

А. Г. Багоудинова, Я. Д. Золотосов, О. В. Шемелова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО МОДУЛЯ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

Ключевые слова: теплообмен, гидродинамика, компьютерное моделирование.

Статья посвящена компьютерному моделированию теплогидродинамических процессов и визуализации структуры потоков в проточной части каналов сложной конфигурации 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 каналов. Получены значения коэффициентов теплоотдачи в проточной части каналов и показана перспективность использования труб с винтовой поверхностью теплообмена при проектировании современных энергоэффективных теплообменных аппаратов.

Keywords: heat exchange, hydrodynamics, computer simulation.

Article is dedicated to computer simulation of heat hydrodynamic processes and visualization of streams structure in flowing part of channels with a complicated configuration by using bundled software SolidWorks Flow Simulation. Nature of distribution of velocity field, temperatures and pressures in the rated operating conditions is determined and the comparative analysis of heat hydrodynamic efficiency of channels under study is carried out. Values of heat transfer coefficients in flowing part of channels are received and prospects of using pipes with helical heat-exchange surface are shown in designing of modern power efficient heat exchange devices.

Разработка эффективных теплообменных аппаратов является актуальной задачей современной теплоэнергетики, ЖКХ и многих смежных с ними отраслей промышленности.

Для улучшения теплогидродинамических характеристик такого оборудования необходимо создание новых конструкций теплообменных аппаратов с учетом передовых технологий их производства.

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 [1].

В связи с этим, авторами предложен новый класс теплообменных элементов по типу «конфузор-диффузор» с винтовой поверхностью теплообмена (рис. 1) [2-5], позволивший реализовать идею крупномасштабной модернизации существующего парка теплообменного оборудования без существенных капитальных затрат.

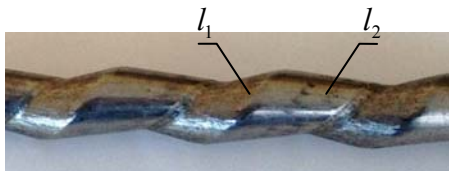


Рис. 1 – Теплообменный элемент с винтовой поверхностью теплообмена

Технология изготовления таких каналов осуществляется в холодном состоянии способом ротационнойковки (ротационным обжатием), являющейся одной из разновидностей процесса

ковки и реализуемой на специальных ротационно-ковочных машинах [6]. Процесс ротационнойковки в целях получения витой трубы, представленной на рис. 1, реализован на ротационной ковочной машине SKK-14 и контролировался её аппаратно-программным комплексом. Это позволило вести ковку в режиме работы сегментов формирующего блока $\pm 0,1$ мм, частотой осцилляции инструмента деформирования - 500 ударов в минуту и усилием ковки – 5000 кг. Мерность заготовки, устанавливаемой в ковочную машину, составляет 6000 мм, а время ротационного обжатия - 10...12 минут.

В целях проведения теоретических исследований, касающихся усовершенствования конфигурации проточной части теплообменного элемента, авторами сделана попытка выполнить компьютерное моделирование тепло и гидродинамических процессов, протекающих в проточной части каналов с винтовой поверхностью теплообмена. Компьютерное моделирование при решении задач теплообмена позволяет наиболее эффективно получать результаты в числовой и графической формах [7-8].

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

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 системы дифференциальных уравнений движения, неразрывности, энергии, теплопроводности стенок канала [9]. Для замыкания системы уравнений используется двухпараметрическая k - ϵ модель турбулентности.

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.

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 $T_{нач} = 20^\circ\text{C}$;

– *граничные условия*: температура воды на входе $t_{вх} = 20^\circ\text{C}$, давление на входе $P_{вх} = 1$ атм, расход воды на выходе $G_{воды} = 0,1...0,6$ кг/с, плотность теплового потока $q = 30287...1801727$ Вт/м², на стенках канала – условия прилипания;

– *геометрические условия*: длина трубы $L = 1,1$ м, толщина стенки $\delta = 0,001$ м; площадь поперечного сечения $S_{сеч} = 0,000226$ м².

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 ξ и критериев Нуссельта Nu , с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation и по известным критериальным зависимостям [10], составляет не более 6 % и 8 % в рассматриваемом диапазоне чисел Re .

После этого 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 ξ/ξ_0 и теплогидродинамической $\eta = (Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$ эффективностей, где индекс “0” означает гладкую цилиндрическую поверхность теплообмена.

На рис. 2 показано изменение ξ 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.

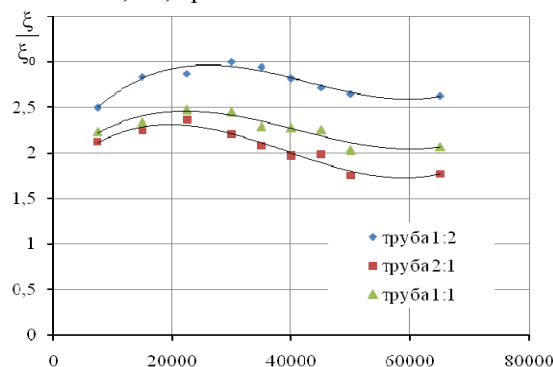


Рис. 2 – Комплекс гидравлической эффективности ξ/ξ_0 с различным соотношением длин фрагментов $l_1 : l_2$

На рис. 3 показано изменение коэффициента теплоотдачи α , 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.

