

УДК. 621.184

*П.Ф. Стоянов, А.Е. Лагутин*

Одесская государственная академия холода, ул. Дворянская, 1/3, Одесса, 65082

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ СИСТЕМ В ТЕХНОЛОГИЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ И НАГРЕВА ГАЗОВ

*В статье представлены результаты экспериментального исследования тепловых и аэродинамических характеристик поперечных наклонных ребер, размещенных на круглой трубе. Выполнено обоснование приемлемого угла посадки ребер и диапазона шага их размещения. Определен предполагаемый эффект при использовании предложенного вида оребренных труб.*

**Ключевые слова:** *Оребренные трубы – Наклонные ребра - Шаг ребер - Теплообмен - Аэродинамика*

*This paper presents the experimental analysis of heat transfer and aerodynamic characteristics of inclined fins placed on circular tube. Feasibility study of fin inclination angle and range of fin pitch was completed. The presumed effect of proposed type finned tubes utilization was determined.*

**Keywords:** *Finned tubes – Inclined fins – Fin pitch – Heat exchange - Aerodynamics*

### I. ВВЕДЕНИЕ

Ребристые поверхности теплообмена нашли широкое применение во многих отраслях промышленности. Современные технологии изготовления ребристых систем теплопереноса позволяют создавать поверхности различных форм и размеров удовлетворяющие различным условиям эксплуатации аппаратов. При этом потенциал эффективности используемых оребренных поверхностей заключается в повышении уровня компактности теплообменных аппаратов, что в конечном итоге определяет их стоимостные показатели.

При создании аппаратов воздушного охлаждения известны следующие пути повышения их энергетической эффективности:

- использование ребристых высокоразвитых элементов для повышения площади поверхности теплопередачи;
- применение турбулизаторов и искусственной шероховатости на поверхности теплопередачи;
- использование теплообменных поверхностей, профиль труб которых приближается к обтекаемому (овальный, эллиптический, каплевидный).

Применение турбулизаторов и искусственной шероховатости поверхности направлено на разрушение пограничного слоя и ликвидацию застойных зон течения теплоносителя. Работы по исследованию таких поверхностей подтвердили ожидаемый эффект. Опытные данные при различных геометрических параметрах оребрения и расходных характеристиках потоков, а также теоретическое описание физических процессов, протекающих при омывании поверхностей с такой геометрией приведены в работах [1-4].

Изучение влияния форм и размеров труб несущих оребрение на теплообмен при вынужденной

конвекции [4-6] показало, что использование труб, профиль которых приближается к обтекаемому приводит к снижению затрат на прокачку теплоносителя без значительного ухудшения теплообмена. Здесь, при равных затратах энергии на транспорт теплоносителя, преимущества труб, профиль которых приближается к обтекаемому весьма ощутимо. Однако, применение труб такого профиля неразрывно связано с повышением опасности их разрыва в местах крепления «калачей». Эта проблема накладывает ограничение на их промышленное применение в технических системах с повышенным внутренним давлением.

В настоящей работе в качестве альтернативного варианта предлагается новое конструктивное решение ребристой поверхности, обеспечивающей безотрывное обтекание труб круглого профиля. Это решение осуществляется за счет насадки ребер на трубу под определенным углом относительно ее оси. В этом случае предел рабочего допустимого давления в аппарате автоматически расширяется. Выбор оптимального угла посадки ребер и диапазона шагов их размещения, при котором ожидаемый эффект не нивелируется свободным «проскоком» теплоносителя в межреберной полости явилось задачей настоящего исследования.

### II. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка преимуществ наклонной посадки ребер на круглую трубу осуществлялась при исследовании тепловых характеристик одиночных ребер, обдуваемых в аэродинамической трубе разомкнутого типа. Общий вид стенда и принципиальная схема рабочего участка приведены на рис.1, 2.

