

УДК 621.184

*В.И. Князюк, А.Е. Лагутин, П.Ф. Стоянов**Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, 65039, Одесса***ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАКЕТОВ ТРУБ С ПОПЕРЕЧНЫМИ НАКЛОННЫМИ РЕБРАМИ**

В настоящей работе представлены результаты экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи пакетов оребренных труб с поперечными наклонными ребрами. Рассмотрены различные компоновочные решения труб в пакетах. Оценены факторы, оказывающие влияние на теплообмен ребристых труб с наклонным оребрением. Проведено сопоставление теоретического и экспериментального значений эффективности ребра

Ключевые слова: *Оребрение – Теплоотдача – Эффективность – Эксперимент*

This paper presents the results of experimental determination of the finned tubes packets with cross sloping ribs heat transfer coefficients. Different layout solutions of tubes in packets are considered. Factors that influence the heat transfer of fin tubes with inclined fins are evaluated. A comparison of theoretical and experimental values of the efficiency of the rib is conducted.

Keywords: *Fins – Heat transfer – Efficiency – Experiment*

I. ВВЕДЕНИЕ

Теплообменники, использующие атмосферный воздух в качестве охлаждающей среды, применяются в различных отраслях, таких как, энергетика, нефтехимия, компрессорные станции магистральные газопроводы, силовые установки, объекты холодильной техники. Все эти аппараты имеют общие признаки: ребристую поверхность теплообмена и принудительную конвекцию воздуха. В аппаратах воздушного охлаждения (АВО) основное термическое сопротивление теплопередачи сосредоточено на стороне воздуха. Таким образом, проблема интенсификации наружного теплообмена в АВО является актуальной.

Из анализа литературы, посвященной этому вопросу, можно выделить четыре главных направления по интенсификации теплообмена ребристых систем теплоотвода: увеличение компактности аппаратов за счет уменьшения шага ребер и диаметра труб; разрез поверхности ребер на отдельные участки и просечки для периодического уменьшения толщины пограничного слоя; увеличение турбулизации потока воздуха за счет гофрирования и отгиба части ребер, а также создания удобообтекаемых форм оребренных поверхностей.

Уменьшение шага ребер имеет различный эффект для труб с отдельно посаженными ребрами и трубчато-пластинчатых поверхностей со сплошными ребрами на пакет труб.

Для труб с отдельно посаженными ребрами установлено, что рост наружного теплообмена наблюдается с увеличением шага ребер [1-3]. Это явление обусловлено тем, что при частых ребрах основная масса воздуха проходит по их вершинам, либо за пределами ребер, что создает неблагоприятные условия для обтекания воздухом поверхностей труб и ребер у их основания.

Совершенно иная картина наблюдается при продуве воздухом трубчато-пластинчатых поверхностей. Характер обтекания таких поверхности можно уподобить течению воздуха в щелевых каналах, что приводит к более равномерному распределению воздуха и, соответственно, увеличению коэффициентов теплоотдачи при уменьшении шага ребер [4, 5].

Отмеченные закономерности прослеживаются для относительно простых геометрических форм оребрения, хотя несомненный интерес представляют поверхности с наклонными поперечными ребрами, обеспечивающими плавное обтекание круглой трубы воздухом [6].

Целью настоящей работы являлось исследование приведенных и конвективных коэффициентов теплоотдачи пакетов труб с отдельно посаженными прямоугольными наклонными ребрами шахматной и коридорной компоновок.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ.

Исследуемые пакеты труб устанавливались в рабочем участке аэродинамической трубы разомкнутого типа. Описание основных элементов схемы приведено в работе [7], а общий вид установки представлен на рисунке 1.

Теплотехнические исследования пакетов оребренных труб осуществляли с помощью метода полного теплового моделирования при стационарном тепловом потоке. Опытные образцы пакетов были набраны из медных труб $\Phi 18 \times 1$ мм с припаянными медными поперечными ребрами 46×46 мм с наклоном ребер в зоне трубы под углом 60° . Принятые толщина $\delta_r = 0,4$ мм и шаг ребер $u = 4,6$ мм, обеспечивали коэффициент оребрения поверхности $\beta = 19,5$. Для проведения исследований теплоотдачи использовался прямоугольный канал

с рабочим сечением 0,3x0,3 м. в съемных трубных досках которого монтировались исследуемые пакеты труб. С учетом геометрических особенностей наклонных участков оребрения в работе исследованы пакеты труб при различных вариантах обтекания ребер набегающим потоком воздуха (рисунок 2а). В опытах исследовались коридорный и

шахматные 4-рядные пакеты оребренных труб. Для исключения теплопотерь через ограждение трубного пакета измерительный участок изолировался теплоизоляцией ПСБ-С толщиной 50 мм. Испытания пакетов проведены при скоростях воздуха в суженном («живом») сечении рабочего участка $w_{ж.с} = 2,4 \div 10,3$ м/с.



