

УДК 621.311

ВИТЕЦКАЯ Г.Ю. СИРОТКИН А.И., студенты гр. 10604221 (БНТУ)  
Научный руководитель ПАНТЕЛЕЙ Н.В., старший преподаватель (БНТУ)  
г. Минск

## ВНУТРЕННЕЕ ОРЕБРЕНИЕ ТРУБ КАК СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

На сегодняшний день теплообменное оборудование используется людьми практически повсеместно: в быту, энергетике, строительстве, технике и др. И практически во всех этих случаях к оборудованию предъявляются одни и те же требования: обеспечить качественный, надёжный и эффективный теплообмен между теплоносителями. Казалось бы, современные технологии, моделирующие процесс теплообмена, позволили раз и навсегда решить вопрос об оптимальной форме поверхности теплообмена и её размерах. Однако не всегда стандартные кожухотрубные теплообменники являются удачным решением. Ведь при достаточно большой тепловой нагрузке их размеры становятся очень большими и уже не вмещаются в требуемые габариты, например, какого-нибудь здания, где необходимо установить тепловой пункт для организации системы отопления, вентиляции и горячего водоснабжения. Поэтому сегодня по-прежнему актуальна задача поиска путей интенсификации теплообмена за счёт внедрения технологий, позволяющих повысить интенсивность процесса теплопередачи на качественном уровне и тем самым существенно уменьшить размеры аппаратов.

В основе работы любого теплообменника лежит способность передавать теплоту через стенку от более горячего теплоносителя к более холодному. В данной работе рассмотрена передовая технология внутреннего оребрения труб, позволяющая интенсифицировать процесс теплообмена в обычном теплообменнике с поверхностью, образованной совокупностью труб (трубным пучком). Для того, чтобы понять суть этой технологии, необходимо рассмотреть физику процесса теплопередачи через стенку трубы и установить, от каких параметров зависит передаваемый тепловой поток.

Теплопередача – это процесс теплообмена между двумя теплоносителями через стенку [1]. Этот процесс состоит из трёх этапов:

1. процесс теплоотдачи от более нагретого теплоносителя к стенке;
2. процесс теплопроводности через стенку;
3. процесс теплоотдачи от стенки к более холодному теплоносителю.

Процесс теплоотдачи описывается уравнением Ньютона-Рихмана, а процесс теплопроводности – уравнением Фурье [1]. В ходе рассмотрения задач по теплопередаче эти уравнения решаются совместно, в результате чего получается зависимость теплового потока от целого комплекса параметров: температур теплоносителей, коэффициентов теплоотдачи, размеров стенки и т.д. Эта зависимость позволяет установить, какие из величин больше всего влияют на протекающий процесс, а также то, на какие из них можно повлиять, чтобы интенсифицировать теплообмен. Рассмотрим процесс теплопередачи через ограждающую

конструкцию, имеющую цилиндрическую форму (как у трубы), представленную на рисунке 1. Из-за того, что длина стенки значительно больше радиуса, в стационарном тепловом состоянии температурное поле будет зависеть только от радиуса.

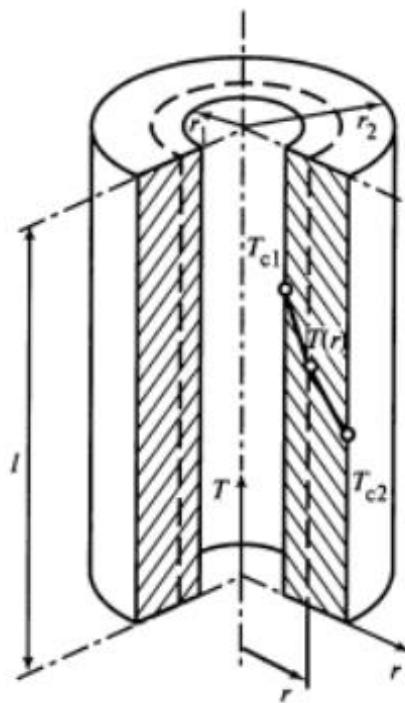


Рисунок 1. Цилиндрическая стенка [1]

В данном случае уравнение передачи теплоты будет иметь следующий вид:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{r_1}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\alpha_2} \cdot \frac{r_1}{r_2}}, \quad (1)$$

где:

$r_1$  – внутренний радиус цилиндрической стенки;

$r_2$  – внешний радиус цилиндрической стенки;

$T_1$  – температура горячего теплоносителя;

$T_2$  – температура холодного теплоносителя;

$\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от более горячего теплоносителя к стенке;

$\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к более холодному теплоносителю;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки;

$q$  – удельный тепловой поток.

