

УДК 532.529.5 : 536.24

ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЙ И ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАКРУЧИВАЮЩИМИ ВСТАВКАМИ

Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Ильин Г.К., Шишкин А.В.

Казанский государственный технический университет им.А.Н.Туполева, Казань, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 08-08-00224а

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований структуры адиабатного двухфазного (воздушно-водяного) течения, а также теплоотдачи и гидравлического сопротивления при однофазном течении воды в трубах с различными ленточными закручивающими вставками. Предложено устрой-

ство для интенсификации теплообмена в первую очередь при двухфазных парожидкостных течениях (при кипении) в виде скрученной ленты, имеющей дискретно установленные под углом к оси ленты ребра.

ВВЕДЕНИЕ

Вставки в виде скрученных лент являются одними из эффективных интенсификаторов теплоотдачи при одно- и двухфазных течениях. Они отличаются простотой изготовления и установки в каналы различного поперечного сечения и позволяют относительно дешево проводить модернизацию существующего оборудования. Известно большое

количество исследований теплогидравлических характеристик каналов с установленными скрученными лентами, наиболее подробный обзор которых представлен в работе [1]. В настоящее время недостаточно исследованными остаются вопросы теплоотдачи и гидродинамики при двухфазных течениях в каналах со скрученными лентами.

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ДВУХФАЗНЫХ АДИАБАТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТРУБАХ СО ВСТАВЛЕННОЙ СКРУЩЕННОЙ ЛЕНТОЙ

Визуализация адиабатных двухфазных (воздушно-водяных) течений проводилась в горизонтально расположенной стеклянной трубе (длина $L=800$ мм, внутренний диаметр $d=18$ мм) со вставленной скрученной лентой (относительный шаг поворота ленты на 180° $s/d=2.5\dots 6$) при давлении $p=0.1\dots 0.2$ МПа.

При визуальном исследовании структуры воздушно-водяного потока в трубах со вставленной лентой были выделены пробковый, волновой, кольцевой, дисперсный и шнуровидный режимы [2]. По сравнению со структурой двухфазных течений в горизонтальных трубах в соответствии с классификацией [3] в горизонтальных трубах со скрученной лентой имеются следующие особенности.

При кольцевом режиме, когда жидкая фаза в поперечном сечении имеет форму неправильного кольца, а центральная часть потока занята газом, основная доля жидкости скапливается у передней по потоку кромки ленты [2]. При увеличении газосодержания сухие пятна на стенке трубы в первую очередь появляются у задней по потоку кромки ленты. В связи с неравномерным распре-

делением жидкости по стенке трубы, а также течением значительной доли жидкой фазы по самой ленте разрывы в кольцевой пленке (сухие пятна) на стенке трубы при наличии ленты появляются при более низком газосодержании, чем в трубе без ленты. Это подтверждается и результатами других исследований [4, 5] – установка в трубу скрученной ленты приводит к увеличению количества сухих пятен на стенке при двухфазных течениях при аналогичных режимных параметрах, что, в прочем, не приводит к ухудшению теплообмена за счет изменения характера течения и интенсификации массообмена в таких каналах.

Основной особенностью структуры двухфазных течений в трубах со вставленной скрученной лентой является то, что часть жидкой фазы (а при большом газосодержании вся жидкость) всегда движется в виде струи (шнура) по центральной части ленты, не являющейся активной теплообменной поверхностью. При кипении это может приводить к увеличению необходимой для полного испарения жидкости длины канала и возникновению более раннего кризиса теплообмена.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛОМАСООБМЕНА

Для интенсификации тепломассообмена при одно- и двухфазных течениях в трубах со вставленной скрученной лентой и, в частности, для предотвращения устойчивых шнуровидных течений на ленте на ее поверхности могут быть установлены ребра под углом к ее оси. Это позволяет смещать часть теплоносителя, движущегося вдоль центральной части самой ленты, непосредственно к теплообменной поверхности канала, в который вставлена скрученная лента, а также дискретно турбулизовать поток и, как следствие, интенсифицировать тепломассообмен в канале. Различные варианты таких интенсифицирующих устройств показаны на рис.1.

Устройство состоит из скрученной плоской ленты 1 с боковыми торцами 2 и дискретно расположенных на ленте ребер 3 под углом к ее оси по направлению или против направления скручивания ленты (рис.1). При этом часть потока, движущаяся вдоль центральной части ленты, будет смещаться либо к передней, либо к задней по потоку образующей ленты соответственно.

Ребра могут быть закреплены на ленте пайкой, сваркой, клейкой, выполнены в виде навитой на ленту проволоки, а также другим способом. При навивке по направлению скручивания ленты обеспечивается плотное прилегание проволоки ко всей поверхности ленты без дополнительного крепления другими способами.