Рисунок 1 – Общий вид установки

Внутри калориметрических труб располагались нихромовые нагреватели с равными электрическими сопротивлениями, изолированные от труб концевыми асбестовыми бобышками. Воздушный зазор между нагревателями и внутренними стенками труб заполнялся кварцевым песком.

Электрическая схема питания калориметров позволяла регулировать мощность нагревателей с помощью лабораторных автотрансформаторов Rucelf LTC-2000. Контроль мощности нагревателей, осуществлялся лабораторными вольтметром АСТВ 0,5 и амперметром АСТ 0,5. В схеме установки также была предусмотрена возможность текущего визуального контроля мощности с помощью цифровых индикаторных датчиков.

Измерения температур воздуха на входе в рабочий участок и на поверхности труб и ребер осуществляли с помощью 116 медь-константановых термопар, с точностью измерения $0,1^{\circ}\text{C}$. Термопары предварительно были апробированы на идентичность показаний в изотермических условиях. Подогрев воздуха в канале аэродинамической трубы контролировали с помощью пятиспайной дифференциальной гипертермопары, установленной на границах рабочего участка. Измерение ЭДС термопар проводилось милливольтметром Picotest 3500a.

Расход воздуха в канале аэродинамической трубы определяли двумя независимыми методами, с помощью термоанемометра Mastercool 52235 и по тепловому балансу.

С учетом различия вариантов расположения наклонных ребер относительно набегающего потока воздуха (рисунок 2а) в двух сечениях труб и

ребер каждого продольного ряда пакета были размещены термопары. Схема размещения термопар на поверхности ребра и трубы на одном контрольном калориметре представлена на рисунке 2б.

Приведенная длина ребра, по варианту (А) расположения ребер вдоль набегающего потока воздуха составила – $L = 51$ мм, а по варианту (В) – $L = 46$ мм.

С учетом возможных вариантов расположения ребер относительно набегающего потока воздуха в опытах исследовались различные комбинации расположения труб в пакетах.

Характеристики исследованных пакетов труб приведены в таблице 1.

Номера пакетов труб представлены в соответствии с выборочными данными гидравлических исследований [7].

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАКЕТОВ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

В опытах определялись приведенные ($\alpha_{пр}$) и конвективные ($\alpha_{к}$) коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha_{пр} = Q / F_H (t_{ср.тр} - t_{ср.в}), \quad (1)$$

$$\alpha_{к} = Q / F_H (t_{ср.р} - t_{ср.в}), \quad (2)$$

где Q – тепловая нагрузка, Вт; F_H – площадь наружной поверхности оребренной трубы, м^2 ; $t_{ср.тр}$ – средняя температура трубы у основания ребер, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ср.р}$ – средняя температура ребристой поверхности, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ср.в}$ – средняя температура воздуха в рабочем участке, $^{\circ}\text{C}$.

