

На правах рукописи

ПУТИЛИН Виктор Юрьевич

УДК 536.244

**ТЕПЛООБМЕН И СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ОБТЕКАНИИ
ОДИНОЧНЫХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ С МАЛЫМИ ШАГАМИ ОРЕБРЕНИЯ**

Специальность: 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая
теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2003

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре
«Теплофизики» (Эб) и в ОАО «Машиностроительный завод»
г. Электростали Московской области.

Научный руководитель: Доктор технических наук,
профессор **М.Д.Диев**

Официальные оппоненты: Доктор технических наук,
профессор **В.А.Зейгарник**
Кандидат технических наук,
доцент **В.А.Шевич**

Ведущее предприятие: Исследовательский центр
им. М.В.Келдыша Росавиакосмоса

Защита состоится «___» _____ 2003 г. в ____ часов на
заседании диссертационного совета Д.212.141.08 в Московском
государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, Москва, Лефортовская наб., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н.Э.Баумана.

Отзывы на автореферат просим направлять по указ-
анному адресу на имя секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент


19. XI. 2003г.

Е.Б.Колосов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования. Теплообменные аппараты (ТА) перспективных образцов систем отопления, охлаждения и кондиционирования воздуха на основе оребренных труб с малыми шагами оребрения с полученными деформирующим резанием ребрами (ТДР).

Актуальность исследования обусловлена все более широким применением в вышеупомянутых системах ТА на основе ТДР. По сравнению с трубчато-пластинчатыми ТА они обладают следующими достоинствами:

- отсутствием термического контактного сопротивления (ТКС) ребер с несущей трубой;
- возможностью получения большей компактности ТА вследствие меньших шагов оребрения;
- высокой надежностью и герметичностью ТА вследствие сокращения соединений, а также большей жесткостью и прочностью конструкции ТА;
- упрощением технологии производства ТА и меньшей стоимостью ТА при серийном производстве.

ТДР перспективны также для воздухонагревательной техники, где в настоящее время применяются, как правило, гладкотрубные ТА. Накатное оребрение слабо интенсифицирует теплоотдачу из-за невозможности получения малых шагов оребрения, а навивное - из-за возникающего ТКС, снизить которое крайне затруднительно.

В процессе разработки систем отопления, охлаждения и кондиционирования воздуха необходимы теплофизические параметры влажного воздуха, в частности вязкости, имеющиеся данные которой крайне ограничены, а результаты исследований разных авторов, противоречивы.

Целью работы является исследование теплоотдачи, аэродинамического сопротивления и оценка эффективности ТДР с малыми шагами оребрения при поперечном обтекании влажным воздухом.

В соответствии с целью ставятся следующие **задачи**:

- исследование вязкости влажного воздуха при характерных для систем отопления, охлаждения и кондиционирования воздуха температуре и влажности;
- исследование теплоотдачи и сопротивления ТДР с шагами оребрения менее 2 мм;
- оценка эффективности ТДР по объемным, тепловым и аэродинамическим характеристикам;
- прогноз эффективности ТА на основе исследованных в диссертации ТДР.

Научная новизна исследований:

- впервые исследованы теплообмен и сопротивление на новой теплообменной поверхности - ТДР с шагами оребрения 0,2 - 1,25 мм;
- разработана методика критериальной оценки эффективности теплоотдачи оребренных труб по потерям давления воздуха при прочих равных условиях.

На защиту выносятся:

- результаты экспериментального исследования и обобщения данных о вязкости влажного воздуха (при температуре $t = 20 - 70^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $\phi = 20 - 95\%$);
- результаты экспериментального исследования и обобщения данных о теплоотдаче и сопротивлении ТДР;
- методика критериальной оценки эффективности теплоотдачи оребренных труб по потерям давления воздуха при прочих равных условиях;

- результаты оценки эффективности теплоотдачи на исследованных ТДР.

Практическая значимость работы:

- результаты работы позволяют определять динамическую вязкость влажного воздуха при параметрах, характерных для систем отопления, охлаждения и кондиционирования воздуха ($t = 20 - 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\phi = 20 - 95\%$);

- результаты работы позволяют определять конвективный и приведенный коэффициенты теплоотдачи и аэродинамическое сопротивление труб с шагами оребрения 0,2 - 1,25 мм.

