

УДК 536.24

Особенности теплогидравлических характеристик каналов с модифицированными скрученными ленточными вставками

С. Э. Тарасевич¹, А. Б. Яковлев², А. В. Шишкин¹

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, Казань;

² Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии (ФГУП «ВНИИР»), Казань;
e-mail: dobryh@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.09.2017

Представлен обзор литературных источников по влиянию различных способов модификации интенсификаторов теплообмена в виде скрученных ленточных вставок на теплоотдачу и гидравлическое сопротивление в различных каналах. Рассмотрено влияние на теплогидравлические характеристики размещения в каналах скрученных лент с зазором между стенкой канала и лентой, укороченных ленточных вставок, лент, периодически меняющих направление закручивания, лент с перфорацией поверхности и боковыми разрезами, рассеченных вставок, лент с отогнутыми по периферии дельтавидными «крылышками», с вырезами треугольной, трапециевидной, прямоугольной или другой формы на боковой поверхности, лент с ребрами под углом к оси ленты, а также пакета из нескольких скрученных лент. Различные модификации классических скрученных лент могут быть направлены, в первую очередь, на интенсификацию теплообмена при одно- и двухфазных течениях, а также на уменьшение гидравлических потерь и избежание загрязняющих отложений на стенках канала. При использовании модифицированных скрученных вставок в качестве интенсификаторов теплообмена может быть достигнут дополнительный прирост теплоотдачи до 2.4 раза и более при росте гидросопротивления до 4.7 раза по сравнению с соответствующими значениями для канала с классической лентой. Основными механизмами, за счет которых происходит интенсификация теплообмена в каналах с модифицированными лентами, являются турбулизация потока, вихреобразование в пристенной области и изменение профиля скорости в поперечном сечении канала. Также описано применение ленточных скрученных вставок в каналах со сплошной и дискретной шероховатостью стенок. Отмечено, что закрутка потока может как усиливать воздействие шероховатости на теплообмен, так и подавлять его.

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, вставленная скрученная лента, закрутка потока.

Введение

Вставки в виде скрученных лент являются одними из эффективных интенсификаторов теплоотдачи в каналах различного сечения. Известно большое количество исследований теплогидравлических характеристик каналов как с установленными классическими скрученными лентами, так и с их многочисленными модифицированными вариантами. Одной из предпосылок геометрической модификации скрученных лент является желание интенсифицировать теплообмен

при одно- и двухфазных течениях или уменьшить гидравлические потери при сохранении уровня интенсификации теплообмена.

Анализ исследований теплоотдачи и гидравлического сопротивления каналов с модифицированными скрученными ленточными вставками

Одним из вариантов является использование скрученных ленточных вставок, не полностью перекрывающих поперечное сечение трубы, т. е.

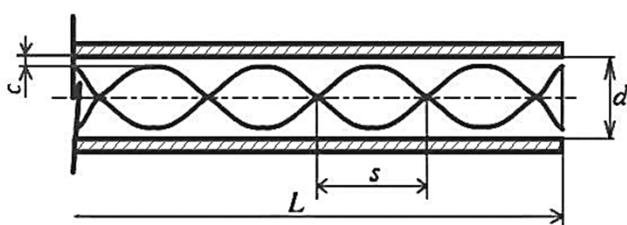


Рис. 1. Продольное сечение трубы со вставкой в виде скрученной ленты, имеющей зазор между боковой поверхностью ленты и поверхностью трубы

имеющих зазор между внутренней поверхностью трубы и боковой поверхностью скрученной ленты (рис. 1). Цель такой модификации – избежание загрязняющих отложений, которые чаще всего возникают в местах контакта скрученной ленты со стенкой канала [1]. По результатам экспериментального исследования теплоотдачи и гидросопротивления труб с такими вставками в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 5000–25\,000$ при течении воздуха отмечено, что коэффициенты теплоотдачи и гидравлического сопротивления уменьшаются с увеличением толщины зазора c : при относительном зазоре $c/d = 0.0178$ соответственно на ~ 5 и $\sim 10\%$ и при $c/d = 0.0357$ – на ~ 10 и $\sim 30\%$ [1]. Для всех случаев теплогидравлическая эффективность уменьшается с увеличением числа Рейнольдса и остается примерно равной единице при $Re > 15000$ и относительном шаге закрутки ленты при повороте на 180° , приведенном к внутреннему диаметру трубы $s/d < 3$. Наиболее эффективное использование скрученных лент с данными параметрами возможно при относительно малых числах Рейнольдса, характерных для ламинарного и переходного режимов. Это связано с тем, что при увеличении числа Re уменьшается толщина вязкого подслоя, и скрученная лента с зазором начинает воздействовать, по большому счету, лишь на турбулентное ядро потока, не разрушая вязкий подслоя.