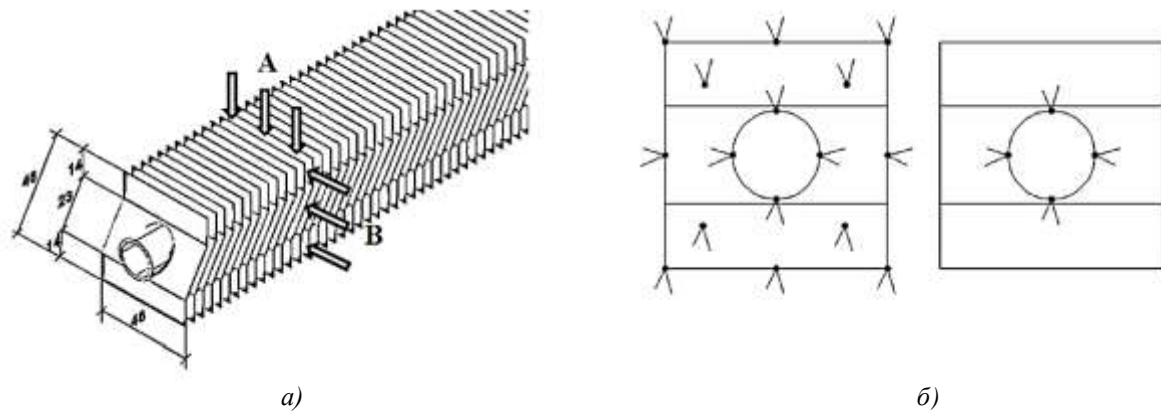


Рисунок 2 – Варианты расположения ребер относительно набегающего потока воздуха (а) и схема размещения термопар на наружной поверхности контрольных калориметров (б).
а – наибольшая длина ребра вдоль потока воздуха;
б – наименьшая длина ребра вдоль потока воздуха.

Таблица 1 – Характеристики исследованных пакетов труб

Показатели	Номер пакета труб					
	1	2	5	6	9	10
Расположение труб в пакете	коридорное		шахматное			
Поперечный шаг труб – S_1 м.	0,05					
Продольный шаг труб – S_2 м.	0,05		0,06		0,05	
Вариант расположения ребер относительно набегающего потока воздуха в рядах пакета труб (см. рисунок 2а)	A	B	A	B	A	B

Для увеличения разрешающей точности опытов удельная тепловая нагрузка, отнесенная к наружной поверхности оребренной трубы, поддерживалась постоянной и составляла 240 Вт/м^2 . Результаты тепловых испытаний пакетов труб представлены на рисунках 3 и 4 рабочими зависимостями вида $\alpha_K = f(w_{ж.с})$ и $\alpha_{ПР} = f(w_{ж.с})$.

Результаты сопоставления исследованных пакетов труб показали, что лучшими теплотехническими показателями обладает пакет труб коридорной компоновки с ориентацией большего размера ребер вдоль потока воздуха (пакет №1). Расхождение значений конвективных коэффициентов теплоотдачи худшего (пакет №2) и лучшего (пакет №1) пакетов, составило 42,5-44%. При этом аэродинамическое сопротивление пакета №2, как показали предварительные опыты [7], меньше чем у пакета № 1 на 35-45%.

Здесь следует отметить, что значения приведенных и конвективных коэффициентов теплоотдачи, для пакетов труб №1 и №9 с равными значениями поперечного и продольного шагов труб $S_1 = S_2 = 0,05$ м., закономерно согласуются с результатами аэродинамических испытаний пакетов [7].

Меньшими значениями аэродинамического сопротивления обладали пакеты №2, 6 и 10, что обусловлено размером ребер вдоль потока воздуха (вариант В) [7].

На основании полученных данных можно заключить, что вариант ориентации (А) большей длиной ребер вдоль потока воздуха (пакеты

№ 1, 9), с точки зрения теплообмена, более перспективны.

Погрешность опытов теплотехнических исследований составила 3-5%.

Результаты испытаний 4-х рядных пакетов оребренных труб обобщены рабочими зависимостями вида:

$$\alpha_K = C_1 \cdot w_{ж.с}^n \quad (3)$$

$$\alpha_{ПР} = C_2 \cdot w_{ж.с}^m \quad (4)$$

Коэффициенты и показатели степени уравнения (3 и 4) приведены в таблице 2.

Область использования полученных уравнений можно принять по графикам, представленным на рисунках 3, 4.

Коэффициенты детерминации R^2 уравнений (3 и 4) лежат в диапазоне значений 0,971-0,995, что позволяет судить о высокой степени надежности полученных рабочих зависимостей.

Для расчета эффективности наклонных ребер в работе использована формула [8] для поперечных прямоугольных ребер

$$E_p = th(mh') / (mh') \quad (5)$$

где: $m = (2\alpha_K / \delta_p \cdot \lambda_p)^{1/2}$, 1/м;
 λ_p - теплопроводность материала ребра, Вт/(м.К);
 δ_p - толщина ребра, м; h' - приведенная высота ребра, м.