Реализация работы. На основе разработанных в диссертации методов расчета теплоотдачи и сопротивления ТДР разработаны и внедрены ТА опытных образцов систем отопления, охлаждения и кондиционирования воздуха в ОАО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь МО).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на XIII (Санкт-Петербург, 2001 г.) и XIV (Рыбинск, 2003 г.) шк.-сем. молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И.Леонтьева; XII международной конференции по компрессорной технике (Казань, 2001 г.); III Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2002 г.); заседаниях кафедры «Теплофизики» (Эб) МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 основных работ, в том числе 6 работ самостоятельно.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка использованной литературы. Диссертация имеет объем 157 страниц, включая 119 страниц печатного текста, 38 рисунков, 5 таблиц. Список литературы включает 122 наименования.

В первой главе дан обзор и критический анализ материалов, опубликованных в литературе и относящихся к аналитическим и экспериментальным исследованиям теплоотдачи и аэродинамического сопротивления поперечно-оребрённых труб, а также вязкости влажного воздуха. Определен объем необходимых теплоаэродинамических исследований оребренных труб и вязкости влажного воздуха.

Анализ литературы показал, что решающим фактором интенсификации теплообмена являются шаг и высота ребра. Известные попытки интенсификации за счет разрезки, перфорации и подгибки ребер не обеспечивают высокой эффективности. Рекомендуются применять в ТА винтовое оребрение, как наиболее технологичное, а теплоотдачу интенсифицировать уменьшением шага оребрения. Показано, что ТКС немонотонного соединения ребер с трубой в ряде случаев сопоставимо с термическим сопротивлением со стороны воздуха и очень нестабильно при изготовлении и эксплуатации ТА. Наличие ТКС в значительной степени перечеркивает технологичность спирально-навивного оребрения, а параметры спирально-накатного оребрения далеки от оптимального, что приводит к низкой теплоотдаче. По данным Н.Н.Зубкова (МГТУ), деформирующее резание позволяет при отсутствии ТКС развить площадь поверхности до 14 раз при возможном минимальном шаге оребрения $s_p = 0,15 \text{ мм}$ ($\delta = 0,02 \text{ мм}$).

В литературе отсутствуют результаты теплоаэродинамических исследований ТДР и других типов оребрения с шагами s_p менее 2 мм. Параметры исследованного оребрения по данным проработанной литературы и область исследования ($0_{\text{и}}$) в диссертации труб, представлены на рис. 1. Здесь и далее ψ - коэффициент оребрения, h_p - высота оребрения.

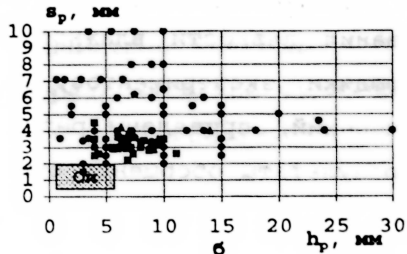
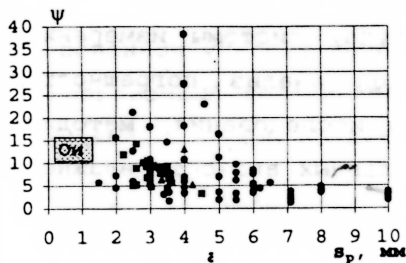


Рис. 1. Параметры исследованных труб ■ – с алюминиевыми, ● – стальными, ▲ – медными ребрами в координатах:

а – в координатах ψ – s_p ; б – в координатах s_p – h_p

Известные теоретические работы по исследованию вязкости газовых смесей проведены на основе кинетической теории и применимы только к идеальным газам. Экспериментальные работы по вязкости влажного воздуха крайне ограничены, а их результаты противоречивы (см. рис. 2).

