

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ ХЛАДАГЕНТА R134A В КАНАЛАХ СО ВСТАВКАМИ В ВИДЕ СКРУЧЕННЫХ ЛЕНТ

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

*Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева –
КАИ, Казань, Россия*

Работа выполнена в рамках Проектной части государственного задания N13.262.201.2014К.
«Разработка эффективного поршневого уплотнения для двигателей внутреннего сгорания,
работающих на сжиженном газообразном топливе с добавлением воды в рабочем процессе»
(руководитель д.т.н., проф. Гуреев В.М.).

АННОТАЦИЯ

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования теплоотдачи при течении хладагента R134a в каналах со вставленными скрученными гладкими и оребренными лентами в условиях вынужденной конвекции.

К одному из способов интенсификации теплообмена относится закрутка потока. Среди многообразия конструктивных элементов позволяющих закручивать поток, широкое

применение в использовании получили вставки в виде скрученных лент, т.к. они недороги в изготовлении и могут быть легко использованы для модернизации существующих кожухотрубных теплообменников. Кроме того, конструкция теплообменников с использованием скрученных лент позволяет существенно сократить весогабаритные характеристики при заданной тепловой нагрузке, тем самым, снижая капиталовложения.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время область применения скрученных лент не ограничивается только применением в кожухотрубных теплообменниках, например охлаждение диверторной кассеты ITER (Международный термоядерный реактор) осуществляется недогретым до температуры насыщения, закрученным с помощью вставленных на всю длину скрученных лент, потоком воды при уровне тепловых нагрузок до 20 МВт/м².

Использование скрученных лент позволяет обеспечивать безаварийное и эффективное

охлаждение различных энергонапряженных элементов при высоких плотностях теплового потока, расширяя область применения в качестве турбулизаторов закручивающих пристенные слои при однофазном течении теплоносителя, при течении двухфазных потоков обеспечивают увеличение коэффициента теплоотдачи, за счет закрутки потока происходит выравнивание температурных неоднородностей в азимутальном направлении.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последнее время наряду с исследованиями классических скрученных лент, большое внимание стали уделять скрученным лентам модифицированной геометрии [1, 2, 3].

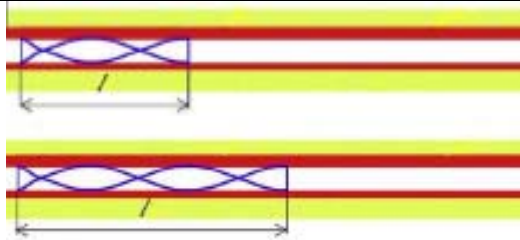

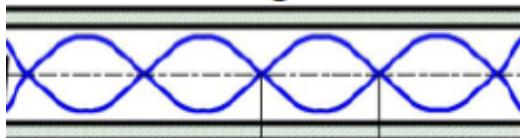
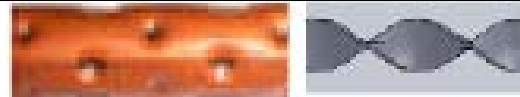

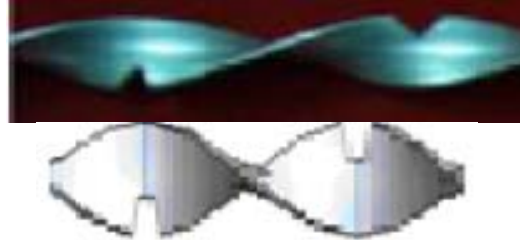
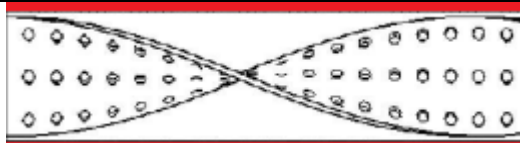


В работах [1, 2, 3] представлен широкий обзор скрученных лент с различной геометрией, в таблице 1.1 представлены схематичные изображения модифицированных скрученных лент.

