

СОВРЕМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ТУРБУЛИЗАТОРОВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ

И.Б. Каримов, Р.П. Бабаходжаев

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова.
Узбекистан, 100095

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7709409>

Аннотация: В статье рассмотрены преимущества и недостатки современных конструкций интенсификаторов, и среди них рекомендован интенсификатор, удобный для использования на территории Узбекистана.

Ключевые слова: интенсификация, активные методы, пассивные методы, оребренные, эффективность, закрутка потока, сферические углубления.

Введение.

Активное исследование и внедрение в промышленность различных методов интенсификации теплообмена обусловлены достижением больших практических результатов за счет уменьшения массы теплообменной аппаратуры или значительного повышения ее эффективности [1].

В настоящее время интенсификация конвективного теплообмена является одной из перспективных и сложных проблем теории переноса. Традиционно считается, что эта задача наиболее актуальна для теплоносителей, которым присущи высокие значения чисел Рейнольдса [1].

Однако элементарные объемы жидкости, перемещаясь по сложным траекториям в пристенной области, могут переносить теплоту более эффективно, чем количество движения из-за различий в распределении полей температуры и вектора скорости. Очевидно, что такая ситуация может возникнуть как результат продуманного интенсифицирующего воздействия на процесс теплообмена, как следствие свойств жидкости или как совместный результат того и другого [1].

Разработаны и исследуются самые различные методы интенсификации теплообмена [1]. Принципиально их классифицируют на две категории [2]:

1) активные методы интенсификации: механическое воздействие на поверхность теплообмена (вращение или вибрация поверхности, перемешивание жидкости и т. п.); воздействие на поток электрическим магнитным или акустическим полем, пульсациями давления; вдув или отсос рабочей среды через пористую поверхность и др.

2) пассивные методы, в основе которых - воздействие на поток формой поверхности теплообмена: применение вставных интенсификаторов (винтовых, локальных и пластинчатых закручивателей потока), различное оребрение поверхности теплообмена и др [2]. В настоящей работе произведен обзор конструкций турбулизаторов, исследование в области гидродинамики в сферических лунках в ламинарном течении жидкости.

Для интенсификации процесса теплопередачи в теплообменниках как весьма продуктивное средство можно применять оребрение рабочей поверхности аппарата со стороны меньшего коэффициента теплоотдачи. Интенсификация теплообмена обеспечивается при этом за счет снижения термического сопротивления теплоотдачи со стороны развитой поверхности. Оребрение наиболее эффективно при значительной разнице коэффициентов теплоотдачи теплоносителей по разные стороны разделительной стенки (в 10 и более раз). Обычно различие в коэффициентах теплоотдачи связано со значительным отличием теплофизических свойств

теплоносителей. Развитие поверхности за счет оребрения особенно эффективно до тех пор, пока произведения коэффициента теплоотдачи и поверхности теплообмена с обеих сторон стенки не станут одинаковыми, дальнейшее развитие поверхности менее эффективно. Однако эффективность ребра понижается по мере увеличения его поверхности, поэтому обычно пользуются следующим ориентировочным правилом: поверхность ребер должна составлять примерно половину от величины, определенной приведенным кратким анализом [2].

В настоящее время в мировой практике применяются ребристые теплообменники с ребрами самой разнообразной конфигурации, изготавливаемыми по различной технологии (рис. 1). Используются продольные и поперечные ребра, винтовые одно- и многозаходные, шипообразные, постоянной толщины и переменного сечения, высокие и низкие. Ребра могут изготавливаться как единое целое со стенкой трубы путем литья, механической обработки, высадки (накатки) на трубообжимных станках. Возможно и раздельное изготовление трубы и ребер, и последующее крепление ребер к трубе на основе различной технологии. Ребра могут навиваться на трубу в виде ленты, поставленной на ребро, а затем крепиться к трубе сваркой или пайкой. Поперечные ребра могут напрессовываться на трубу или надеваться на нее с зазором при условии последующего крепления пайкой или сваркой, возможно и гидравлическое подавление трубы изнутри вплоть до некоторой остаточной деформации (увеличения диаметра), которая обеспечит качественный контакт между трубой и основанием ребра. Основание ребер может завальцовываться в стенку трубы. Продольные ребра удобно крепить роликовой или точечной сваркой [3].