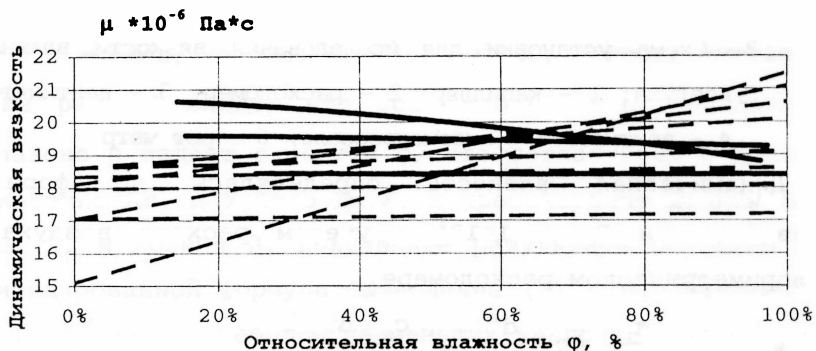


Рис. 2. Вязкость влажного воздуха при $t = \text{const}$:

— — по данным Д.Воронца и Д.Козица;
 — по данным Дж.Кестина и Дж.Х.Уайтло

Анализ литературы показал, что наиболее распространенным и единственным теоретически обоснованным, подтвержденным экспериментально, является капиллярный метод исследования вязкости газов, паров и их смесей.

Во второй главе приведено описание установки исследования вязкости влажного воздуха, системы измерений, методики экспериментов, проведен анализ погрешностей измерений, приведены результаты исследования, методика и результаты обобщения опытных данных вязкости влажного воздуха.

Экспериментальным участком установки (см. рис. 3) является капиллярный вискозиметр, работающий в составе климатической камеры, поддерживающей заданный температурно-влажностный режим.

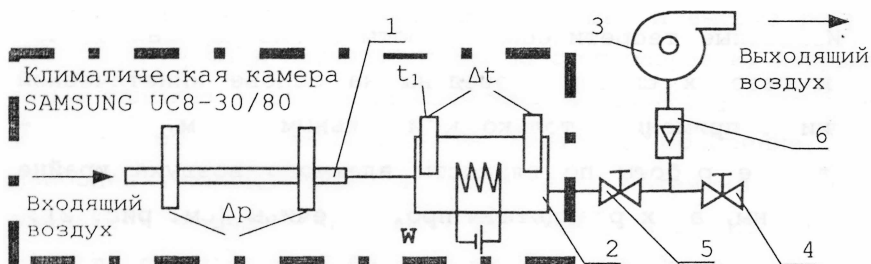


Рис. 3. Схема установки для исследования вязкости влажного воздуха: 1 - капилляр; 2 - расходомер; 3 - вентилятор; 4 - вентиль; 5 - пневмодроссель; 6 - ротаметр

Динамическая вязкость определялась по формуле Пуазейля при $Re \approx 1 \cdot 10^3$ с учетом расхода воздуха в калориметрическом расходомере:

$$\mu = k_p \cdot \frac{\pi}{128} \cdot \Delta p \cdot \frac{d^4}{L_{\text{рас}}} \cdot \rho \cdot \frac{c_p \cdot \Delta t}{W} \quad (1)$$

Температура воздуха на входе в расходомер t_1 и разность температур воздуха в расходомере Δt (см. рис. 3) измерялись эталонными платиновыми термометрами сопротивления Pt 100 класса 1 с погрешностью не более $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Перепад давлений измерялся микроманометром типа

мм с погрешностью не более $\pm 0,12$ мм вод. ст. на стабилизированном участке капилляра диаметром $d = 3$ мм.

Поправочный коэффициент k_p определялся при тарировке установки на сухом воздухе для каждой температуры.

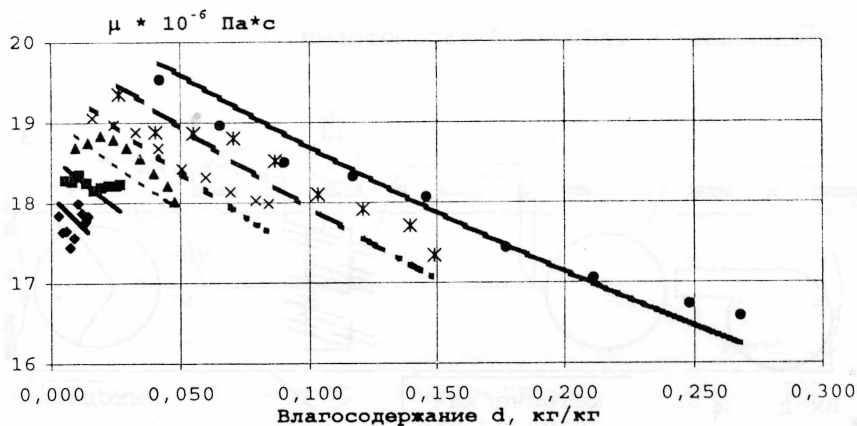


Рис. 4. Динамическая вязкость влажного воздуха при t ($^{\circ}\text{C}$):