В работе [2] рассмотрено использование скрученных лент, занимающих лишь часть начальной длины канала. Отмечается, что при этом обеспечиваются меньшие коэффициенты гидросопротивления, теплоотдачи и теплогидравлической эффективности по сравнению с использованием скрученных лент, занимающих всю длину канала, что обусловлено затуханием закрученного движения за лентой. Например, использование укороченной ленточной вставки длиной $0.29L$ при течении воздуха привело к уменьшению гид-

равлического сопротивления канала на 21% при снижении средней теплоотдачи на 14%. Местная теплоотдача быстро уменьшается на участке за вставкой, поэтому по данным [3–5] более эффективным является последовательная установка в канал с небольшими промежутками нескольких коротких скрученных лент, соединенных между собой по оси, например, тонкими цилиндрическими стержнями.

Модификации скрученных лент, направленные на снижение гидравлических потерь, рекомендуется использовать только в условиях сильно закрученного потока [6]. Большинство же известных ленточных модификаций в первую очередь создается все-таки для дополнительной интенсификации теплообмена, а не снижения гидравлических потерь. В работе [6] экспериментально подтвержден заметный рост коэффициентов теплоотдачи в трубах со вставками в виде скрученных лент с периодической сменой (через шаг $2s$) направления закрутки по длине канала при $s/d = 3–5$ и $Re = 3000–27\,000$ при течении воды. Так, при $s/d = 3$ в зависимости от числа Re повышение теплоотдачи составило от 25 до 90% при увеличении гидросопротивления от 45 до 65% по сравнению с соответствующими характеристиками канала с классической скрученной лентой. Кроме того, в работе [6] отмечено, что теплогидравлическая эффективность каналов с такими вставками заметно выше, чем с обычными. Это обеспечивается за счет лучшего перемешивания жидкости в трубе. В местах смены направления закрутки происходит разделение потока на четыре части, которые далее взаимодействуют друг с другом, разрушая тепловой и вязкий гидродинамический слой.

Для дополнительной интенсификации теплообмена в каналах с закручивающими вставками также может быть выполнена перфорация скрученных лент, при этом отверстия в ленте могут быть размещены, например, только на оси ленты [7] или равномерно распределены по всей поверхности ленты (рис. 2) [8, 9]. По результатам экспериментальных исследований [8, 9] при течении воздуха установлено, что за счет перфорации скрученных лент отверстиями диаметром от 3 до 9 мм (при $d = 55$ и 65 мм) может быть достигнут дополнительный рост теплоотдачи до 1.7 раз в связи с турбулизацией потока и изменением поля скорости в поперечном сечении канала. При этом максимум интенсификации тепло-

отдачи наблюдается при относительной площади перфорации $\sim 4.5\%$, с дальнейшим увеличением площади перфорации теплоотдача несколько уменьшается за счет снижения закручивающего эффекта ленты [8, 9].

Для интенсификации теплообмена и увеличения теплогидравлической эффективности в [10] предложено использовать скрученные ленты с небольшими разрывами в виде зазубрин, отогнутых сегментов и рассечений на боковых поверхностях. По результатам экспериментального исследования при течении воды ($Re = 1000-20000$) в трубе со скрученной лентой ($s/d = 3$) с боковыми надрезами (рис. 3), имеющими различные относительные глубины $h/d = 0.11-0.33$ и шаги прореза $t/d = 0.11-0.33$, наблюдался значительный рост коэффициентов теплоотдачи (в 1.3–1.9 раза) и гидросопротивления (соответственно в 1.6–3 раза) по сравнению с использованием классических ленточных вставок, особенно в ламинарной области. Это обусловлено дополнительной турбулизацией жидкости вблизи стенки трубы и возникновением вихрей позади прорезов. Эффект усиливается при увеличении значения h/d и уменьшении t/d , что подтверждается и результатами работы [11] при использовании лент с разрезами в виде острых зубьев.

Кроме того, в работе [12] получен положительный эффект от комбинированного воздействия надрезов на боковых поверхностях ленты и периодической смены направления закрутки ленты, как в [6]. При этом достигнут дополнительный рост теплоотдачи от 13 до 38% при увеличении гидравлического сопротивления в 1.7 раза по сравнению с соответствующими характеристиками канала со скрученной лентой, имеющей только боковые надрезы при $s/d = 3$, $h/d = 0.11$ и $t/d = 0.11-0.33$. В работе [12] отмечено, что при комбинированном использовании указанных методов интенсификации теплообмена общая теплогидравлическая эффективность заметно возрастает.

Одним из вариантов лент с относительно глубокими разрезами являются рассеченные скрученные ленты (рис. 4) с шириной центральной непрорезанной части, составляющей только четверть от всей ширины ленты. По результатам экспериментального исследования [13], проведенного в каналах с рассеченными лента-

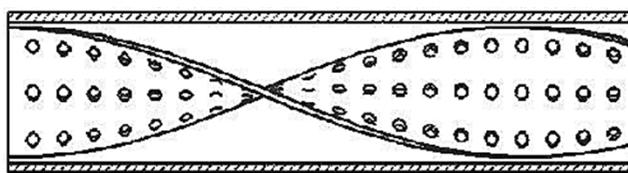


Рис. 2. Продольное сечение трубы с перфорированной скрученной лентой [8]

ми при $s/d = 1-\infty$ и $Re = 1000-40000$ при течении воды, получен значительный прирост теплоотдачи в 1.28–2.4 раза при увеличении гидравлических потерь 2–4.7 раза по сравнению с использованием классических лент. Скрученные ленты в работе [13] изготавливались по специальной технологии во избежание нарушения геометрии при скручивании. При интенсификации теплообмена в трубах с данным типом лент обеспечивается лучшее перемешивание жидкости, увеличение интенсивности турбулентности и вихреобразование за каждым выступом.