Ребра могут занимать всю ширину ленты, либо ее часть и располагаться с некоторым шагом как по всей длине ленты, так и на некотором ее участке. Высота, ширина и форма поперечного сечения ребер могут быть постоянными или переменными по их длине.

Такое техническое решение позволяет увеличить коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности канала, в который вставлена скрученная лента, а в случае парожидкостных течений (например, при кипении) также увеличить количество

жидкости на теплообменной поверхности и существенно продлить бескризисную область теплообмена.

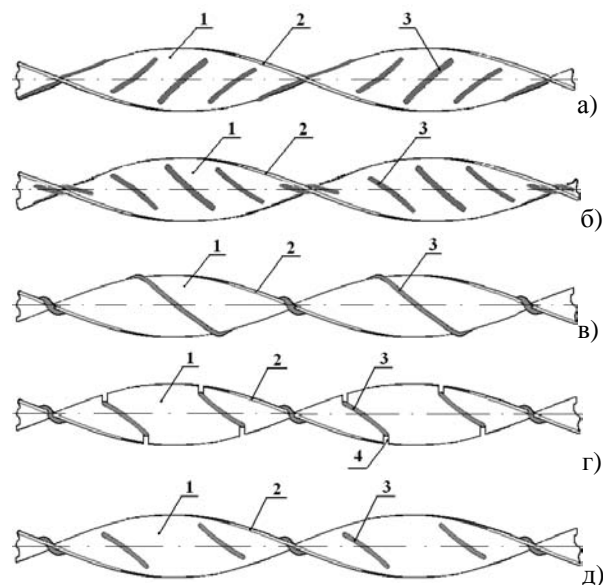


Рис.1. Скрученная лента с ребрами на ее поверхности под углом к оси ленты: а) ребра расположены против направления; б) ребра расположены по направлению скручивания; в) ребра в виде проволоки навитой на ленту по направлению ее скручивания с выступом ребер над боковыми торцами ленты; г) ребра в виде проволоки навитой на ленту по направлению ее скручивания, при этом на боковых торцах ленты имеются пазы, в которые заглублены ребра; д) ребра в виде проволоки навитой на ленту через отверстия в ленте по направлению ее скручивания

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ДВУХФАЗНЫХ АДИАБАТНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТРУБАХ СО ВСТАВЛЕННОЙ СКРУЩЕННОЙ ЛЕНТОЙ, ИМЕЮЩЕЙ РЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ

Для подтверждения возможности эффективного использования предложенных устройств для интенсификации теплообмена в каналах различной формы, и, в частности, влияние на шнуровидные и кольцевые режимы течения, было проведено визуальное исследование структуры двухфазных (водо-воздушных) адиабатных течений при давлении $p=0.1...0.2$ МПа в стеклянных трубах ($d=18$ мм) с установкой некоторых из предложенных устройств ($s/d=3$): 1) скрученной ленты с ребрами в виде проволоки навитой на ленту под углом к оси ленты по направлению ее скручивания с выступом ребер над боковыми торцами ленты (согласно рис.1,в); толщина проволоки h и соответственно зазор между

кромкой ленты и стенкой трубы составляет 1 мм, шаг навивки равнялся s , что соответствует шагу между ребрами $t=2/3s$; 2) скрученной ленты с ребрами в виде проволоки навитой на ленту через пазы в ней под углом к оси ленты по направлению ее скручивания без выступа ребер над боковыми торцами ленты (рис.1,г), при этом торцы ленты и ребер плотно прилегают к стенкам трубы, $h=2.5$ мм и $t=2/3s$; 3) скрученной ленты с ребрами на ее поверхности, расположенными под углом 45° к оси ленты против направления ее скручивания с неробренными участками по 2 мм у торцов ленты (рис.1,а), $h=1$ мм, $t=1/2s$.

Результаты визуализации показали, что использование любой из таких вставок приводит к значительному снижению количества жидкой фазы, текущей непосредственно по ленте, что при кипении должно способствовать более раннему выкипанию жидкости и уменьшению требуемой длины канала.

В трубах с первыми двумя вставками с навитыми по направлению скручивания ленты ребрами при взаимодействии потока с ребрами на ленте жидкая фаза движется вдоль ребер и переносится к стенке канала. С уменьшением газосодержания наступление полного кольцевого режима течения на стенке трубы несколько задерживается вследствие наличия разрежения в точке контакта ребра со стенкой канала. Поэтому в трубе с таким устройством при кипении в первую очередь могут образовываться сухие пятна и точки пережога за местом контакта ребра и стенки.

Наличие зазора между стенкой канала и торцом ленты при установке устройства, показанного на рис.1,в, способствует лучшему распределению жидкости на поверхности трубы, хотя некоторое утолщение слоя жидкости на стенке наблюдается вблизи передней по потоку образующей ленты, как и в трубе с простой скрученной лентой.

