

УДК 536.242

Интенсификация теплоотдачи при помощи лунок и накатки на поверхности теплообмена

*Шафигов Г.А., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Баумана,
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»*

*Научный руководитель: Киселев Н.А., ассистент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Баумана,
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»
e3@bmstu.ru*

Введение

В настоящее время вся вырабатываемая тепловая энергия до своего использования 2-3 раза проходит преобразование в различных теплообменных устройствах. Поэтому эффективность производства напрямую зависит от эффективности теплообменных аппаратов (ТА).

Первые ТА состояли из технически гладких поверхностей теплообмена. С развитием технического прогресса росла потребность в увеличении мощности теплосиловых установок, что привело к необходимости создания высокоэффективных ТА. Поверхности теплообмена стали изготавливаться отличными от гладких - на них начали появляться различного рода оребрения, выступы, углубления увеличивающие теплоотдачу.

Однако, несмотря на необходимость увеличения теплового потока, существуют другие немаловажные характеристики теплообменного оборудования:

- 1) Загрязнение и коррозия теплообменных поверхностей – довольно острая проблема, так как большинство действующих ТА имеют тепловую эффективность, в среднем, не более 60% из-за загрязнения поверхностей теплообмена. Их очистка проблематична и, в некоторых случаях, может нарушить целостность матрицы ТА [1];
- 2) Компактность - во всех действующих и перспективных энергетических установках теплообменное оборудование составляет существенную часть по габаритам и массе и во многом определяет общие технико-экономические показатели установок [2];

3) Экономичность – ТА должен обладать малыми затратами энергии на перекачку теплоносителей, низкой металлоемкостью, высокой технологичностью [3].

Следует отметить, что большинство способов интенсификации теплообмена приводят к значительному росту гидросопротивления, и соответственно, затраты энергии на перекачку теплоносителя увеличиваются. Исключением являются методы интенсификации теплообмена, в которых осуществляется воздействие на пограничный слой путем завихрения потока вблизи стенки.

Проблемы и их решение

Большинство способов интенсификации теплообмена приводят к квадратичному росту гидросопротивления. В этом случае экспериментальные точки ложатся возле кривой Нуннера [4]:

$$Nu/Nu_{zl} = \sqrt{\xi/\xi_{zl}}.$$

Способы интенсификации теплообмена, локально разрушающие пограничный слой, позволили получить экспериментальные точки, лежащие выше кривой Нуннера, а в случае сферических углублений – рядом с аналогией Рейнольдса [5]:

$$Nu/Nu_{zl} = \xi/\xi_{zl}.$$

Благодаря увеличению теплогидравлической эффективности при помощи воздействия на пограничный слой могут быть успешно решены проблемы со снижением массы и габаритов теплообменного оборудования и борьбы с загрязнениями.

В узком пристеночном слое сосредоточено основное термическое сопротивление при теплоотдаче между стенкой и потоком. Поэтому для существенного увеличения коэффициента теплоотдачи при умеренном росте гидравлического сопротивления нужно разрушать только этот пристеночный слой, вдобавок к этому завихрения потока около стенки будут уменьшать образование отложений.

Эффективным способом разрушения пограничного слоя является создание у стенки локальных отрывных зон, что достигается при помощи периодически расположенных выступов или углублений, обеспечивающих генерацию турбулентных вихрей, распространяющихся вдоль стенки и диффундирующих в ядро потока [6]. Пристеночные интенсификаторы могут быть различных видов, это – цилиндрические, сферические, призматические выступы и выемки с поперечным и продольным, нормальным и наклонным положением относительно поверхности [7]. Несмотря на их различия,

принцип функционирования у них одинаков – создание дискретно расположенных локальных зон отрыва пограничного слоя. Эти отрывные пристеночные течения способствуют обновлению пограничного слоя и увеличению его степени турбулентности, в результате чего увеличивается тепловой поток по нормали к стенке.

Интенсификаторы теплообмена в виде накатки

Одним из успешных способов интенсификации теплообмена в кожухотрубных ТА является создание на трубах кольцевых турбулизаторов:

1) Внутри труб создаются периодически расположенные поперечные кольцевые выступы, за которыми образуются вихревые зоны, служащие источником дополнительных вихрей, переносящихся вдоль стенки.