В работе [14] проведено исследование труб со вставками в виде скрученных лент с отогнутыми дельтавидными «крылышками» по периферии (рис. 5) при течении воды в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 3000-27000$ и с относительными шагами закрутки $s/d = 3-5$, а также тремя комбинациями значений относительной высоты выступающей части $h/d = 0.11; 0.21; 0.32$. В работе исследовались два варианта расположения отогнутых «крылышек» по отношению к потоку: параллельно (рис. 5, б) и под углом (рис. 5, в). Предполагается, что отогнутые «крылышки» увеличивают интенсивность турбулентности в пристенной области, что приводит к интенсификации теплообмена. Авторы работы [14] отмечают, что коэффициенты теплоотдачи и гидросопротивления растут с увеличением относительной высоты выступа. Также отмечается, что выступы, рас-

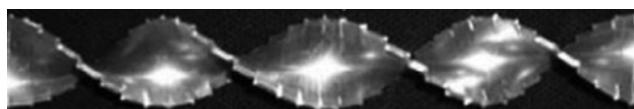


Рис. 3. Скрученная лента ($s/d = 3$) с надрезами боковой поверхности с $h/d = 0.11$ и $t/d = 0.22$ [10]



Рис. 4. Рассеченные скрученная и прямая ленты [13]

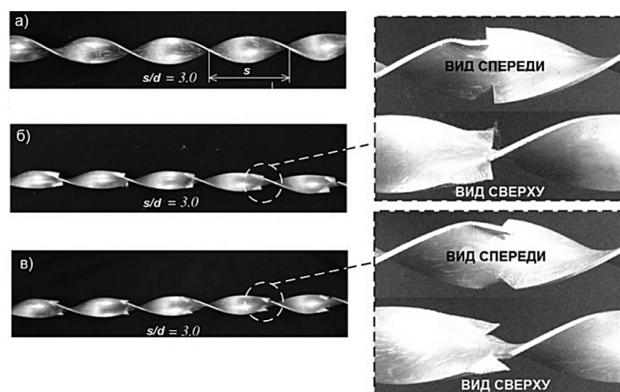


Рис. 5. Скрученные ленты с отогнутыми дельтавидными «крылышками» по периферии: *a* – гладкая скрученная лента, *б* – скрученная лента с сегментами, расположенными параллельно потоку, *в* – скрученная лента с сегментами, расположенными под углом к потоку [14]

положенные под углом к потоку, обеспечивают большую интенсификацию теплообмена, чем выступы, расположенные параллельно потоку. В диапазоне исследованных режимных и конструктивных параметров коэффициенты теплоотдачи и гидросопротивления каналов с лентами, имеющими отогнутые «крылышки» под углом к потоку, соответственно увеличиваются на 4–64% и 9–95% по сравнению с каналами, в которых установлены гладкие скрученные ленты.

По результатам исследования [15] при течении воды выявлен еще больший дополнительный прирост теплоотдачи (до 2 раз) при сопоставимом росте гидросопротивления (до 2.5 раз) при использовании в трубах скрученных ленточных вставок с отогнутыми «крылышками» по периферии и нанесенными на оси ленты с шагом s отверстиями с диаметрами от $0.11d$ до $0.33d$. Отверстия на ленте способствуют дополнительному перетеканию теплоносителя из одной половины поперечного сечения канала в другую. При этом отмечено, что увеличение диаметра отверстий несколько снижает закручивающий эффект ленты, поэтому наибольший прирост теплоотдачи наблюдался в каналах со вставками, имеющими относительно небольшие отверстия.

Еще одним способом модификации скрученных ленточных вставок является выполнение на их боковой поверхности вырезов трапецеидальной



Рис. 6. Скрученная лента с трапецеидальными вырезами на боковой поверхности [17]

ной, трапецевидной, прямоугольной или другой формы (рис. 6) [16–20]. По данным экспериментального исследования [16] при течении воды в каналах с ленточными вставками ($s/d=2-6$), имеющими установленные с шагом s на боковой поверхности треугольные вырезы с относительными высотой $h/d=0.34-0.43$ и шириной $w/d=0.34-0.43$, возможно дополнительное увеличение теплоотдачи до 40% при росте гидросопротивления на 70%. Основными механизмами, за счет которых происходит интенсификация теплообмена, являются увеличение интенсивности турбулентности в пристенной области, а также вихреобразование позади прорезов. Коэффициенты теплоотдачи и гидросопротивления возрастают при увеличении относительной глубины вырезов и уменьшении относительной ширины вырезов.

Положительный эффект для интенсификации теплоотдачи при течении воздуха также отмечен в исследовании [21] при использовании ленточных вставок с боковыми треугольными вырезами и дискретно выполненными на оси ленты отверстиями.

