

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В КАНАЛАХ С ОРЕБРЕННЫМИ СКРУЧЕННЫМИ ЛЕНТАМИ

Тарасевич С. Э., Яковлев А. Б., Шишкин А. В., Гиниятуллин А. А.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева-КАИ,

Казань, Россия, dobryh@yandex.ru

В работе представлены результаты исследования тепломассообмена в трубах со вставленными скрученными лентами, имеющими на поверхности ребра, дискретно установленные под углом к оси ленты. Экспериментальные данные подтверждены и дополнены результатами численного моделирования. Ребра на ленте способствуют перемещению потока с поверхности ленты к теплообменной поверхности трубы. Выполнены анализ структуры потока и теплоотдачи при ламинарном и турбулентном режимах течения и анализ профилей скорости в таких каналах. Показана возможность эффективного использования скрученных ленточных вставок для

ВВЕДЕНИЕ

Скрученные ленточные вставки являются одними из эффективных устройств для повышения теплоотдачи в различных каналах при одно - и двухфазных течениях. Они отличаются простота производства и установки в каналах и позволяют выполнять довольно дешевую модернизацию существующего оборудования теплообмена. Результаты исследований теплогидравлических характеристик в каналах с простыми и модифицированными скрученными лентами представлены в работах [1-10] и многих других. Наиболее детализированные обзоры таких исследований выполнены в [11, 12]. Основная особенность структуры двухфазного газожидкостного течения в трубах со вставленными скрученными лентами является то, что часть жидкой фазы всегда двигается в форму шнура по самой ленте, не являющейся активной теплообменной поверхностью (рис. 1, 2) [13-16]. При кипении это

может приводить к увеличению длины канала, необходимой для полного испарения и возникновению более раннего кризиса теплообмена.

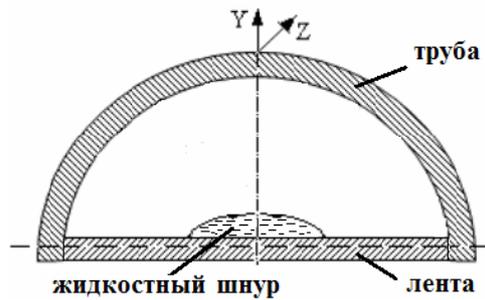


Рис. 1. Картина шнуровидного режима в поперечном сечении канала [13]

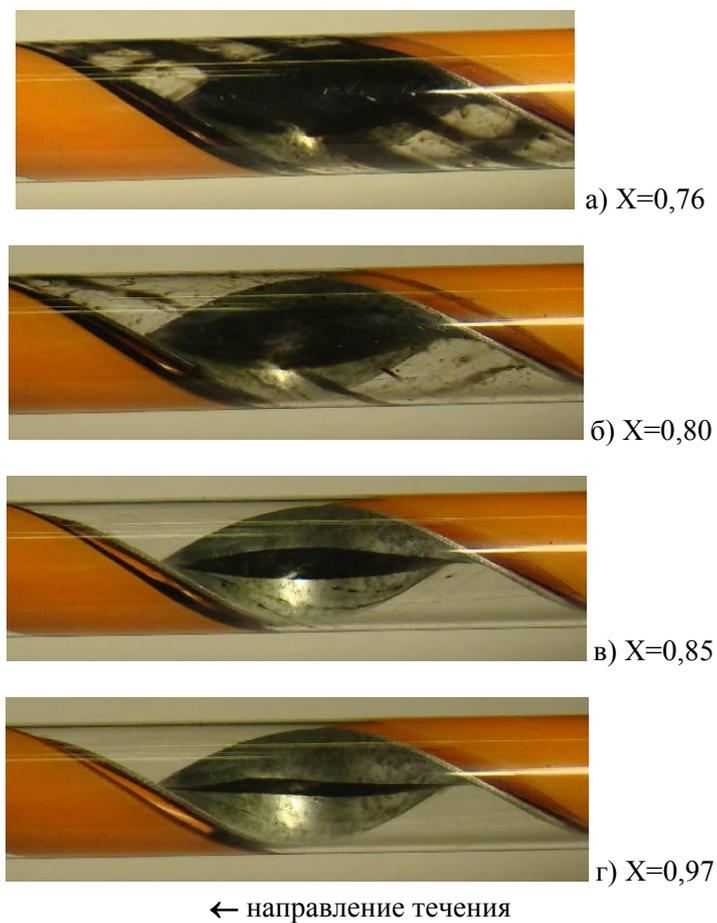


Рис. 2. Фотография шнуровидных течений в трубе со вставленной скрученной лентой при изменении газосодержания (жидкость подкрашена темной краской, половина канала заглушена): $G=7$ г/с, $p=0,13$ МПа, $S/d=3$

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 [17] (рис. 3). Это позволяет смещать часть теплоносителя, движущегося по ленте, непосредственно к теплообменной поверхности канала, в который вставлена скрученная лента.

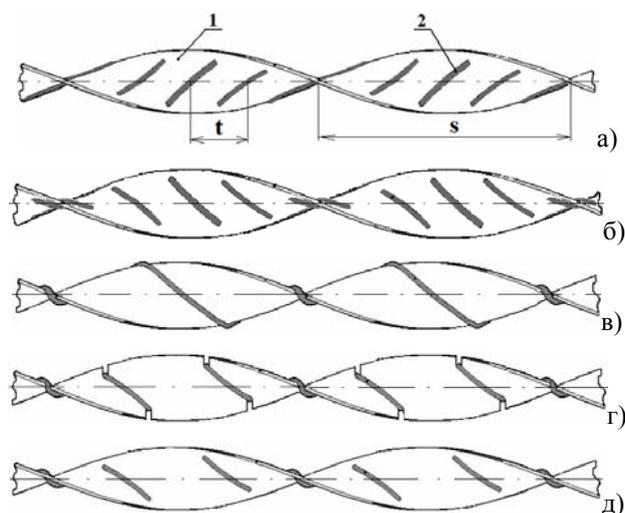


Рис. 3. Скрученная лента с ребрами на ее поверхности под углом к оси ленты (1 - скрученная лента, 2 – ребра): а) ребра расположены против направления скручивания ленты; б) ребра расположены по направлению скручивания; в) ребра в виде проволоки навитой на ленту по направлению ее скручивания с выступом 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 ТЕЧЕНИЙ В ТРУБАХ С ОРЕБРЕННЫМИ СКРУЧЕННЫМИ ЛЕНТАМИ

Визуализация адиабатных двухфазных (воздушно-водяных) течений проводилась в горизонтально расположенной стеклянной трубе ($L=800$ мм, $d=18$ мм) со вставленной скрученной лентой ($s/d=2.5\dots 6$) при $p=0.1\dots 0.2$ МПа. Результаты исследований показали, что наличие ребер на ленте действительно приводит к отсутствию шнура на ленте [14-16], что должно позитивно сказаться при использовании данного устройства при кипении. Наилучшие результаты по разрушению шнуровидных течений на ленте и устойчивости кольцевого течения (без сухих пятен) на стенке трубы показало применение интенсификатора в виде скрученной ленты с ребрами на ее поверхности, расположенными под углом 45° к оси ленты против направления ее скручивания (рис.3-а, 4): при этом жидкость более равномерно распределяется

по поверхности трубы (рис. 5). При расположении ребер по направлению скручивания ленты (рис. 3, б-д) шнур на ленте также отсутствует, но основная доля жидкости, как и в трубе с обычной скрученной лентой, скапливается у передней по потоку кромки ленты.

