

Е.С. Данильчик,
аспирант, ассистент кафедры энергосбережения,
гидравлики и теплотехники

А.Б. Сухоцкий,
к.т.н., доцент кафедры энергосбережения,
гидравлики и теплотехники

Белорусский государственный технологический университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ НА СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНУЮ ТЕПЛООТДАЧУ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи в режиме свободной конвекции воздуха оребренной трубы разной относительной высоты h/s (типы I–VI) при различных углах наклона $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ и 90° к горизонтальной плоскости. Получены соответствующие критерийные уравнения для расчета средней приведенной теплоотдачи одиночной трубы.

В результате экспериментальных исследований выяснено, что на предприятии для экономии габаритного пространства, занимаемого теплообменными аппаратами, из всех типов исследованных труб могут быть собраны теплообменные секции аппаратов (режим свободной конвекции воздуха) при угле наклона труб $\gamma = 15\text{--}30^\circ$ к горизонтальной плоскости.

Annotation

An experimental study was made of heat transfer in the regime of its own air pipe with a relative h/s height (types I–VI) at various angles of inclination $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ and 90° to the horizontal plane. The corresponding criteria for calculating the average reduced heat transfer of a single pipe are obtained.

As a result of experimental studies, it turned out that in order to save the overall space occupied by heat exchangers, all heat exchangers (free air convection mode) are used at an angle of inclination of the pipe $\gamma = 15\text{--}30^\circ$ to the horizontal plane.

Введение

Теплообменные оребренные трубы различных материальных исполнений и конструктивных форм (насадные шайбовые и прямоугольные, навитые овалообразные, проволочные, продольные прямоугольные и корытообразные, мембранные, плавниковые, шиповые и штыревые различных сечений, дисковые и непрерывные спиральные, называемые часто поперечно-винтовыми ребрами) применяются как способ интенсификации теплообмена со стороны меньшего коэффициента теплопередачи в теплообменных аппаратах газотурбинных установок, котлоагрегатов, компрессорных и холодильных машин, на железнодорожном транспорте, в энергетике [1–2]. Однако исключительно широкое применение в промышленности и технике получили биметаллические ребристые трубы (БРТ) с круглыми спиральными ребрами, изготавливаемые по различным технологиям.

Исключительно широкое применение в промышленности и технике получили биметаллические ребристые трубы (БРТ) с круглыми спиральными ребрами, изготавливаемые по различным технологиям.

ными алюминиевыми ребрами, изготавливаемые по разным технологиям: трубы со спиральными или винтовыми ребрами, сформированными в процессе поперечно-винтового накатывания (технология, которая используется многие годы); трубы с ребрами, изготовленными из ленты (перспективная развивающаяся технология [3]).

Из оребренных труб собираются теплообменные секции воздухоохлаждаемых теплообменников, которые получили широкое распространение в различных системах кондиционирования и охлаждения, в электронных устройствах, на тепловых и атомных электростанциях и т.д. В Республике Беларусь воздухоохлаждаемые теплообменники имеют широкое применение на ОАО «Гродноазот», ОАО «Мозырьский нефтеперерабатывающий завод», ОАО «Нафтан», ОАО «Бел-

газпром», ОАО «Слонимский бумажный комбинат», ОАО «Добрушская фабрика «Герой труда», на всех хладокомбинатах. Интерес к использованию воздухоохлаждаемых теплообменников только возрастает, т.к. воздушная система охлаждения различных технологических продуктов и веществ оказывается дешевле и проще, чем водяная и комбинирования даже на предприятиях, расположенных около богатых источников воды.

Состояние вопроса и анализ имеющихся научных данных

Воздухоохлаждаемые теплообменники в основном эксплуатируются в режиме вынужденной конвекции, на привод которых затрачивается большое количество электроэнергии. Однако в настоящее время, в эпоху развития энергосбережения, очень актуален перевод теплообменников с воздушным охлаждением в режим свободной конвекции, с полным или частичным отключением электропривода вентиляторов с обеспечением при этом заданного теплового режима.