2) Снаружи труб в качестве турбулизаторов используются поперечные кольцевые канавки, что позволяет создавать тесные пучки труб для проектирования компактных ТА. При турбулентном течении из-за вихрей в канавках происходит срыв пограничного слоя и увеличение теплоотдачи между стенкой и потоком.

Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер и др. в своей работе [8] исследовали влияние кольцевых турбулизаторов на трубах на теплообмен и гидросопротивление. В результате были получены экспериментальные данные, в которых рост теплоотдачи сопровождался умеренным ростом гидравлического сопротивления.

Была разработана серийная технология накатки трубок винтовыми роликами по наружной поверхности. При этом на наружной поверхности трубок образовывались кольцевые канавки, а на внутренней стороне – плавно очерченные кольцевые выступы. Стоимость данной процедуры составляет лишь малую часть от стоимости гладкой трубы.

Интенсификаторы теплообмена в виде лунок

Высокой энергоэффективностью обладает система сферических выступов и углублений, нанесенных на поверхность канала. Они интенсифицируют тепловой поток как за счет увеличения самой поверхности теплообмена, так и за счет воздействия на структуру потока [9].

Сферическая выемка, ввиду своей геометрии, является источником трехмерных возмущений, в ней происходит самоорганизация смерчеобразных вихревых структур. Более плотное нанесение сферических выемок и увеличение их глубины усиливает теплоотдачу и вызывает рост гидравлического сопротивления.

Сферический выступ также является источником смерчеобразных вихревых структур. Увеличение высоты выступа усиливает теплоотдачу и вызывает резкий рост гидравлического сопротивления.

Анализ многих научных работ по влиянию сферических выступов на теплообмен показал, что сферические выступы больше интенсифицируют теплообмен, чем сферические углубления. Однако каналы с выступами обладают бóльшим гидравлическим сопротивлением.

Применение интенсификаторов в виде лунок и накатки в ТА

Экспериментальные данные по интенсификации теплоотдачи при помощи накатки и лунок можно применять при проектировании теплообменного оборудования. Это позволит существенно увеличить тепловой поток, а также снизить массогабаритные характеристики при неизменной тепловой эффективности теплообменника, что особенно актуально для довольно громоздких кожухотрубных ТА.

Характеристики кожухотрубных ТА

Кожухотрубные ТА получили широкое распространение. Например, в нашей стране 80% всех ТА приходится на кожухотрубный тип. Чаще всего данные теплообменники применяются в нефтяной, газовой и химической промышленности благодаря своим отличительным от других типов ТА особенностям: возможность работы при высоких давлениях и температурах, простота изготовления и обслуживания, стойкость к гидроударам, пониженные требования к чистоте рабочих сред.

К их основным недостаткам можно отнести: высокие массогабаритные характеристики и, соответственно, высокая стоимость в связи с повышенной металлоемкостью. С ними можно бороться при помощи современных методов интенсификации теплообмена, которые позволяют уменьшить габариты ТА в 1.5...2 и более раз по сравнению с ТА без интенсификаторов, обладающим такой же тепловой мощностью и КПД.

Проектирование кожухотрубного ТА с применением интенсификаторов теплообмена в виде накатки и лунок.

В данной работе были выполнены расчет и проектирование кожухотрубного ТА типа газ-газ для утилизации теплоты дымовых газов. Основная задача состояла в том,

чтобы при неизменных тепловой мощности и потерях давления максимально уменьшить габариты ТА при помощи интенсификаторов теплообмена.

В качестве теплогидравлических характеристик интенсификаторов теплообмена в расчете использовались экспериментальные данные:

Для труб с накаткой – данные работы Калинина Э.К., Дрейцера Г.А., Коппа И.З., Мякочина А.С. «Эффективные поверхности теплообмена» [8];

Для труб с лунками – данные работы Мунябина К.Л. «Эффективность интенсификации теплообмена углублениями и выступами сферической формы» [10].