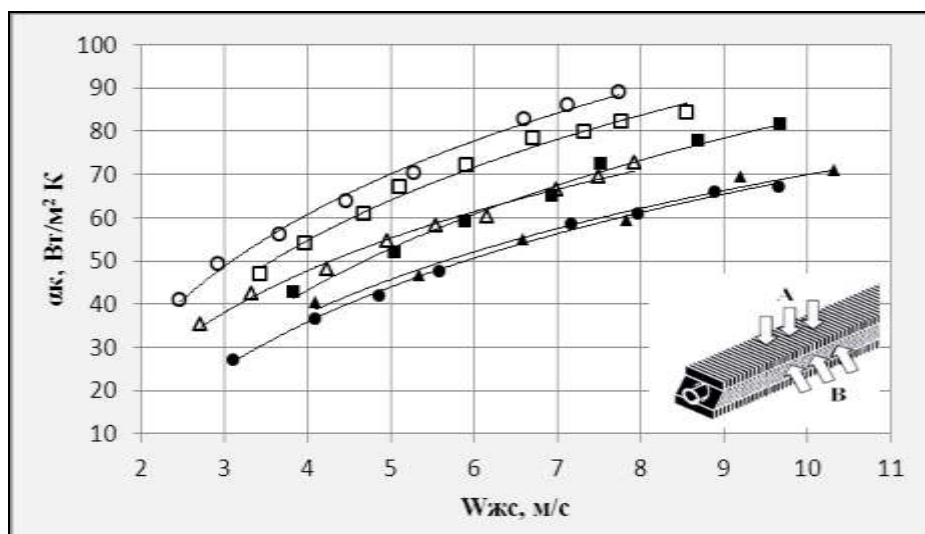


Рисунок 3 – Зависимость конвективного коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха в «живом» сечении пакетов труб: ○ - пакет № 1; ● - пакет № 2; △ - пакет № 5; ▲ - пакет № 6; □ - пакет № 9; ■ - пакет № 10.

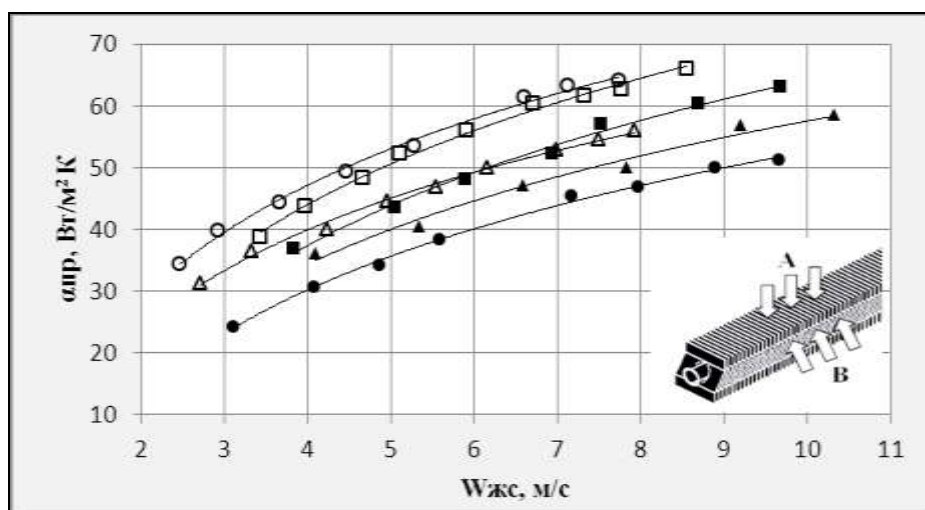


Рисунок 4 – Зависимость приведенного коэффициента теплоотдачи от скорости воздуха в «живом» сечении пакетов труб (обозначение пакетов труб приведено на рисунке 3).

Таблица 2 – Коэффициенты и показатели степени в уравнениях (3 и 4)

Номер пакета труб	C_1	n	R^2	C_2	m	R^2
1	23,6	0,66	0,994	21,7	0,54	0,993
2	11,7	0,80	0,985	12,0	0,66	0,987
5	19,2	0,64	0,995	18,8	0,53	0,995
6	16,3	0,64	0,990	16,6	0,54	0,991
9	22,5	0,64	0,971	20,0	0,57	0,982
10	16,5	0,71	0,993	16,7	0,59	0,994

Для прямоугольных ребер

$$h' = 0,5 \cdot d (\rho - 1) (1 + 0,805 \lg \rho) \quad (6)$$

$$\rho = 1,28 \cdot (B/d) [(A/B) - 0,2]^{1/2} \quad (7)$$

где: А и В соответственно, больший и меньший размеры ребра, м; d – диаметр трубы, м

На рисунке 5 представлены результаты сравнительной оценки теоретического решения по уравнениям (5-7) (сплошная линия), с полученными

экспериментальными значениями эффективности ребра

$$E_p = \alpha_{пр} / \alpha_k.$$

Для всех исследованных пакетов труб отклонение опытных значений эффективности ребра не превысило $\pm 7,5\%$ от расчетного значения по уравнениям (5-7). В расчетах значение теплопроводности медного ребра принималось равным $\lambda_p = 380 \text{ Вт/(м.К)}$.