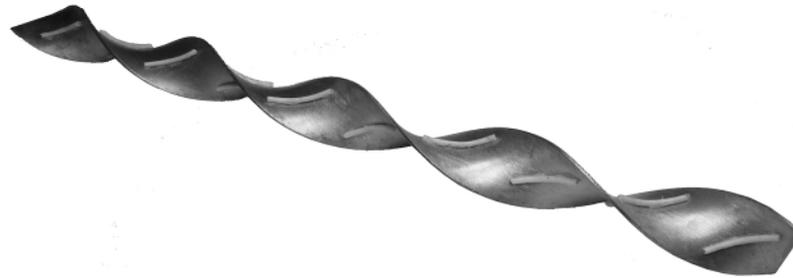


Рис. 4. Фотография скрученной ленты с ребрами, установленными против направления ее скручивания

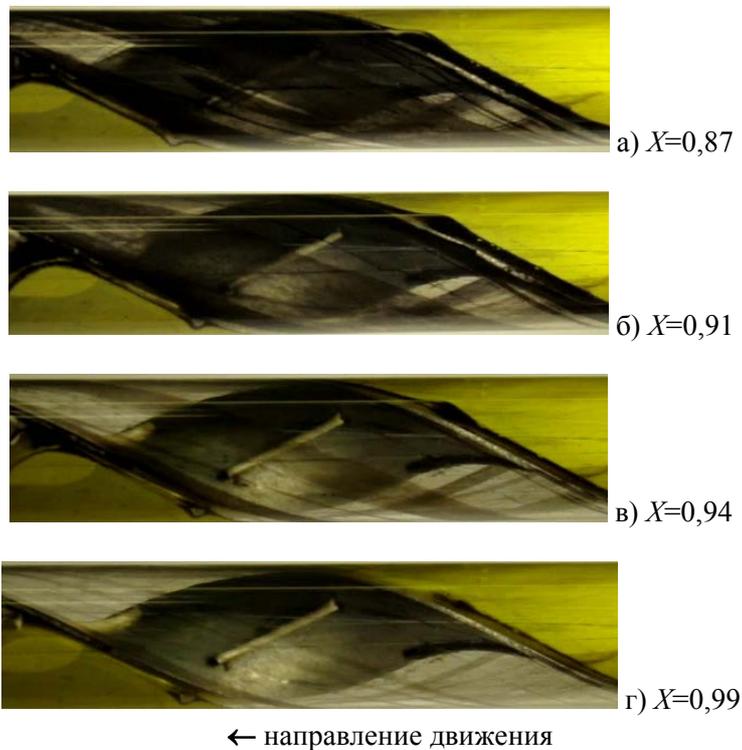


Рис. 5. Фотография двухфазных течений при изменении газосодержания в трубе со вставленной скрученной лентой с ребрами на ее поверхности, расположенными под углом к оси ленты против направления ее скручивания (жидкость подкрашена темной краской, половина канала заглушена): $G=14,5$ г/с, $p=0,15$ МПа, $s/d=3$, $h=1$ мм, $t=18$ мм

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ И ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТРУБ С ОРЕБРЕННЫМИ СКРУЧЕННЫМИ ЛЕНТАМИ

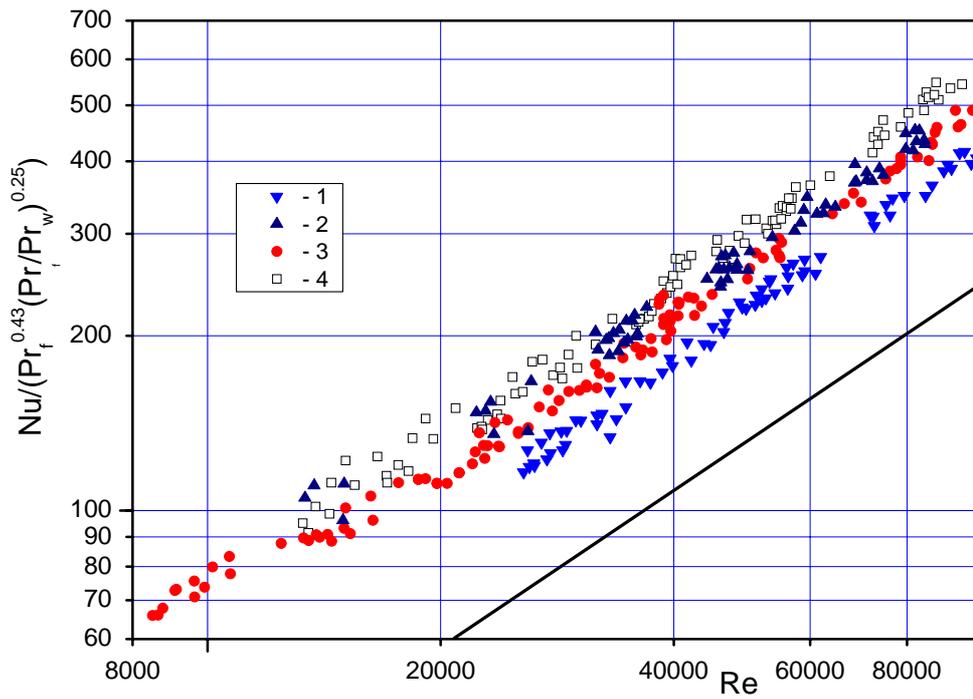
При исследовании теплообмена подвод теплоты осуществлялся электроконтактным методом – пропусканием электротока непосредственно через трубу, изготовленную из нержавеющей стали. Для организации закрутки потока в участок устанавливалась скрученная лента толщиной 0.7 мм и шириной равной внутреннему диаметру трубы ($s/d=2.5\dots 6.0$). Лента покрывалась высокотемпературным лаком для обеспечения электрической изоляции со стенкой канала. На ребра также различными способами устанавливались ребра согласно схемам на рис. 3. В частности, ребра образовывались путем навивки на ленту через пазы в ней согласно рис. 3,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. 3,д ($h=1.5$ мм, $t=s/3$). Также ребра напаялись против направления скручивания ленты (рис. 3,а), при этом $h=0.7$ мм и 1 мм, $t=s$ и $s/2$.

