

УДК 536.24:621.9.04

## **Проектирование водовоздушного теплообменного аппарата с оптимизацией параметров поперечно-оребрённых труб**

*Морозов А.С., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Теплофизика»*

*Научный руководитель: Зубков Н.Н., профессор  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Теплофизика»*

*Каськов С.И., ст. преподаватель  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
кафедра «Теплофизика»  
[zubkovn@bmstu.ru](mailto:zubkovn@bmstu.ru)*

В настоящее время в задачах теплопередачи через оребренные трубы часто возникают жесткие ограничения на материал ребер и на их геометрические параметры. Для аппаратов, работающих в условиях агрессивных сред требуется использование теплообменных труб из коррозионностойких сталей. Практически единственным методом развития поверхности на стальных трубах является ленточное оребрение с прикорневой приваркой ленты к трубе непрерывным швом. Ленточное оребрение имеет ограничение по количеству ребер на единицу длины трубы, поскольку минимальный шаг оребрения составляет 3,5 мм. Альтернативой существующим способам получения ребер на трубах является метод деформирующего резания (ДР), как один из наиболее перспективных способов получения оребренной поверхности, в том числе на трубах из коррозионностойких сталей [1, 2].

Метод ДР основан на сочетании процесса резания и целенаправленного пластического деформирования подрезанного слоя [3, 4]. Возможности технологии ДР позволяют выполнять оребрение на трубах из различных материалов в широком диапазоне типоразмеров получаемых ребер [5, 6]. Возможности метода ДР при оребрении стальных труб указаны в таблице 1.

Параметры оребрения, получаемого ДР на стальных трубах

Исходный диаметр труб, мм	6...30
Исходная толщина стенки трубной заготовки, мм	от 1 и выше
Шаг оребрения, мм	0,2...2,0
Межреберный зазор	3...50% от шага оребрения
Высота ребер, мм	до 4 шагов оребрения, но не более 3 мм
Длина трубы, м	до 6

В работе сравниваются теплообменники на основе ленточно-спирального оребрения и оребрения, полученного ДР. Сравнение вариантов потребовало разработки конструкции теплообменников. На рис. 1 представлена конструкция теплообменника на основе ленточно-оребранных труб из стали 12Х18Н10Т.

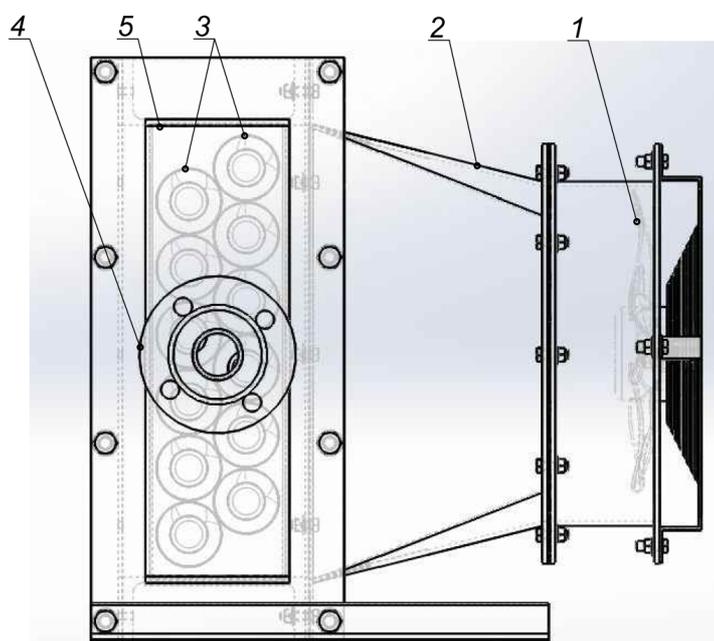


Рис. 1. Схема разработанного водовоздушного теплообменника на основе ленточно-оребранных труб

Разрабатываемый теплообменник предназначен для охлаждения высокотемпературного газового потока с агрессивными компонентами водой. Исходные данные для проектирования теплообменника приведены в таблице 2.

