

**В. И. Князюк, А. Е. Лагутин, В. В. Речицкий**

Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского  
Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082

## **ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ МАЛОРЯДНЫХ ПАКЕТОВ ТРУБ С НАКЛОННЫМИ РЕБРАМИ**

*В настоящей работе рассмотрены различные компоновочные решения труб в пакетах. Оценены тепловые и аэродинамические характеристики малорядных пакетов труб с поперечными наклонными ребрами. Получены обобщающие критериальные зависимости по тепловым и аэродинамическим характеристикам пакетов труб.*

**Ключевые слова:** Малорядные пакеты труб – Оребренные трубы – Аэродинамика – Теплообмен – Эксперимент

## **УЗАГАЛЬНЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ З ДОСЛІДЖЕННЯ МАЛОРЯДНИХ ПАКЕТІВ ТРУБ З ПОХИЛИМИ РЕБРАМИ**

*У даній роботі розглянуті різні компоувальні рішення труб в пакетах. Оцінені теплові та аеродинамічні характеристики малорядних пакетів труб з поперечними похилими ребрами. Отримано узагальнюючі критеріальні залежності по теплових і аеродинамічних характеристиках пакетів труб.*

**Ключові слова:** Малорядні пакети труб – Оребрені труби – Аеродинаміка – Теплообмін – Експеримент

## **EXPERIMENTAL DATA SUMMARY FOR THE RESEARCH OF PIPES IN THE FEW ROWS OF BUNDLES WITH SLOPE FINS**

*In this paper different layout decisions for tubes in bundles are examined. Thermal and aerodynamic characteristics of the few rows of bundles with cross slope ribs are assessed. The generalizing criterion dependencies according to thermal and aerodynamic characteristics of finned tubes in bundles are obtained.*

**Keywords:** Few rows bundles tubes – Finned tubes – Aerodynamics – Heat exchange – Experiment

### **I. ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время практика создания воздушных теплообменников все больше опирается на использование малорядных пакетов оребренных труб.

Экспериментальные исследования, проведенные в Одесской государственной академии холода, показали, что создание коридорных пакетов из трехтрубных элементов с поперечными наклонными ребрами приводит к улучшению теплогидравлических характеристик воздушных теплообменных аппаратов /1-3/. Однако на базе трехтрубных элементов весьма проблематично создание малорядных и шахматных пакетов. Для оценки характеристик различных модификаций малорядных пакетов были созданы оребренные поверхности с угловой посадкой ребер в зоне трубы.

Целью данной статьи являлось обобщение опытных данных и получение зависимостей по расчету потерь напора и конвективных коэффициентов теплоотдачи с учетом малорядности пакетов труб с наклонными ребрами.

### **II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Оценка тепловых и аэродинамических показателей четырехрядных коридорных и шахматных пакетов труб с отдельно посаженными на трубу наклонными ребрами представлена в работах /4, 5/ в форме рабочих зависимостей коэффициентов теплоотдачи и потерь напора от скорости воздуха в «живом» сечении пакетов труб  $\alpha_i = f(w_{жс})$  и  $\Delta P = f(w_{жс})$ .

При определении коэффициентов теплоотдачи использовались методы полного теплового моделирования при стационарном тепловом потоке.

Аэродинамические испытания были проведены в изотермических условиях. Принятые в исследованиях значения поперечного  $S_1$  и продольного  $S_2$  шагов труб в пучках выбраны, исходя из условий создания плотной компоновки по поперечному ряду труб ( $S_1=0,05$  м.) при различных значениях продольного шага  $S_2= 0,05 - 0,065$  м.

Исследованные пучки труб отличались различным расположением наибольшей приведенной длины ребер, относительно набегающего потока воздуха. Для вариантов обтекания труб А и В

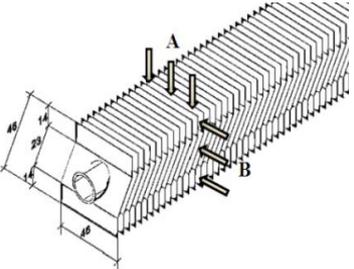
(таблица 1) приведенные длины ребер, соответственно, составили:  $L = 0,051$  м. и  $L = 0,046$  м.

