

УДК 532.529.5:536.24

ТЕПЛООТДАЧА В КАНАЛЕ С ОРЕБРЕННЫМИ СКРУЧЕННЫМИ ЛЕНТАМИ

© 2020 г. С. Э. Тарасевич^{1,*}, А. В. Шишкин¹, А. А. Гиниятуллин²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия

²TGT Oilfield Services, г. Казань, Россия

*E-mail: ts.55@mail.ru

Поступила в редакцию 14.05.2019 г.

После доработки 24.07.2019 г.

Принята к публикации 22.10.2019 г.

Представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи в канале со скрученной оребренной лентой с $s/d = 2.5-4$. Исследованы ребра высотой 0.5, 1.0 и 1.5 мм, установленные на ленте с различными шагами ($t = 40-120$ мм) против потока. Выполнен анализ влияния геометрических и режимных параметров на интенсивность теплообмена, и получена обобщающая зависимость для расчета теплоотдачи в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 10^4-2 \times 10^5$ при течении воды и хладагента R134a.

DOI: 10.31857/S0040364420010214

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в литературе помимо исследований влияния гладких скрученных лент на теплогидравлические характеристики потока активно изучаются модифицированные скрученные ленты с геометриями, отличными от классической [1–8]. Одной из предпосылок использования геометрически модифицированных скрученных лент является желание уменьшить гидравлические потери при сохранении уровня интенсификации теплообмена. Практический и научный интерес представляет использование модифицированных скрученных лент при кипении недогретой жидкости для увеличения критических тепловых потоков при охлаждении и термостабилизации высокотемпературных устройств. Совместный эффект лучшего перемешивания и отбрасывания жидкой фазы от ядра к периферии потока под действием массовых сил наряду с дополнительной дискретной турбулизацией [7–9] увеличивает количество жидкости на теплообменной поверхности и существенно интенсифицирует процесс ее испарения, что очень важно при создании эффективных испарителей.

Цель работы – исследование закономерности теплоотдачи при течении жидких теплоносителей в каналах с установленной на всю ее длину скрученной лентой с поперечными ребрами.

ТЕПЛООТДАЧА ТРУБ СО ВСТАВКАМИ В ВИДЕ ОРЕБРЕННЫХ СКРУЧЕННЫХ ЛЕНТ ПРИ ТЕЧЕНИИ ВОДЫ

Экспериментальный участок (рис. 1) для исследования теплоотдачи и гидравлического сопротивления труб со вставками в виде скрученных лент представляет собой канал с осевыми входом и выходом.

Толщина трубы составляет 1.0 мм при внутреннем диаметре 10 мм, длина трубы – 460 мм.

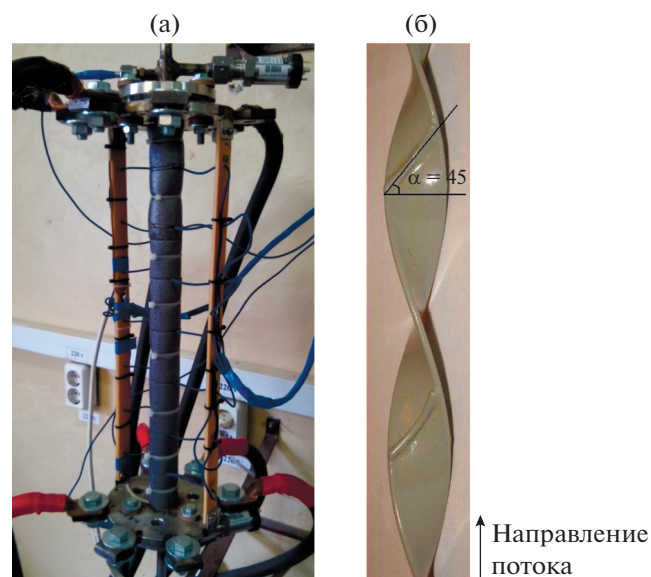


Рис. 1. Фотографии экспериментального участка (а) и скрученной оребренной ленты (б).