♦ 20; ■ 30; ▲ 40; × 50; Ж 60; ● 70;
 — 70; — 60; - - 50; - - - 40; — 30; — 20

Из рис. 4 видно, что при $t = \text{const}$ в исследованном диапазоне μ падает с ростом ϕ , что согласуется с данными Кестина Дж. и Уайтло Дж.Х. и противоречит данным Воронца Д. и Козича Д. Полученные результаты обобщены по модифицированной формуле Сазерленда (2) с параметрами A и B , полученными методом наименьших квадратов:

$$\mu = \frac{\mu_{\text{св}}}{1 + A \cdot d} + \frac{\mu_{\text{п}}}{1 + B/d}. \quad (2)$$

Таблица 1

Значения коэффициентов уравнения (2)

$t, ^{\circ}\text{C}$	20	30	40	50	60	70
$A, [\text{кг/кг}]$	3,68	2,33	1,59	1,43	1,27	1,08
$B, [\text{кг/кг}]$	0,884	1,256	2,218	6,616	9,86	11,628

В третьей главе приведено описание установки теплоаэродинамических исследований ТДР, системы измерений, методики экспериментов, проведен анализ погрешностей измерений, приведены результаты исследования конвективной и приведенной теплоотдачи и сопротивления труб с приведенными в таблице 2 параметрами.

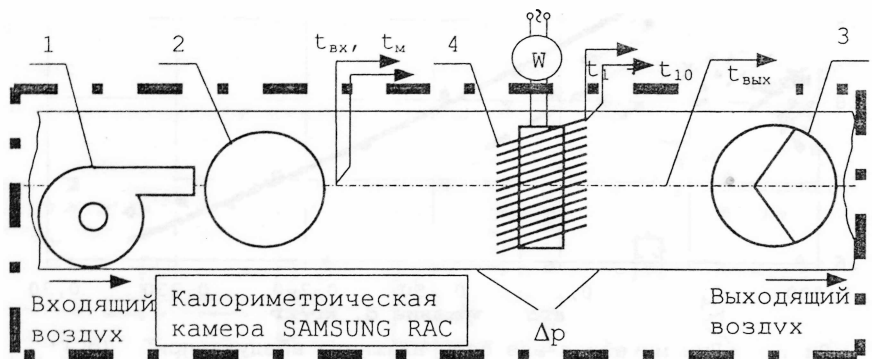


Рис. 5. Принципиальная схема установки: 1 - вентилятор с регулируемой частотой вращения; 2 - ресивер; 3 - расходомер; 4 - исследуемая ТДР

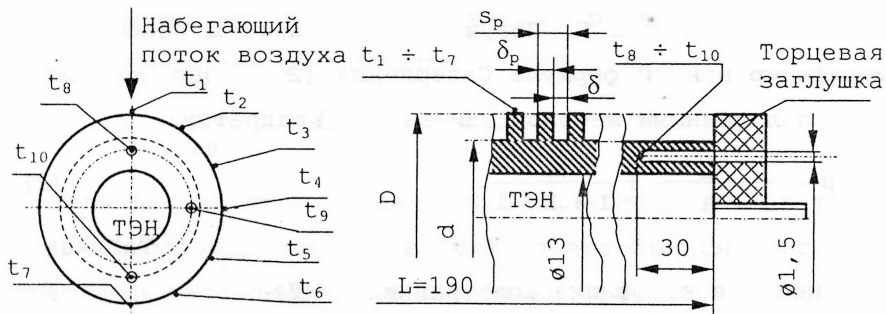


Рис. 6. Схема размещения термодатчиков

Геометрические параметры оребрения исследуемых ТДР

№ трубы	ψ	ψ_D	s_p , мм	h_p , мм	δ_p , мм	d , мм	D , мм
1	11,46	10,58	0,2	1	0,1	24	26
2	11,7	10,38	0,3	1,5	0,15	23,5	26,5
3	12,22	10	0,5	2,5	0,25	22,5	27,5
4	12,94	9,57	0,75	3,75	0,375	21,25	28,75
5	13,75	9,17	1	5	0,5	20	30
6	14,67	8,8	1,25	6,25	0,625	18,75	31,25