Результаты исследования теплоотдачи при турбулентном режиме течения представлены на рис. 6-7. Как видно, 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 [15, 16]. При этом последние имеют заметно меньший прирост гидравлического сопротивления, что особенно заметно при относительно небольшой закрутке ($s/d=6$). 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. Уменьшение шага установки ребер (увеличение частоты постановки ребер) и увеличение высоты ребер также увеличивают теплоотдачу. Но гидравлическое сопротивление растет при этом значительно больше.

Несмотря на то, что оребренные скрученные ленты разработаны для интенсификации теплообмена

при двухфазных шнуровидных течениях, при однофазном турбулентном течении их использование также позволяет заметно повысить теплоотдачу в трубе по сравнению с использованием лент без ребер – до 40% при росте гидросопротивления на 65%. Однако наибольшее увеличение теплоотдачи (до двух раз и более) может быть получено при использовании оребренных лент вместо классических при ламинарном течении (рис. 8). При этом использование лент с ребрами, установленными против направления скручивания, также позволяет получить более значительный прирост теплоотдачи



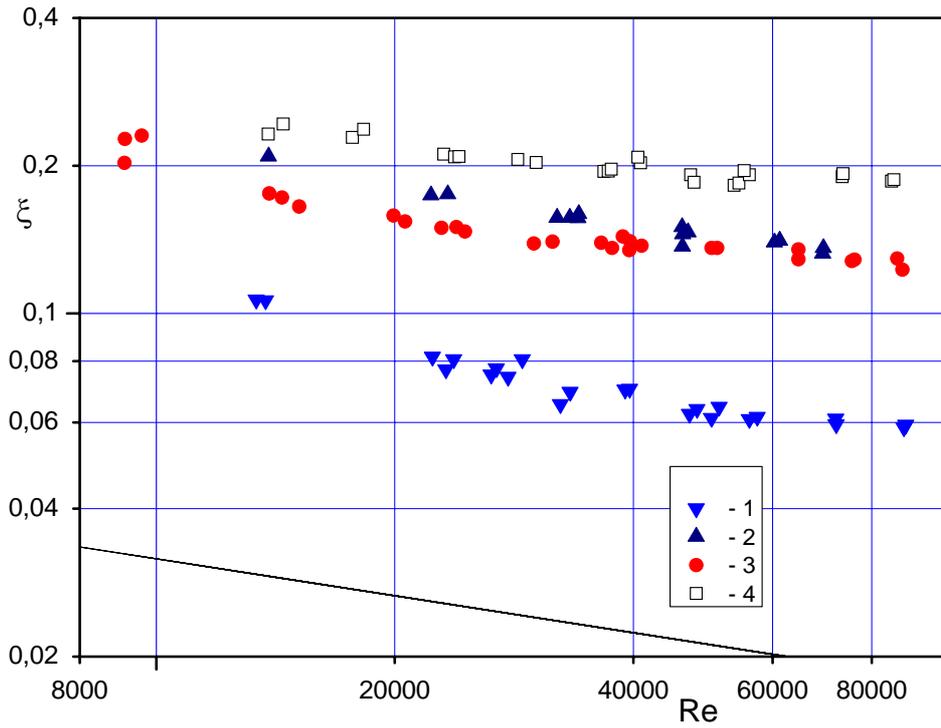
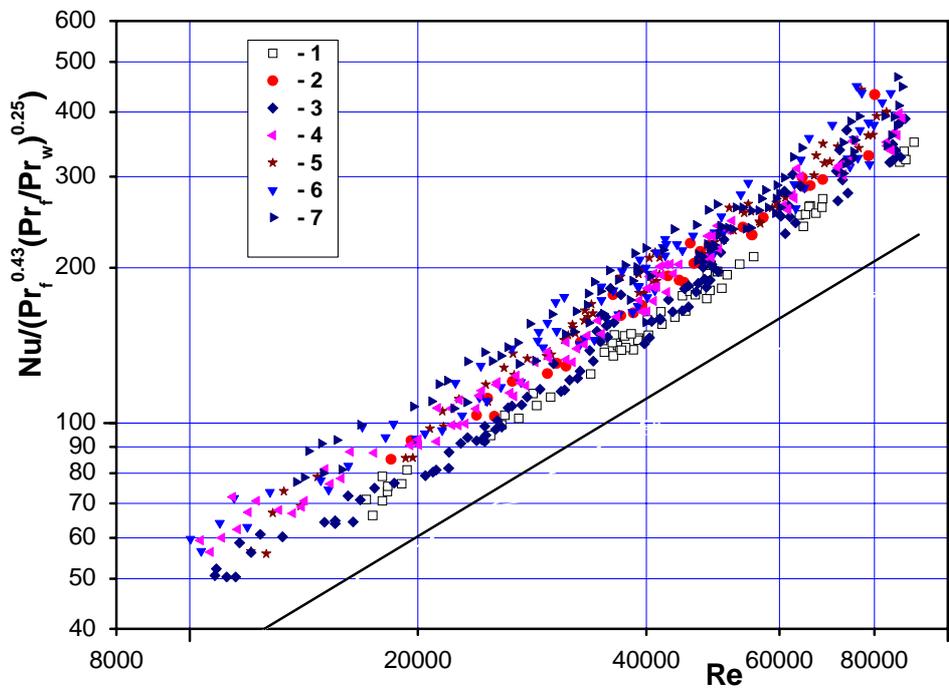


Рис. 6. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление труб с различными скрученными лентами ($s/d=2.5$) при турбулентном течении: 1 – без ребер; 2 – ребра в виде проволоки навитой на ленту по направлению ее скручивания (в соответствии с рис. 3, г) без зазора между стенкой трубы и ребром ($t=2/3s, h=1.5 \text{ mm}$); 3 – ребра против направления скручивания (в соответствии с рис.3, а; $t=s, h=0.7 \text{ mm}$); 4 - ребра против направления скручивания (в соответствии с рис.3, а; $t=s/2, h=0.7 \text{ mm}$); линия – расчет для прямой трубы по М.А.Михееву