Геометрия рассматриваемых поверхностей труб представлена на рис. 1.

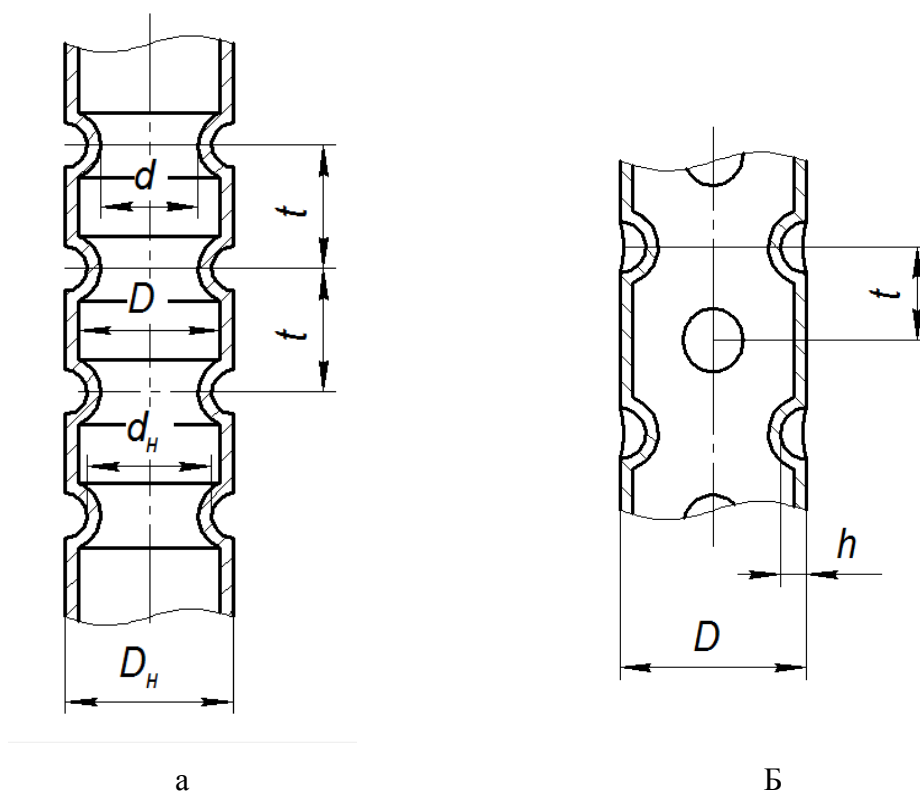


Рис. 1. Схема трубы с накаткой (а) и с лунками (б)

Результаты расчетов

В процессе расчета сравнивались объемы матриц из гладких и накатанных труб (рис. 2). В результате получено, что технология накатки труб позволяет уменьшить объем матрицы в 1.5 раза (рис. 3), а объем самого теплообменного аппарата – в 1.3 раза.