В работах [6, 8, 10–16, 18, 19] также проведен анализ теплогидравлической эффективности каналов с предлагаемыми модифицированными скрученными лентами в зависимости от режимных и конструктивных параметров. В качестве коэффициента теплогидравлической эффективности использовался параметр $\eta = (Nu/Nu_0)/(\xi/\xi_0)^{1/3}$ (где Nu/Nu_0 и ξ/ξ_0 – соответственно относительное увеличение числа Нуссельта и коэффициента гидравлического сопротивления в канале с интенсификатором теплообмена по сравнению со значениями для прямой трубы), представляющий собой по смыслу относительное увеличение теплоотдачи при использовании интенсификатора теплообмена при сохранении неизменной мощности на прокачку теплоносителя [22]. На рис. 7 показана зависимость коэффициента η от числа Рейнольдса для каналов с различными модифицированными скрученными ленточными вставками при максимальном полученном в экспериментах приросте теплоотдачи Nu/Nu_0 . Как видно, в основном значения $\eta > 1$ лежат в одной области для различных вставок за исключением линии 2 для канала с перфорированной лентой. Очевидно, что с увеличением числа Re теплогидравлическая эффективность каналов падает, как и при использовании многих других пассивных методов

интенсификации теплообмена, в связи с ростом турбулентности потока. В работах [10, 13] также отмечается, что максимальные значения η могут достигать величин от 3.5 до 5 в ламинарной области течения при $Re \approx 2000$.

Еще одним способом дополнительной интенсификации тепломассообмена при одно- и двухфазных течениях в каналах со вставленными скрученными лентами, предотвращающим устойчивые шнуровидные течения на ленте, является установка ребер на ее поверхности под углом к оси (рис. 8) [23–25]. Как показали результаты численных исследований [25], наличие дискретно установленных ребер на поверхности скрученной ленты приводит к существенному перестроению профилей осевой скорости и температуры потока в поперечном сечении и по длине канала. Установлено, что наиболее эффективно нанесение ребер под углом к оси ленты против направления скручивания ленты. При течении двухфазного теплоносителя под действием ребер происходит смещение жидкой фазы, текущей непосредственно по ленте, к теплообменной поверхности трубы, увеличивая тем самым смоченный периметр при больших значениях паросодержания и продляя бескризисные режимы теплообмена. Также отмечено, что оребренные скрученные ленты являются эффективным средством интенсификации теплообмена и при течении однофазного теплоносителя. В ходе проведения экспериментальных исследований при течении воды с варьированием шага установки и высоты ребер наблюдался дополнительный прирост теплоотдачи до 40% при увеличении гидросопротивления от 70% и более по сравнению с соответствующими значениями для трубы со скрученной лентой без ребер.

Одним из возможных способов расширения диапазона чисел Рейнольдса турбулентной области, где возможно эффективное использование скрученных лент с точки зрения теплогидравлической эффективности является использование в качестве вставок пакетов из скрученных лент. Так, в работе [26] при установке в трубу пакета из трех скрученных лент ($s/d = 1.92–6.79$) в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 7200–50200$ отмечено увеличение коэффициентов теплоотдачи и гидросопротивления до 3.85 и 4.2 раза соответственно по сравнению со значениями для трубы без вставок. Авторы работы [26] связывают интенсификацию теплообмена с увеличением интенсивности турбулентности, обеспечивающей лучшее

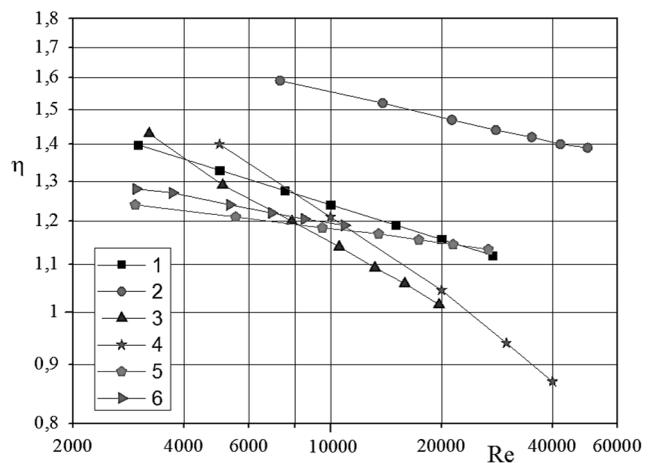


Рис. 7. Теплогидравлическая эффективность каналов с различными ленточными вставками: 1 – лента с периодической сменой направления закрутки [6]; 2 – перфорированная лента [8]; 3 – лента с боковыми надрезами [10]; 4 – рассеченная лента [13]; 5 – лента с отогнутыми дельтавидными «крылышками» [14]; 6 – лента с вырезами на боковой поверхности [16, 18]

перемешивание пристенных слоев и ядра потока, а также с увеличенным временем пробега за счет разделения основного потока тремя скрученными лентами.