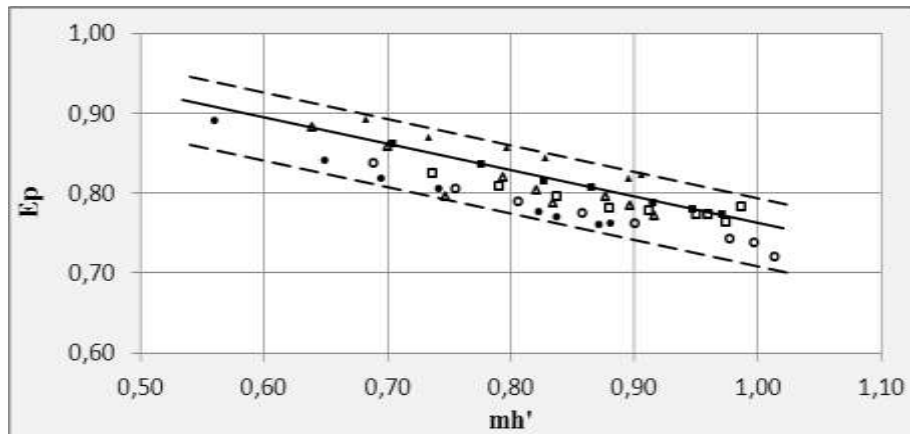


Рисунок 5 – Зависимость эффективности ребра E_p от безразмерного комплекса mh' (обозначение пакетов труб приведено на рисунке 3).

IV. ВЫВОДЫ

Исследования теплообмена в пакетах труб при угловой посадке прямоугольных поперечных ребер на круглую трубу показали, что увеличение продольного шага труб для пакетов шахматной компоновки приводит к снижению коэффициентов теплоотдачи при ориентации ребер большей приведенной длиной вдоль потока воздуха на 15-22%, а для варианта ориентации меньшей приведенной длиной, соответственно, на 10-12%.

Выбор ориентации ребер относительно набегающего потока воздуха для коридорных пакетов труб более существенный. Сравнение конвективных и приведенных коэффициентов теплоотдачи пакетов труб №1 и №2 показали расхождение полученных значений до 33-42%.

Результаты сравнений пакетов труб подтвердили преимущества тесных пакетов ($S1 = S2 = 0,05 \text{ м}$) при размещении ребер большей приведенной длиной вдоль потока воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечно-оребранных труб // Ленинград, Машиностроение, 1982, 189 с., ил.
2. Петровский Ю.В., Фастовский В.Г. Современные эффективные теплообменники // Москва, Ленинград, Госэнергоиздат, 1962, 256 с.
3. Мигай В.К. Влияние неравномерности теплообмена по высоте ребра на его эффективность //

Инженерно-физический журнал, Т VI. №3-1963, с. 51-56

4. Гоголин А.А., Данилова Г.Н., Азарсков В.М., Медникова Н.М. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин// М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 224 с.

5. Гопин С.Р., Шавра В.М. Воздушные конденсаторы малых холодильных машин, -М.: ВО «Агропромиздат», 1987 -151 с.

6. Стоянов П.Ф., Лагутин А.Е. Теплоаэродинамические характеристики поперечно-оребранных пучков труб // Холодильная техника и технология, 2010, №4(126), с. 28-33.

7. Лагутин А.Е., Князюк В.И., Стоянов П.Ф. Исследование аэродинамического сопротивления пакетов труб с поперечными наклонными ребрами // Холодильная техника і технологія, 2012, №1 (135), с. 28-32.

8. Данилова Н.Г., Богданов С.Н., Иванов О.П. и др Теплообменные аппараты холодильных установок / Под ред. д-ра. техн. наук Г.Н. Даниловой – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1986, - 303 с.

9. Антуфьев В.М., Белецкий Г.С. Теплопередача и аэродинамическое сопротивление трубчатых поверхностей в поперечном потоке//Москва, Машгиз 1948,- 119 с.

Получена в редакции 16.01.2013, принята к печати 18.01.2013