Таблица 2

## Исходные данные для проектирования теплообменника

Рабочая среда		вода	воздух
Расход, кг/с		8,33	0,121
Температура, °С	на входе	15	250
	на выходе	-	40
Рабочее давление, МПа		0,4	-
Давление гидроиспытаний, МПа		0,5	-
Площадь поверхности теплоотдачи, м <sup>2</sup>		0,24	3,04
Количество труб, шт		12	
Суммарная длина оребренных труб, мм		3600	

Вытяжной аксиальный вентилятор 1 (рис. 1) создает напор охлаждаемого теплоносителя – воздуха, который, попадая в межтрубное пространство через диффузор 2, поперечно омывает двухрядный пучок внешне-оребранных труб 3. Охлаждающий теплоноситель - вода поступает в теплообменник через штуцер 4, и через коллектор 5 раздается в трубный пучок. Параметры используемого ленточного оребрения приведены в таблице 3. Обозначения параметров показаны на рис. 2.

Таблица 3

## Параметры ленточного оребрения

	Обозначение на рисунке	Размер, мм
Толщина ребра	$\delta$	0,85
Шаг ребер	$h$	3,5
Внутренний диаметр трубы	$d_{in}$	21
Внешний диаметр трубы	$d_{ex}$	28
Диаметр по вершинам ребер	$D$	49

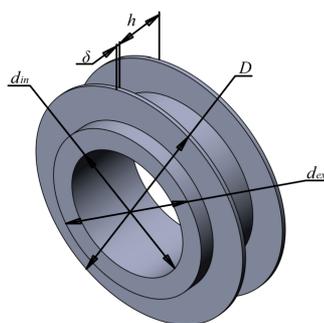


Рис. 2. Элемент ленточно-ребренной трубы

Анализ эффективности теплообменника со спирально-ленточным оребрением показал не оптимальность оребрения. Это связано с тем, что большое отношение высоты ребра к его толщине и низкая теплопроводность материала приводит к тому, что поверхность ребра у его вершины имеет значительно меньшую температуру, чем у корня. Оценить эффективность можно через коэффициент теоретической эффективности ребра  $E$ , расчетная величина которого для ленточных ребер составила 0,23, в то время как приемлемые значения для подобного рода задач должны лежать в диапазоне 0,5 – 0,7 [7]. Из этого следует, что для теплообменника с ленточным оребрением труб характерны завышенные массогабаритные характеристики, которые можно уменьшить за счет увеличения КПД ребра.

Оптимизационный анализ представлял собой исследование поведения КПД ребра при варьировании числа  $k = \frac{D}{d_{ex}}$  (при последовательном фиксировании  $D$  и  $d_{ex}$ ) и

$$\text{параметра ребра } m = \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha_g}{\lambda \cdot \delta}},$$

где  $\alpha_g$  – коэффициент теплоотдачи;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$\delta$  – толщина ребра.

Результаты исследования показаны на рис. 3, построенном в среде Mathcad. Цветовые переходы выполнены с целью наглядного представления поведения криволинейных поверхностей.