На практике нашли применение и комплексные методы интенсификации. Данные методы в настоящее время привлекают все большее количество исследователей в связи со своей эффективностью. При использовании комплексных методов коэффициенты теплоотдачи могут быть увеличены вследствие действия каждого из входящих в него способа интенсификации. Например, авторы работ [27, 28] использовали скрученные ленты для дополнительной интенсификации теплообмена в гофрированных трубах. Также исследовалось влияние скрученной ленты на теплообмен и гидродинамику в «облуненных» трубах [29], спирально накатанных трубах [30], в трубах с периодически установленными по длине конфузорными вставками [31].

Авторы работы [32] изучили совместное влияние вставки из двух скрученных лент, установленных в спирально-накатанную трубу (рис. 9), на теплогидравлические характеристики при течении воды в диапазоне чисел Рей-

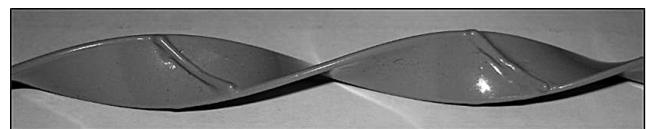


Рис. 8. Фотография скрученной ленты с ребрами на поверхности, установленными против направления скручивания ленты

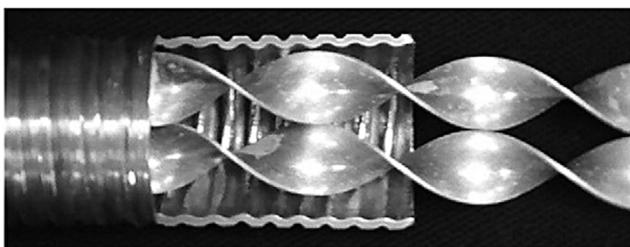


Рис. 9. Вставка из двух скрученных лент в спирально-накатанную трубу [32]

нольдса $Re = 6000–60000$. В проведенных экспериментах направление скручивания лент и спиральной накатки совпадает, т. е. накатка дополнительно закручивает поток. Авторы отмечают, что эффективность данного комплексного метода интенсификации значительно выше по сравнению с оребренной или гладкой трубой без лент. Утверждается, что теплогидравлическая эффективность имеет высокие значения для всех режимных и конструктивных параметров и достигает максимального значения для лент с относительным шагом закрутки $s/d = 8$ и снижается с увеличением числа Рейнольдса.

Для описанных выше комплексных методов интенсификации общим является одновременное воздействие на пристенный вязкий подслои и макроперемешивание жидкости. Предполагается, что вихревое течение, создаваемое скрученной лентой, приводит к омыванию рециркуляционных зон между выступами (лунками, канавками, спиральной накаткой), что влечет за собой улучшение смешивания основного и пристенного потоков. Однако в то же время отмечается, что закрутка частично подавляет интенсивность вихрей. Так, в работах [33–35] отмечается, что парные вихри, возникающие в канале с закруткой, подавляют механизм турбулизации потока в дискретно-шероховатом канале, что приводит к снижению теплоотдачи. В работах [33–35] также изучалось совместное влияние закрутки потока и сплошной шероховатости на теплообмен и гидродинамику потоков в трубах, отмечен заметный эффект интенсификации теплообмена при умеренном росте гидравлического сопротивления.

Заключение

Выполненный обзор литературных источников показывает, что хорошо известные интенсификаторы теплообмена в виде скрученных лент

точных вставок имеют много возможностей для модификации с целью дополнительного улучшения теплогидравлических характеристик. Кроме того, скрученные ленты могут быть эффективно использованы и в комбинации с другими методами интенсификации теплообмена, например шероховатости поверхности. Выбор того или иного способа модификации или их комбинации, как, впрочем, и любого другого метода интенсификации тепломассообмена, на практике обусловлен условиями и режимами работы теплообменного оборудования, технологичностью, стоимостью изготовления и др. Наибольший эффект от применения модифицированных скрученных ленточных вставок для интенсификации теплообмена достигается в ламинарной и переходной областях течения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bas H., Ozceyhan V.** Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012. V. 41. P. 51–58.
2. **Eiamsa-ard S., Thianpong C., Eiamsa-ard P., Promvong P.** Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2009. V. 36. P. 365–371.
3. **Eiamsa-ard S., Thianpong C., Promvong P.** Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2006. V. 33. P. 1225–1233.
4. **Saha S. K., Dutta A., Dhal S. K.** Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001. V. 44. P. 4211–4223.
5. **Wang Y., Hou M., Deng X., Li L., Huang G., Huang H., Zhang G., Chen C., Huang W.** Configuration optimization of regularly spaced short-length twisted tape in a circular tube to enhance turbulent heat transfer using CFD modeling // *Applied Thermal Engineering*. 2011. V. 31. P. 1141–1149.
6. **Eiamsa-ard S., Promvong P.** Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. V. 53. P. 1364–1372.
7. **Sidhappa K. A., Hande S. S., Patil S. B., Maske V. R.** Heat transfer enhancement by using twisted tape inserts with circular holes in forced convection // *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*. 2016. V. 3. Iss. 3. 7 p.
8. **Bhuiya M. M. K., Chowdhury M. S. U., Saha M., Islam M. T.** Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013. V. 46. P. 49–57.
9. **Ahamed J. U., Wazed M. A., Ahmed S., Nukman Y., Tuan Ya T. M. Y. S., Sarkar M. A. R.** Enhancement and prediction