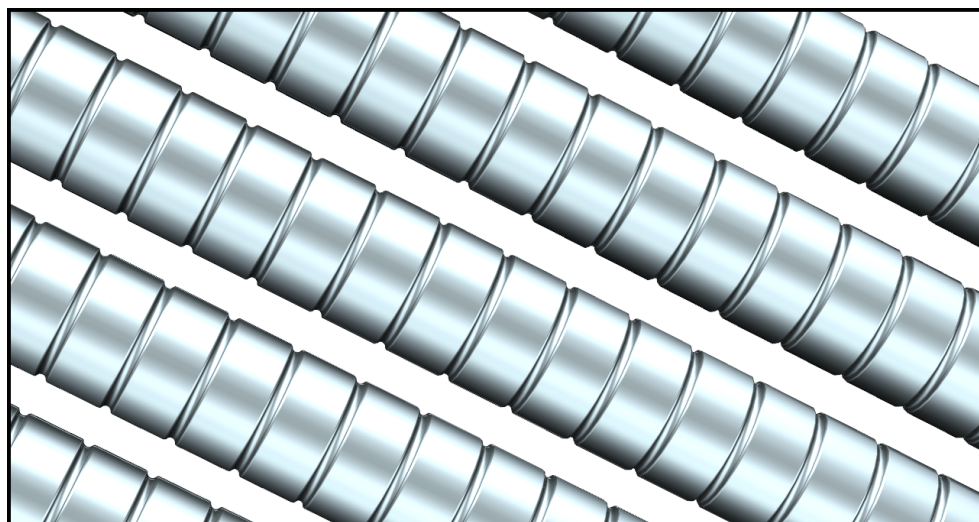


Рис. 2. Трехмерная модель труб с накаткой

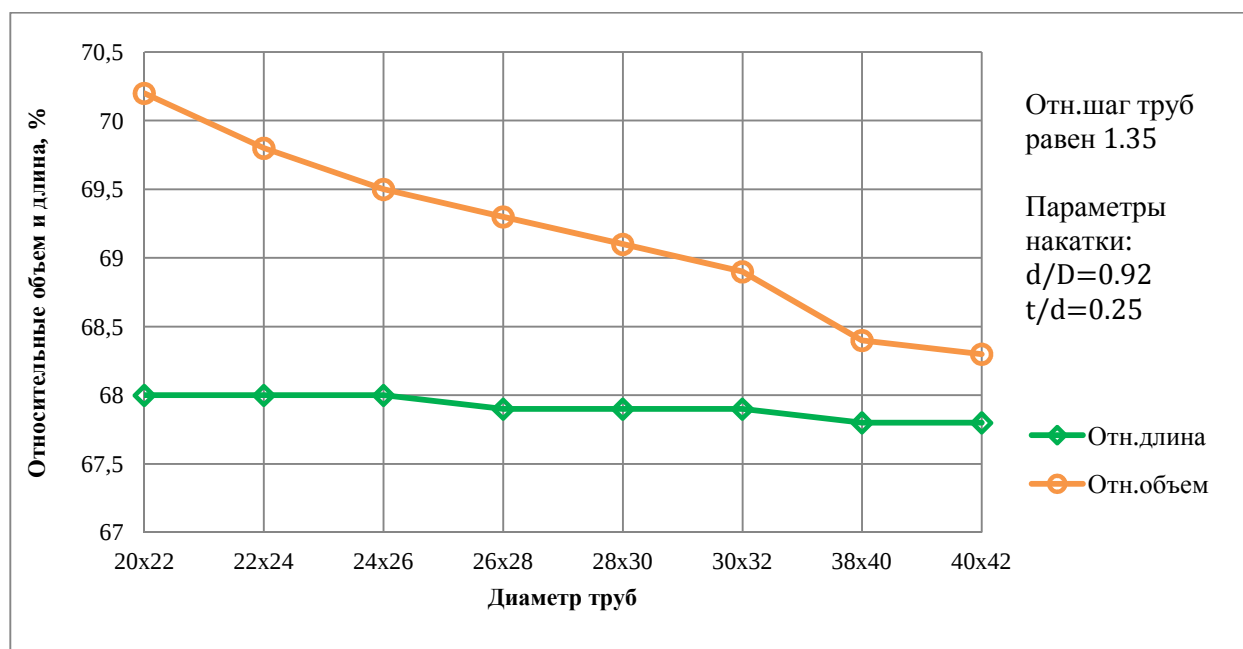


Рис. 3. Отношение объемов/длин матриц с накатанными трубами и матрицы с гладкими трубами в зависимости от диаметра трубы

Далее сравнивались объемы матриц из гладких и облуненных труб (рис. 4). В итоге получено, что объем матрицы из труб с лунками в 2,4 раза меньше объема гладкотрубной матрицы (рис. 5). В результате удалось сократить объем теплообменного аппарата в 2,2 раза.