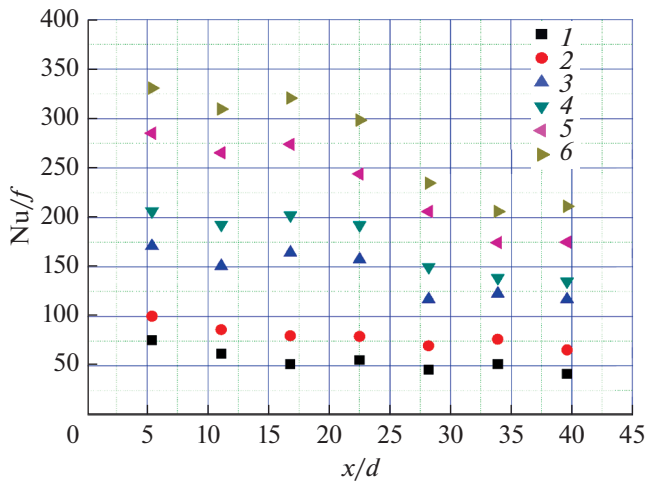


Рис. 2. Локальные значения теплоотдачи трубы со вставленной оребренной скрученной лентой при $s/d = 4$, $h = 1.5$ мм: 1 – $Re = 5800$, 2 – 10100, 3 – 23000, 4 – 31700, 5 – 42600, 6 – 51600.

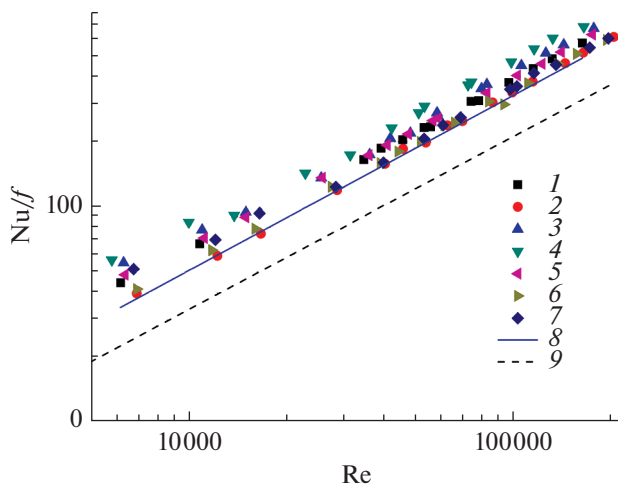


Рис. 3. Теплоотдача труб со вставками в виде оребренных скрученных лент при $s/d = 4$: экспериментальные данные: 1 – $t = 40$ мм, $\alpha = 40^\circ$, $h = 1$ мм; 2 – 40, 45, 0.5; 3 – 40, 45, 1; 4 – 40, 45, 1.5; 5 – 40, 50, 1; 6 – 80, 45, 1; 7 – 120, 45, 1; 8 – расчет по формуле М.А. Михеева (гладкая труба), 9 – Манглика–Бергелеса [10] (гладкая лента при $s/d = 4$).

Канал размещался вертикально с подъемным течением теплоносителя. Наружная сторона экспериментального участка покрыта двумя слоями теплоизоляции для обеспечения минимальных тепловых потерь. Между фланцами экспериментального участка и фланцами отводящих/подводящих патрубков устанавливалась цельно выточенная прокладка из фторопласта толщиной 7 мм, которая обеспечивала электрическую и, в определенной мере, тепловую изоляцию рабочего участка от металлического контура всей экспериментальной

установки. Участки стабилизации до и после рабочего участка имели длину $80d$ и $50d$ соответственно. К подводящим и отводящим патрубкам приваривались штуцеры с гайкой для присоединения датчиков давления. Экспериментальный участок препарирован термометрами в семи сечениях по четыре штуки в каждом с наружной стороны канала, по одной термометре установлено на входе и выходе теплоносителя. Корольки термометров изготавливались из проволоки хромель-копель диаметром 0.2 мм.