Величина, стоящая в знаменателе формулы (1), называется термическим сопротивлением стенки. Она напрямую влияет на интенсивность передачи теплоты. Для нахождения теплового потока, который можно передать через стенку, необходимо удельный поток умножить на суммарную площадь поверхности:

$$Q = q \cdot F, \quad (2)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка, которую можно передать через поверхность площадью  $F$ .

Таким образом, исходя из формул (1) и (2), можно заметить, что сильнее всего повлиять на удельный тепловой поток при уже заданных параметрах теплоносителя можно, если изменить коэффициенты теплоотдачи, поскольку коэффициент теплопроводности определяется только лишь материалом. Нагрузка теплообменника, в свою очередь, определяется помимо этого ещё и площадью поверхности теплообмена.

Достаточно большого эффекта можно добиться, если применять в кожухотрубных теплообменниках трубы с внутренним оребрением. Это позволит увеличить площадь поверхности теплообмена, не увеличивая при этом габаритов аппарата, а также повлиять на коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  путём дополнительной турбулизации потока за счёт применения рёбер винтовой конструкции. Однако перед установкой таких труб следует изучить их характеристики более подробно. Так, следует учитывать, что применение этой технологии изменяет режим течения среды в зоне, прилегающей к стенке, что может привести также и к замедлению потока. В итоге возрастает гидравлическое сопротивление теплообменника, а это, в свою очередь, требует проведения тщательных расчётов перед установкой труб с внутренним оребрением, чтобы не ошибиться в выборе конструкции, наиболее подходящей под имеющийся теплоноситель.

Конструкции оребрённых труб бывают различными и зависят в основном от назначения аппарата. Также в зависимости от материала и исполнения сильно варьируются их стоимость и рабочие характеристики. Рассмотрим наиболее распространенные виды данных теплообменников.

Широко распространены трубы со вставными ребрами. Их можно считать наименее сложными и трудоёмкими в плане конструкции. Создание данного вида труб происходит следующим образом: во внутреннее пространство обычной трубы помещается лист с ребрами из материала, имеющего высокий коэффициент теплопроводности. В результате площадь теплообмена значительно увеличивается, что обеспечивает интенсификацию процесса теплообмена. Однако использование вставных ребер значительно увеличивает затраты металла, что приводит к удорожанию конструкции. Этот эффект в некоторой степени можно снизить, применив спиральные ребра: в этом случае металлоемкость посредством последовательного деформирования (обжатие и скручивание) снижают вплоть до значения, характерного для гладких труб.

Существуют и другие виды труб с оребрением. К примеру, чтобы снизить затраты металла на производство громоздкой конструкции и добиться значительного прогресса в технических характеристиках трубопровода, может быть применена технология с вырезанием внутренних ребер из цельной детали трубопровода. Сам процесс достаточно сложен в производстве, однако позволяет получить надёжную и более долговечную конструкцию. Тем не менее, данная технология имеет значительный недостаток, заключающийся в трудоёмкости процесса изготовления и необходимости в специальном оборудовании.