Исследования теплоотдачи в каналах с вышеприведенными скрученными лентами

различной геометрии проведены при вынужденной конвекции теплоносителя. Авторы данных работ отмечают увеличение коэффициента теплоотдачи и гидросопротивления в каналах с модифицированными скрученными лентами по сравнению со скрученными лентами классической геометрии, особенно в ламинарной области [2], так же авторы едины во мнении о сложном механизме взаимодействия потока с измененной образующей скрученной ленты на структуру потока, и указывают

на необходимость поиска оптимальных | исследований.
геометрических параметров в дальнейших

Табл. 1.1 – Скрученные ленты модифицированной геометрией.

| № п/п | Авторы | Схематичное изображение модифицированной скрученной ленты | Описание |
|-------|------------------|---|--|
| 1 | [4, 5] |  | Установка скрученных лент с различными относительными длинами |
| 2 | [6, 7, 8] |  | Дискретно разнесенные скрученные ленты с различными относительными длинами |
| 3 | [9] |  | Установка ленты с щелевым зазором между стенкой |
| 4 | [10] |  | Установка ленты в «облуненную» трубу |
| 5 | [11, 12, 13, 14] |  | Скрученная лента с периодическим изменением закрутки по длине |
| 6 | [15, 16] |  | Скрученные ленты с различными вырезами |
| 7 | [17] |  | Скрученная лента с перфорацией |
| 8 | [18, 19] |  | Рассеченные скрученные ленты |
| 9 | [20] |  | Скрученная лента с отогнутыми сегментами по периферии |

| | | | |
|----|----------|--|--|
| 10 | [21, 22] |  | Установка двух скрученных лент в спирально-накатанную трубу |
| 11 | [23] |  | Установка скрученной ленты в канал совместно с коническими кольцами |
| 12 | [24] |  | Скрученная лента с вырезанной центральной частью |
| 13 | [25] |  | Скрученная лента с разделительными перегородками |
| 14 | [2] |  | Скрученная лента с ребрами на поверхности установленными против направления закрутки |

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении хладагента R134a в каналах со вставленной скрученной лентой выполнено на автоматизированном экспериментальном стенде лаборатории кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения» КНИТУ-КАИ им. А.Н.Туполева. Подробное описание экспериментального стенда представлено в работе [26]. Стенд состоит из: системы подачи рабочих тел; системы автоматической стабилизации рабочих параметров (давление, температура, расход); системы нагрева рабочего участка, системы измерений.

Система подачи рабочих тел включает в себя (основные элементы): поршневой компрессор 1 (Воск HGX22e/190-4s); воздушный конденсатор 5 (Q7-24 T-cool); ресивер 7 (Вескооl BC-LR, объем – 16 литров).

Система автоматической стабилизации рабочих параметров поддерживает задаваемые параметры потока.

Система нагрева рабочего участка обеспечивает требуемый омический нагрев рабочего участка переменным током с помощью трансформатора.

Система измерений обеспечивает съем, обработку и индикацию данных полученных в ходе проведения эксперимента.

Экспериментальный участок для проведения исследований теплогидравлических характеристик двухфазного потока при кипении хладагента R134a в прямых трубах, в том числе со вставленной скрученной лентой, представляет собой горизонтально расположенную нержавеющую трубу с внутренним диаметром $d=10$ мм, толщиной стенки $\delta=1$ мм, и длиной $L=500$ мм.

Соединение рабочего участка с магистралью фланцевое. На фланцах магистрали выполнены отверстия для отбора статического давления и отверстия для защитных гильз погружных термопар для регистрации показаний давления и температуры потока на входе и выходе из рабочего участка.

По всей длине рабочего участка равномерно расположены в 8 сечениях 16 термопар, по 2 в каждом сечении (0° , 270°). Корольки термопар изготовлены из проводов хромель-копель диаметром $d=0,2$ мм, и длиной $L=2100$ мм. Для каждой термопары получена индивидуальная тарировочная зависимость. Рабочий участок теплоизолирован. В рабочий участок вставляются скрученные ленты свободной посадкой.

Для электрической изоляции между лентой и стенкой канала, ленты покрывались порошковой термостойкой краской с последующим запеканием в печи.

Измерительная система построена на базе модульной платформы PXI/SCXI компании National Instruments. Измерительные и вспомогательные модули установлены в шасси NI PXI-1052, позволяющее установить до 4-х модулей формата PXI и 8-ми модулей формата SCXI.

Скорость сканирования по шине SCXI составляет 333 кГц. Таким образом, время между измерением

двух соседних каналов в одном «скане» равно 3 мс. Полное время опроса, обработки и записи экспериментальных данных в файл составляет 3.08 мсек.