Основным недостатком свободной конвекции является низкое значение теплопередачи, которое обычно компенсируется увеличением площади теплообмена путем оребрения ее поверхности. При этом во многих случаях ось оребренной трубы расположена не горизонтально, а наклонена из-за технологических ограничений прокатки теплоносителя или для уменьшения площади, занимаемой теплообменником. Угол наклона трубы также оказывает некое влияние на теплопередающие характеристики теплообменников с ребристыми трубами с воздушным охлаждением.

Опубликовано небольшое количество экспериментальных исследований влияния угла наклона оребренной трубы на свободно-конвективный теплообмен [4–9] и их результаты несколько противоречивы. В целом зависимость числа Нуссельта Nu от числа Рейля Ra для трубы со спиральным или винтовым оребрением при свободно-конвективном теплообмене с воздухом имеет вид уравнения (1) с соответствующими коэффициентами A и n , в котором теплофизические свойства воздуха оптимально определять по температуре окружающей среды

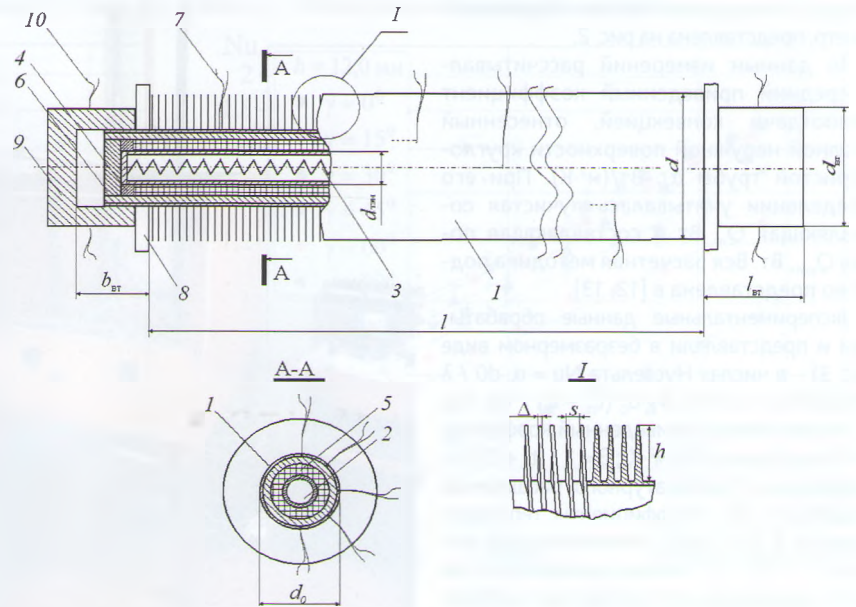
$$Nu = A \cdot Ra^n \quad (1)$$

При этом имеется несколько работ [5, 8], где характер уравнения (1) изменяется добавлением экспоненциального члена, что при числах $Ra > 250000$ приводит к снижению темпа роста теплоотдачи.

На основе анализа экспериментальных результатов работ [4–9] можно сделать следующие выводы. При увеличении угла наклона γ от 15° до 90° теплоотдача уменьшается, а степень n в уравнении (1) также снижается и стремится к $n = 0,25$ при $\gamma = 90^\circ$ (теплоотдача по сравнению с горизонтальной трубой уменьшается приблизительно в два раза), как и в экспериментальной зависимости, описывающей теплоотдачу гладких труб. Только в работе [4] с увеличением угла наклона γ от 0 до 60° значение степени n в уравнении (1) плавно увеличивается от $0,25$ до $0,53$, а при вертикальном расположении трубы степень n составила $0,293$. К сожалению, в данной работе неверно учитывался тепловой поток излучением, так как приведенная степень черноты принималась равной нормальной степени черноты алюминиевой поверхности в диапазоне $0,07–0,15$ в зависимости от температуры и не учитывалось влияние переизлучения между ребрами трубы. Наиболее качественные исследования представлены в остальных работах [5–9].