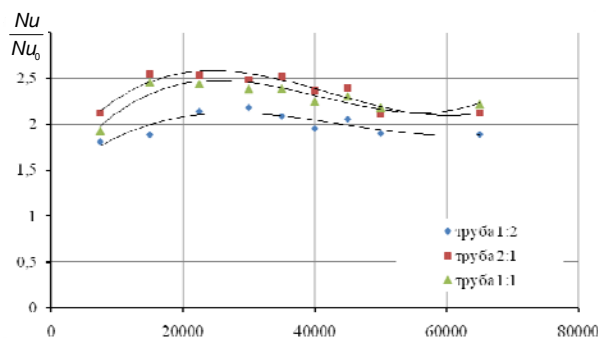


Рис. 3 - Комплекс тепловой эффективности Nu/Nu_0 с различным соотношением длин фрагментов $l_1 : l_2$

Как видно из рис. 4, при $Re > 20000$ устанавливается хорошее согласование между приростом теплоотдачи Nu/Nu_0 и увеличением гидравлических потерь ξ/ξ_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 является труба с соотношением $l_1 : l_2 = 2 : 1$. При этом темп роста эффективности теплоотдачи превышает рост гидравлического сопротивления на 15–20 %.

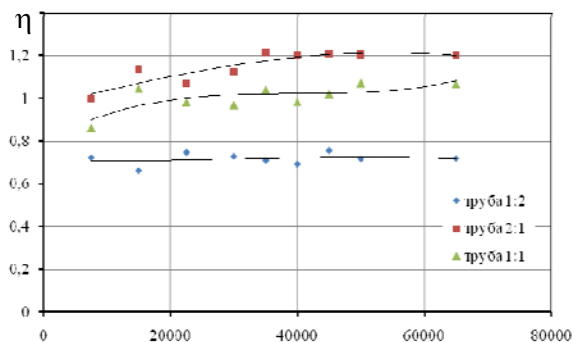


Рис. 4 - Теплогидродинамическая эффективность $\eta = (Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)$

В результате компьютерного моделирования были определены поля скоростей, температур и давлений во всей расчетной области. Показано, что 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 $10000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

С целью экспериментального сравнения эффективности рассматриваемых теплообменных элементов разработана методика исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб по типу «конфузор-диффузор» с винтовой поверхностью теплообмена [11]. 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 тепловой и гидродинамической эффективности гладкой цилиндрической трубы и трех труб по типу «конфузор-диффузор» с различным соотношением длин фрагментов. Показано, что наиболее эффективной является труба с соотношением $l_1 : l_2 = 2 : 1$, при $Re > 30000$ коэффициент теплогидродинамической эффективности составил 1,2;

- разработана методика проведения последующих натурных экспериментов.

Литература

1. Ю.И. Данилов, Б.В. Дзюбенко, Г.А. Дрейцер и др. *Теплообмен и гидродинамика в каналах сложной формы*. Машиностроение, Москва, 1986, 200 с.
2. Пат. РФ 119452 (2012).
3. А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносков. *Известия вузов. Проблемы энергетики*, 7–8, 80–86 (2012).
4. А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносков, Н.И. Сулимов, М.Н. Яхнев. *Известия КГАСУ*, 4, 22, 204-208 (2012).
5. А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносков. *Известия КГАСУ*, 2, 24, 157-167 (2013).
6. А.Г. Багоутдинова, А.Я. Золотоносков, Я.Д. Золотоносков, М.Н. Яхнев. *Известия КГАСУ*, 2, 24, 150-156 (2013).
7. И.А. Сабанаев, Ф.М. Алмакаева, З.Ф. Сабанаева. *Вестник Казанского технологического университета*, 16, 15, 315-317 (2013).
8. О.В. Шемелова, *Вестник Казанского технологического университета*, 16, 12, 285-288 (2013).
9. А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов. *SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. БХВ-Петербург, Санкт-Петербург, 2008, 1040 с.
10. М.А. Михеев, И.М. Михеева. *Основы теплопередачи*. Энергия, Москва, 1977. 341 с.
11. А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносков. *Проблемы и перспективы развития химии, нефтехимии и нефтепереработки: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Нижнекамского химико-технологического института* (Нижнекамск), Нижнекамск, 2014. С. 12-15.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 13-08-00535.

© А. Г. Багоутдинова – канд. техн. наук, доц. каф. математики и экономической информатики К(П)ФУ, bagoutdinova@rambler.ru; Я. Д. Золотоносков – д-р техн. наук, проф., зав. каф. начертательной геометрии и графики КГАСУ, zolotonosov@mail.ru; О.В. Шемелова – канд. физ.-мат.наук, доц. каф. математики НХТИ КНИТУ, olga-shemelova@yandex.ru

© A. G. Bagoutdinova – the associate professor of mathematics and economic informatics of KFU, bagoutdinova@rambler.ru; Y. D. Zolotonosov – professor, the head of the department of descriptive geometry and graphics KGASU, zolotonosov@mail.ru; O. V. Shemelova – the associate professor of mathematics of NCHTI KNRTU, olga-shemelova@yandex.ru.