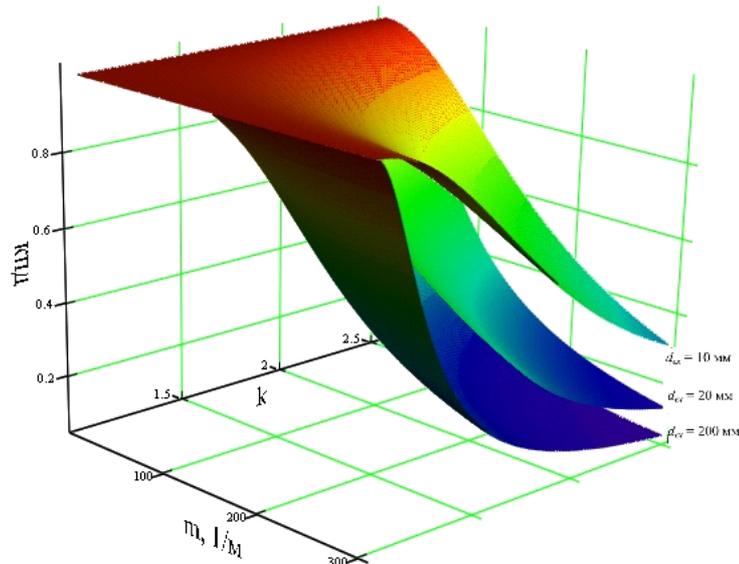


Рис. 3. Зависимость теоретической эффективности (КПД) ребра от параметров  $k$  и  $m$  при трех разных фиксированных значениях  $d_{ex}$

Рис. 3 показывает, что увеличение чисел  $k$  и  $m$  неблагоприятно сказывается на тепловой эффективности ребра; кроме того, для увеличения КПД целесообразнее использовать трубы с меньшим внешним диаметром гладкой части.

В связи с вышесказанным была проведена оптимизация ребра с использованием методик [8, 9]. Подбирались параметры ребра, обеспечивающие максимальную плотность теплового потока через его основание. При этом задавались начальные значения площади поперечного сечения ребра –  $A = 2,5 \text{ мм}^2$ , и расстояние между ребрами  $h = 0,5 \text{ мм}$ . При оптимизации были сделаны следующие допущения:

1. теплопередачи через торец ребра нет;
2. коэффициент теплоотдачи считался постоянным, не зависящим от расположения ребер;
3. процесс теплопередачи - стационарный, одномерный.

Искались оптимальные параметры: температура вершины ребра  $T_1$ , температура основания ребра  $T_2$ , и толщина ребра  $\delta$ .

Для поиска оптимальных параметров использовались соотношения теплового баланса:

$$Q_1(T_1, T_2, \delta) = Q_2(T_1, T_2, \delta) = Q_3(T_1, T_2, \delta),$$

где  $Q_1$  – тепловая мощность, переданная воде на длине, равной шагу ребер;  
 $Q_2$  – тепловая мощность через стенку трубы на длине, равной шагу ребер;  
 $Q_3$  – тепловая мощность, переданная воздухом стенке на длине, равной шагу ребер.  
 Оптимизация велась по  $Q_3$  в среде Mathcad. В итоге были получены следующие оптимальные параметры:

$$T_1 = 112,6 \text{ }^\circ\text{C}; T_2 = 70,6 \text{ }^\circ\text{C}; \delta = 0,85 \text{ мм}.$$

Отметим что толщина ребра осталась той же, но из-за других заданных  $A$  и  $h$ , конфигурация ребра изменилась (оно стало короче). В таблице 4 представлено сравнение геометрических параметров и рассчитанных тепловых характеристик ленточного и оптимизированного ребра.

Таблица 4

Сравнительные характеристики труб

Величина	Спирально-ленточное ребро	Оптимизированное ребро
Теоретическая эффективность ребра	0,23	0,77
Мощность, отбираемая от воздуха, на длине, равной шагу ребер, Вт	29,86	13,63
Мощность, отбираемая от воздуха, на 1 метр трубы, кВт	8,55	10,10
Изменение температуры воды, К	1,3	1,9
Шаг ребер, мм	3,5	1,35
Высота ребра, мм	10,5	3,0
Толщина ребра, мм	0,85	0,85

Анализ таблицы показывает, что несмотря на то, что оптимизированное ребро имеет меньшую мощность на удельной длине трубы (равной шагу ребер), но за счет более частого расположения ребер и большего КПД ребра, мощность на погонный метр ребренной трубы больше 15 % больше, чем для трубы с ленточным оребрением. Изменение геометрических параметров сечения ребра обеспечивает снижение

металлоемкости теплообменника до 25 %, что позволило уменьшить массу сборки теплообменной матрицы с 66 кг до 49 кг.

На рис. 4 показаны распределения температур для исходного и оптимизированного ребер. Температуры были найдены с помощью численных методов, реализованных в программном пакете ANSYS. Шкала температур представлена в градусах Кельвина. Как видно из рисунка, изотермичность оптимизированного ребра существенно выше.

