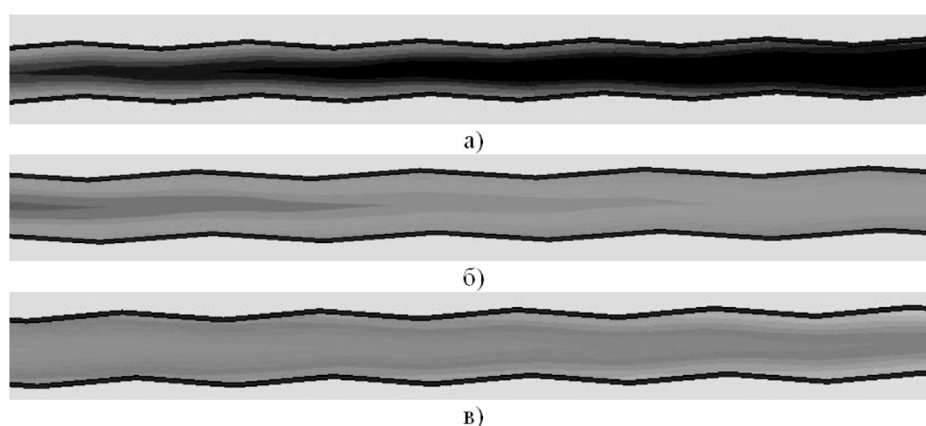


Рис. 11. Распределение поля температур по длине канала:  
а) начальный участок; б) средний участок; в) конечный участок

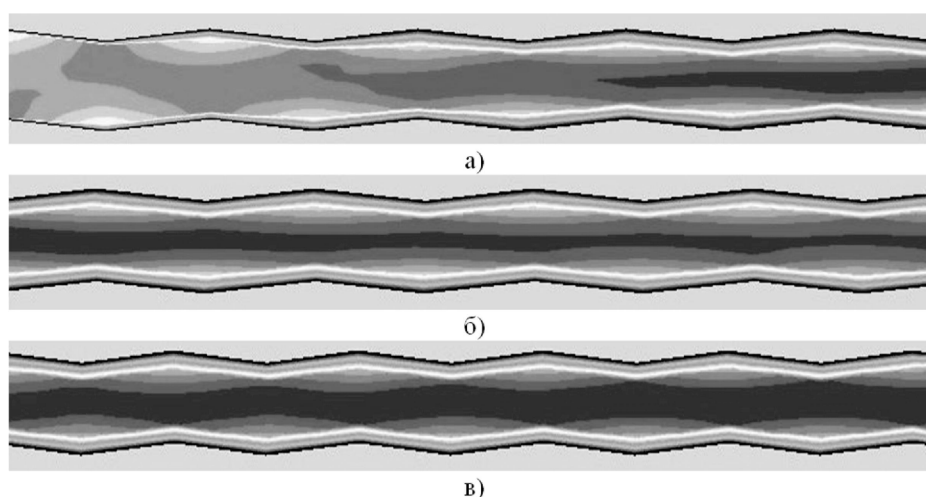


Рис. 12. Распределение поля скоростей по длине канала:  
а) начальный участок; б) средний участок; в) конечный участок

Как следует из результатов компьютерного моделирования, имеет место интенсивное перемешивание среды в проточной части каналов, выравнивание температурных полей в радиальном сечении труб, коэффициенты теплоотдачи в проточной части каналов ( $Re=50000$ ) при этом составляют в среднем  $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ .

В перспективе предполагаются широкие натурные испытания, проведение сравнительного анализа результатов экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

### Заключение

В ходе исследования процессов гидродинамики и теплообмена с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation получены следующие основные результаты:

- предложены конфигурации труб по типу «конфузор-диффузор» с винтовой поверхностью теплообмена и построены их 3D модели;
- получены значения поля скоростей, температур, давлений в проточной части рассматриваемых труб;
- определены коэффициенты теплоотдачи в проточной части каналов, так при  $Re=50000$  их значения составляют в среднем  $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ ;
- проведена оценка теплогидродинамической эффективности гладкой цилиндрической трубы и трех труб по типу «конфузор-диффузор» с различным соотношением длин фрагментов. Показано, что наиболее эффективной является труба с соотношением  $l_1:l_2 = 2:1$ , коэффициент теплогидродинамической эффективности при  $Re>30000$  составил 1,2;
- разработана методика проведения последующих натуральных экспериментов.