- of heat transfer rate in turbulent flow through tube with perforated twisted tape inserts: A new correlation // *Journal of Heat Transfer*. 2011. V. 133 (4)/041903. 9 p.
10. **Eiamsa-ard S., Seemawute P., Wongcharee K.** Influences of peripherally-cut twisted tape insert on heat transfer and thermal performance characteristics in laminar and turbulent tube flows // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010. V. 34. P. 711–719.
 11. **Lekurwale R.A., Ingole Pr.R., Joshi Y.G., Ingole P.R.** Performance assessment of heat exchanger tubes to improve the heat transfer rate in turbulent flows by using different types of twisted tapes inserts in tubes // *International Journal of Research in Advent Technology*. 2014. V. 2. N 5. P. 428–432.
 12. **Seemawute P., Eiamsa-ard S.** Thermohydraulics of turbulent flow through a round tube by a peripherally-cut twisted tape with an alternate axis // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2010. V. 37. P. 652–659.
 13. **Chang S.W., Yang T.L., Liou J.S.** Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2007. V. 32. P. 489–501.
 14. **Eiamsa-ard S., Wongcharee K., Eiamsa-ard P., Thianpong C.** Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts // *Applied Thermal Engineering*. 2010. V. 30. P. 310–318.
 15. **Thianpong C., Eiamsa-ard P., Promvong P., Eiamsa-ard S.** Effect of perforated twisted-tapes with parallel wings on heat transfer enhancement in a heat exchanger tube // *Energy Procedia*. 2012. V. 14. P. 1117–1123.
 16. **Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S., Srinivasan P.S.S.** Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert // *J. of International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2011. V. 38. P. 329–334.
 17. **Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S., Srinivasan P.S.S.** Heat transfer and pressure drop characteristics of turbulent flow in a tube fitted with trapezoidal-cut twisted tape insert // *International Journal of Academic Research*. 2009. V. 1. N 1. P. 123–128.
 18. **Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S.** Heat transfer and friction factor in a tube equipped with U-cut twisted tape insert // *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2011. V. 5. N 6. P. 559–565.
 19. **Salam B., Biswas S., Saha S., Bhuiya M.M.K.** Heat transfer enhancement in a tube using rectangular-cut twisted tape insert // *Procedia Engineering*. 2013. V. 56. P. 96–103.
 20. **Choudhary M.S., Tembhurne Y.** Heat transfer enhancement by twisted tape inserts in a tube exchanger // *International Journal of Engineering Technology & Management Research*. 2015. V. 3. Iss. 2. P. 117–122.
 21. **Quazi I., Mohite V.R.** Heat transfer enhancement in a heat exchanger using punched and V-cut twisted tape inserts // *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*. 2015. V. 5. Iss. 5. 17 p.
 22. **Webb R.L.** Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1981. V. 24 (4). P. 715–726.
 23. **Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А., Шишкин А.В.** Особенности теплообмена в трубах с различными закручивающими ленточными вставками // *Тепловые процессы в технике*. 2011. Т. 3. № 3. С. 133–139.
 24. **Yakovlev A. B., Tarasevich S. E., Giniyatullin A. A., Shishkin A. V.** Hydrodynamics and heat transfer in tubes with smooth and ribbed twisted tape inserts // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 2013. V. 20. N 6. P. 511–518.
 25. **Гиниятуллин А.А., Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б.** Экспериментальное и численное исследование тепло-массообмена в трубах с оребренными скрученными ленточными вставками // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*. 2013. Т. 2. № 2. С. 13–18.
 26. **Bhuiya M. M. K., Chowdhury M. S. U., Shahabuddin M., Saha M., Memon L.A.** Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with triple twisted tape inserts // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013. V. 48. P. 124–132.
 27. **Zimparov V.** Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts. Part 1: Friction factors // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. V. 47. P. 589–599.
 28. **Zimparov V.** Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts. Part 2: Heat transfer coefficients // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. V. 47. P. 385–393.
 29. **Thianpong C., Eiamsa-ard P., Wongcharee K., et al.** Compound heat transfer enhancement of a dimpled tube with a twisted tape swirl generator // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2009. V. 36. P. 698–704.
 30. **Bharadwaj P., Khondge A., Date A.** Heat transfer and pressure drop in a spirally grooved tube with twisted tape insert // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. V. 52. N 5. P. 1938–1944.
 31. **Promvong P., Eiamsa-ard S.** Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted tape insert // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2007. V. 34. P. 849–859.
 32. **Promvong P., Pethkool S., Pimsarn M., Thianpong C.** Heat transfer augmentation in a helical-ribbed tube with double twisted tape inserts // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2012. V. 39. P. 953–959.
 33. **Злобин А.В., Ильин Г.К., Тарасевич С.Э. и др.** Теплоотдача и гидравлическое сопротивление шероховатых труб со вставленной скрученной лентой // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск: “Актуальные вопросы тепло- и массообмена, энергоэффективность, исследование вихревых закрученных потоков*. 2008. С. 113–119.
 34. **П’ин Г.К., Tarasevich S. E., Shchelchikov A. V., Yakovlev A. B.** Heat transfer in rough tubes with an inserted twisted tape // *J. Heat Transfer Research*. 2010. V. 41. N 1. P. 21–32.
 35. **Tarasevich S., Yakovlev A.** Chapter 23: Heat transfer and hydraulic resistance in rough tubes including with twisted tape inserts // *In Evaporation, Condensation and Heat Transfer*, Edited by Amimul Ahsan. Rijeka: InTech (Croatia). 2011. P. 487–510.