Температуры $t_1 - t_{10}$ ($^{\circ}\text{C}$) (рис. 6) измерялись эталонными медно-никелевыми термопарами с погрешностью измерения с учетом тепловых потерь проводов не более $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Температура воздуха $t_{\text{вх}}$, $t_{\text{м}}$, $t_{\text{вых}}$ ($^{\circ}\text{C}$) измерялась эталонными платиновыми термометрами сопротивления Pt 100 класса 1 с погрешностью не более $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Перепад давления воздуха на рабочем участке канала измерялся микроманометром типа ММ с погрешностью не более $\pm 2\%$. Расход воздуха измерялся встроенными в камеру соплами Вентури с погрешностью не более $\pm 5\%$.

Сопротивление оребренных труб определялось с учетом потерь на трение в проточной части стенда. Исследование сопротивления проводилось в изотермическом режиме при $Re=700-7000$, а теплоотдачи при $Re=1000-10000$ с определяющим размером d и скоростью воздуха в живом сечении.

В четвертой главе приведены методика и результаты обобщения теплоаэродинамических исследований оребренных труб, методика и результаты оценки эффективности теплоотдачи исследованных труб, результаты сравнительной оценки эффективности теплоотдачи исследованных в диссертации ТДР и труб, исследованных другими авторами.

Результаты исследования конвективной и приведенной теплоотдачи и аэродинамического сопротивления ТДР обобщены в виде зависимостей:

$$Nu = 0.061 \cdot Re_d^{0.783} \cdot (s_p / d)^{0.31}; \quad (3)$$

$$Nu_{np} = \psi \cdot 0.081 \cdot Re_d^{0.701} \cdot (s_p / d)^{0.31}; \quad (4)$$

$$\zeta = 1.085 \cdot Re_d^{0.086} \cdot (\delta / d)^{0.103}. \quad (5)$$

Результаты обобщения представлены на рис. 7.

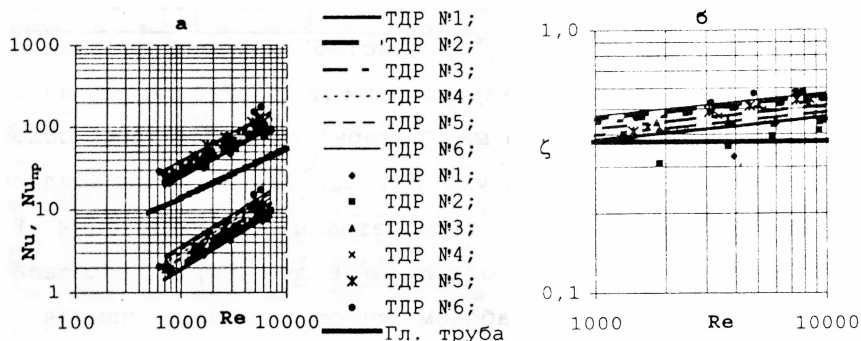


Рис. 7. Характеристики исследованных ТДР:

а - теплоотдача; б - сопротивление

Проведена оценка эффективности теплоотдачи исследованных ТДР относительно гладких труб по критериям:

1. $(Nu/Nu_{г\text{л}})_{Re} / (\zeta/\zeta_{г\text{л}})_{Re}$;
2. компактности ТА при прочих равных условиях;
3. тепловых нагрузок ТА при прочих равных условиях;
4. сравнение потерь давления при прочих равных условиях.

Оценка эффективности теплоотдачи по компактности проводилась по соотношению Г.А.Дрейцера:

$$\eta_v = \frac{V}{V_{г\text{л}}} = \frac{(\zeta / \zeta_{г\text{л}})_{Re}^{\frac{n_{г\text{л}}}{3-n_{г\text{л}}+n_{1г\text{л}}}}}{(Nu_{np} / Nu_{г\text{л}})_{Re}^{\frac{n_{г\text{л}}}{3-n_{г\text{л}}+n_{1г\text{л}}}}}, \quad (6)$$

здесь и далее n , n_1 , $n_{г\text{л}}$, $n_{1г\text{л}}$ - соответственно показатели степени Re уравнений (4), (5) и гладких труб.