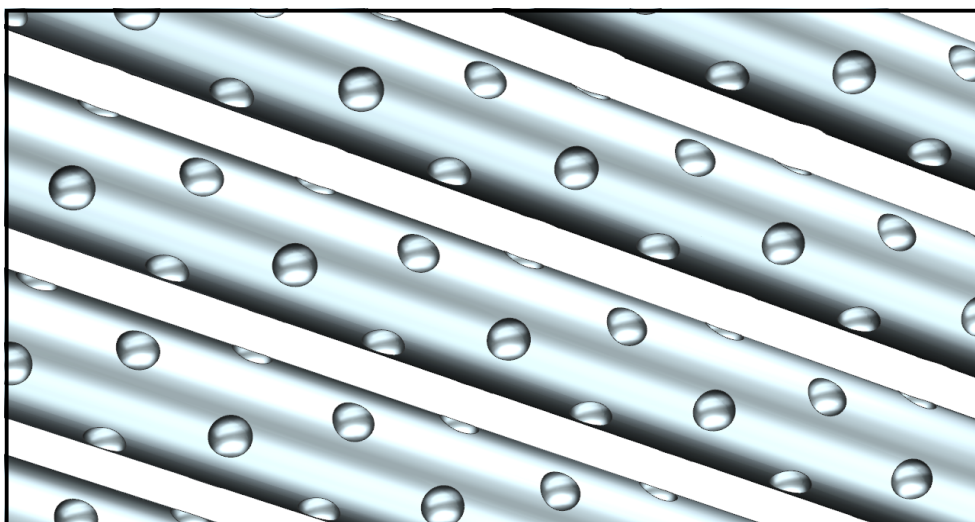


Рис. 4. Трехмерная модель труб с лунками

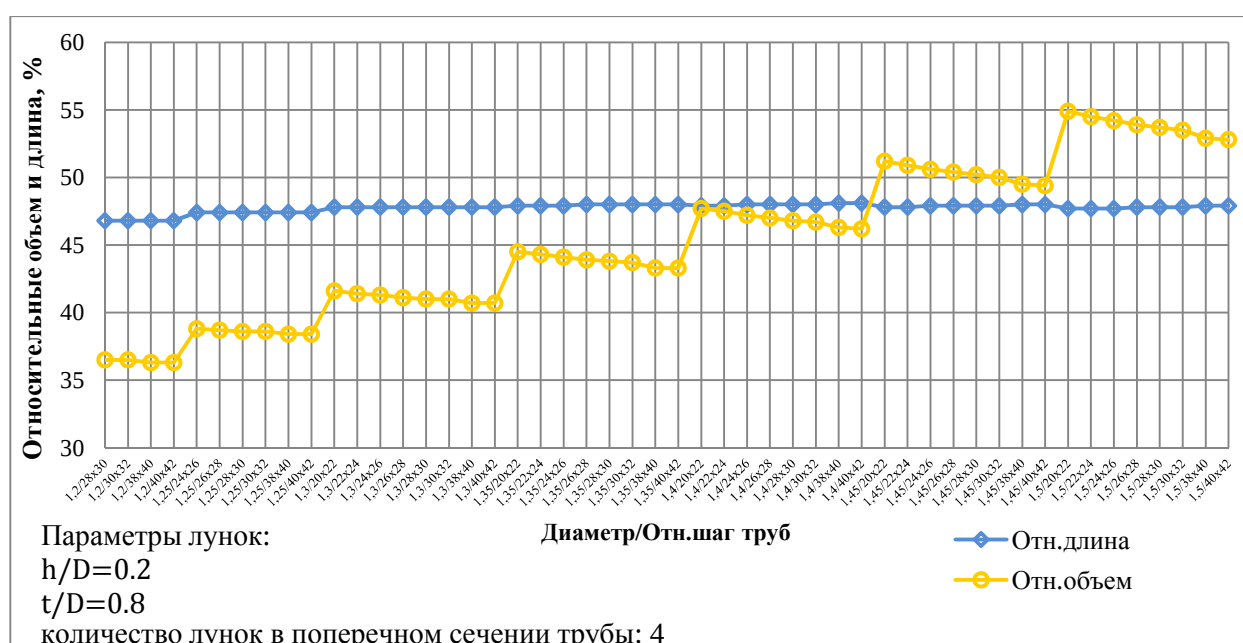


Рис. 5. Отношение объемов/длин матрицы с облуненными трубами и матрицы с гладкими трубами в зависимости от диаметра и относительного шага труб

Создание твердотельной модели ТА

Для сокращения трудоемкости, повышения качества и технико-экономического уровня результатов проектирования после расчета была спроектирована трехмерная модель ТА в САПР Siemens NX (рис 6, 7) [11-14].