Теплоноситель – вода. Подвод теплоты к рабочему участку осуществлялся электроконтактным способом непосредственным пропусканием электрического тока по трубе. Проведено исследование теплоотдачи труб со вставками в виде оребренных скрученных лент с $s/d = 2.5-4$. Высота ребер h варьировалась от 0.5 до 1.5 мм, шаг установки ребер t составлял от 40 до 120 мм, угол установки ребра α – в пределах $40^\circ-50^\circ$. Число Рейнольдса Re , рассчитанное по диаметру трубы d , варьировалось от 8000 до 2×10^5 , плотность теплового потока $q = 50-350$ кВт/м². На рис. 2 представлены локальные значения теплоотдачи в трубе со вставкой в виде оребренной скрученной ленты при разных числах Рейнольдса в виде изменения комплекса $Nu/f = Nu / (Pr_f^{0.43} (Pr_f/Pr_w)^{0.25})$ по относительной координате x/d от входа. Можно отметить, что теплоотдача уменьшается по длине, однако наблюдается неравномерность значений локальной теплоотдачи в трубах со вставками в виде оребренных скрученных лент, которая, как и в случае гладких лент, обусловлена особенностью измерения температуры стенки трубы со вставкой. За счет изоляционных эффектов в местах соприкосновения торцов скрученной ленты со стенкой канала температура становится выше, чем в окрестностях, что приводит к неравномерности температуры как по сечению, так и по длине. Среднеквадратическое отклонение температуры в каждом сечении в данной серии экспериментов составляет 0.32°C .

На рис. 3 представлены экспериментальные данные по теплоотдаче труб со вставками в виде оребренных скрученных лент с относительным шагом закрутки $s/d = 4$ и различными параметрами оребрения.

Полученные данные по теплоотдаче сравнивались с результатами расчета по формуле Манглика–Бергелеса [10]. Установка ребер на поверхность скрученной ленты приводит к интенсификации теплообмена. Интенсификация обеспечивается за счет дополнительной дискретной турбулизации потока, дополнительного макроперемешивания, а также выравнивания температурных неоднородностей, характерных для течений в трубах со вставками в виде скрученных лент. Чем мень-

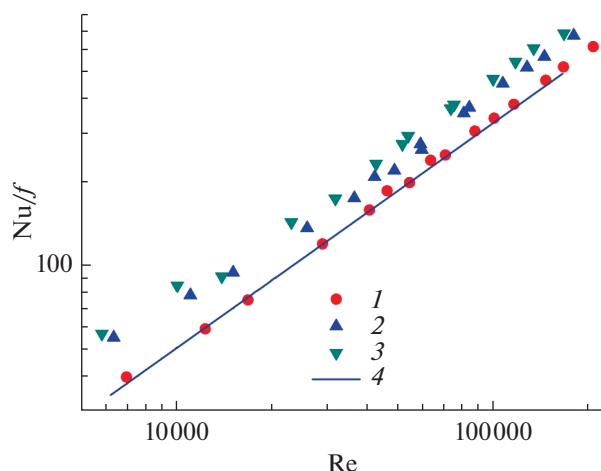


Рис. 4. Теплоотдача труб со вставками в виде скрученных лент, имеющих ребра на поверхности разной высоты: экспериментальные данные: 1 – $t = 40$ мм, $\alpha = 45^\circ$, $h = 0.5$ мм; 2 – 40, 45, 1; 3 – 40, 45, 1.5; 4 – расчет по формуле Манглика–Берггеса для гладкой ленты с $s/d = 4$.