Программирование системы производится в графической среде разработки LabVIEW.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Массовый расход теплоносителя рассчитывался по показаниям расходомера и температуры потока по тарировочной зависимости:

$$G = Q\rho = (0,00047305 + 0,0003805\text{Hz})\rho; \quad (1)$$

где Q – объемный расход [$\text{м}^3/\text{сек}$], Hz – показание расходомера [Гц], ρ – плотность теплоносителя в зоне расположения расходомера [$\text{кг}/\text{м}^3$].

Массовую скорость определяли как:

$$\rho w = \frac{G}{F} \quad (2)$$

где F – площадь поперечного сечения [м^2], которая определяется:

$$F = \frac{\pi d_{in}^2}{4} \quad (3)$$

Где d_{in} – внутренний диаметр канала [м].

Тепловая мощность, которая подводилась к рабочему участку вычисляется:

$$N = I\Delta U \quad (4)$$

где I – переменный ток проходящий через участок [А], ΔU – перепад напряжения на рабочем участке [В].

Потери тепловой мощности в окружающую среду были приняты равные нулю, т.к. рабочий участок был тщательно теплоизолирован.

Плотность теплового потока определялась выражением:

$$q_w = \frac{N}{F} \quad (5)$$

где F – площадь внутренней поверхности канала рабочего участка. В связи с тем, что ленты были электроизолированы термостойкой краской, а так же установка лент осуществлялась свободной посадкой, принималось тепловой поток через ленту равен нулю.

Температура потока в отдельных сечениях по длине рабочего участка определялась через уравнение теплового баланса, по подведенному теплу в каждом сечении:

$$t_{fi} = t_{inlet} + \left(\frac{\pi d_{in} \Delta x q_w}{GC_p'} \right) \quad (6)$$

где t_{inlet} – температура потока на входе в рабочий участок [$^{\circ}\text{C}$], Δx – расстояние от входа рабочего участка до i -того сечения [м], C_p' – теплоемкость жидкости [Дж/(кг·К)]

Температура внутренней стенки рабочего участка рассчитывалась:

$$t_{wi} = t_{exti} + \left(\frac{q_w \delta}{2\lambda} \right) \quad (7)$$

где t_{exti} – температура на внешней поверхности рабочего участка, измеряемой термопарой, λ – коэффициент теплопроводности стали 12X18H10T, [Вт/(м· $^{\circ}\text{C}$)]

Статическое давление в каждом сечении рабочего участка определялось путем линейной интерполяции между значениями давления на входе и выходе:

$$p_{fi} = (p_{inlet} + p_{bar}) - \left(\frac{\Delta p}{L} \right) \Delta x \quad (8)$$

где p_{inlet} – давление потока на входе в рабочий участок [Па], p_{bar} – барометрическое давление [Па], Δp – перепад давления между входом и выходом рабочего участка, L – расстояние между точками отбора статического и дифференциального давления.

Местный коэффициент теплоотдачи определялся по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$\alpha_i = \frac{q_w}{(t_{wi} - t_{fi})} \quad (9)$$

Данные о теплофизических свойствах хладагента R134a определялись по международной базе данных REFPROP Version 9.1 [27].

Для оценки работоспособности экспериментального стенда, а также для подтверждения достоверности получаемых результатов были проведены тестовые опыты по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции.

Экспериментальные данные по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции при течении однофазного потока хладагента R134a в прямой трубе сравнивались с расчетными значениями по формуле М.А. Михеева [28]. Максимальная относительная погрешность расчетных данных относительно опытных не превышает +1 и -15%.

Проведенные тестовые опыты по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции хладагента R134a показывают удовлетворительную работу экспериментального стенда и подтверждают достоверность получаемых результатов.

ТЕПЛОТДАЧА В КАНАЛАХ СО ВСТАВЛЕННЫМИ СКРУЧЕННЫМИ ЛЕНТАМИ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ТЕЧЕНИИ ХЛАДАГЕНТА R134A

Экспериментальное исследование теплоотдачи при вынужденном движении хладагента R134a в каналах со вставленными гладкими и оребренными скрученными лентами было выполнено на созданном экспериментальном стенде при следующих режимных параметрах: $Re=30000 \div 120000$; $q=0,7 \div 50$ кВт/м²; $p=0,4 \div 1,0$ МПа; диаметр канала $d=0,001$ м.