Использование интенсификаторов теплообмена в виде лунок позволяет существенно увеличить тепловой поток при относительно слабом росте гидросопротивления, что позволяет проектировать более мощные ТА или снижать их массогабаритные характеристики. К тому же способ сборки ТА из облуненных труб

ничем не отличается от способа сборки гладкотрубного ТА, а технология нанесения сферических углублений обладает относительно низкой стоимостью.

В данном ТА реализовано два входа и два выхода охлаждаемого теплоносителя для уменьшения застойных зон. Для повышения технологичности и ремонтпригодности матрица состоит из трубных пучков, в которых трубы имеют треугольную компоновку.

Спроектированный ТА рассчитан на тепловой поток 2.6 МВт; затраты на перекачку теплоносителей составляют 0.2 МВт;

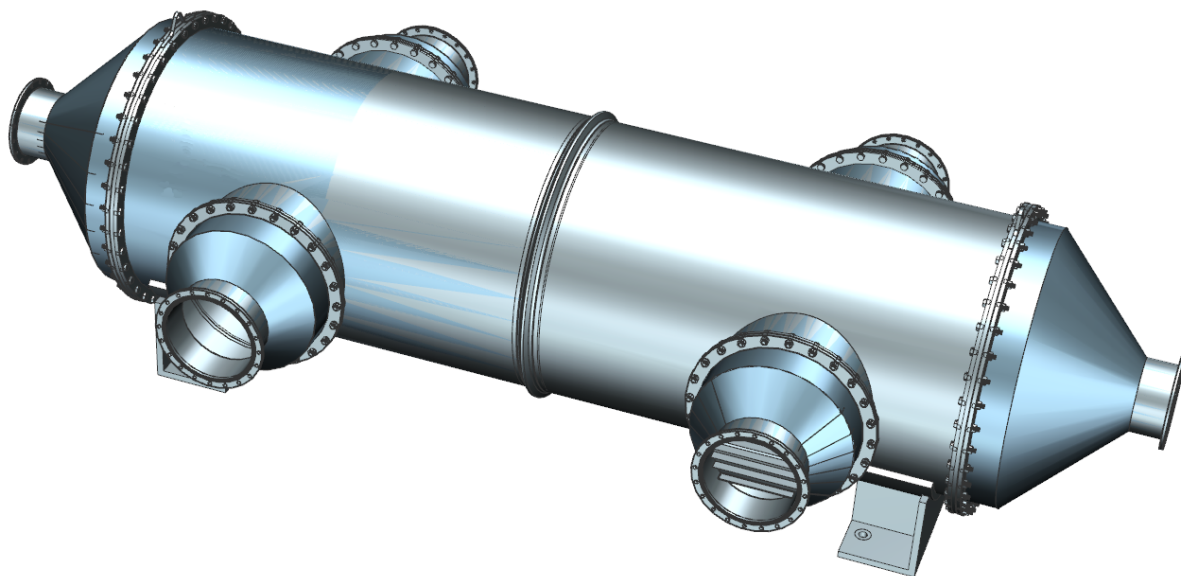


Рис. 6. Трехмерная модель ТА

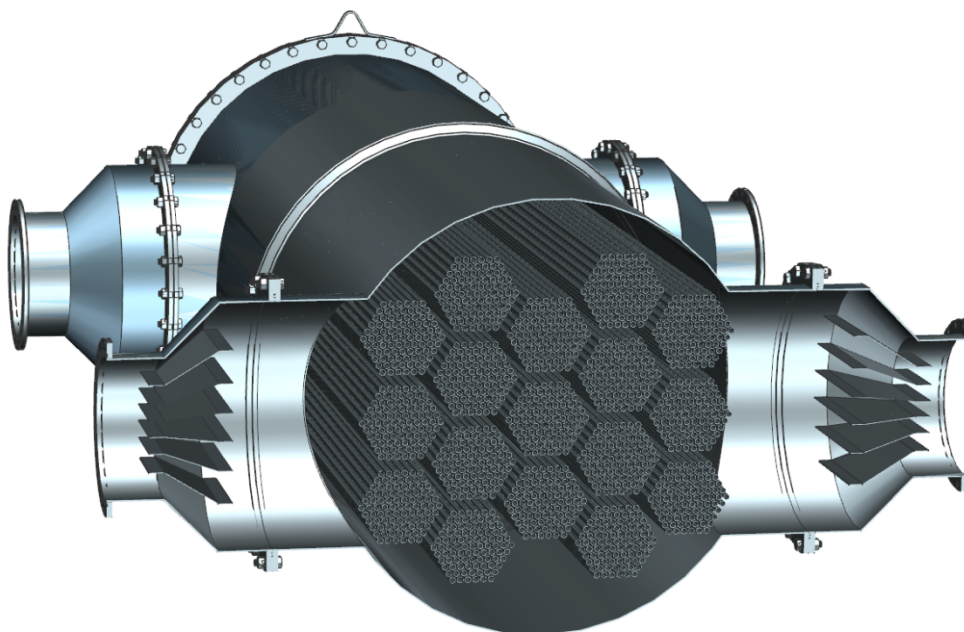


Рис. 7. Трехмерная модель ТА: вид поперечного сечения

Заключение

В данной работе рассматривается интенсификация теплообмена при помощи перспективных технологий – нанесения накатки и лунок на поверхность теплообмена. Рассмотрены механизмы действия данных видов интенсификаторов на теплоотдачу. На основе экспериментальных данных спроектирован кожухотрубный теплообменный аппарат. В результате получено значительное снижение массогабаритных характеристик по сравнению с теплообменным аппаратом такой же мощности и затратами энергии на перекачку теплоносителей.

Однако на сегодняшний день практически отсутствуют рекомендации для расчетов ТА и использования сферических выступов и углублений в качестве интенсификаторов, а имеющиеся экспериментальные данные применимы лишь для ограниченных диапазонов геометрических параметров интенсификаторов, свойств теплоносителей и условий течения.

Следовательно, необходимы дальнейшие исследования в области интенсификации теплообмена при помощи лунок для получения рекомендации по их применению в технике.