Thermal-hydraulic characteristics specifics of channels with modified twisted tape inserts

S. E. Tarasevich¹, A. B. Yakovlev², A. V. Shishkin¹

¹ Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev, Kazan;

² All-Russian Institute of Flow Metering, Kazan;

e-mail: dobryh@yandex.ru

The article presents the literary sources review on the effect of various methods of heat exchange intensifiers modification techniques in the form of twisted tape inserts on heat transfer and hydraulic resistance in various channels. It regards the impact of placement of twisted tapes with a gap between the channel's wall and the tape; the shortened tape inserts; tapes periodically changing twisting direction; tapes with perforated surface and side incisions; dissected insertions; tapes with deflected in a circumferential direction with delta-type "winglets", with V-, trapezoidal and rectangular or other shape cutouts at the side surface; tapes with ribs aslant to the tape axis, as well as a pack of several twisted tapes on thermo-hydraulic characteristics. Various modifications of the classical twisted tapes can be directed, first of all, on heat and mass transfer enhancement at one- and two-phase flows, and also on decrease of hydraulic losses and avoidance of polluting adjournment on channel walls. While application of modified twisted insertions as thermal exchange intensifiers, an additional heat emission increase can be achieved up to 2.4 times and more at hydro resistance growth up to 4.7 times compared to the corresponding values for a channel with classical tape. The basic mechanisms allowing the heat exchange intensification in the channels with modified tapes are the flow turbolization, vortex formation in the wall-adjacent area and changing of velocity profile in the channel cross-section.

Application of the tape twisted inserts in the channels with continuous and discrete walls roughness is also presented. It was noted, that the flow swirling can both reinforce the roughness affecting the heat transfer and suppress it.

Keywords: heat and mass transfer enhancement, twisted tape insert, swirling of a flow.

REFERENCES

1. **Bas H., Ozceyhan V.** Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, vol. 41, pp. 51–58.
2. **Eiamsa-ard S., Thianpong C., Eiamsa-ard P., Promvong P.** Convective heat transfer in a circular tube with short-length twisted tape insert. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 36, pp. 365–371.
3. **Eiamsa-ard S., Thianpong C., Promvong P.** Experimental investigation of heat transfer and flow friction in a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2006, vol. 33, pp. 1225–1233.
4. **Saha S. K., Dutta A., Dhal S. K.** Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, vol. 44, pp. 4211–4223.
5. **Wang Y., Hou M., Deng X., Li L., Huang G., Huang H., Zhang G., Chen C., Huang W.** Configuration optimization of regularly spaced short-length twisted tape in a circular tube to enhance turbulent heat transfer using CFD modeling. *Applied Thermal Engineering*, 2011, vol. 31, pp. 1141–1149.
6. **Eiamsa-ard S., Promvong P.** Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 53, pp. 1364–1372.
7. **Sidhappa K. A., Hande S. S., Patil S. B., Maske V. R.** Heat transfer enhancement by using twisted tape inserts with circular holes in forced convection. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 2016, vol. 3, no. 3, 7 p.
8. **Bhuiya M. M. K., Chowdhury M. S. U., Saha M., Islam M. T.** Heat transfer and friction factor characteristics in turbulent flow through a tube fitted with perforated twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 46, pp. 49–57.
9. **Ahamed J. U., Wazed M. A., Ahmed S., Nukman Y., Tuan Ya T. M. Y. S., Sarkar M. A. R.** Enhancement and prediction of heat transfer rate in turbulent flow through tube with perforated twisted tape inserts: A new correlation. *Journal of Heat Transfer*, 2011, vol. 133, no.4, p. 041903. doi:10.1115/1.4002635
10. **Eiamsa-ard S., Seemawute P., Wongcharee K.** Influences of peripherally-cut twisted tape insert on heat transfer and thermal performance characteristics in laminar and turbulent tube flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, vol. 34, pp. 711–719.
11. **Lekurwale R. A., Ingole Pr. R., Joshi Y. G., Ingole P. R.** Performance assessment of heat exchanger tubes to improve the heat transfer rate in turbulent flows by using different types of twisted tapes inserts in tubes. *International Journal of Research in Advent Technology*, 2014, vol. 2, no. 5, pp. 428–432.
12. **Seemawute P., Eiamsa-ard S.** Thermohydraulics of turbulent flow through a round tube by a peripherally-cut twisted tape with an alternate axis. *International Com-*