Стоит отметить некоторое несовершенство предложенной методики оптимизации геометрических параметров ребра с заданием температур  $T_1$  и  $T_2$ , поскольку они заранее неизвестны и находятся в сложной функциональной зависимости от многих параметров, в число которых входит и толщина оребрения.

На основе труб с оптимизированными параметрами оребрения спроектирован водовоздушный теплообменник, общий вид которого показан на рис. 5. Теплообменник имеет более высокие показатели по энергоэффективности при большей компактности и меньшей металлоемкости по сравнению с теплообменником на основе ленточно-оребранных труб.

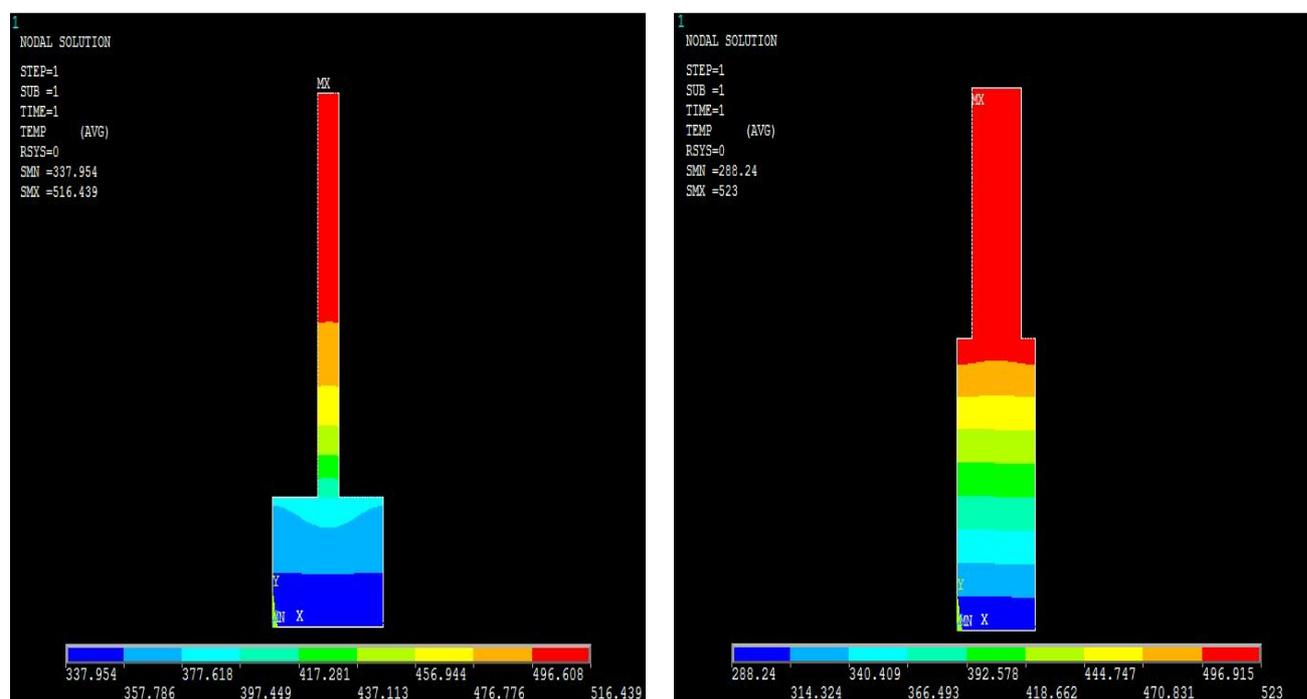


Рис. 4. Профиль температур для ленточного (слева) и оптимизированного ребер

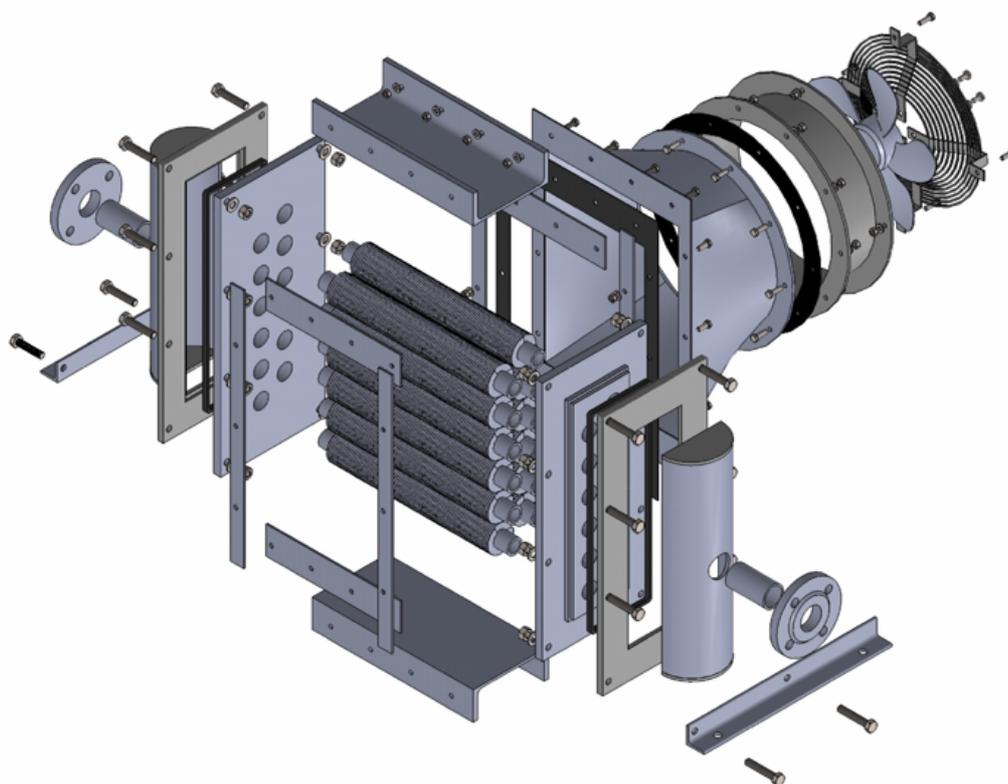


Рис. 5. 3D модель водовоздушного теплообменника с оптимизированными параметрами оребрения

В отличие от метода оребрения труб прикорневой приваркой ленты, оптимизированные параметры оребрения могут быть получены методом ДР, что и рекомендуется для использования в конструкциях разрабатываемых водовоздушных теплообменников. Помимо повышения эксплуатационных характеристик теплообменников, метод оребрения труб ДР имеет дополнительные технологические преимущества, поскольку обеспечивает существенно большую производительность, не требует специализированного оборудования и менее энергоемок по сравнению с прикорневой приваркой ленты.

#### Список литературы

1. Ельчинов В.П., Митин Е.В. Новые нержавеющие кожухотрубные конденсаторы водяного охлаждения: сочетание эффективности и надежности // Холодильный бизнес. 2014. №1. С. 16-22.
2. Изготовление теплообменных поверхностей нового класса деформирующим резанием. Зубков Н.Н., Овчинников А.И., Кононов О.В. // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1993. № 4. С. 79-82.

3.Зубков Н.Н. Особенности реализации метода деформирующего резания // Технология машиностроения, 2001. № 1. С. 19-26.

4.Зубков Н.Н.Совмещение процессов резания и обработки давлением в новом методе формообразования развитых поверхностных структур // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2002. № 10. С. 17-20, 29-34.

5.Зубков Н.Н. Многофункциональная технология увеличения площади поверхности для повышения теплообменных и технологических свойств деталей // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2003. № 3. С. 41-46.

6.Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // Новости теплоснабжения. 2005. № 4. С. 51-53.

7.Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. Отд-ние, 1992. 280 с.

8.Сборник Н.Т. Конвективный теплообмен. Киев: Наукова думка, 1968. 220 с.

9.Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 367 с.