Сопоставление теплотехнических характеристик ребристого элемента при различных углах наклона ребер относительно оси трубы проведено

по условным коэффициентам теплопередачи. Исследуемое латунное ребро (2) устанавливалось в изолированном канале (1) между сменными бобышками (3), имитирующими не участвующие в теплообмене элементы трубы. Бобышки были изготовлены из низко теплопроводного материала и создавали при фиксированных значениях толщины 4,5,6 и 10 мм формы посадки ребра под различными углами ( $\varphi = 90^0, 60^0$  и  $45^0$ ) относительно осевой линии трубы. Подвод питания от источника постоянного тока 5Б-43 (6) к дисковому константановому нагревателю (4), припаянному в центре ребра, осуществлялся через изолирующую бобышку. Для транспорта воздуха в канале рабочего участка использовались последовательно установленные вентиляторы марки МА-21. Применение спаренных вентиляторов было продиктовано необходимостью обеспечения напорно-расходных характеристик в принятом диапазоне скоростей. Питание вентиляторов позволяло регулировать расход воздуха посредством изменения стабилизированного напряжения, подаваемого на обмотку двигателей вентиляторов.

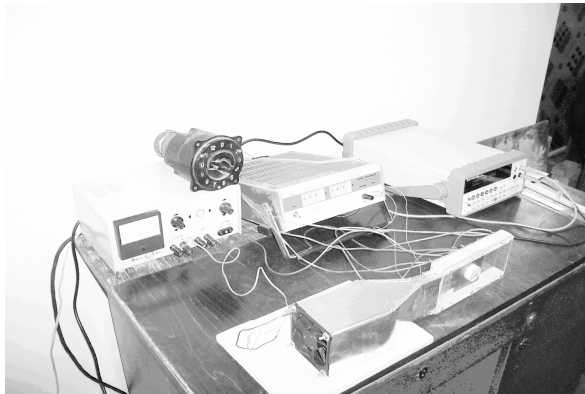


Рис.1 Общий вид стенда

Скорость воздуха в живом сечении рабочего участка определялась из теплового баланса и прямых измерений с помощью анемометра. Расхождение значений скоростей потока воздуха, полученных обоими способами, не превысило  $\pm 0,1$  м/с.

Температурный напор ( $\Delta t_{\text{учл}}$ ) между температурой поверхности в центре сплошного квадратного ребра (0,065x0,065 м) и температурой воздуха на входе в рабочий участок определялся с помощью дифференциальной термопары (5). Измерение температурного напора и температур воздуха на входе и выходе рабочего участка проводилось при помощи медь-константановых термопар, подключенных к милливольтметру PICOTEST 3500A.

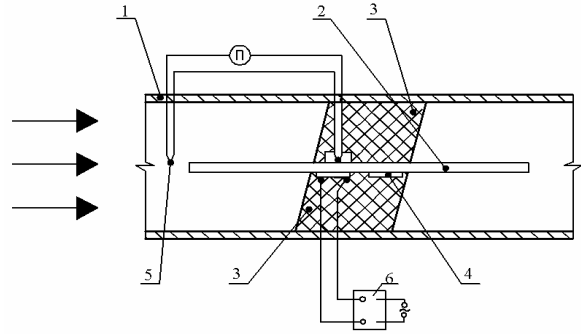


Рис.2 Принципиальная схема рабочего участка

- 1 – канал экспериментального участка;  
2 – исследуемое ребро; 3 – бобышка;  
4 – нагреватель; 5 – дифференциальная термопара;  
6 – источник постоянного тока 5Б-43

Значение условного коэффициента теплопередачи вычислялось по уравнению

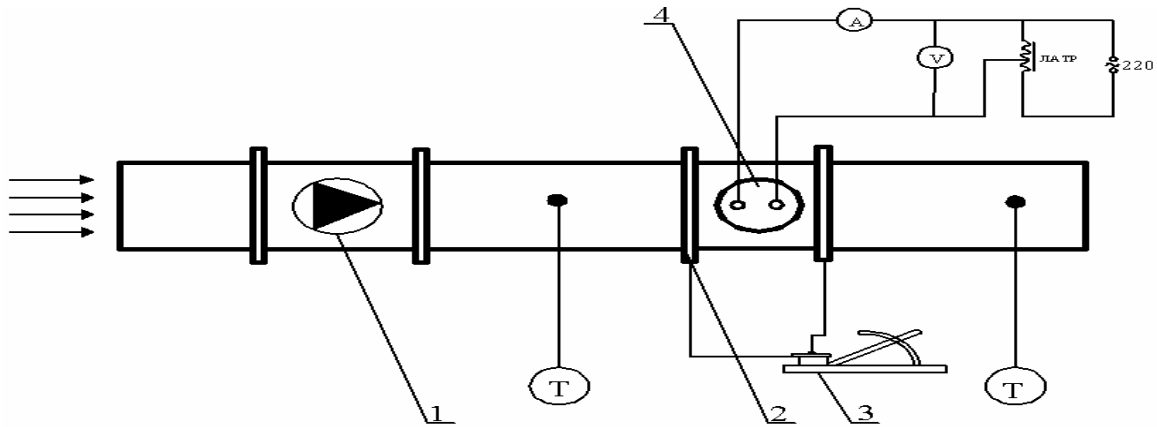
$$K_{\text{учл}} = Q / (F_p \cdot \Delta t_{\text{учл}}) \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка ребристого элемента, Вт;  $F_p$  – площадь наружной поверхности ребра, м<sup>2</sup>.