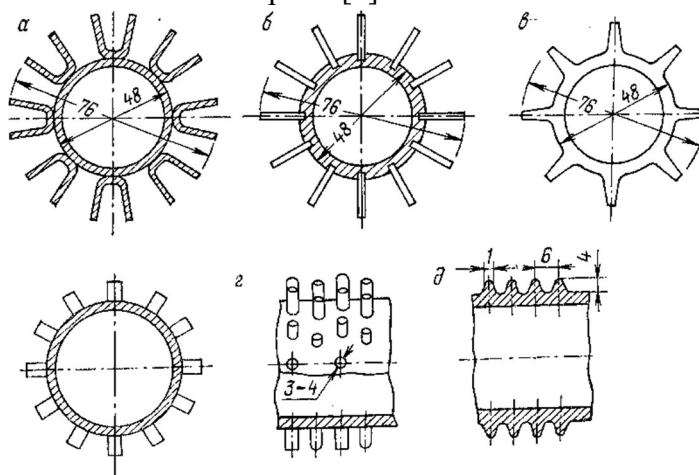


Рис. 1. Оребренные трубы:

- а – ребра корытообразные приварные;
б – ребра завальцованные; в – ребра выдавленные;
г – ребра приварные шиповидные; д – ребра накатанные

Преимущество раздельного изготовления ребер и трубы заключается в том, что ребра могут быть изготовлены из высокотеплопроводного материала: меди, алюминия, а трубы – из более дешевого и прочного металла, например, стали. Однако есть и существенный недостаток раздельной технологии – проблема устранения контактного термического сопротивления в месте стыка поверхности трубы и основания ребра. Контактное сопротивление снижает эффект применения ребристой поверхности.

Использование оребренной (развитой) поверхности для интенсификации теплообмена целесообразно как при внешнем обтекании пучков труб, так и при течении в каналах.

Экономически оправдано применение труб с внутренними относительно низкими спиральными ребрами, в которых интенсификация теплообмена достигается за счет развития поверхности и закрутки потока.

Из анализа следует, что с возрастанием закрутки потока спиральные ребра увеличивают теплоотдачу больше, чем гидросопротивление, поэтому выгода применения труб с такими ребрами очевидна. Область использования труб со спиральными ребрами для интенсификации теплообмена весьма широка: в потоках однофазных жидкостей и газов; при кипении и конденсации с одновременным вынужденным течением теплоносителя [4].

Закрутка потока теплоносителя и каналы типа конфузор-диффузор.

Интенсификацию теплообмена в трубе можно осуществить, закручивая поток теплоносителя вокруг продольной оси трубы. Закрутка потока обеспечивается различными вставками, монтируемыми в трубе: винтовыми – в форме шнека или плоской закрученной ленты (рис. 2); лопаточными завихрителями – по типу многолопастного пропеллера или турбинного колеса. Закрутить поток можно и посредством тангенциального подвода жидкости, как это делается в циклонах. При монтаже вставки только на входе в трубу закрутка потока под действием вязких сил достаточно быстро исчезает при движении жидкости вдоль канала. Характеристики закрученного потока для винтовых вставок определяются шагом закручивания вставки S , для лопаточных завихрителей – углом закрутки лопаток.

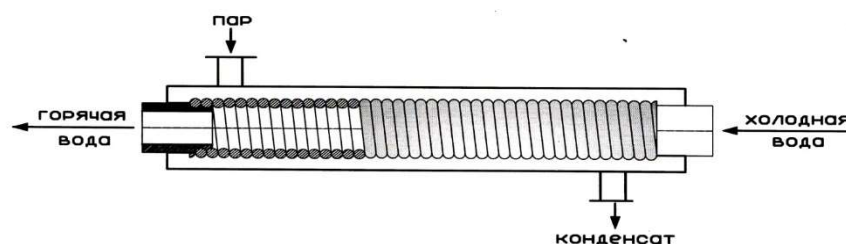


Рис. 2. Схема теплообменника типа «труба в трубе» с теплообменным элементом в виде пружинно-витого канала

Структура закрученного потока очень сложная. Движение жидкости складывается из продольного и вращательного и имеет винтообразный характер, одновременно в поперечном сечении трубы может возникать замкнутое вихревое вторичное течение жидкости.

Гидравлическое сопротивление трубы с закручивающей вставкой возрастает по сравнению со свободной трубой. Это связано с увеличением поверхности трения и дополнительными затратами энергии на создание вращательного движения теплоносителя и образование вторичных поперечных течений.

Интенсификация теплоотдачи в закрученном потоке достигается за счет увеличения пристенной скорости потока и вторичных течений, возникающих под действием центробежных сил и усиливающих теплообмен между ядром потока и погранслоем на стенке канала; а также за счет того, что протяженный завихритель (скрученная лента) увеличивает поверхность теплообмена, возникает эффект оребрения при условии хорошего контакта между вставкой и стенкой трубы. Вставка посредством теплопроводности передает (или забирает) тепло в стенку трубы. Доля теплового потока за счет эффекта оребрения не превышает 30% от количества тепла, которым обмениваются стенка трубы и теплоноситель путем теплоотдачи. При ламинарном и переходном режимах ленточные завихрители позволяют увеличить теплоотдачу

в несколько раз при умеренном росте потерь энергии на прокачивание теплоносителя. В этой области режимов течения завихрители особенно эффективны [3].