Теплоотдача также зависит от относительной высоты оребрения трубы, отно-

Рис. 1. Общий вид трубы-калориметра:



1 – биметаллическая ребристая труба; 2 – трубчатый электронагреватель (ТЭН); 3 – спираль ТЭНа; 4 – центровочное кольцо; 5 – кварцевый песок; 6 – высокотемпературная силиконовая замазка; 7 – хромель-алюмелевые термопары; 8 – трубная доска из МДФ; 9 – фторопластовая втулка; 10 – 4-спайная медь-константановая дифференциальная термобатарея

шения высоты ребра к межреберному шагу (h/s). При высоких ребрах $h = 14,0–15,2$ мм и небольшом шаге ребра $s = 2,43–3,0$ мм ($h/s = 4,70–6,30$) теплоотдача слабо изменяется при углах наклона $\gamma = 0–15^\circ$ [4–8]. Как показано в работе [9], где исследовалась стальная одиночная оребренная овальная труба с $h = 44,5$ мм, при увеличении угла наклона от 0 до 40° число Нуссельта уменьшается на $11,1\%$ для $s = 16$ мм ($h/s = 2,78$), а показатель степени n в уравнении (1) не изменяется при $\gamma = 0–40^\circ$. При $s = 11$ мм ($h/s = 4,05$) темп снижения числа Нуссельта увеличивается при увеличении числа Рейля, т.е. степень n в уравнении (1) уменьшается с ростом угла наклона. При $s = 6$ мм ($h/s = 7,41$) влияние угла наклона трубы на теплообмен становится незначительным.

Экспериментальные исследования

Цель работы – экспериментальные исследования влияния угла ($\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ и 90°) наклона оси оребренной трубы к горизонтальной плоскости с различной относительной высотой (h/s) на свободно-конвективный теплообмен с воздухом.

В качестве объекта исследования была выбрана биметаллическая ребристая труба со спиральными накатными ребрами следующих геометрических параметров: наружный диаметр оребрения $d = 56,0$ мм; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,8$ мм; высота ребра $h = 14,6$ мм; шаг ребра $s = 2,5$ мм; средняя толщина ребра $\Delta = 0,5$ мм; коэффициент оребрения тру-

бы $\Phi = 19,3$ (I тип, $h/s = 5,84$). Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь, длина трубы $l_n = 330$ мм (теплоотдающая длина $l = 300$ мм). Диаметр несущей трубы $d_n = 25$ мм, толщина стенки $\delta = 2$ мм.

Для изменения высоты оребрения трубы ее ребра стачивались с помощью шлифования с образованием новых типов труб: II тип – $h = 12,0$ мм, $d = 50,8$ мм, $\Phi = 15,1$ ($h/s = 4,80$); III тип – $h = 8,0$ мм; $d = 42,8$ мм; $\Phi = 9,4$ ($h/s = 3,20$); IV тип – $h = 4,1$ мм; $d = 35,0$ мм; $\Phi = 4,8$ ($h/s = 1,64$); V тип – $h = 2,0$ мм; $d = 30,8$ мм; $\Phi = 2,8$ ($h/s = 0,80$); VI тип – $h = 0–0,2$ мм; $d = 26,8$ мм; $\Phi \approx 1$ (считаем, что гладкая труба).

Все экспериментальные исследования проводились методом полного теплового моделирования. Конструкция опытной трубы-калориметра представлена на рис. 1.

Для этого труба оснащалась стальным теплоэлектронагревателем (ТЭНом) диаметром $d_{ТЭН} = 12,5$ мм с максимальной мощностью 320 Вт. Для равномерного прогрева трубы между ТЭНом и стенкой засыпался кварцевый песок дисперсным составом $0,16–0,32$ мм. Торцевые участки трубы защищались фторопластовыми втулками наружным диаметром $d_{вт} = 45$ мм и длиной $l_{вт} = 35$ мм.