Наилучшие результаты по разрушению шнуровидных течений на ленте и устойчивости кольцевого течения (без сухих пятен) на стенке трубы показало применение третьего интенсификатора в виде скрученной ленты с ребрами на ее поверхности, расположенными под углом 45° к оси ленты против направления ее скручивания (рис.1,а): широкий шнур на ленте отсутствует; при кольцевом течении на стенке трубы жидкость равномерно распределяется по поверхности трубы, что способствует хорошей устойчивости сплошной пленки. Это связано с тем, что расположение ребер против направления скручивания ленты способствует усилению действия закрутки ленты. Кроме того ребра располагаются не по всей ширине ленты, что исключает образования вихревых застойных зона у поверхности трубы.

Сравнение границы кольцевого режима течения (без сухих пятен на стенке) в виде зависимости относительного массового газосодержания X от числа

Рейнольдса $Re_{см}$, подсчитанного по параметрам гомогенной смеси [2], подтверждает (рис. 2), что кольцевое течение на поверхности трубы с последним интенсификатором значительно устойчивее, чем в других рассмотренных случаях в результате отмеченного выше - более равномерного распределения жидкости по поверхности трубы и отсутствия вихревых отрывных зон вблизи поверхности.

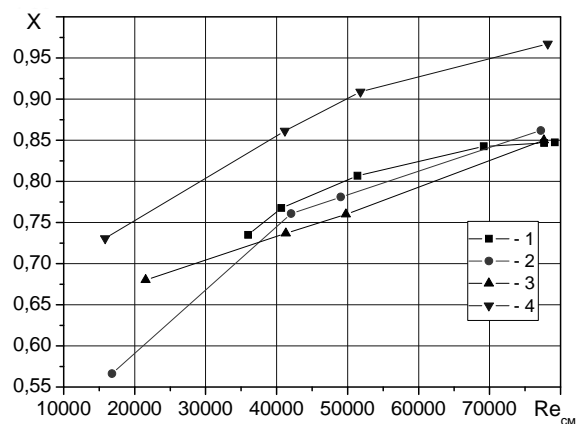


Рис.2. Граница кольцевого течения (без сухих пятен на стенке) в трубе с различными закручивающими вставками ($p=0,14$ МПа, $s/d=3$): 1- скрученная лента без ребер; 2 - скрученная лента с ребрами в виде проволоки навитой на ленту под углом к оси ленты по направлению ее скручивания с выступом ребер над боковыми торцами ленты (рис.1,в); 3 - скрученная лента с оребрением в виде навитой на ленту проволоки без выступа ребер над боковыми торцами ленты (рис.1,г); 4 - скрученная лента с ребрами на ее поверхности, расположенными под углом к оси ленты против направления ее скручивания (рис. 1, а)

ТЕПЛОТДАЧА И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТРУБ С ЗАКРУЧЕННЫМИ ЛЕНТОЧНЫМИ ВСТАВКАМИ, ИМЕЮЩИМИ КОСЫЕ РЕБРА НА ПОВЕРХНОСТИ, ПРИ ОДНОФАЗНОМ ДВИЖЕНИИ

Далее представлены результаты исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления гладких и шероховатой труб ($d=10$ мм) с закрученными ленточными вставками, имеющими косые ребра на поверхности, при однофазном течении воды. При исследовании теплообмена подвод теплоты осуществлялся электроконтактным методом – пропусканием электротока непосредственно через трубу, изготовленную из нержавеющей стали. Для

организации закрутки потока в участок устанавливалась скрученная лента толщиной 0,7 мм и шириной равной внутреннему диаметру трубы. Лента покрывалась высокотемпературным лаком для обеспечения электрической изоляции со стенкой канала. Относительные шаги закрутки ленты при повороте на 180° составляли $s/d=2,5...6,0$. На ребра также различными способами устанавливались ребра согласно схемам на рис. 1. В частности, ребра

образовывались путем навивки на ленту через пазы в ней согласно рис.1,г без образования зазора между стенкой и ребром (высота навитых ребер составляла $h=1.5$ мм, шаг навивки равнялся s , что соответствует шагу между ребрами $t=2/3s$), а также в виде проволоки навитой на ленту через отверстия в ленте по направлению ее скручивания (в виде прошивки) согласно рис.1,д ($h=1.5$ мм, $t=s/3$). Также ребра напайвались против направления скручивания ленты (рис.1,а), при этом $h=0.7$ мм и 1 мм, $t=s$ и $s/2$.

Как видно на рис.3-4, установка ребер на поверхности ленты приводит к росту теплоотдачи и гидравлического сопротивления.