Экспериментальные данные по теплоотдаче при вынужденном движении R134a в канале со

вставленными гладкими скрученными лентами $y=2,5$ и 4 хорошо согласуются с расчетными значениями, полученными по зависимости (10) Манглика-Бергеса [29].

Экспериментальные данные по теплоотдаче при течении R134a в канале со скрученной лентой с ребрами на поверхности $y=4$, $h=1$ мм, $t=40$ мм, $\varphi=45^\circ$ сравнивались с расчетной зависимостью (11) полученной А.А. Гиниятуллиним [2]. Результаты данного сравнения представлены на Рисунке 1.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(1 + \frac{0.769}{s/d} \right) \left(\frac{\pi}{\pi - 4\delta/d} \right)^{0.8} \left(\frac{\pi + 2 - 2\delta/d}{\pi - 4\delta/d} \right)^{0.2} \quad (10)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(1 + \frac{0.769}{s/d} \right) \left(\frac{\pi}{\pi - 4\delta/d} \right)^{0.8} \left(\frac{\pi + 2 - 2\delta/d}{\pi - 4\delta/d} \right)^{0.2} (1 + 59(h/t)^{1.5}) \left(\frac{\mu_{liq}}{\mu_w} \right)^{0.18} \quad (11)$$

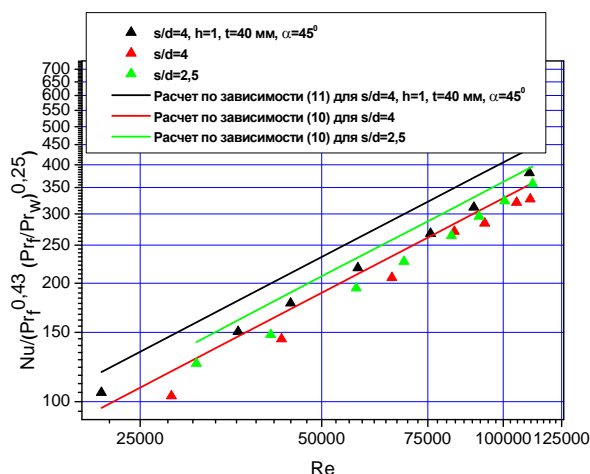


Рис. 1. Теплоотдача при течении R134a в каналах со вставленными гладкими и оребренными скрученными лентами.

Прирост теплоотдачи с лентой имеющей ребра на своей поверхности относительно гладкой скрученной

лентой с относительным шагом закрутки $s/d=4$ при течении хладагента R134a, составляет 23%, данный уровень интенсификации удовлетворительным образом согласуется с данными, полученными на воде [2].