Варианты рассмотренных комбинаций расположения труб в четырехрядных пакетах приведены в таблице 1.

Пакеты труб №1-4 с относительными шагами расположения труб  $S_1/d = S_2/d = 2,78$  путем последовательного удаления 4, 3 и 2 рядов были пре-

образованы в трехрядный, двухрядный и однорядный пакеты. С отмеченными пакетами были проведены опыты по определению аэродинамического сопротивления при переменных значениях скорости воздуха. Результаты исследования пакетов труб для коридорных пакетов представлены на рисунках 1, 2. Аналогичные зависимости получены и для шахматных пакетов труб №3, 4.

**Таблица 1** – Характеристики пакетов труб

	№ пакета труб							
	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Характеристики пучков</b>								
Вариант размещения труб относительно набегающего потока воздуха	A	B	A	B	A	B	A	B
Приведенная длина ребра вдоль потока воздуха, - L, мм	51	46	51	46	51	46	51	46
Поперечный шаг труб - $S_1$ , мм	50	50	50	50	50	50	50	50
Продольный шаг труб – $S_2$ , мм	50	50	50	50	55	55	60	60
Относительный поперечный шаг труб – $\sigma_1 = S_1/d$	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78	2,78
Относительный продольный шаг труб – $\sigma_2 = S_2/d$	2,78	2,78	2,78	2,78	3,06	3,06	3,49	3,49
Коэффициент компактности – $\Pi$ , $\text{м}^2/\text{м}^3$	391	391	391	391	356	356	326	326
Расположение труб в пакете: Ш-шахматное; К- коридорное	К	К	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
Отношение живого сечения пакета труб к свободному сечению канала, $(F_{жс}/F_{св})$	0,59							

Из рисунков следует, что при увеличении числа рядов труб вдоль потока воздуха потери напора  $\Delta P$  пакетов растут непропорционально, а отношения потерь напора, приходящихся на один ряд пакетов  $\Delta P/z$ , зависит от принятого варианта

обтекания пакета набегающим потоком воздуха и компоновочного решения. При ориентации поверхности шахматных и коридорных пакетов по варианту (B) зафиксированы наименьшие потери напора.

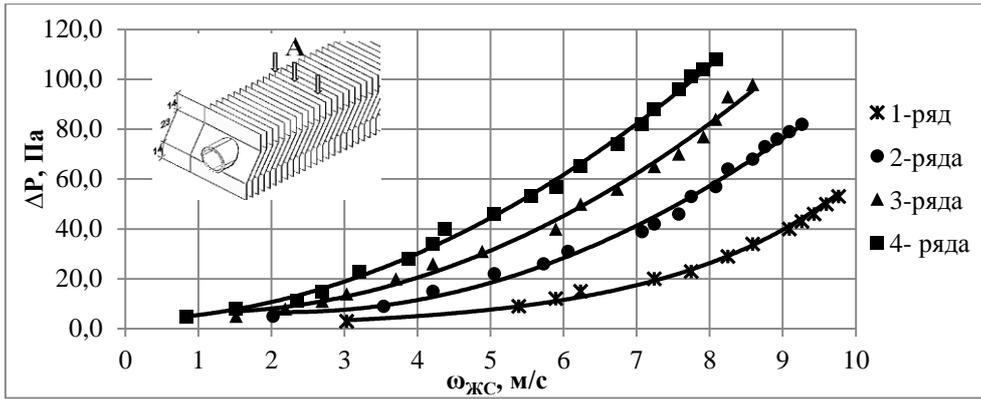


Рисунок 1 – Зависимость  $\Delta P = f(\omega_{жс})$  для однорядных, двухрядных, трехрядных и четырехрядных коридорных пакетов труб (вариант обтекания А)