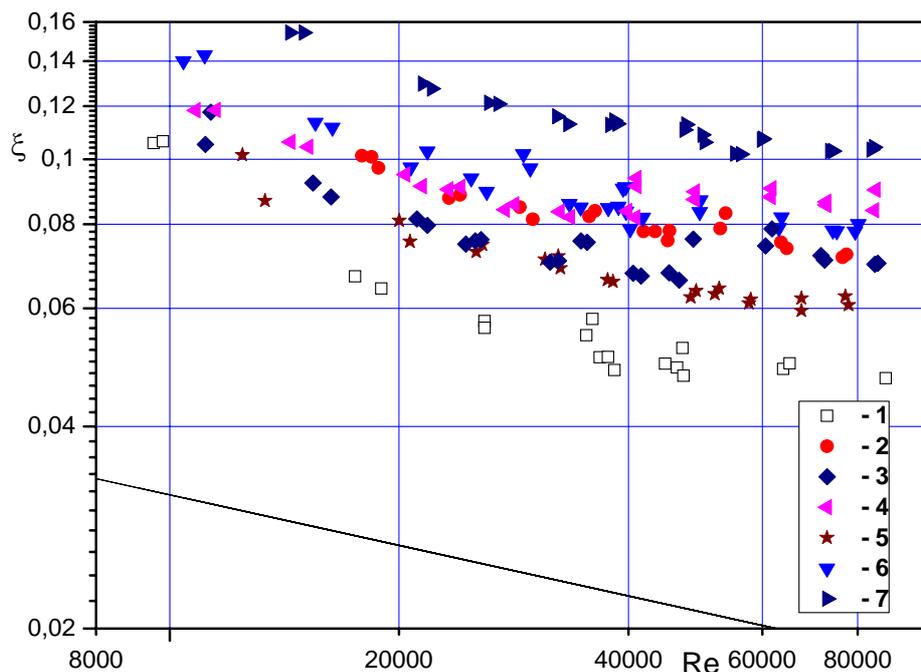
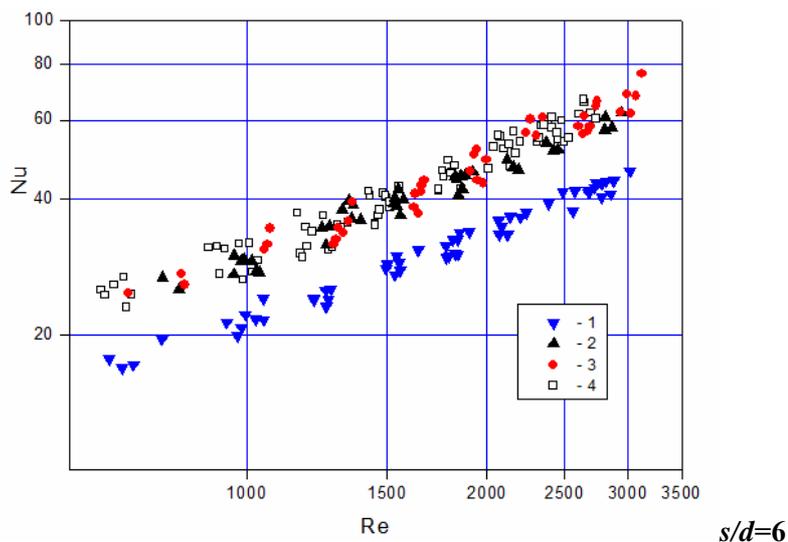


Рис. 7. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление труб с различными скрученными лентами ($s/d=6$) при турбулентном течении: 1 – без ребер; 2 – ребра в виде проволоки навитой на ленту по направлению ее скручивания (в соответствии с рис. 3, г) без зазора между стенкой трубы и ребром ($t=2/3s, h=1.5 \text{ mm}$); 3 – ребра в виде проволоки навитой на ленту через отверстия в ленте по направлению ее скручивания (в соответствии с рис.3, д; $t=s/3, h=0.7 \text{ mm}$); 4 - ребра в виде проволоки навитой на ленту через отверстия в ленте по направлению ее скручивания (в соответствии с рис.3, д; $t=s/3, h=1 \text{ mm}$); 5 - ребра против направления скручивания (в соответствии с рис.3, а; $t=s, h=0.7 \text{ mm}$); 6 - ребра против направления скручивания (в соответствии с рис.3, а; $t=s/2, h=0.7 \text{ mm}$); 7 - ребра против направления скручивания (в соответствии с рис.3, а; $t=s/2, h=1 \text{ mm}$); линия – расчет для прямой трубы по М.А.Михееву



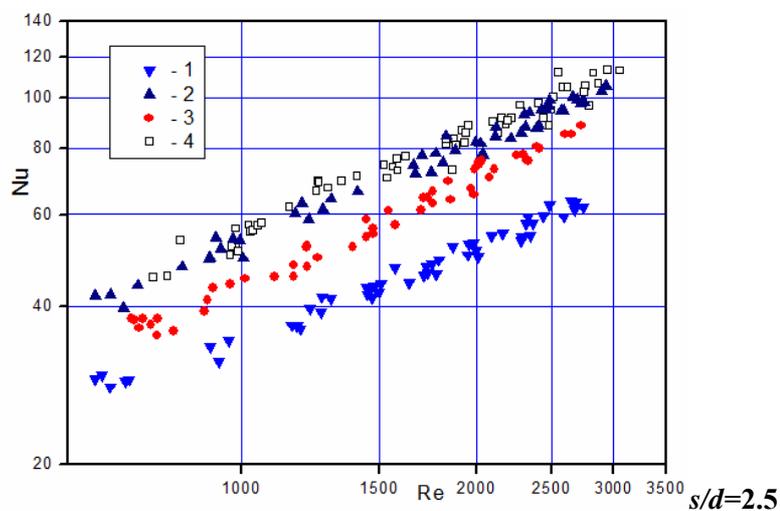
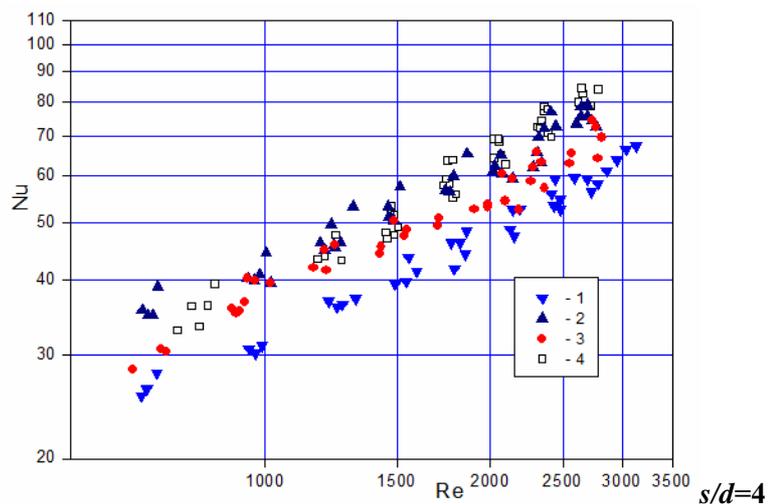