Оценка эффективности теплоотдачи по тепловым нагрузкам проводилась по данным В.Ф.Юдина:

$$\eta_0 = C / C_{г\lambda} \cdot (C_{1г\lambda} / C_1)^{\frac{n}{n_1+1}} \cdot Re^{\frac{3+n_{1г\lambda}}{3+n_1}-n_{г\lambda}} \quad (7)$$

Разработана методика критериальной оценки эффективности теплоотдачи по потерям давления на основе методики размерной оценки В.М.Легкого:

$$\eta_N = \frac{C_1 \cdot C_{г\lambda} \cdot W^{n_{г\lambda}-n+n_1-n_{1г\lambda}}}{C_{1г\lambda} \cdot C} \times \frac{1 + \frac{F_0 \cdot C \cdot \lambda / D \cdot Re^n}{2 \cdot W \cdot F_{кан} \cdot \rho_{вх} \cdot C_{рв}}}{1 + \frac{F_0 \cdot C_{г\lambda} \cdot \lambda / D \cdot Re^{n_{г\lambda}}}{2 \cdot W \cdot F_{кан} \cdot \rho_{вх} \cdot C_{рв}}} \quad (8)$$

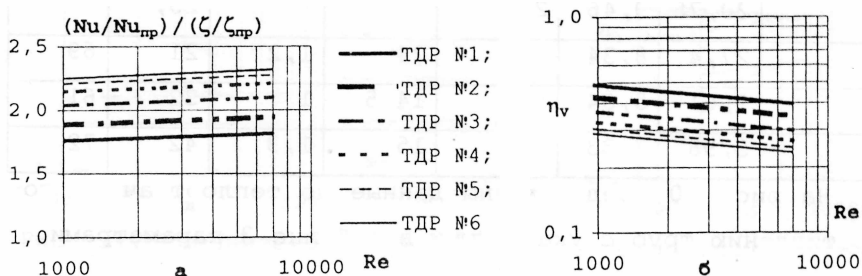


Рис. 8. Оценка эффективности теплоотдачи ТДР по:

а - $(Nu/Nu_{гр}) / (\zeta/\zeta_{гр})$; б - η_v

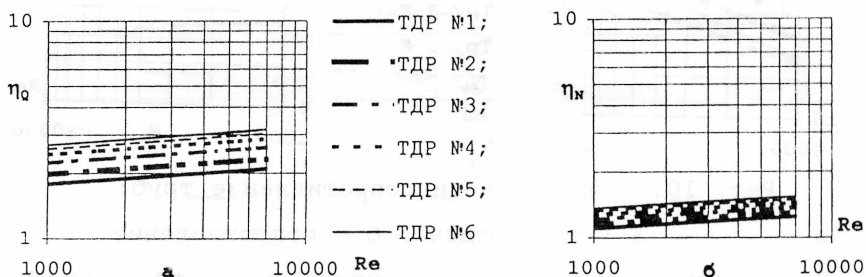


Рис. 9. Оценка эффективности теплоотдачи ТДР по: а- η_0 ; б- η_N

Проведена сравнительная оценка эффективности теплоотдачи исследованных в диссертации ТДР с исследованными другими авторами трубами с представленными в таблице 3 параметрами по компактности, тепловым нагрузкам и потерям давления при прочих равных условиях по описанным выше методикам оценки эффективности теплоотдачи.

Таблица 3

Параметры труб, подвергнутых сравнительной оценке

№ трубы	ψ	ψ_D	s_p , мм	h_p , мм	δ_p , мм	d , мм	D , мм
1	19,93	9,44	2,5	15	0,6	27	56,9
2	22,72	7,01	3	15	0,7	13,4	43,4
3	20,78	9,46	2,53	15,5	0,4	25,9	57
4	27,4	8,34	4	24	1,2	21	69
5	9,61	5,04	5	14,5	1	32	61
6	5,98	3,33	8	15	1,3	42	72

На рис. 10 представлены данные по теплоотдаче и сопротивлению труб с указанными в таблице 3 параметрами.