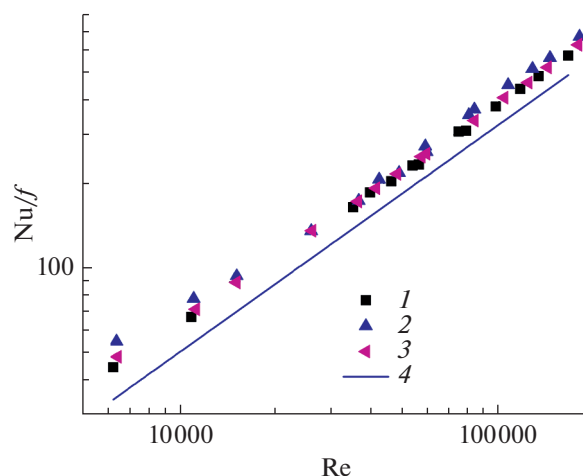


Рис. 5. Теплоотдача труб со вставками в виде скрученных лент, имеющих ребра на поверхности, установленные под различным углом: экспериментальные данные: 1 – $t = 40$ мм, $\alpha = 40^\circ$, $h = 1$ мм; 2 – 40, 45, 1; 3 – 40, 50, 1; 4 – расчет по формуле Манглика–Берггеса для гладкой ленты с $s/d = 4$.

ше шаг и больше высота ребер, тем выше интенсификация теплообмена.

Для исследования влияния высоты установленных ребер на теплоотдачу использовались три скрученные ленты с $s/d = 4$, $\alpha = 45^\circ$, $t = 40$ мм и $h = 0.5, 1, 1.5$ мм. На рис. 4 представлена зависимость теплоотдачи от числа Рейнольдса для трех скрученных лент с ребрами, имеющими разную высоту, в сравнении с расчетом по формуле Манглика–Берггеса для гладкой скрученной ленты $s/d = 4$. Видно, что высота установленных ребер значительно влияет на коэффициент теплоотдачи. Причем теплоотдача растет нелинейно с увеличением высоты ребра. Сравнивая результаты для двух крайних высот ребер, соответствующих 0.5 и 1.5 мм, можно сказать, что теплоотдача труб с такими вставками отличается примерно на 36%. Наименьшее значение теплоотдачи имеют трубы со вставками в виде лент с ребрами малой высоты (0.5 мм). Такие ленты интенсифицируют теплоотдачу максимум на 7% по сравнению с гладкими скрученными лентами.

Для исследования влияния угла установки ребер на теплоотдачу использовались три скрученные ленты с $s/d = 4$, $h = 1$ мм, $t = 40$ мм и $\alpha = 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$. На рис. 5 представлена зависимость теплоотдачи от числа Рейнольдса для трех скрученных лент с ребрами, имеющими разный угол установки в сравнении с расчетом по формуле Манглика–Берггеса. Влияние угла выражено слабо и находится в пределах погрешности эксперимента.

Для исследования влияния шага установки ребер на теплоотдачу использовались три скрученные ленты с $s/d = 4$, $h = 1$ мм, $\alpha = 45^\circ$ и $t = 40, 80,$

и 120 мм. Рис. 6 демонстрирует зависимость теплоотдачи от числа Рейнольдса для трех скрученных лент с ребрами, установленными с разным шагом в сравнении с расчетом по формуле Манглика–Берггеса.

Шаг установки ребер значительно влияет на коэффициент теплоотдачи. Причем ленты с шагами 80 и 120 мм имеют примерно одинаковый уровень интенсификации в пределах 7–9% по сравнению с гладкой лентой. Сравнивая значения теплоотдачи труб со вставками в виде реб-