Рис. 8. Теплоотдача труб с различными скрученными лентами при ламинарном течении: 1 – без ребер; 2 – ребра в виде проволоки навитой на ленту по направлению ее скручивания (в соответствии с рис. 3, г) без зазора между стенкой трубы и ребром ($t=2/3s$, $h=1$ mm); 3 - ребра в виде проволоки навитой на ленту через отверстия в ленте по направлению ее скручивания (в соответствии с рис.3, д; $t=s/3$, $h=1$ mm); 4 - ребра против направления скручивания (в соответствии с рис.3, а; $t=s$, $h=0.5$ mm)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОМАСООБМЕНА В ТРУБАХ С РАЗЛИЧНЫМИ СКРУЧЕННЫМИ ЛЕНТОЧНЫМИ ВСТАВКАМИ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ТЕЧЕНИИ

Численное исследование было проведено для течения в трубе с диаметром $d=10$ мм для подтверждения и уточнения результатов экспериментальных исследований при ламинарном течении теплоносителя. Исследование выполнено средствами коммерческого пакета ANSYS FLUENT. Математическое моделирование включало расчет течения и теплообмена. Рабочей жидкостью была вода с постоянными физическими свойствами. Течение в трубе со

вставленной скрученной лентой принималось установившимся и ламинарным. Для решения уравнений сохранения был использован метод конечных объемов. В процессе моделирования решались уравнения энергии, неразрывности и движения в трехмерной постановке.

Неструктурированная тетраэдрическая сетка была построена в сеточном генераторе ANSYS ICEM CFD. Была сделана многократная градиентная адаптация сетки, для получения решения независимого от размера сетки (рис. 9).

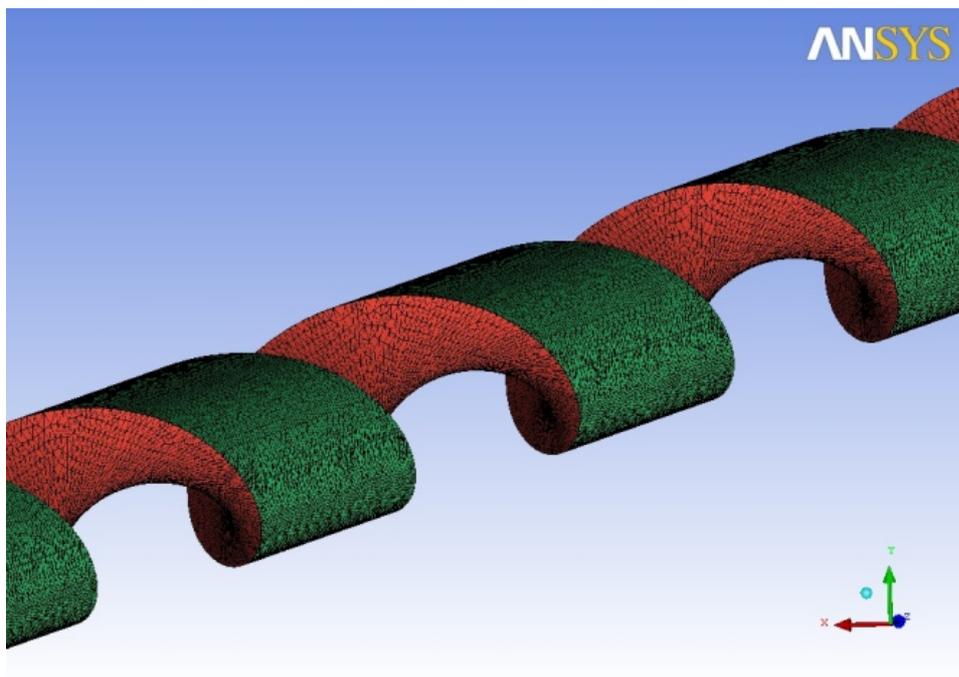


Рис. 9. Расчетная область половины канала, образованной стенкой трубы и скрученной лентой
Размер пристенных ячеек удовлетворяет условию

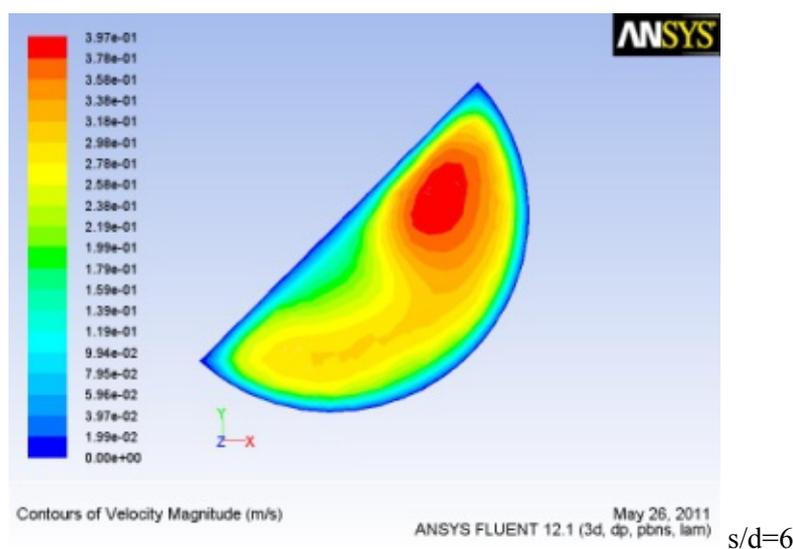
$$y_p \sqrt{\frac{u_\infty}{\nu_x}} \leq 1,$$

где y_p – расстояние до стенки от центра первой ячейки, u_∞ - скорость невозмущенного потока, ν_x – кинематическая вязкость жидкости на расстоянии x .

Профили осевой скорости в сечении трубы при различных шагах закрутки гладкой ленты представлены на рис. 10. Показано смещение максимума профиля скорости под действием

центробежных сил к вогнутой поверхности стенки трубы. Отчетливо видно, что с уменьшением относительного шага закрутки смещение максимума профиля скорости становится все более значительным. Есть зона в центральной части ленты с малым значением осевой скорости. В данных областях как раз образуется «шнур» при течении газожидкостного потока с большим газосодержанием в трубе со скрученной лентой. Поэтому можно предположить, что данное явление имеет чисто гидродинамическую природу.