Схема экспериментальной установки, аппаратное оснащение ее измерительными приборами, методика и порядок проведения опытов изложены в [10, 11].

Экспериментальная установка, в камеру которой помещалась опытная труба-калориметр, представлена на рис. 2.

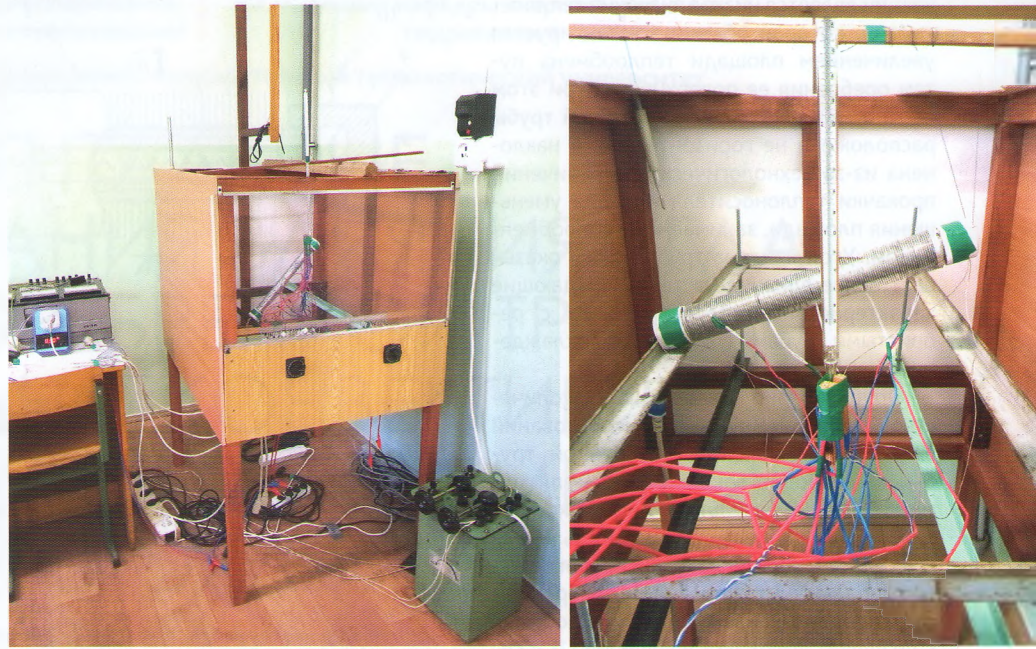
По данным измерений рассчитывался средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности кругло-ребристой трубы α_k , Вт/(м²·К). При его определении учитывалась лучистая составляющая $Q_{лr}$, Вт и составляющая потеря $Q_{пот}$, Вт. Вся расчетная методика подробно представлена в [12, 13].

Экспериментальные данные обрабатывали и представляли в безразмерном виде (рис. 3) – в числах Нуссельта $Nu = \alpha_k \cdot d_0 / \lambda$ и Релея $Ra = Gr \cdot Pr = \beta \cdot g \cdot d_0^3 (t_{cr} - t_0) / \nu \cdot a$, где α_k – конвективный приведенный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $\beta = 1 / (t_0 + 273)$ – коэффициент температурного расширения воздуха, 1 / °С. Коэффициенты теплопроводности λ , Вт / (м·К), кинематической вязкости ν , м²/с, и температуропроводности a , м²/с, принимали по температура окружающей среды $t_0 = 16–27^\circ\text{C}$. Во время экспериментального исследования средняя температура стенки у основания ребер составляла $t_{cr} = 25–275^\circ\text{C}$, а электрическая мощность, подводимая к трубе, изменялась в пределах $W = 5–270$ Вт. За определяющий размер был принят диаметр трубы по основанию ребер d_0 .

Результаты экспериментального исследования свободно-конвективной теплоотдачи ребристых труб представлены на рис. 3.