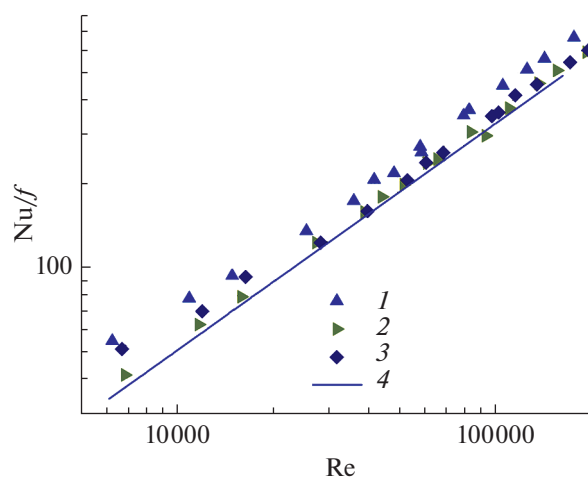


Рис. 6. Теплоотдача труб со вставками в виде скрученных лент, имеющих ребра на поверхности, установленные с разным шагом: экспериментальные данные: 1 – $t = 40$ мм, $\alpha = 45^\circ$, $h = 1$ мм; 2 – 80, 45, 1; 3 – 120, 45, 1; 4 – расчет по формуле Манглика–Берггеса для гладкой ленты с $s/d = 4$.

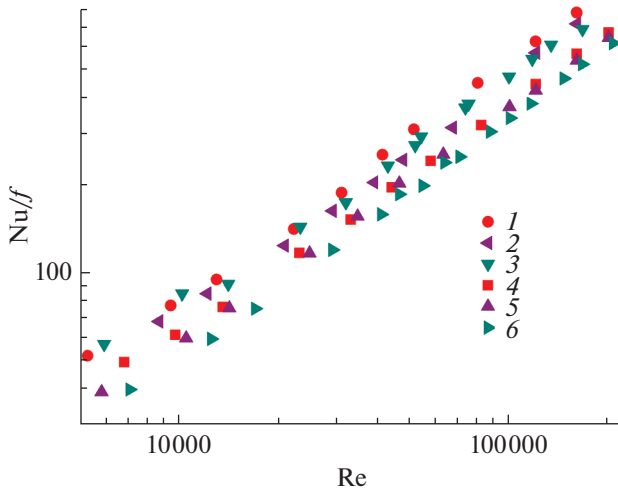


Рис. 7. Теплоотдача труб со вставками в виде оребренных скрученных лент при $t = 40$ и $\alpha = 45^\circ$: 1 – $s/d = 2,5$, $h = 1,5$; 2 – 3, 1,5; 3 – 4, 1,5; 4 – 2,5, 0,5; 5 – 3, 0,5; 6 – 4, 0,5.

ренных скрученных лент с шагом 120 и 40 мм, можно сказать, что теплоотдача последних на 20–25% больше.

В результате экспериментов с одним шагом закрутки $s/d = 4$ и различными комбинациями геометрических параметров оребрения были выбраны наиболее предпочтительные с точки зрения практического применения параметры ребер: $t = 40$ мм, $\alpha = 45^\circ$. Проведен второй этап экспериментов, в котором зафиксированы выбранные эффективные параметры и исследованы режимы с двумя дополнительными относительными шагами закрутки ($s/d = 3$ и 2,5) для выявления влияния закрутки при обтекании ребер на теплоотдачу. Стоит отметить, что в качестве эффективных зафиксированы лишь два параметра ребер из трех, эксперименты с дополнительными относительными шагами закрутки проведены при $h = 0,5$; 1,5 мм для каждой из лент соответственно. Результаты исследований представлены на рис. 7. Можно сделать вывод, что теплоотдача увеличивается примерно до одного и того же уровня для разных закруток при переходе от лент с ребрами высотой 0,5 мм к лентам с высотой ребер 1,5 мм. Однако для ленты с $s/d = 4$ прирост теплоотдачи несколько больше, чем для более интенсивных закруток. Это подтверждает выводы численного исследования о том, что закрутка подавляет возмущения, генерируемые ребрами [5, 6].