Температура стенки растет вниз по потоку. Необходимо отметить, что температура стенки неоднородна в каждом отдельно взятом сечении трубы (рис. 11). На рис. 12 представлен график неоднородности температуры в осевом направлении на одном шаге ленты $s=25$ mm. Неравномерность температуры в 12 °C обнаружена для ленты с относительным шагом закрутки $s/d=2.5$. Это объясняет лучшую теплогидравлическую эффективность скрученных лент, имеющих ребра, установленные против направления скручивания ленты. В этом случае ребра смещают часть теплоносителя непосредственно в зону с повышенной температурой стенки и тем самым выравнивают температурную неоднородность стенки (рис.13). Ребра, установленные по направлению скручивания ленты имеют обратный эффект, т.е способствуют дополнительному смещению профиля скорости и температуры (рис.14).



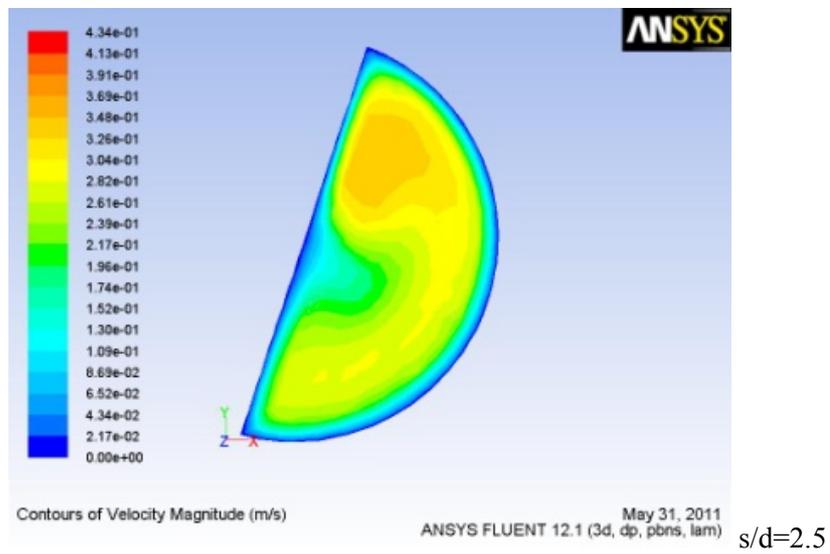
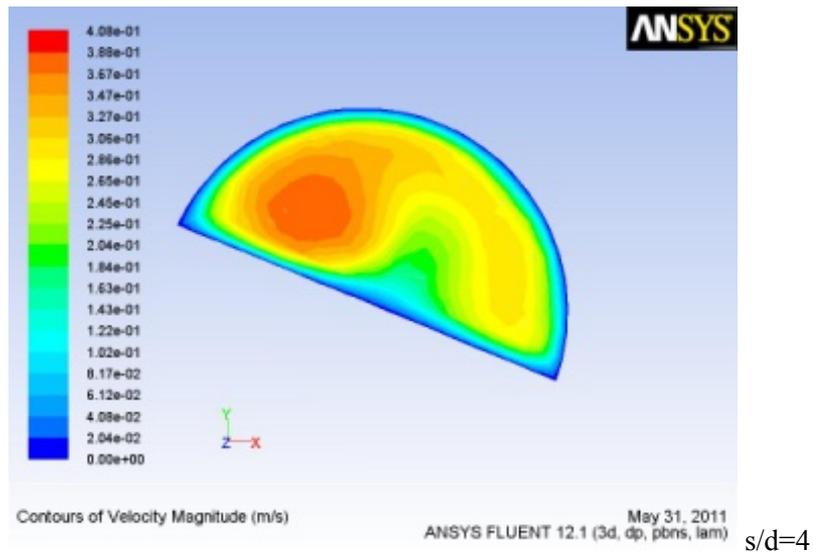


Рис. 10. Профили осевой скорости в различных сечениях канала при различных шагах закрутки s/d ($Re=2600$)