Список литературы

1. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
2. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники / под редакцией Ю.В. Петровского. М.: Государственное энергетическое издательство, 1962. 160 с.
3. Иванов В.Л., Леонтьев А.И., Манушин Э.А., Осипов М.И.. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок. М.: МГТУ им. Баумана, 2003. 591 с.
4. Nunner W. Heat transfer and pressure drop in rough tubes. VDI Forch 445-B 5-39 // AERE Lib Transactions 1956. V. 786. 1958.
5. Ligrani P. M., Oliveira M. M., Blaskovich T. Comparison of Heat Transfer Augmentation Techniques // AIAA Journal. 2003. V. 41. No. 3. P. 337-362.
6. Бурцев С.А., Васильев В.К., Виноградов Ю.А., Киселёв Н.А., Титов А.А. Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых

- регулярным рельефом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 1. С. 263-290. DOI: 10.7463/0113.0532996.
7. Афанасьев В.Н., Бурцев С.А., Егоров К.С., Кулагин А.Ю. Цилиндр в пограничном слое плоской пластины // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. № 2. С. 3-22.
 8. Калинин Э.К., Дрейцер Г. А., Копп И. З. Эффективные поверхности теплообмена. М.: Энергоатомиздат, 1998. 408 с.
 9. Бурцев С.А., Киселёв Н.А., Леонтьев А.И. Особенности исследования теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. №. 6. С. 895-898. DOI: 10.7868/S0040364414060052.
 10. Мулябин К.Л. Эффективность интенсификации теплообмена углублениями и выступами сферической формы // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10. №. 2. С. 235-247.
 11. Ряховский О.А. Атлас конструкций узлов и деталей машин. М.: Изд-во МГТУ им. НЭ Баумана, 2005. 380 с.
 12. Арзамасов Б.Н., Соловьева Т. В., Герасимов С. А. Справочник по конструкционным материалам. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 687 с.
 13. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
 14. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 343 с.