Предварительные заключения о перспективности труб с поперечными наклонными ребрами должны быть оценены при сравнительных испытаниях тепловых и аэродинамических характеристик одиночных труб. Тем более, что аэродинамическая ситуация в случае использования наклонных ребер совершенно не ясна.

Экспериментальные исследования одиночных труб проводились в аэродинамической трубе разомкнутого типа (рис.3). Рабочий участок представлял собой прямоугольный канал (65x300мм), сечение которого определялось геометрическими размерами исследуемого теплообменного элемента. Воздух в канале трубы перемещался осевым вентилятором (1) Systemair KD 315 XL1.

Регулирование расхода воздуха осуществлялось с помощью частотного преобразователя. Расход воздуха определялся по тепловому балансу и по скорости потока, измеренного с помощью анемометра Techno EA-3010. Электрическая схема питания и включения контрольно-измерительных приборов позволила плавно регулировать мощность электронагревателя калориметрической трубы при помощи лабораторного автотрансформатора РНШ. Контроль мощности электронагревателя осуществлялся с помощью измерительного комплекса К505. Измерение температур выполнялось термопарной установкой из 20 медь-константановых термопар. Точность измерения температур составила  $\pm 0,1$  °С. Измерение термо-ЭДС проводилось милливольтметром PICOTEST 3500A.

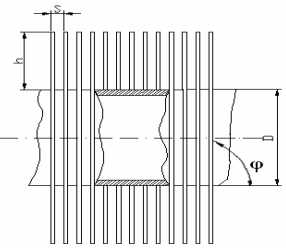
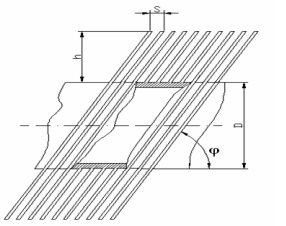
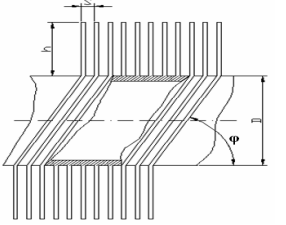


**Рис.3** Экспериментальная установка для испытания одиночных оребренных труб  
 1 - вентилятор; 2 - отборники статического давления; 3 - наклонный микроманометр;  
 4 - ребристый элемент

В рабочем участке устанавливались исследуемые элементы ребристых труб. Общий вид и характеристики исследуемых труб приведены в табл.1. Для всех теплообменных элементов постоянными являлись: длина трубы - 0,3 м, шаг ребер -

0,0043 м, диаметр трубы у основания ребер - 0,018 м. У сравниваемых элементов, для исключения контактного термического сопротивления, соединения ребер с трубой выполнено пайкой.

**Табл. 1** Параметры оребренных поверхностей

№ п/п	Тип трубы.	Размеры ребра, м	Угол наклона ребра, град.	Обозначение трубы	Коэффициент оребрения $\beta$ ; (Площадь поверхности ребер $F_p \cdot 10^3, \text{ м}^2$ )
1		0,03x0,03	$\varphi = 90^0$	Элемент №1	$\beta = 8,6$ ; $F_p = 98$
2		0,03x0,038	$\varphi = 60^0$	Элемент №2	$\beta = 9,7$ ; $F_p = 112$
3		0,03x0,038	$\varphi = 60^0$	Элемент №3	$\beta = 9,7$ ; $F_p = 112$

Температура поверхности трубы у основания ребер определялась с помощью термопар, измерительные спаи которых были припаяны в двух сечениях на поверхности несущей трубы по полукруглости. Температура основания ребра вычислялась как среднearифметическое значение всех 10 контрольных точек.