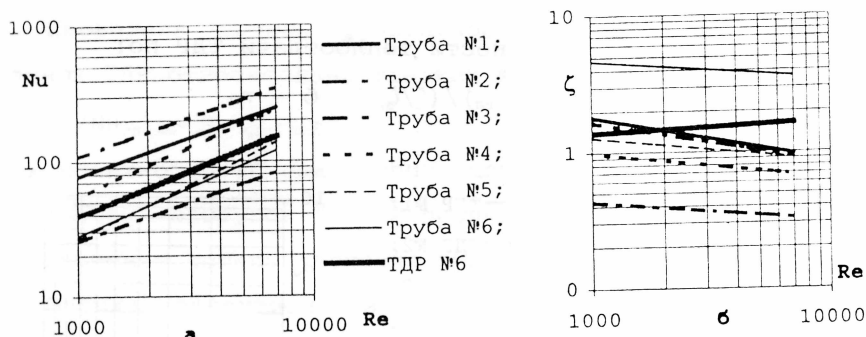


Рис. 10. Теплоотдача и сопротивление труб:

а - теплоотдача; б - сопротивление

Подвергнутые оценки эффективности теплоотдачи трубы являются основными типами поперечно-оребрённых труб. Трубы №1 и №2 со спирально-накатными, №3 со спирально-

навивными алюминиевыми L ребрами и №4 со стальными приварными ребрами в своем классе имеют максимальные значения ψ . Труба №5 имеет спирально-навивное сегментное алюминиевое оребрение, а №6 - спирально-навивное стальное приварное оребрение с конфузорной подгибкой ребер. Эталоном являлась исследованная в диссертации ТДР №6. Результаты сравнительной оценки эффективности теплоотдачи представлены на рис. 11 - 12.

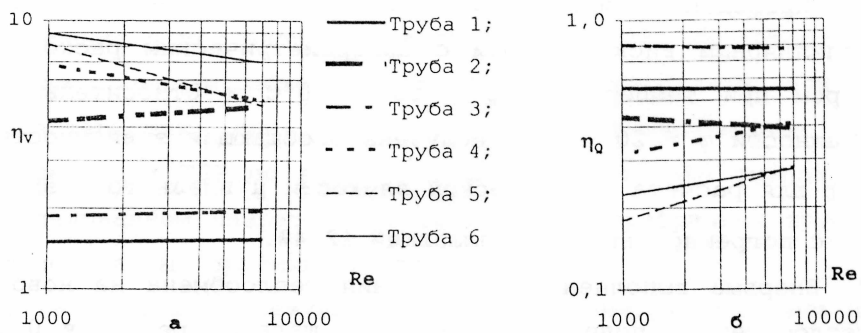


Рис. 11. Сравнительная эффективность теплоотдачи:

а - по η_v ; б - по η_a

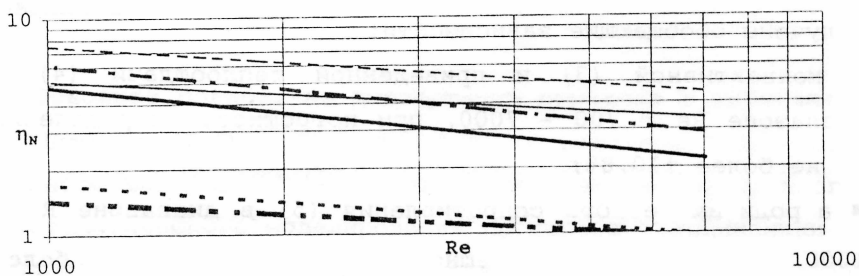


Рис. 12. Сравнительная эффективность теплоотдачи по η_N :

— Труба 1; — Труба 2; - - Труба 3;
 - - - Труба 4; - · - Труба 5; — Труба 6

Показано, что исследованные в диссертации ТДР являются наиболее эффективными. На основании проведенной сравнительной оценки эффективности теплоотдачи ТА при

характерных для систем отопления, охлаждения и кондиционирования воздуха скоростях воздуха подтверждаются выводы о целесообразности интенсификации теплоотдачи в данных условиях уменьшением шага оребрения и о целесообразности применения винтовых ребер, как наиболее технологичных.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование вязкости влажного воздуха капиллярным вискозиметром с калориметрическим расходомером при температуре $t = 20 - 70^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\phi = 20 - 95\%$. Получена обобщающая зависимость (2) для расчета динамической вязкости μ влажного воздуха с погрешностью не превышающей $\pm 2,4\%$.