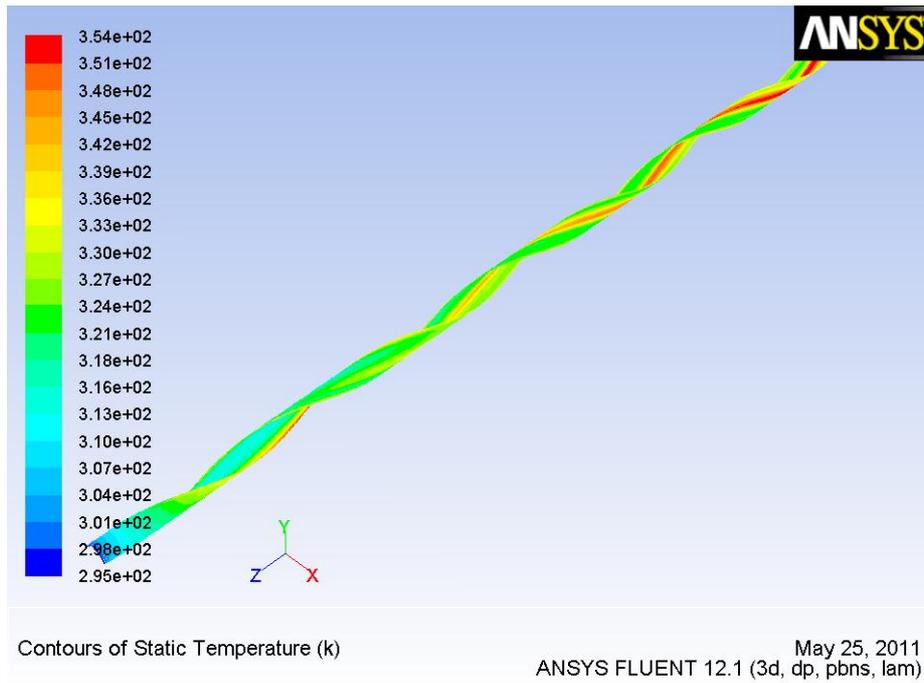


Рис. 11. Неравномерность температуры стенки

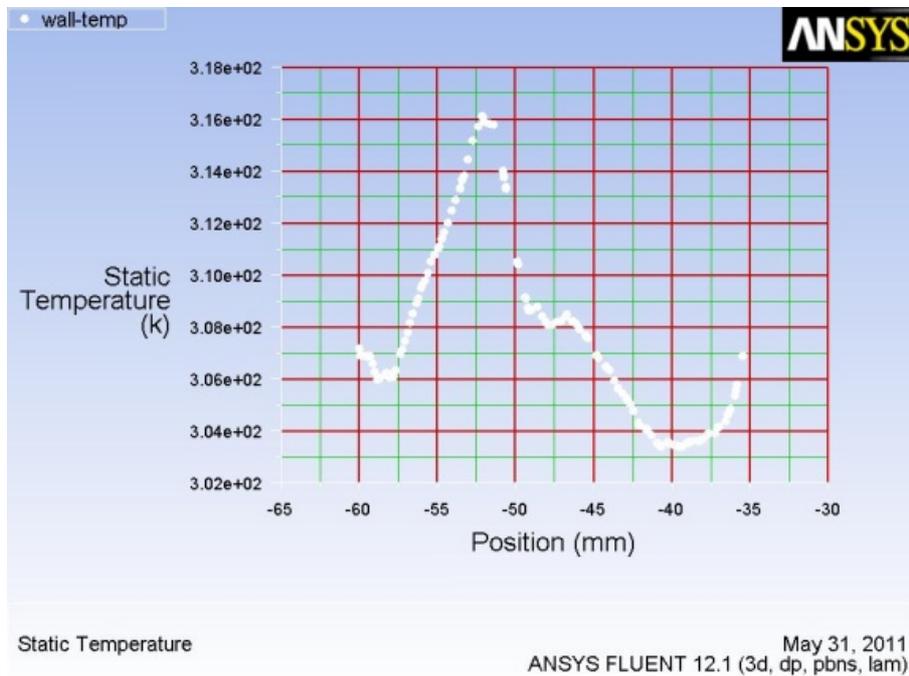


Рис. 12. Неравномерность температуры стенки на одном шаге ленты $s/d=2.5$

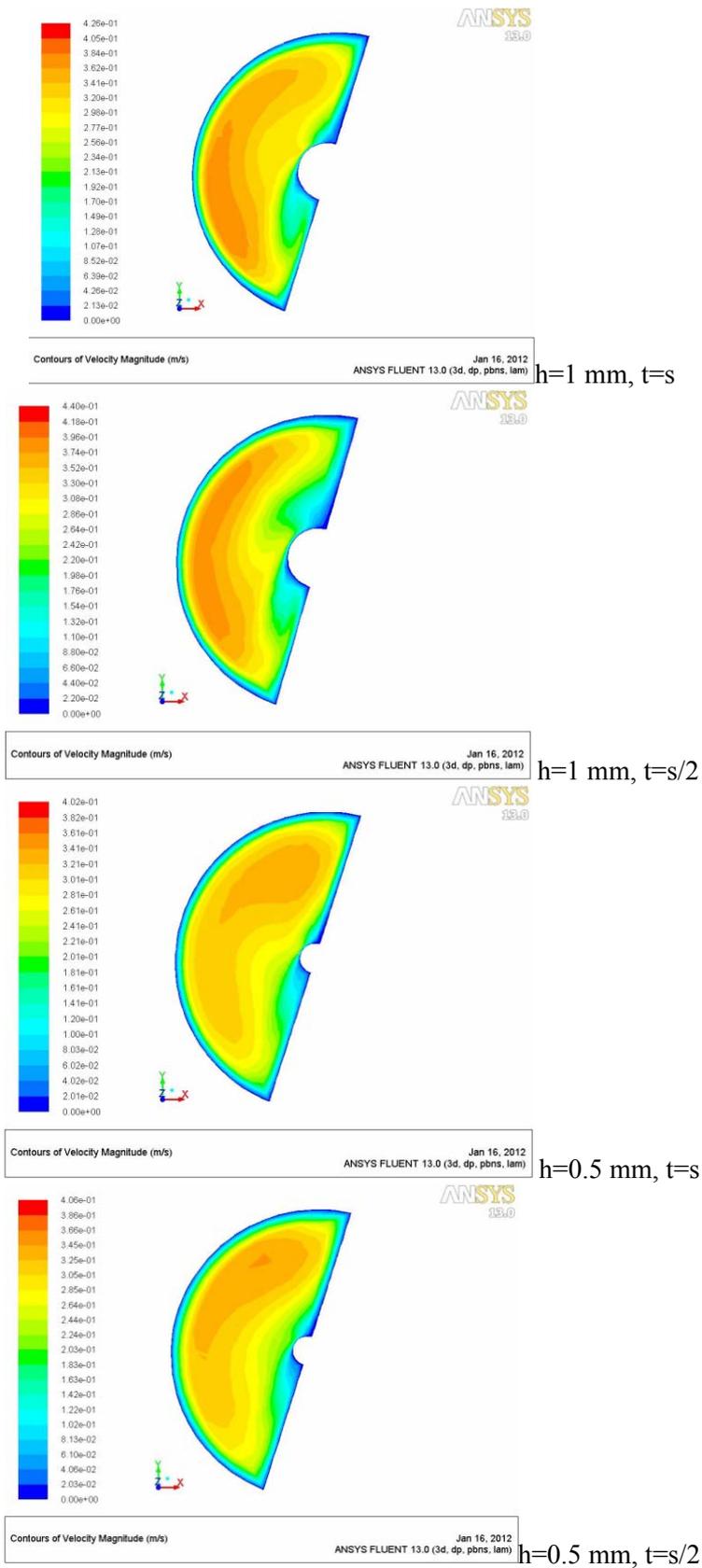


Рис. 13. Профили осевой скорости в сечении трубы со скрученной лентой, имеющей ребра против направления скручивания ленты ($s/d=2.5$, $Re=2600$)