В турбулентном режиме при использовании ленточных завихрителей достигается увеличение теплоотдачи в 1,5-2 раза. Снижение эффективности завихрителей при возрастании числа Рейнольдса объясняется тем, что рассматриваемые интенсификаторы теплообмена воздействуют на весь поток, а не только на пристенную область.

Возможный недостаток закручивателей потока, смонтированных непрерывно вдоль трубы, заключается в существенном увеличении гидросопротивления. Уменьшение гидросопротивления при сохранении достаточно высокого уровня теплообмена может быть достигнуто установкой в трубе последовательного ряда отдельных закручивателей. Теплоотдача в таком канале зависит от геометрии закручивателей и расстояния между ними.

Для интенсификации теплообмена закрутка потока используется не только в трубах, но и в межтрубном пространстве теплообменников.

При разработке высокоэффективного теплообменного оборудования достойное приложение могут найти каналы типа диффузор-конфузор (каналы с волнистыми стенками) (рис. 3).

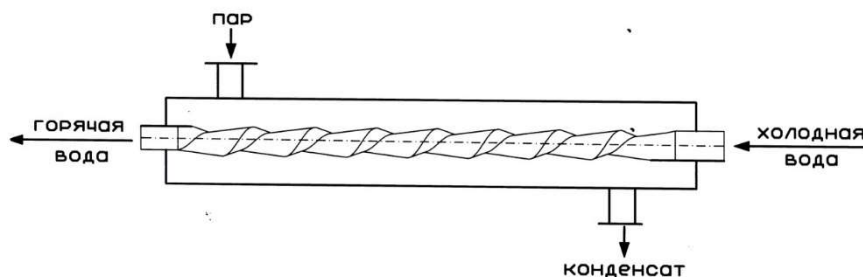
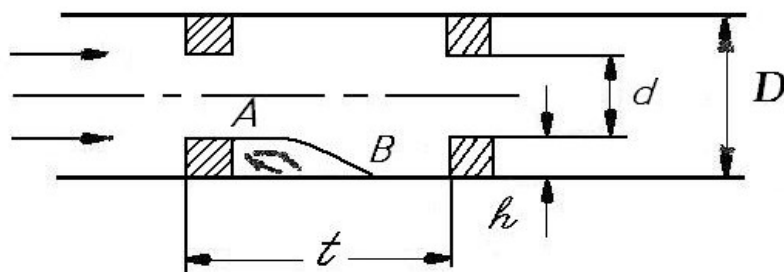


Рис. 3. Схема теплообменника типа «труба в трубе»
с теплообменным элементом типа «конфузор-диффузор»
с винтовой поверхностью теплообмена

Каналы выполняются в форме последовательно повторяющегося расположения системы диффузор-конфузор. Интенсификация теплообмена в таком канале обусловлена особенностями гидродинамики потока. Течение газа в диффузоре характеризуется возрастанием турбулентности и отрывом потока от стенки, поперечным перемешиванием в потоке, что приводит к интенсификации теплоотдачи. При течении в конфузоре ускорение потока вызывает упорядочение потока (снижение турбулентности) и соответствующее уменьшение теплообмена. Однако если поток поступает в конфузор после диффузора, то турбулентные возмущения течения, генерируемые диффузором и отрывной зоной кромки стыка его с конфузоре, обеспечивают высокий уровень теплообмена и в конфузоре. В целом система диффузор-конфузор характеризуется высокой тепловой эффективностью при умеренном гидросопротивлении. Теплоотдача и сопротивление канала зависят от соотношения длин диффузора и конфузора, размеров входного и выходного сечений диффузора и формы кромки стыка. В плоском волнистом канале теплоотдача увеличивается на 40-50% по сравнению с гладким каналом при одинаковом гидросопротивлении. Наличие выступов на поверхностях теплообмена в форме витых труб «конфузор-диффузор» обеспечивает двустороннюю интенсификацию процессов теплопередачи и увеличивает площадь теплообменной поверхности по сравнению с гладкой трубой в среднем в 1,5–1,7 раза [1].

Каналы с поперечными кольцевыми выступами. При интенсификации теплоотдачи в трубах весьма эффективны поперечные кольцевые выступы, наиболее просто получаемые накаткой. В области относительно малых чисел Рейнольдса и сравнительно больших относительных шагов выступов турбулизация потока приводит к выгодному соотношению



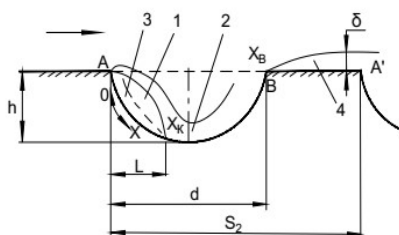
между нарастанием теплообмена и увеличением сопротивления. Доказано, что возможно опережающее нарастание теплообмена по сравнению с увеличением гидросопротивления. Повышение числа Рейнольдса течения снижает положительный эффект интенсификации теплообмена.