2. Впервые выполнены исследования теплообмена на новой теплообменной поверхности - ТДР с шагами оребрения $0,2 - 1,25$ мм. В исследованном диапазоне теплоотдача и сопротивление труб возрастали с ростом шага оребрения. Получены обобщающие зависимости:

■ конвективной (3) и приведенной теплоотдачи (4) в диапазоне $Re = 700 - 7000$, при погрешности определения Nu не более $\pm 10,8\%$;

■ аэродинамического сопротивления (5) в диапазоне $Re = 1000 - 10000$, при погрешности определения ζ не более $\pm 7,7\%$.

3. Проведена оценка эффективности теплоотдачи на исследованных ТДР по критерию $(Nu/Nu_{г\lambda})/(\zeta/\zeta_{г\lambda})$, а также по критериям оценки объемных, тепловых и аэродинамических характеристик при прочих равных условиях. Для последней оценки разработана новая методика критериальной оценки

эффективности теплоотдачи по потерям давления воздуха. Оценка эффективности теплоотдачи исследуемых ТДР по сравнению с гладкими показывает:

- опережающий рост теплоотдачи в 1,7 – 2,3 раз;
- большую компактность в 2,1 – 4,3 раза;
- большую тепловую нагрузку в 1,7 – 3,1 раза;
- большие потери давления воздуха в 1,1 – 1,5 раз.

4. Проведена сравнительная оценка эффективности теплоотдачи на исследованных другими авторами основных типах оребрения и исследованных в диссертации ТДР по вышеописанным оценкам объемных, тепловых и аэродинамических характеристик при прочих равных. Исследованные в диссертации ТДР по всем проведенным критериям оценок в исследованном диапазоне Re эффективнее оребренных труб, исследованных другими авторами.

5. На основании результатов исследования теплоотдачи и сопротивления ТДР разработаны и внедрены ТА перспективных образцов систем отопления, охлаждения и кондиционирования воздуха.

Основное содержание диссертации отражено в работах:

1. Путилин В.Ю., Савелло А.Е. Определение вязкости влажного воздуха // Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тр. XIII шк.-сем. молодых ученых и специалистов. – М., 2001. – Т.2. – С. 264 – 267.
2. Путилин В.Ю., Каськов С.И. Особенности измерения влажного воздуха калориметрическим расходомером // Двенадцатая международная конференция по компрессорной технике.: Тез. докладов международной конф. – Казань, 2001. – С. 206 – 207.

3. Путилин В.Ю. Определение вязкости влажного воздуха // Вестник международной академии холода. - 2001. - №4. - С. 40 - 41.
4. Путилин В.Ю. Исследование конвективного теплообмена цельнометаллических оребренных труб с малым шагом оребрения // Актуальные проблемы современной науки. - 2002. - №1 (4). - С. 235 - 236.
5. Путилин В.Ю. Поперечно обдуваемые воздухом цельнометаллические спиральные оребренные трубы с малым шагом оребрения // Аспирант и соискатель. - 2002. - №1 (8). - С. 183 - 186.
6. Путилин В.Ю., Савелло А.Е. Экспериментальное исследование конвективного теплообмена цельнометаллических оребренных труб с малым шагом оребрения при поперечном обдуве, воздухом // Интенсификация теплообмена. Радиационный и сложный теплообмен.: Тр. Третьей Рос. нац. конф. по теплообмену. - М., 2002. - Т.6. - С. 187 - 190.
7. Путилин В.Ю. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление одиночных оребренных труб с малым шагом оребрения // Вестник международной академии холода. - 2002. - №3. - С. 12 - 13.
8. Путилин В.Ю. Оценка эффективности теплоотдачи теплообменных аппаратов на основе оребренных труб, изготовленных методом деформирующего резания // Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тр. XIV шк.-сем. молодых ученых и специалистов. - М., 2003. - Т.2. - С. 317 - 320.
9. Путилин В.Ю. Оценка эффективности теплоотдачи оребренных труб, изготовленных методом деформирующего резания // Вестник международной академии холода. - 2003. - №2. - С. 31 - 33.

1634816

Путилин В.Ю.

Теплообмен и сопротивление
при поперечном обтекании
одиночных оребренных труб
с малыми шагами оребрения
2003 0-00

1634816

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Подписано в печать 20.11.2003. Формат 60х84 Печать офсетная.

Бумага офсетная. Усл.печ.л 1 Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии "Формат А"

г.Электросталь, ул.Красная 15.

Тел. (257) 6-86-00