Экспериментальные данные по теплоотдаче одиночной ребристой трубы I типа с высотой оребрения $h = 14,6$ мм при различных углах наклона γ , представленных

Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки с опытной трубой-калориметром



на рис. 3а), с отклонением, не превышающим 5%, аппроксимированы уравнением вида, где коэффициент B для углов $\gamma = 0, 15, 30, 45^\circ$ составил $1,05 \cdot 10^6$, для $\gamma = 60^\circ - 1,21 \cdot 10^6$, а для $\gamma = 90^\circ - 0,90 \cdot 10^6$

$$Nu = A \cdot Ra^n (1 - \exp(-B/Ra)). \quad (2)$$

При этом необычный характер кривых ребристой трубы I типа по уравнению (2) совпадает с исследованиями свободной конвекции на оребренных биметаллических трубных пучках в работах [5, 8].

Все остальные экспериментальные данные по теплоотдаче одиночной трубы II–VI типов при различных углах наклона γ на рис. 3б–д) с отклонением, не превышающим 5%, аппроксимированы функцией вида (1).

Значения постоянных A, n в уравнениях (1) и (2) представлены в табл. 1.

На рис. 4 представлена графическая зависимость поправочного коэффициента $C_\gamma = Nu_\gamma / Nu_{\gamma=0^\circ}$ на угол наклона γ для различных типов экспериментальных труб, где числа Nu при соответствующих числах Ra вычислялись по уравнениям (1) и (2). Данный коэффициент C_γ определялся как среднее арифметическое расчетных точек на исследовательском диапазоне $Ra = 30000–500000$. Отклонение определения C_γ по кривой рис. 4 составило 5–7%.

На рис. 5 представлены рассчитанные по (1) и (2) зависимости при числе $Ra = 100000$ для сравнения тепловой эффективности теплоотдачи в режиме свободной конвекции одиночной трубы разной относительной высоты h/s (типы I–VI) при различных углах наклона γ .

Таблица 1. Значения постоянных A, n в уравнениях (1) и (2) и диапазоны применимости по числу Ra для теплоотдачи одиночной ребристой трубы в режиме свободной конвекции

Тип трубы	I (h / s = 5,84)	II (h / s = 4,80)	III (h / s = 3,20)	IV (h / s = 1,64)	V (h / s = 0,80)	VI гладкая труба
h, мм (Ф)	14,6 (19,3)	12,0 (15,1)	8,0 (9,4)	4,1 (4,8)	2,0 (2,8)	0–0,2 (1)
Диапазон $Ra \cdot 10^{-5}$	0,4–4,5	0,35–4,5	0,32–4,4	0,45–4,3	0,4–4,4	0,4–2,3
$\gamma = 0^\circ$						
A	0,0213	0,0461	0,0859	0,1344	0,2155	0,5184
n	0,32	0,28	0,25	0,25	0,25	0,25
$\gamma = 15^\circ$						
A	0,0201	0,0451	0,0859	0,1344	0,2155	0,5184
n	0,32	0,28	0,25	0,25	0,25	0,25
$\gamma = 30^\circ$						
A	0,0187	0,0430	0,0827	0,1310	0,2046	0,4751
n	0,32	0,28	0,25	0,25	0,25	0,25
$\gamma = 45^\circ$						
A	0,0170	0,0398	0,0804	0,1278	0,2019	0,4702
n	0,32	0,28	0,25	0,25	0,25	0,25
$\gamma = 60^\circ$						
A	0,0233	0,0442	0,0717	0,1158	0,1876	0,4400
n	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25
$\gamma = 90^\circ$						
A	0,0230	0,0377	0,0576	0,0970	0,1570	0,3461
n	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25

Выводы

Из данных, представленных на рис. 3–5, видно, что увеличение угла наклона трубы различных типов I–VI в целом сопровождается монотонным снижением теплоотдачи. При вертикальном расположении трубы по сравнению с ее горизонтальным расположением она уменьшается для различных типов труб I–VI приблизительно в 2–1,4 раза. Наибольшее снижение теплоотдачи относительно остальных исследованных типов труб наблюдается для оребренных труб с большей относительной высотой ребра