Рис. 4. Канал с поперечными кольцевыми выступами.

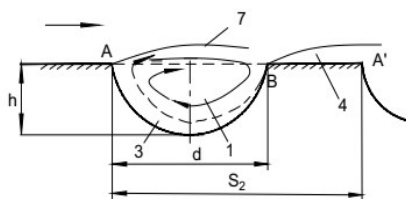
Интенсификация теплообмена в трубах посредством накатки низких поперечных кольцевых выступов обладает следующими преимуществами:

- 1) Канавки, образующиеся на наружной поверхности трубы при накатке выступов в трубе, интенсифицируют теплообмен в межтрубном потоке теплоносителя;
- 2) Технология накатки проста и легко механизмуется;
- 3) Существующая технология сборки кожухотрубчатых теплообменников целиком применима для накатанных труб;
- 4) Интенсификация теплообмена накаткой выступов применима в тесных пучках труб, где невозможно использование оребрения снаружи труб [4].

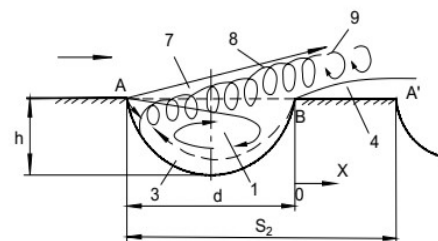
Сферические углубления на поверхности теплообмена. При обтекании потоком сплошной среды сферических углублений возникают крупномасштабные динамические вихревые структуры, наблюдаемые как в ламинарном, так и в турбулентном дозвуковом и околозвуковом режимах течения. Отмечается сходство этих вихревых образований с природными смерчами, обладающими свойством всасывания среды в ствол смерча [6].



a



b



c

Рис.5. Физические модели обтекания поверхностей со сферическими, цилиндрическими и траншейными выемками:

а-обтеки поверхности с выемками ламинарным потоком с присоединением на дне выемки: б-Обтекание поверхности с выемками ламинарным потоком без присоединения на дне выемки: в-Обтекание поверхности с выемками турбулентным потоком без присоединения потока на дне выемки:

1 -рециркуляционное течение: 2 - внутренний ламинарный пограничный слой: 3-внутренний ламинарный пограничный слой в зоне рециркуляции: 4 - внутренний пограничный слой: 5 – вихревая ячейка: 6 - внутренний парный вихрь: 7 - слой смешения: 8 - смерчеобразный вихрь: 9 – вихрь Кармана: 10- вторичная зона рециркуляции [5].

В ряде работ экспериментально установлено, что для сферических углублений рост теплоотдачи не сопровождается типичным квадратичным увеличением гидравлического сопротивления. Причем особенно ярко это проявляется в щелевых каналах. Поверхности со сферическими углублениями позволяют существенно (в 1,5–4,5 раза) увеличить теплообмен при умеренном росте гидросопротивления.

Технология нанесения лунок на плоские поверхности несложная и не оказывает заметного влияния на общую стоимость теплообменного аппарата.

Теплогидравлические характеристики поверхностей, формованных сферическими углублениями, зависят от формы лунок (с острыми кромками или плавными обводами), плотности их расположения на поверхности, продольного и поперечного шага лунок и их относительной глубины, относительной высоты канала. Кроме этих параметров для теплообменных аппаратов на гидравлическое сопротивление и теплообмен оказывает заметное влияние взаимное расположение лунок на соседних поверхностях канала [2].

Вывод. Рассматривая выше интенсификаторы, можно сказать, что без изменения конструкции рекомендуется выполнять лунки сферической формы, позволяющие повысить эффективность в 1,5-2 раза, снизить образование накипи и требуют низкой себестоимости.

Литература:

1. А.Г. Лаптев, Н.А. Николаев, М.М. Башаров Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов // Учебно-справочное пособие, Москва 2011.
2. Назмеев Ю.Г., Лавыгин В.М. Теплообменные аппараты ТЭС: учеб. пособие для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2002.
3. О.С. Попкова, О.С. Дмитриева Методы интенсификации теплообмена// Учебное пособие, Нижнекамск 2016.
4. . Юдин, В. Ф. Теплообмен поперечно-оребрённых труб / В. Ф. Юдин. – Л. : Машиностроение, 1982. – 187 с.
5. Рыжков, Д.В. Гидродинамика и теплообмен в каналах с поверхностными интенсификаторами при вынужденном движении теплоносителей // Автореферат докт. дисс. Казань: КНИТУ, 2011. – 25 с.