Помимо использования оребренных труб в теплообменниках, имеет смысл также внедрение их в трубные пучки хвостовых поверхностей нагрева (эконо-майзеров и трубчатых воздухоподогревателей) паровых и водогрейных котлов тепловых электростанций [2]. Для примера мы рассмотрим использование этой технологии в трубчатом воздухоподогревателе парового котла. В этом случае продукты сгорания проходят по трубам с внутренними ребрами, а нагреваемый воздух находится в межтрубном пространстве. Были проведены исследования по определению конструктивных характеристик и размеров ребер трубопровода для заданного примера [3]. В результате было выяснено, что для достижения наилучшей эффективности следует применять сплошные продольные ребра. Их габариты должны быть не более  $0,08 \cdot d$  по высоте ( $d$  – наружный диаметр трубы), и не более чем  $0,025 \cdot d$  по ширине. В ходе исследования были взяты 3 расчётные модели. Первая модель – это исходная труба поверхности нагрева без внутренних рёбер. Вторая модель имеет 10 внутренних рёбер пирамидальной формы, высотой  $0,04 \cdot d$  и шириной основания  $0,08 \cdot d$ . Третья модель содержит уже 20 рёбер с теми же размерами, что и вторая модель. При выборе геометрической формы рёбер важной задачей было не уменьшить проходное сечение трубы, чтобы не препятствовать нормальному режиму течения теплоносителя. Чтобы этого избежать, пришлось несколько уменьшить толщину стенки трубы в промежутках между ребрами. Внешний вид моделей представлен на рисунке 2.

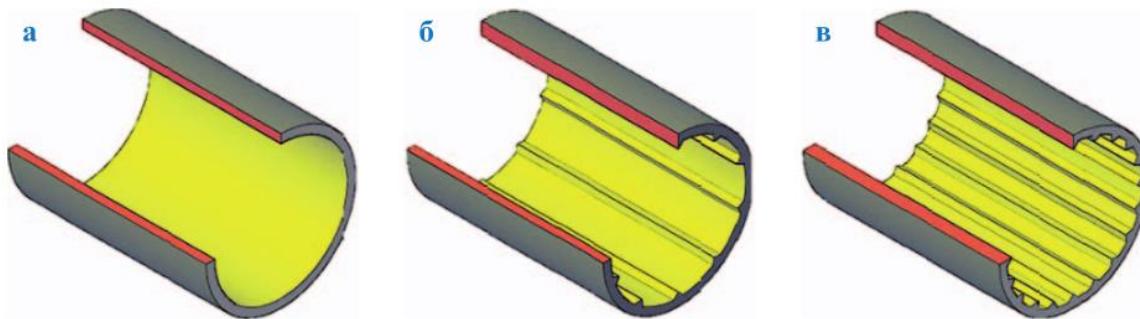


Рисунок 2. Исследуемые модели труб поверхности нагрева котла [3]:  
а — модель трубы без оребрения; б — модель трубы с десятью рёбрами пирамидальной формы; в — модель трубы с двадцатью рёбрами пирамидальной формы.

В ходе практических испытаний было выявлено, что, применяя вторую модель оребрения, можно увеличить теплоотдачу на 15,5% по сравнению с первой. Третья модель увеличивает теплоотдачу еще сильнее, вплоть до 22,5%. Следует отметить и то, что площадь внутренней поверхности трубы также значительно возросла. Изначально она была равна  $0,2136 \text{ м}^2$ ; после первой модернизации площадь стала составлять  $0,236 \text{ м}^2$ ; в итоговом варианте она достигла  $0,2581 \text{ м}^2$ . Это даёт нам возможность уверенно говорить о повышении эффективности работы теплообменного оборудования, что также отражается и на температурах продуктов сгорания. Если сравнивать последние относительно трех моделей

труб, то можно увидеть, что наименьшая температура дымовых газов достигается у третьей модели с двадцатью ребрами. Наибольшая температура уходящих газов при этом замечена у модели с гладкими трубами. Увидеть распределение поля температур при теплопередаче через стенку исследуемой трубы с внутренним оребрением можно на рисунке 3.