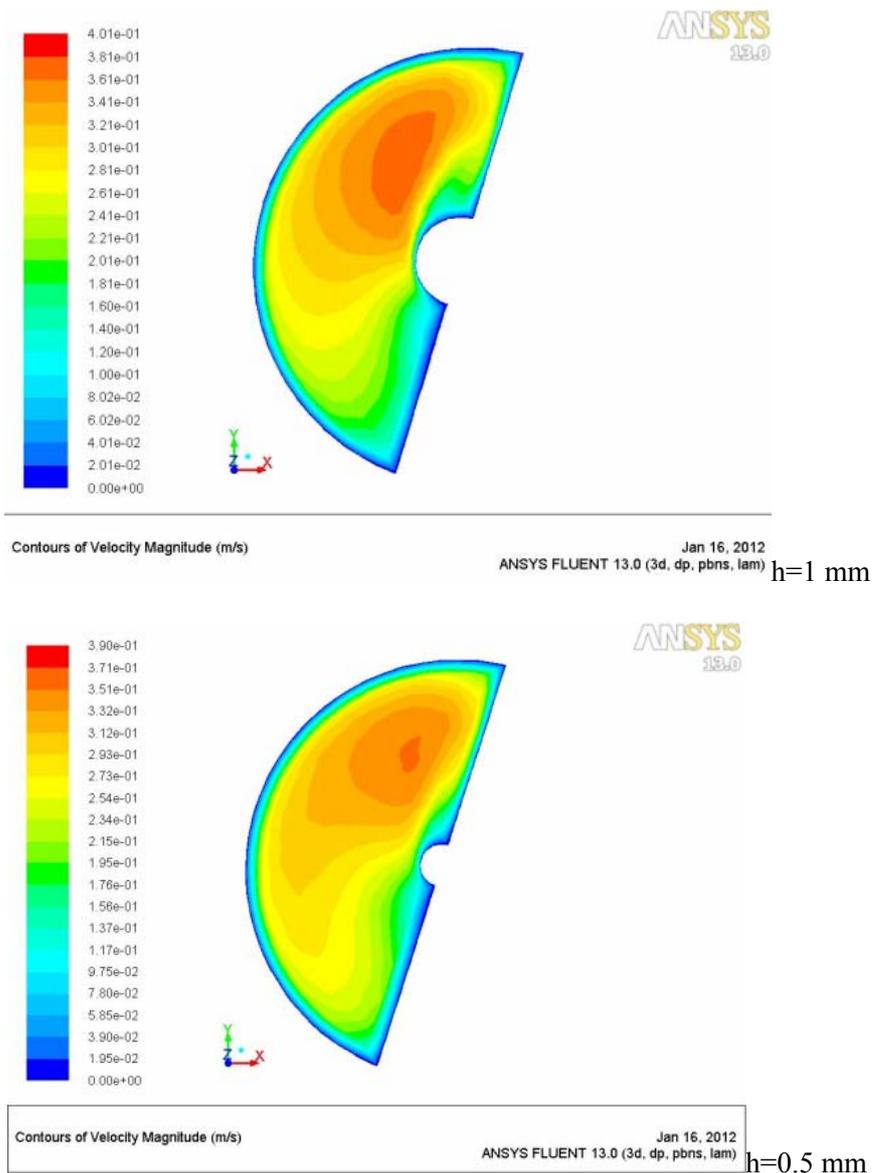


Рис. 14. Профили осевой скорости в сечении трубы со скрученной лентой, имеющей ребра по направлению скручивания ленты ($s/d=2.5$, $t=s$, $Re=2600$)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность эффективного использования скрученных оребренных ленточных вставок для интенсификации тепломассообмена в каналах.

Результаты экспериментального и численного исследований показывают, что применение скрученных лент с ребрами, установленными под углом к оси ленты против направления ее скручивания, наиболее эффективно.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

d – внутренний диаметр канала;

G – массовый расход потока;

h – высота ребер на ленте;

L – длина канала;

Nu – число Нуссельта по эквивалентному диаметру в осевом сечении канала;

p – давление;

Pr – число Прандтля;

Re – число Рейнольдса по эквивалентному диаметру в осевом сечении канала;

s – шаг поворота ленты при повороте на 180° ;

t – шаг между ребрами;

X – относительное массовое среднерасходное газосодержание;

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления, $\xi = \frac{2\Delta P d}{\rho V^2 L}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smithberg, R. and F. Landis, 1964, “Friction and forced convection heat transfer characteristics in tubes with twisted tape swirl generators”, *Journal of Heat Transfer*, 87, pp.39–49.
2. Lopina, R.F. and Bergles, A.E., 1969, “Heat transfer and pressure drop in tape-generated swirl flow of single-phase water”, *ASME Journal Heat Transfer*, 91, pp. 434-442.
3. Bergles, A.E., Fuller, W.D., and Hynek S.J., 1971, “Dispersed flow film boiling of nitrogen with swirl flow”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 14, pp. 1343-1354.
4. Kedzierski, M.A., and Kim, M.S., 1997, “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.

5. Kumar, A. and Prasad, B.N., 2000, "Investigation of twisted tape inserted solar water heaters-heat transfer, friction factor and Thermal performance results", *Renewable Energy Journal*, 19, pp. 379-398.
6. Saha, S.K. and Dutta, A., 2001, "Thermohydraulic Study of Laminar Swirl Flow Through a Circular Tube Fitted With Twisted Tapes," *ASME, Journal of Heat Transfer*, 123, pp 417-425.
7. Ray, S. and Date, A.W., 2003, "Friction and Heat Transfer Characteristics of Flow through Square Duct with Twisted Tape Insert", *International Journal Heat and Mass Transfer*, 46, pp. 889-902.
8. Ahamed, J. U., Rashid Sarkar, M. A., Khan, M. H. and Wazed, M. A., 2007, "Heat Transfer In Turbulent Flow Through Tube With Perforated Twisted Tape Insert", *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering (ICME2007)*, Dhaka, Bangladesh, paper ICME07-TH-05, pp.1-8.
9. Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S. and Srinivasan, P.S.S., 2009, "Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Turbulent Flow In a Tube Fitted With Trapezoidal-Cut Twisted Tape Insert ", *International Journal of Academic Research*, 1 (1), pp.123-128.
10. Chiu, Yu-Wei and Jang, Jiin-Yuh, 2009, "3D numerical and experimental analysis for thermal-hydraulic characteristics of air flow inside a circular tube with different tube inserts", *Applied Thermal Engineering*, 29, pp.250-258.
11. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. М.: Машиностроение, 1980, 240 с..
12. Manglik, R. M., and Bergles, A. E., 2002, "Swirl Flow Heat Transfer and Pressure Drop with Twisted-Tape Inserts", *Advances in Heat Transfer*, 36, pp. 183-266.
13. 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 тепломассообмена в аэрокосмических технологиях». М.: Издательский дом МЭИ, 2009. Т. 2. С. 143-146.

14. Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Шишкин А.В. Особенности структуры адиабатных двухфазных течений в каналах с закручивающими вставками // Труды Пятой Российской Национальной конференции по теплообмену. Т.6. Двухфазные течения. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С.108-111.

15. Тарасевич С. Э., Яковлев А. Б., Гиниятуллин А. А., Шишкин А. В. Особенности тепломассообмена в трубах с различными закручивающими ленточными вставками // Тепловые процессы в технике, 2011, №3, с.133-139.

16. Tarasevich S.E., Yakovlev A.B., Giniatullin A.A., Shishkin A.V., 2011, "Heat And Mass Transfer In Tubes With Various Twisted Tape Inserts", Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2011, Denver, Colorado, USA. Paper IMECE2011-62088, pp. 1-6.

17. Яковлев А.Б., Тарасевич С.Э., Ильин Г.К., Щелчков А.В. Устройство для интенсификации теплообмена в каналах различного поперечного сечения / Патент на изобретение RU № 2432542 С2, заявка № 2009147927 от 22.12.2009.