Для сравнительной оценки, рассмотренных ребристых элементов (см. табл.1), в опытах определялись приведенные ( $\alpha_{прив}$ ) коэффициенты теплоотдачи

$$\alpha_{прив} = Q/[F_n(t_{mp}-t_a)], \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2)$$

где  $Q$  – тепловая нагрузка, Вт;  $F_n$  – площадь наружной поверхности оребренной трубы,  $\text{м}^2$ ;

$(t_{mp}-t_a)$  – разность средних температур трубы у основания ребер и воздуха в сечении рабочего участка,  $^{\circ}\text{C}$ .

При проведении теплотехнических испытаний, для исключения теплотерь через ограждение, рабочий участок изолировался теплоизоляцией ПСБ-С, толщиной 50 мм.

Аэродинамическое сопротивление исследуемых ребристых труб, обдуваемых вынужденным потоком воздуха, определялось в изотермических условиях по разности статических давлений, измеренных до и после теплообменного элемента с помощью микроанометра ММН-240(5)-1,0. Отборники статического давления и термопары для измерения температур воздуха располагались непосредственно на границах рабочего участка.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕЛЕЙ РЕБЕР И РЕБРИСТЫХ ТРУБ

При проведении исследований моделей одиночных ребер скорость потока воздуха в живом сечении канала варьировалась в диапазоне 2,3-6 м/с при изменении толщины и форм бобышек, имитирующих различные варианты шага и наклона ребра. Тепловая нагрузка подводимая к ребру была постоянной и составляла 1,98 Вт, что соответствовало плотности теплового потока, отнесенного к наружной поверхности ребра  $q_n = 266 - 286 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Характер изменения условного коэффициента теплопередачи одиночного ребра при фиксированном значении шага ребра 4 мм для различных вариантов угла наклона ребер представлен на рис.4. График зависимости  $K_{усл} = f(w)$  показывает на тепловые преимущества наклонных ребер. Аналогичный эффект отмечен и для других фиксированных значений шага ребра (5, 6 и 10 мм).

Для исследованных поперечных ребер (рис. 5) направленных по нормали к поверхности трубы ( $\varphi = 90^{\circ}$ ) изменение толщины бобышки подтвердило известные выводы [7-8] о росте коэффициентов теплоотдачи и соответственно условных

коэффициентов теплопередачи при увеличении межреберного зазора. Аналогичные закономерности выявлены и для наклонных ребер ( $\varphi = 60^{\circ}$  и  $45^{\circ}$ ). При наклоне ребра относительно оси трубы ( $\varphi = 60^{\circ}$  и  $45^{\circ}$ ) площадь ребра уменьшалась в сравнении с традиционным расположением ребра ( $\varphi = 90^{\circ}$ ) соответственно на 2,7 % и 7,1 %. Проведенная серия опытов позволила оценить влияние шага и угла наклона поперечного ребра на его тепловые характеристики. На рис.5 представлен график зависимости условного коэффициента теплопередачи ( $K_{усл}$ ) от угла наклона ребра ( $\varphi$ ) при различных значениях шага ребра ( $S$ ) для фиксированного значения скорости воздуха ( $w = 4,5 \text{ м}/\text{с}$ ) в живом сечении рабочего участка. Характер зависимостей  $K_{усл} = f(\varphi)$  во всем исследованном интервале значений скоростей воздуха 2,3-6 м/с подтвердил преимущества наклонных ребер.