Анализируя исследования по теплоотдаче можно сказать, что коэффициент теплоотдачи возрастает максимум на 40% для лент с ребрами высотой $h = 1,5$ мм и шагом установки $t = 40$ мм по сравнению с гладкой скрученной лентой с тем же относительным шагом закрутки. Ленты с $t = 80$ и 120 мм имеют одинаково низкий уровень интенсификации, не превышающий 9%. Скрученные

ленты с ребрами высотой $h = 0,5$ мм обеспечивают самый низкий уровень интенсификации, даже несмотря на малый шаг установки 40 мм. Вставки в виде оребренных скрученных лент с высотой ребер $h = 0,5$ мм и гладкие ленты обеспечивают практически одинаковые значения теплоотдачи во всем диапазоне исследованных режимных параметров. Исключение составляют режимы с большими числами Рейнольдса, когда интенсификация достигает 7–8%, что подтверждает вывод численного эксперимента об увеличении возмущающего действия ребра с ростом Re [5, 6]. Экспериментальное исследование показало, что ребра высотой 0,5 мм не обеспечивают необходимого воздействия на поток, приводящего к интенсификации теплообмена. Однако увеличение высоты ребра до 1 мм при неизменном шаге приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи до 25% по сравнению с гладкой скрученной лентой. Если сравнивать результаты для труб с лентами, отличающимися только углом установки ребер, можно сказать, что теплоотдача примерно одинакова. Однако ребра, установленные под углом 45° , обеспечивают все же несколько большую интенсификацию. Данный вывод согласуется с результатами численных исследований [5, 6] и подтверждает, что угол 45° является наиболее предпочтительным. В то же время отличие в коэффициентах теплоотдачи настолько невелико, что оно может быть обусловлено погрешностью экспериментов.

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ТЕПЛОТДАЧЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ВОДЫ

Для обобщения данных по теплоотдаче труб со вставками в виде оребренных скрученных лент использован метод нелинейной регрессии, выполненный средствами коммерческого кода Origin 8.

Как показало экспериментальное исследование анализа чувствительности, теплоотдача наиболее сильно зависит от t и h . Влияние угла выражено менее сильно и находится в пределах погрешности измерений, поэтому в конечный вид формулы для теплоотдачи вошли лишь два геометрических параметра ребер (высота и шаг), объединенных в один влияющий фактор h/t . Таким образом, формула справедлива для различных высот и шагов установки ребер при фиксированном эффективном угле установки ребер, равном 45° . Обобщающая формула с параметрами A и n , подлежащими определению, имеет вид

$$Nu = \frac{Nu_{\text{эксп}}}{Nu_0} = f(h/t) = 1 + A(h/t)^n,$$

где Nu – число Нуссельта для оребренных скрученных лент, полученное из эксперимента, а Nu_0 рассчитано по формуле Манглика–Бергелеса для

гладких скрученных лент. В результате одномерной минимизации определены параметры A и n :

$$\overline{Nu} = 1 + 59(h/t)^{1.5}.$$

Для изучения возможного влияния других параметров построены зависимости отношения экспериментальных данных к расчетным от Re и s/d при различных фиксированных значениях параметра h/t .

Анализ показал, что отсутствует влияние числа Рейнольдса и параметра закрутки на отношение экспериментальных данных к расчетным при любом значении комплекса h/t . Таким образом, конечная формула для расчета теплоотдачи труб со вставками в виде оребренных скрученных лент имеет вид

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.43} \left(1 + \frac{0.769}{\frac{s}{d}}\right) \left(\frac{\pi}{\pi - \frac{4\delta}{d}}\right)^{0.8} \times \left(\frac{\pi + 2 + \frac{2\delta}{d}}{\pi - \frac{4\delta}{d}}\right)^{0.2} + 1 + 59(h/t)^{1.5} \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_{ст}}\right)^{0.18}. \quad (1)$$

При стремлении высоты ребра к нулю при любом шаге либо при увеличении шага и фиксированной высоте расчетное соотношение (1) асимптотически приближается к формуле Манглика–Бергелеса для гладких скрученных лент. Формула справедлива для расчета теплоотдачи труб со вставками в виде оребренных (ребра установлены против направления скручивания ленты) скрученных лент с $s/d = 2.5, \dots, 4$ при $h/t = 0.0083–0.0375$, $\alpha = 45^\circ$, числах Прандтля $Pr = 2.2, \dots, 6.2$ и $Re = 10^4–2 \times 10^5$ при течении воды. Полученная обобщающая зависимость описывает экспериментальные точки с максимальным отклонением $\pm 10\%$ при доверительной вероятности 0.95.