### Список библиографических ссылок

1. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
2. Гортышов Ю.Ф., Олимпиев В.В. Теплообменные аппараты с интенсифицированным теплообменом. – Казань, КГТУ, 1999. – 176 с.
3. Данилов Ю.И. Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы / Данилов Ю.И., Дзюбенко Б.В., Дрейцер Г.А. и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 200 с.
4. Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д. Математическое описание и визуализация теплообменных поверхностей в форме пружинно-витых каналов и труб типа «конфузор-диффузор» // Известия вузов. Проблемы энергетики. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2012, № 7-8. – С. 80-86.
5. Багоутдинова А.Г., Золотонос А.Я., Золотонос Я.Д., Сулимов Н.И., Яхнев М.Н. Математическое описание теплообменных поверхностей сложных каналов типа «конфузор-диффузор» // Известия КГАСУ, 2012, № 4 (22). – С. 204-208.
6. Патент № 119452 на пол. мод. РФ. Теплообменный элемент / Золотонос А.Я., Золотонос Я.Д., Багоутдинова А.Г., Осыка И.И. № 2012109355/06; заявл. 12.03.12.; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.
7. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
8. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 341 с.

**Bagoutdinova A.G.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

**Zolotonosov Ya.D.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: zolotonosov@mail.ru

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

### Visualization process of fluid flow and heat transfer in tubes with helical heat exchange surface

#### Resume

One of the ways to create efficient heat transfer devices is to use them in the heat exchanger elements with a twist flow. In this regard, recently has been actively working to

create channels using the effects of spin currents. We previously proposed the heat transfer elements of the type «confuser-diffuser» with spiral heat exchange surface.

In this paper we attempt to perform computer simulations of fluid flow and heat transfer using imaging flow patterns in the running part of such elements. Computational study was conducted with the help of the program complex Solid Works Flow Simulation for pipes with different dimensions.

The values of the distribution of the velocity field, temperature and pressure in each of the computational domain and the comparative analysis of heat and hydrodynamic efficiency considered pipes.

The values of heat transfer coefficients in the flow of the channels and proven promising tubes with helical heat exchange surface for design of energy-efficient heat exchangers.

**Keywords:** heat transfer, fluid dynamics, numerical simulation and visualization.

### Reference list

1. Khalatov A.A. Theory and practice of swirling flows. – Kiev: Naukova Dumka, 1989. – 192 p.
2. Gortichov Yu.F., Olimpiev V.V. Heat exchange devices with improved heat transfer. – Kazan: Kazan state technical University, 1999. – 176 p.
3. Danilov Y.I. Heat transfer and hydrodynamics in channels of complex shape / Danilov Y.I., Dziubenko B.V., Dreitser G.A. – M.: Mashinostroyeniye, 1986. – 200 p.
4. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ja.D. Mathematical description and visualization of heat-exchange surfaces in form the spring-curly channels and pipes of type «confuser-diffuser» // Izvestiya vuzov. Problemy energetiki. – Kazan: Izd. KGEU, 2012, № 7-8. – P. 80-86.
5. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov A.J., Zolotonosov J.D., Sulimov M.I., Yakhnev M.N. Mathematical description of the heat exchange surfaces of complex channels such as «confuser-diffuser» // News of the KSUAE, 2012, № 4 (22). – P. 204-208.
6. Zolotonosov J.D., Osyka I.I., Bagoutdinova A.G. Heat exchanging element: Patent №119452 on the floor. fashion. Growing up. The Federation. №2012109355/06; Appl. 12.03.12.; publ. 20.08.2012. Byull. № 23.
7. Alyamovsky A.A. SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice / Alyamovsky A.A., Sobachkin A.A., Odintsov E.V. – SPb.: BHV-Petersburg, 2008. – 1040 p.
8. Mikheev M.A., Mikheev I.M. Fundamentals of Heat Transfer. – M.: Energiya, 1977. – 341 p.