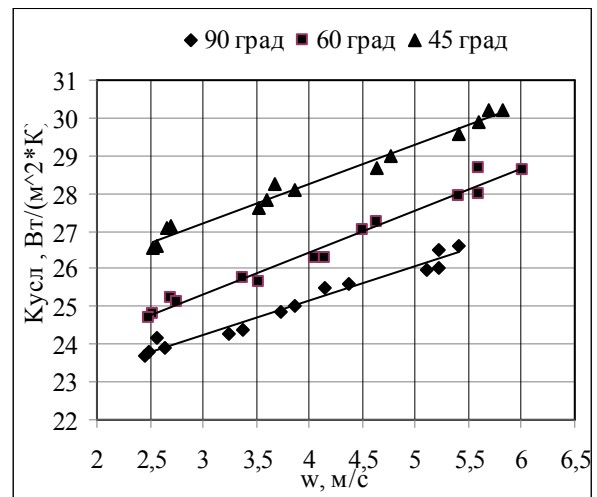


Рис. 4 Зависимость  $K_{усл} = f(w)$  при шаге ребра 4 мм

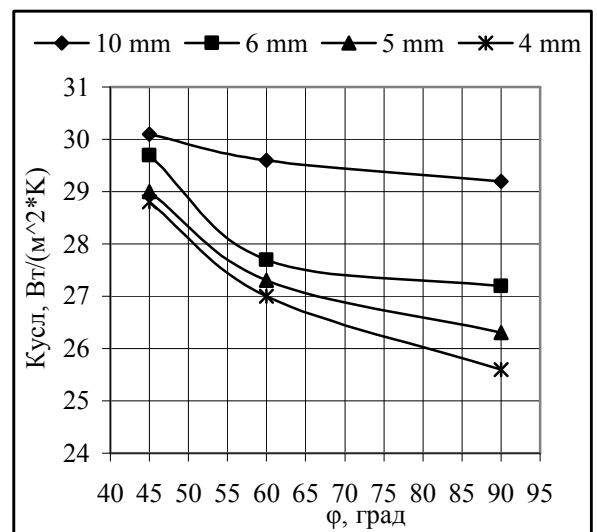


Рис. 5 Зависимость  $K_{усл} = f(\varphi)$  при шагах ребра 4, 5, 6 и 10 мм

Наиболее ощутимый эффект наблюдался при шаге ребра  $S = 4$  мм в области минимального исследованного значения угла наклона ребра ( $\varphi=45^\circ$ ). Дальнейшее увеличение шага ребра до 6 мм расширяло область положительного влияния наклона ребер до  $\varphi=60^\circ$  и практически нивелировало полученный эффект при дальнейшем увеличении межреберного расстояния. Последнее свидетельствует об уменьшении активной зоны взаимодействия потока с охлаждаемой поверхностью, то есть расстояние между ребрами не принуждает поток воздуха обтекать трубу по эллипсу. По всей видимости, на основании полученных данных можно ожидать увеличения условного коэффициента теплопередачи при меньших значениях шага  $S < 4$  мм и угла наклона ребер  $\varphi < 45^\circ$ . Однако, уменьшение  $\varphi < 45^\circ$  приведет к увеличению продольного шага труб и снижению коэффициента оребрения и компактности пучка труб аппарата.

Отмеченные преимущества одиночных моделей наклонных ребер не отражают аэродинамическую картину процесса. Для комплексных испытаний были изготовлены одиночные оребренные трубы (см. табл. 1).

Сравнительные испытания одиночных оребренных труб проводились при стационарных условиях эксплуатации установки в диапазоне скоростей воздуха в живом сечении экспериментального участка  $w = 1,4-12,8$  м/с. Результаты тепловых и аэродинамических испытаний оребренных труб обобщены рабочими зависимостями:  $\alpha_{прив} = f(w)$ ;  $\Delta P = f(w)$

Погрешности теплотехнических и аэродинамических испытаний соответственно составили: 4 – 8 %, 3 – 5 %.

Графики зависимостей  $\alpha_{прив} = f(w)$  и  $\Delta P = f(w)$  представлены на рис. 6,7