ТЕПЛОТДАЧА ТРУБ СО ВСТАВКАМИ В ВИДЕ ОРЕБРЕННЫХ СКРУЧЕННЫХ ЛЕНТ ПРИ ТЕЧЕНИИ ХЛАДАГЕНТА R134A

Экспериментальное исследование теплоотдачи при вынужденном движении хладагента R134a в каналах со вставленными гладкими и оребренными скрученными лентами было выполнено на экспериментальном стенде (рис. 8) [11] при горизонтальном расположении экспериментального участка. Были реализованы следующие режимные параметры: $Re = 30000–120000$, $q = 0.7–50$ кВт/м², $P = 0.4–1.0$ МПа, диаметр канала $d = 0.001$ м.

Экспериментальные данные по теплоотдаче в условиях вынужденной конвекции при течении однофазного хладагента R134a в прямой трубе сравнивались с расчетными значениями по из-

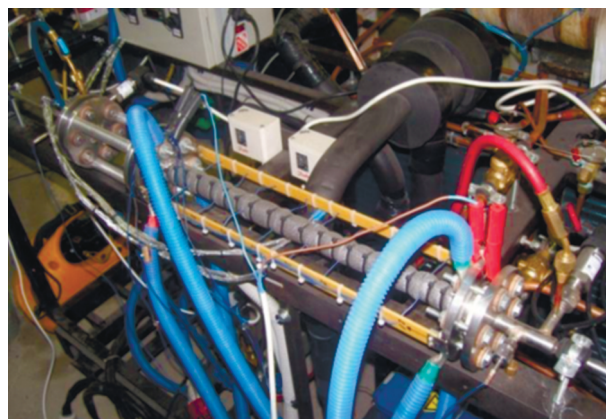


Рис. 8. Фотография экспериментального участка, установленного на стенде.

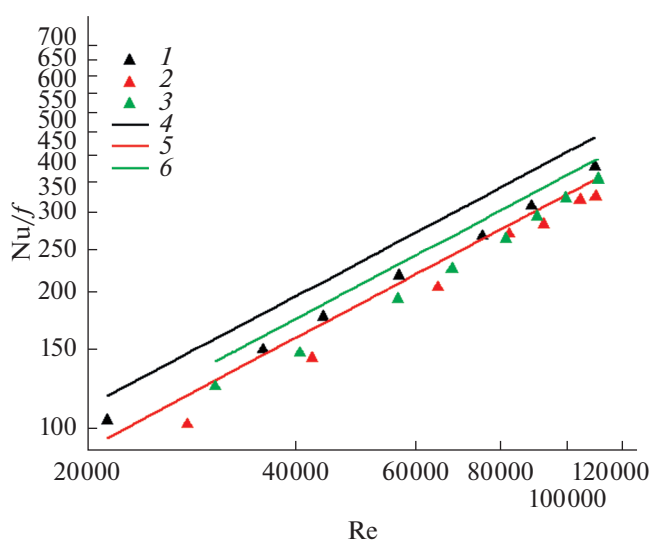


Рис. 9. Теплоотдача при течении R134a в каналах со вставленными оребренными скрученными лентами: 1 – $s/d = 4$, $h = 1$, $t = 40$ мм, $\alpha = 45^\circ$; 2 – $s/d = 4$; 3 – 2.5; 4 – результаты расчета по (1) при $s/d = 4$, $h = 1$, $t = 40$ мм, $\alpha = 45^\circ$; 5 – по [10] при $s/d = 4$; 6 – при $s/d = 2.5$.