Рис. 3. Теплоотдача в режиме свободной конвекции воздуха ребристых труб экспериментальных типов: а) – I тип, б) – II тип, в) – III тип, г) – IV тип, д) – V тип, е) – VI тип, при различных углах наклона γ

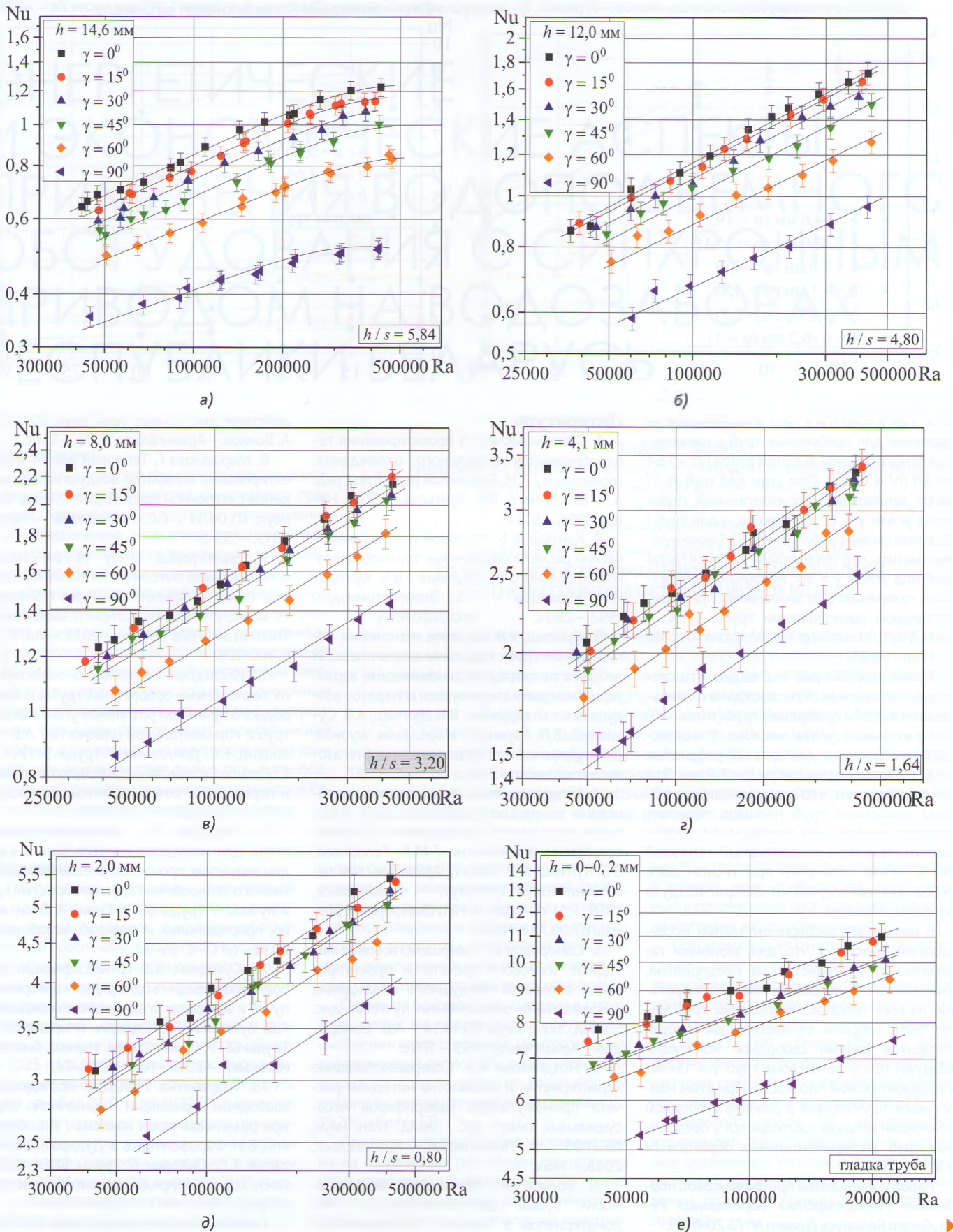
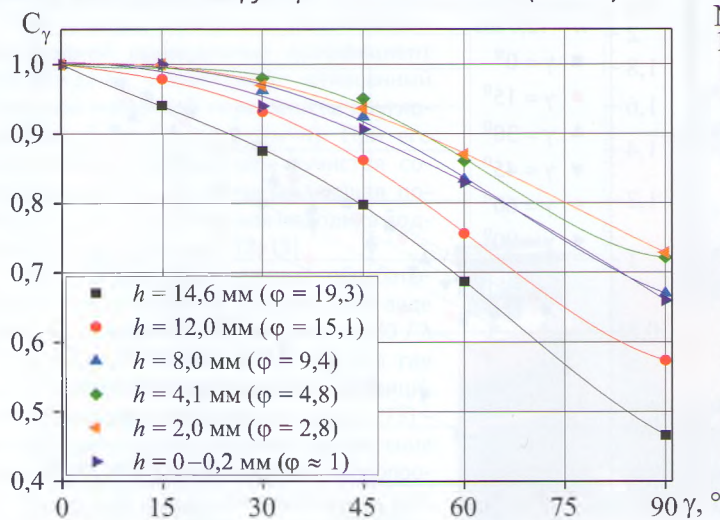