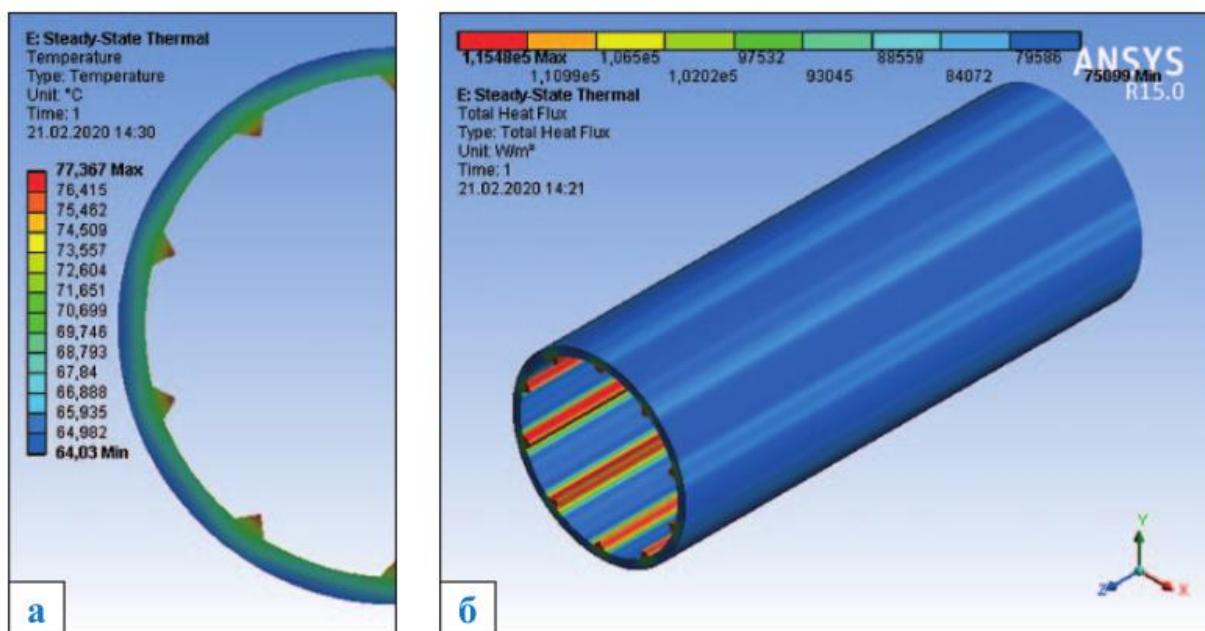


Рисунок 3. Распределение тепловой нагрузки в процессе теплопередачи через цилиндрическую стенку с внутренним оребрением [3]:  
а – распределение поля температур вдоль радиуса трубы; б – распределение тепловой нагрузки по внутренней стенке трубы

Как видно из рисунка 3, наиболее термонагруженными являются вершины рёбер, что говорит об определённой неравномерности процесса теплоотдачи. Тем не менее при достаточно большом количестве рёбер эта неравномерность сглаживается, и сама стенка трубы прогревается примерно одинаково со всех сторон.

В результате исследования после сравнения различных моделей труб, которые отличались лишь количеством внутренних рёбер и площадью теплообмена, было выявлено следующее: труба с двадцатью пирамидальными ребрами справляется с задачей по теплопередаче лучше, чем такая же труба, но с десятью пирамидальными ребрами. Труба с абсолютно гладкой внутренней поверхностью обладает наименьшим коэффициентом теплопередачи. Это доказывает эффективность увеличения площади теплообмена за счет применения внутреннего оребрения труб. Данная технология позволяет повысить как площадь теплообмена, так и коэффициент теплоотдачи, при этом не увеличивая общие габаритные размеры теплообменного аппарата.

### Список литературы:

1. Цветков, Ф.Ф. Тепломассообмен: учебник для вузов / Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с.
2. Жихар, Г.И. Котельные установки тепловых электростанций / Г.И. Жихар. – Минск: Вышэйшая школа, 2015 – 523 с.
3. Янчук, В.М. Повышение эффективности теплообменников подогревателей газа газораспределительной станции за счёт использования труб с внутренним оребрением / В.М. Янчук, И.В. Шишгин, П.А. Кузьбожев, А.В. Сальников // Актуальные вопросы комплексного изучения и освоения месторождений Европейского Севера России. – 2020. – спецвыпуск. – С. 87–92.