При однофазном течении использование ребер с навитой по направлению скручивания лентой с высотой ребер $h=1.5$ мм дает такой же прирост теплоотдачи как использование ребер напаянных против направления скручивания с $h=0.7$ мм (от 14 до 21 %). При этом последние имеют заметно меньший прирост гидравлического сопротивления, что особенно заметно при относительно небольшой закрутке $s/d=6$: 25% с ребрами против направления скручивания и 50% – по направлению скручивания. Таким образом, каналы с лентами, имеющими ребра, установленные против скручивания ленты имеют большую теплогидравлическую эффективность даже при меньшей высоте ребер.

Также отмечено, что при однофазном движении использование ребер на лентах менее эффективно при больших степенях закрутки ($s/d=2.5$). Это может быть вызвано тем, что большая степень закрутки и так приводит к высокой турбулизации потока, и установка ребер больше увеличивает гидросопротивление, чем теплоотдачу (увеличивается трение потока на ленте).

Можно отметить, что уменьшение шага установки ребер (увеличение частоты постановки ребер) и увеличение высоты ребер также увеличивают теплоотдачу. Но гидравлическое сопротивление растет при этом значительно больше.

Сравнение использования ребер, навитых по направлению скручивания ленты с контактом между ребрами и стенкой в торцевой точке ленты и без контакта (в виде прошивки ребер) показывает, что в первом случае эффективность выше. Это связано с тем, что при прохождении ребер вблизи со стенкой они вызывают дополнительную турбулизацию течения вблизи стенки.

Следует отметить, что закручивающие устройства в виде скрученных лент с ребрами на поверхности разработаны для интенсификации теплооб-

мена при двухфазных шнуровидных течениях. Тем не менее, при однофазном течении использование лент с ребрами также позволяет заметно повысить теплоотдачу в трубе по сравнению с использованием лент без ребер – до 40% при росте гидросопротивления на 65%. Однако это проявляется в основном при относительно небольших степенях закрутки ($s/d=6$). При больших степенях закрутки ($s/d=2.5$) прирост гидросопротивления значительно опережает прирост теплоотдачи.



Рис.3. Зависимость теплоотдачи труб с различными скрученными лентами при $s/d=6$ от числа Рейнольдса Re

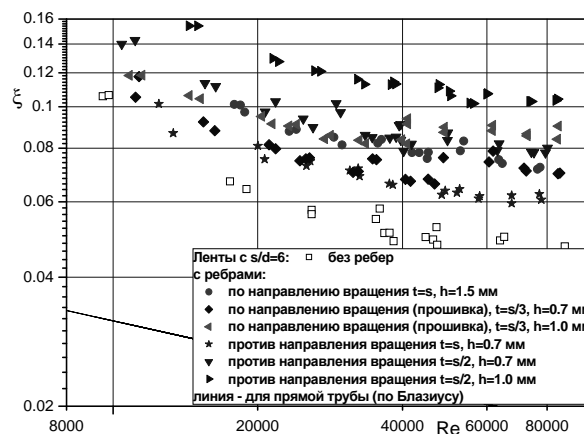


Рис.4. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления труб с различными скрученными лентами при $s/d=6$ от числа Рейнольдса Re

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- По результатам визуализации показана возможность эффективного использования скрученных лент с дискретно установленными под углом к оси ленты ребрами для интенсификации тепло-

массообмена в каналах при двухфазных течениях, особенно при кипении. Данные устройства также могут быть использованы и для интенсификации теплообмена при однофазных те-

чениях.

- Первичные результаты показывают, что наиболее эффективно нанесение ребер под углом к оси ленты против направления скручивания ленты.
- Необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований теплоотдачи и гид-

равлического сопротивления каналов с предложенными закручивающими устройствами, в том числе при кипении, для поиска оптимальных параметров предложенных устройств для интенсификации теплообмена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Manglik R. M., and Bergles A. E. Swirl Flow Heat Transfer and Pressure Drop with Twisted-Tape Inserts // *Advances in Heat Transfer*. – 2002. – Vol. 36. – P. 183-266.
2. Тарасевич С.Э., Щелчков А.В., Яковлев А.Б. Структура адиабатных двухфазных течений в каналах с закручивающими вставками // Труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях». М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – Т. 2. – С. 143-146.
3. Теплопередача в двухфазном потоке. Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюита. Пер. с англ. М.: Энергия, 1980. – 328 С.
4. Bergles A.E., Fuller W.D., Hynek S.J. Dispersed flow film boiling of nitrogen with swirl flow // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 1971. – Vol. 14. – P. 1343-1354.
5. Kedzierski, M. A., and Kim, M. S. Convective Boiling and Condensation Heat Transfer with a Twisted-Tape Insert for R12, R22, R152a, R134a, R290, R32/R134a, R32/R152a, R290/R134a, R134a/R600a. Report NISTIR 5905. – National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. – 1997. – 94 p.