Максимальное отклонение экспериментальных данных от значений, рассчитанных по зависимости (11) составляет не более 17,6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное экспериментальное исследование теплоотдачи однофазного потока хладагента R134a в канале с вставленной на всю длину скрученной оребренной лентой показало, что установка ребер на поверхности скрученной ленты позволяет интенсифицировать теплообмен в конвективной области. Уровень теплоотдачи, при прочих равных условиях, получен аналогично тому, что наблюдался при течении воды. Расчет теплоотдачи можно вести по обобщающей зависимости полученной ранее для воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов И.А., Махьянов Х.М., Гуреев В.М. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена / Под общ. ред. Ю.Ф. Гортышова. - Казань: Центр инновационных технологий, 2009. - 560 с.
Popov I.A., Makhyanov Kh.M., Gureev V.M. Fizicheskie osnovy i promyshlennoe primenenie intensivatsii teploobmena / Pod obshch. red. Yu.F. Gortyshova. - Kazan: Tsentr innovatsionnykh tekhnology, 2009. - 560 s.
2. Гиниятуллин А.А. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление труб со вставками в виде оребренных скрученных лент. Казань. 2015. 268 с. дис. канд. техн. наук: 01.04.14.
Giniyatullin A.A. Teplootdacha i gidravlichesкое soprotivlenie trub so vstavkami v vide orebrennykh skruchennykh lent. Kazan. 2015. 268 s. dis. kand. tekhn. nauk: 01.04.14.
3. Nithiyesh C. Kumar, Murugesan, P. Review on Twisted Tapes Heat Transfer Enhancement / Int. J. Of Scientific & Engineering Research, vol. 3, №4 (2012).
4. Ferroni, P., Block, R.E., Todreas, N.E., Bergles, A.E. Experimental evaluation of pressure drop in round tubes provided with physically separated, multiple, short-length twisted tapes / Experimental Thermal and Fluid Science, 35 (2011) 1357-1369.
5. Yadav, A.S. Effect of Half Length Twisted-Tape Turbulators on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics inside a Double Pipe U-Bend Heat Exchanger / Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, vol. 3, № 1 (2009), pp. 17-22.
6. 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, vol. 31 (2011), pp. 1141-1149.
7. Eiamsa-ard, S., Thianpong, C., Promvonge, 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, vol. 33 (2006), pp. 1225-1233.
8. 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, vol. 44 (2001), pp. 4211-4223.
9. Eiamsa-ard, S., Wongcharee, K., Sripattanapipat, S. 3-D Numerical simulation of swirling flow and convective heat transfer in a circular tube induced by means of loose-fit twisted tapes, International communication in Heat and Mass Transfer, vol. 36 (2009), pp. 947-955.
10. Thianpong, C., Eiamsa-ard, P., Wongcharee, K., Eiamsa-ard, S. Compound heat transfer enhancement of a dimpled tube with a twisted tape swirl generator, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 36 (2009), pp. 698-704.
11. Wongcharee, K., Eiamsa-ard, S. Enhancement of heat transfer using CuO/water nanofluid and twisted tape with alternate axis, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 38 (2011), pp. 742-748.
12. Eiamsa-ard, S., Promvonge, P. Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 53 (2010), pp. 1364-1372.
13. 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, vol. 37 (2010), pp. 652-659.
14. 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, vol. 34 (2010), pp. 711-719.
15. 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, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 38 (2011), pp. 329-334.
16. 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, vol. 1 №1 (2009), pp. 123-128.
17. 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 // ASME J. of Heat Transfer, № 133, 2011.
18. Chang, S.W., William Lees, A., Chang, H.T. Influence of spiky twisted tape insert on thermal

- fluid performances of tubular air-water bubbly flow, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48 (2009), pp. 2341-2354.
19. 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*, vol. 32 (2007), pp. 489- 501.
 20. 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*, vol. 30 (2010), pp. 310-318.
 21. Promvong, P., Pethkool, S., Pimsarn, M., и др. Heat transfer augmentation in a helical-ribbed tube with double twisted tape inserts // *J. of Int. Communications in Heat and Mass Transfer*, № 39, 2012. С. 953-959.
 22. Hong, M., Deng, X., Huang, K., Li, Z. Compound heat transfer enhancement of a converging-diverging tube with evenly spaced twisted-tapes, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 15 №6 (2007), pp. 814-820.
 23. Promvong, P., Eiamsa-ard, S. Heat transfer behaviors in a tube with combined conical ring and twisted-tape inserts, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 34 (2007), pp. 849-859.
 24. Guo, J., Fan, A., Zhang, X., Liu, W. A numerical study on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow in a circular tube fitted with center-cleared twisted tape, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 50 (2011), pp. 1263-1270.
 25. Salman, S.D., Kadhum, A.A.H., Takriff, M.S., BakarMohamad, A. CFD Simulation of Heat Transfer Augmentation in Constant Heat-Fluxed Tube fitted with Baffled Twisted Tape Inserts, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(8): 488-496, 2013.
 26. Тарасевич С.Э., Шишкин А.В., Яковлев А.Б. Стенд для экспериментального исследования кипения фреонов в различных каналах // *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, №2, вып. 2, 2013, С. 60-62.
Tarasevich S.E., Shishkin A.V., Yakovlev A.B. Stend dlya eksperimentalnogo issledovaniya kipeniya freonov v razlichnykh kanalakh // *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, №2, вып. 2, 2013, pp. 60 - 62.
 27. NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP Version 9.1, April, 2013.
 28. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. -М.: Энергия, 1977. -334 с.
Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Osnovy teploperedachi. -M.: Energiya, 1977. -334 s.
 29. Manglik, R.M. Bergles A.E. Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes: part II - transition and turbulent flows // *ASME Journal of Heat Transfer*, T. 115, № 890, 1993.