- munications in Heat and Mass Transfer*, 2010, vol. 37, pp. 652–659.
13. **Chang S. W., Yang T. L., Liou J. S.** Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, vol. 32, pp. 489–501.
 14. **Eiamsa-ard S., Wongcharee K., Eiamsa-ard P., Thianpong C.** Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts. *Applied Thermal Engineering*, 2010, vol. 30, pp. 310–318.
 15. **Thianpong C., Eiamsa-ard P., Promvong P., Eiamsa-ard S.** Effect of perforated twisted-tapes with parallel wings on heat transfer enhancement in a heat exchanger tube. *Energy Procedia*, 2012, vol. 14, pp. 1117–1123.
 16. **Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S., Srinivasan P. S. S.** Heat transfer and pressure drop characteristics in a circular tube fitted with and without V-cut twisted tape insert. *J. of International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, vol. 38, pp. 329–334.
 17. **Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S., Srinivasan P. S. S.** Heat transfer and pressure drop characteristics of turbulent flow in a tube fitted with trapezoidal-cut twisted tape insert. *International Journal of Academic Research*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 123–128.
 18. **Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S.** Heat transfer and friction factor in a tube equipped with U-cut twisted tape insert. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2011, vol. 5, no. 6, pp. 559–565.
 19. **Salam B., Biswas S., Saha S., Bhuiya M. M. K.** Heat transfer enhancement in a tube using rectangular-cut twisted tape insert. *Procedia Engineering*, 2013, vol. 56, pp. 96–103.
 20. **Choudhary M. S., Tembhurne Y.** Heat transfer enhancement by twisted tape inserts in a tube exchanger. *International Journal of Engineering Technology & Management Research*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 117–122.
 21. **Quazi I., Mohite V. R.** Heat transfer enhancement in a heat exchanger using punched and V-cut twisted tape inserts. *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*, 2015, vol. 5, no. 5, 17 p.
 22. **Webb R. L.** Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1981, vol. 24, no. 4, pp. 715–726.
 23. **Tarasevich S. E., Yakovlev A. B., Giniyatullin A. A., Shishkin A. V.** Osobennosti teplomassoobmena v trubakh s razlichnymi zakruchivayushimi lentochnymi vstavkami [Features of heat and mass transfer in tubes with various twisted tape inserts]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2011, vol. 3, no. 3, pp. 133–139. In Russ.
 24. **Yakovlev A. B., Tarasevich S. E., Giniyatullin A. A., Shishkin A. V.** Hydrodynamics and heat transfer in tubes with smooth and ribbed twisted tape inserts. *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 511–518.
 25. **Giniyatullin A. A., Tarasevich S. E., Yakovlev A. B.** Eksperimental'noe i chislennoe issledovanie teplomassoobmena v trubakh s orebrennymi skruchennymi lentochnymi vstavkami [Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer in tubes with ribbed twisted tape inserts], *Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva – Proceedings of Kazan Aviation Institute*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 13–18. In Russ.
 26. **Bhuiya M. M. K., Chowdhury M. S. U., Shahabuddin M., Saha M., Memon L. A.** Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with triple twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2013, vol. 48, pp. 124–132.
 27. **Zimparov V.** Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts. Part 1: Friction factors. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, pp. 589–599.
 28. **Zimparov V.** Prediction of friction factors and heat transfer coefficients for turbulent flow in corrugated tubes combined with twisted tape inserts. Part 2: Heat transfer coefficients. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, pp. 385–393.
 29. **Thianpong C., Eiamsa-ard P., Wongcharee K., et al.** Compound heat transfer enhancement of a dimpled tube with a twisted tape swirl generator. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 36, pp. 698–704.
 30. **Bharadwaj P., Khondge A., Date A.** Heat transfer and pressure drop in a spirally grooved tube with twisted tape insert. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, no. 5, pp. 1938–1944.
 31. **Promvong P., Eiamsa-ard S.** Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted tape insert. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 34, pp. 849–859.
 32. **Promvong P., Pethkool S., Pimsarn M., Thianpong C.** Heat transfer augmentation in a helical-ribbed tube with double twisted tape inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2012, vol. 39, pp. 953–959.
 33. **Zlobin A. V., Il'in G. K., Tarasevich S. E. i dr.** Teplootdacha i gidravlichesкое soprotivlenie sherokhovatykh trub so vstavlennoj skruchennoj lentoj [Heat transfer and hydraulic resistance of rough pipes with twisted tape insert], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk. Spetsial'nyj vypusk: "Aktual'nye voprosy teplo- i massobmena, ehnergoehffektivnost', issledovanie vikhrevykh zakruchennykh potokov – Special Issue «Actual Problems of Heat and Mass Transfer, Energy Efficiency, Study of Vortex Swirling Flows» of Academic Journal "Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"*, 2008, pp. 113–119. In Russ.
 34. **Il'in G. K., Tarasevich S. E., Shchelchikov A. V., Yakovlev A. B.** Heat transfer in rough tubes with an inserted twisted tape. *J. Heat Transfer Research*, 2010, vol. 41, no. 1, pp. 21–32.
 35. **Tarasevich S., Yakovlev A.** Chapter 23: Heat transfer and hydraulic resistance in rough tubes including with twisted tape inserts. In book *"Evaporation, Condensation and Heat Transfer"* Edited by *Amimul Ahsan*. Rijeka: InTech (Croatia), 2011, pp. 487–510.