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента C_γ на угол наклона γ к горизонтальной плоскости для одиночной трубы различных типов I–VI (табл. 1)



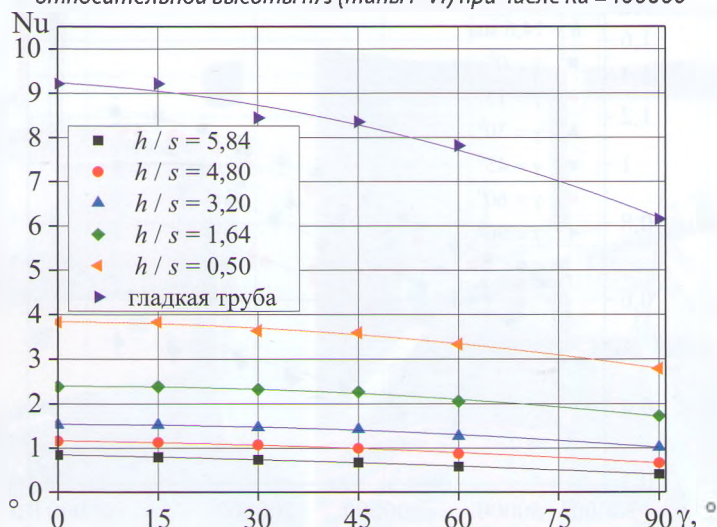
$h/s = 5,84$ и $4,80$ (I и II тип), а наименьшее ее снижение для оребренных труб с наименьшей относительной высотой ребра $h/s = 1,64$ и $0,80$ (IV и V тип). При этом для труб III–VI типов теплоотдача горизонтальной трубы и под углом $\gamma = 15^\circ$ одинакова, а для труб I и II типов схожа с работами [5, 8]. Также нужно отметить, что теплоотдача для всех типов труб под углом $\gamma = 30^\circ$ не сильно снижается по сравнению с ее значениями при горизонтальном расположении трубы: I тип – на 16,5%, II, III тип – на 7%, IV, V тип – на 4% и VI тип – на 9%.

Кроме этого из рис. 3–5 видно, что свободно-конвективная теплоотдача с уменьшением высоты оребрения труб (типы I–VI) при различных углах наклона γ возрастает, что логично для данных ребристых труб с малым шагом ребра $s = 2,5$ мм. Это объясняется тем, что при уменьшении высоты оребрения труб площадь теплоотдающей оребренной поверхности уменьшается, при этом конвективный тепловой поток менее ограничен при тесном шаге ребра для свободной конвекции воздуха ребрами по бокам.

