

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 процессаковки и реализуемой на специальных ротационно-ковочных машинах [6]. Процесс ротационнойковки в целях получения витой трубы, представленной на рис. 1, реализован на ротационнойковочной 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 усилиемковки - 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, 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 $k-\epsilon$ 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; - граничные условия: температура воды на входе, давление на входе атм, расход воды на выходе l/s , плотность теплового потока $Вт/м^2$, на стенках канала - условия прилипания; - геометрические условия: длина трубы $м$, толщина стенки $м$; площадь поперечного сечения $м^2$. 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 и критериев Нуссельта, с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation и по известным критериальным зависимостям [10], составляет не более 6 % и 8 % в рассматриваемом диапазоне чисел. 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, гидродинамической и теплогидродинамической эффективностей, где индекс "0" означает гладкую цилиндрическую поверхность теплообмена. На рис. 2 показано изменение в зависимости от для всех исследованных труб. Установлено, что в рассматриваемом диапазоне чисел увеличение коэффициента сопротивления по сравнению с гладкой цилиндрической трубой составляло 1,5-2,8 раза. Рис. 2 - Комплекс гидравлической эффективности с различным соотношением длин фрагментов. На рис. 3 показано изменение коэффициента теплоотдачи, представленное в виде зависимости. 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 с различным соотношением длин фрагментов. Как видно из рис. 4, при >20000 устанавливается хорошее согласование между приростом теплоотдачи и увеличением гидравлических потерь для труб с соотношением λ , при этом комплекс тепловой эффективности >1 . Сравнительная оценка полученных данных позволяет сделать вывод, что наиболее перспективной с точки зрения тепловых эффектов является труба с соотношением λ . При этом темп роста эффективности теплоотдачи превышает рост гидравлического сопротивления на 15-20 %. Рис. 4 - Теплогидродинамическая эффективность. 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 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 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 λ , при коэффициент теплогидродинамической эффективности составил 1,2; - разработана методика проведения последующих натурных экспериментов.