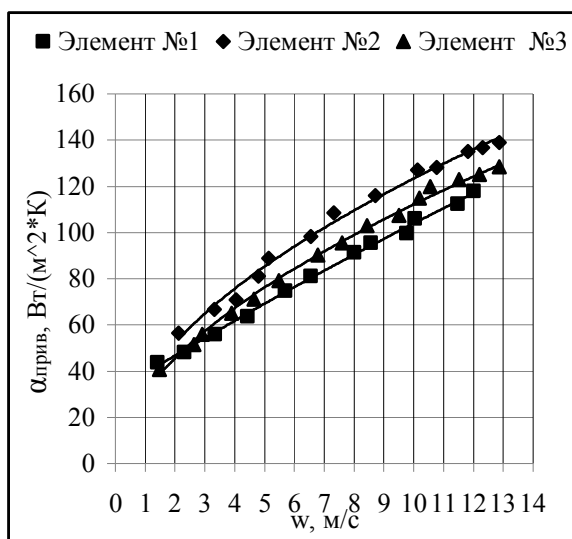


Рис. 6 График зависимости  $\alpha_{прив} = f(w)$

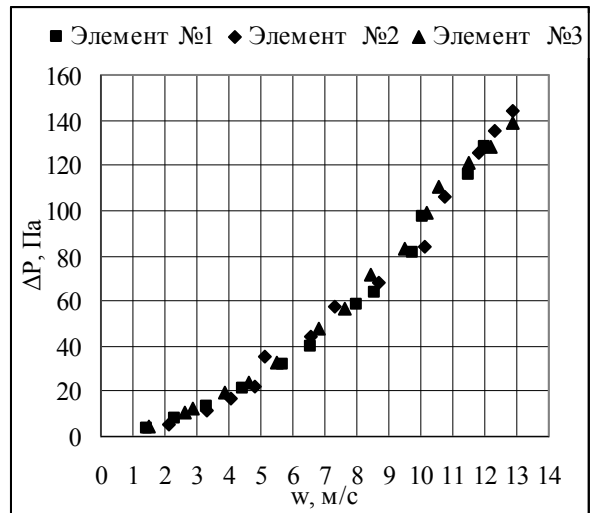


Рис. 7 График зависимости  $\Delta P = f(w)$

Теплотехнические исследования (рис. 6) подтвердили преимущества труб с наклонными ребрами. Отмеченное повышение тепловой эффективности предложенных поверхностей практически происходит без ухудшения аэродинамических показателей (рис. 7). Здесь следует отметить, что для всех исследованных труб обеспечивалось примерное равенство коэффициента оребрения поверхности  $\beta$ . В этом случае, для наклонных ребер длина ребра вдоль потока воздуха была больше, чем для ребер, направленных по нормали к поверхности трубы ( $\varphi = 90^\circ$ ). Такое решение было принято для исключения влияния степени оребрения на сравниваемые теплотехнические показатели исследованных труб при создании условий равенства живых сечений проходу воздуха. В связи с этим можно утверждать, что повышение коэффициентов теплоотдачи на ~23 % элемента №2 по сравнению с элементом №1, в диапазоне скоростей воздуха 5 - 13 м/с, связано с интенсификацией процесса при течении воздушного потока в модифицированном межреберном канале с наклонными ребрами.

Исходя из соображения удобства компоновки пучков труб с наклонными ребрами, был исследован альтернативный вариант с отогнутыми ребрами (элемент №3). Однако, такая модификация привела к снижению коэффициентов теплоотдачи без ухудшения гидравлических характеристик.

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований установлены закономерности влияния шага и угла наклона поперечных ребер на теплообмен и аэродинамику оребренной поверхности.

#### IV. ВЫВОДЫ

Окончательные выводы о перспективности применения наклонного оребрения могут быть получены при сравнительной оценке энергетических, объемных и массовых показателей различных типов оребренных поверхностей. Для этих целей в дальнейших исследованиях предстоит определить тепловые и аэродинамические характеристики пучков труб с предложенным типом ребер.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **A. Joardar, A.M. Jacobi.** Heat transfer enhancement by winglelet-type vortex generator arrays in compact plain-fin-and-tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration* 31 (2008) 87 – 97
2. **Xiaokui MA, Guoliang Ding, Yanming Zhang, Kaijian Wang.** Airside heat transfer and friction characteristics for enhanced fin-and-tube heat exchanger with hydrophilic coating under wet conditions, *International Journal of Refrigeration* 30 (2007) 1153 – 1167
3. **Chi-Chuan Wang, Young-Ming Hwang, Yur-Tsai Lih.** Empirical correlations for heat transfer and flow friction characteristics of herringbone wavy fin-and-tube heat exchangers, *International Journal of Refrigeration* 25 (2002) 673 – 680
4. **Юдин В.Ф.** Теплообмен поперечно – оребренных труб, - Л.: Машиностроение, 1982,-189 с., ил.
5. **Терех А.М., Багрий П.И., Литвиненко Н.Н., Николаенко Ю.Е., Семеняко А.В.** Испытание опытного образца модуля воздушного охладителя, - *Промышленная теплотехника*, 2008, т.30, №2, с.13-20
6. **Петровский Ю.В., Фастовский В.Г.** Современные эффективные теплообменники, Москва, Госэнергоиздат, 1962
7. **Man-Hoe Kim, Clark W. Bullard.** Air-side thermal hydraulic performance of multi-louvered fin aluminum heat exchangers, *International Journal of Refrigeration* 25 (2002) 390 – 400
8. **Жукаускас А.А.** Конвективный перенос в теплообменниках, - М: Наука, 1982, - 472 с.

---

Получена в редакции 20.01.2009, принята к печати 22.01.2009