вестной зависимости М.А. Михеева для турбулентного режима течения. Максимальная относительная погрешность расчетных данных относительно экспериментальных не превышает $+1\%$ и -15% . Данные по теплоотдаче при вынужденном движении R134a в канале со вставленными гладкими скрученными лентами $s/d = 2.5$ и 4 хорошо согласуются с расчетными значениями, полученными по зависимости Манглика–Бергелеса [10]. Теплоотдача при течении R134a в канале со скрученной лентой с ребрами на поверхности $s/d = 4$, $h = 1$ мм, $t = 40$ мм, $\alpha = 45^\circ$ (аналогично исследованных при течении воды) сравнивалась с полученной расчетной зависимостью (1). Результаты сравнения представлены на рис. 9.

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

скрученной ленты с $s/d = 4$ при течении хладагента R134a составляет 23%. Такой уровень интенсификации удовлетворительным образом согласуется с данными, полученными на воде. Максимальное отклонение экспериментальных данных от значений, рассчитанных по (1), составляет не более 17.6%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучено влияние ребер, установленных на поверхность скрученных лент, на теплообмен потоков жидкости в трубах. Отмечены интенсификация теплообмена при использовании оребренных скрученных лент. Наименьшую интенсификацию теплообмена обеспечивают вставки в виде лент с ребрами малой высоты (0.5 мм) или большого шага (80, 120 мм), а уменьшение шага и увеличение высоты ребра приводят к возрастанию коэффициента теплоотдачи.

Установлено влияние основных геометрических безразмерных параметров ребер на гидравлическое сопротивление и среднюю теплоотдачу труб со вставками в виде оребренных скрученных лент при вынужденном течении теплоносителя в диапазоне режимных параметров $Re = 10^4 - 2 \times 10^5$ и $Pr = 2.2 - 6.2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bas H., Ozceyhan V.* Heat Transfer Enhancement in a Tube with Twisted Tape Inserts Placed Separately from the Tube Wall // *J. Exp. Therm. Fluid Sci.* 2012. V. 41. P. 51.
2. *Eiamsa-ard S., Promvong P.* Performance Assessment in a Heat Exchanger Tube with Alternate Clockwise and Counter-clockwise Twisted-tape Inserts // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2010. V. 53. P. 1364.
3. *Murugesan P., Mayilsamy K., Suresh S.* Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics in a Circular Tube Fitted with and without V-cut Twisted Tape Insert // *J. Int. Commun. Heat Mass Transfer.* 2011. V. 38. P. 329.
4. *Eiamsa-ard S., Wongcharee K., Eiamsa-ard P., Thippong C.* Heat Transfer Enhancement in a Tube Using Delta-winglet Twisted Tape Inserts // *J. Appl. Therm. Eng.* 2010. V. 30. P. 310.
5. *Гиниятуллин А.А., Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б.* Экспериментальное и численное исследование тепло-массообмена в трубах с оребренными скрученными вставками // *Вестн. КГТУ им. А.Н. Туполева.* 2013. № 2. С. 13.
6. *Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Гиниятуллин А.А.* Теплоотдача и гидравлическое сопротивление труб с оребренными скрученными ленточными вставками // VI Рос. нац. конф. по теплообмену "РНКТ-6". М., 2014. Т. 1. С. 103.
7. *Тарасевич С.Э., Яковлев А.Б., Шишкин А.В.* Особенности теплогидравлических характеристик каналов с модифицированными скрученными ленточными вставками // *Тепловые процессы в технике.* 2018. Т. 10. № 3–4. С. 107.
8. *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. № 3. С. 133.
9. *Тарасевич С.Э., Злобин А.В., Яковлев А.Б.* Гидродинамика и теплообмен при движении однофазной жидкости в трубах с искусственной шероховатостью // *ТВТ.* 2015. Т. 53. № 6. С. 938.
10. *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 J. Heat Transfer.* 1993. V. 115. № 890. P. 183.
11. *Тарасевич С.Э., Шишкин А.В., Яковлев А.Б.* Стенд для экспериментального исследования фреонов в различных каналах // *Вестн. КГТУ им. А.Н. Туполева.* 2013. № 2. С. 60.