В результате экспериментальных исследований выяснено, что для экономии габаритного пространства на предприятии, занимаемого теплообменными аппаратами, из всех типов исследованных труб могут быть собраны теплообменные секции аппаратов (режим свободной конвекции воздуха) при угле наклона труб $\gamma = 15-30^\circ$ к горизонтальной плоскости. При этом наибольшая теплоотдача в режиме свободной конвекции воздуха наблюдается у оребренных труб экспериментальных образцов IV и V.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант № ГБ 20-052).

Рис. 5. Зависимость числа Nu от угла наклона γ к горизонтальной плоскости для одиночной трубы различной относительной высоты h/s (типы I–VI) при числе $Ra = 100000$



Литература

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / А.Н. Бессонный [и др.]; под ред. А.Н. Бессонного, В.Б. Кунтыша. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
2. Кунтыш, В.Б. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения / В.Б. Кунтыш, Н.М. Кузнецов. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.
3. Кунтыш, В.Б. Влияние технологии изготовления труб с навитыми алюминиевыми ребрами на теплоаэродинамические характеристики шахматных пучков аппаратов воздушного охлаждения / В.Б. Кунтыш, А.Б. Сухоцкий, В.П. Мулин // Науч. техн. журнал. Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – №1. – С. 31–37.
4. Топоркова, М.А. Исследование теплоотдачи спирально-оребранных труб аппаратов воздушного охлаждения в условиях естественной конвекции / М.А. Топоркова, В.Б. Кунтыш, А.Э. Пиир // Архангельский лесотехнический институт. – Архангельск, 1978. – 11 с. – Деп. в НИИЭинформэнерго-маш 07.09.78 г. №29.
5. Самородов А. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ...канд. техн. наук: 05.14.14 / А.В. Самородов. – Архангельск, 1999. – 176 с.
6. Позднякова А.В. Совершенствование характеристик и разработка методики расчета промежуточных калориферов лесосушильных камер: дис. ...канд. техн. наук: 05.21.05 / А. Позднякова. – Архангельск, 2003. – 146 с.
7. Волков А. Повышение эффективности сушки длительносохнущих пиломатериалов в камерах периодического

действия: дис. ...канд. техн. наук: 05.21.05 / А. Волков. – Архангельск, 2003. – 154 с.

8. Маршалова Г. Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой: дис. ...канд. техн. наук: 01.04.14 / Г.С. Маршалова. – Минск, 2019. – 153 с.

9. Experimental study of the natural convection heat transfer performance for finned oval tubes at different tilt angles / S. Unger, M. Beyer, J. Thiele, U. Hampel // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2019. – Vol. 105. – P. 100–108.

10. Исследование свободноконвективного теплообмена оребренной трубы и однородного пучка при различных углах наклона труб к горизонтальной плоскости / А.Б. Сухоцкий, Е.С. Данильчик // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2019. – №2 (222). – С. 272–279.

11. Сидорик, Г.С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглооребранных труб и пучков // Труды БГТУ. Серия 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возоб. рес. – 2018. – №1. – С. 85–93.

12. Сухоцкий, А.Б. Интенсификация свободной конвекции в однорядном оребренном пучке в аппаратах воздушного охлаждения / А.Б. Сухоцкий, Г.С. Сидорик (Маршалова) // Труды БГТУ. Серия 2. Хим. технол., биотехн., геоэколог. – 2017. – №1. – С. 68–74.

13. Разработка стенда и исследование свободной конвекции одиночной трубы при различных углах наклона / А.Б. Сухоцкий, В.Н. Фарафонов, В.В. Дударев, С.О. Филатов, Г.С. Сидорик // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возоб. рес. – 2017. – №1. – С. 169–174. ■

Статья поступила в редакцию 3.05.2020