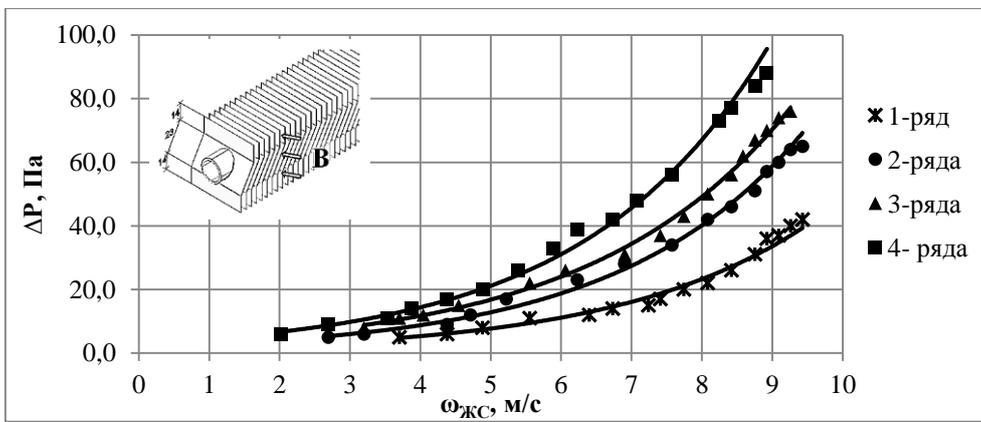


Рисунок 2 – Зависимость  $\Delta P = f(\omega_{жс})$  для однорядных, двухрядных, трехрядных и четырехрядных коридорных пакетов труб (вариант обтекания В)

Отношения потерь напора ( $\Delta P_i/z_i$ ), приходящихся на один ряд малорядного коридорного пакета ( $z_i = 1 \dots 4$ ), к отношению потерь напора, на один ряд шестирядного пакета ( $z_6 = 6$ ), представлены на рис 3, в виде функции:

$$C_z = f(z) = (\Delta P_i/z_i) / (\Delta P_6/z_6).$$

Полученные величины поправок  $C_z$  к потерям напора малорядных пакетов труб

справедливы только для рассмотренных поверхностей. Характер зависимости  $C_z = f(z)$  для варианта (В) коридорного пакета по характеру зависимости согласуется с данными для малорядных пакетов из оребренных труб традиционных типов /6-8/, и имеет совершенно противоположный характер влияния при расположении труб в пакете по варианту (А).

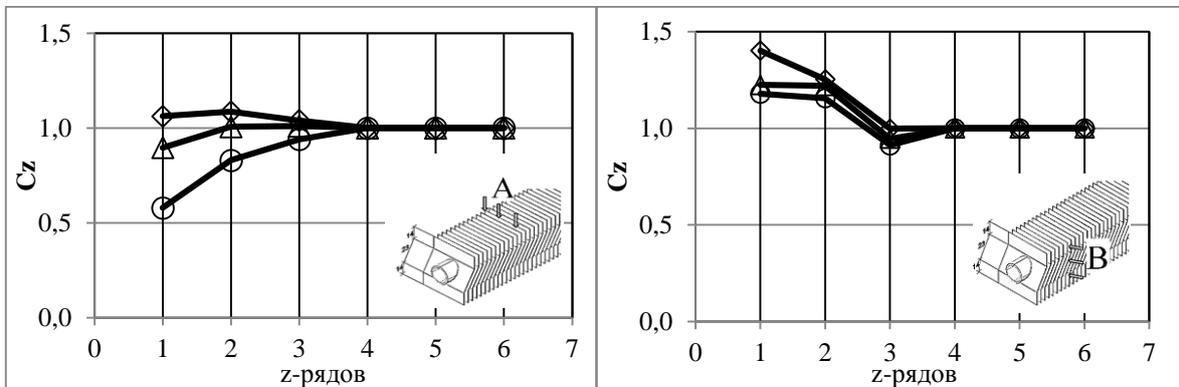


Рисунок 3 – Зависимость  $C_z = f(z)$  для коридорных пакетов труб при разных значениях скорости воздуха:

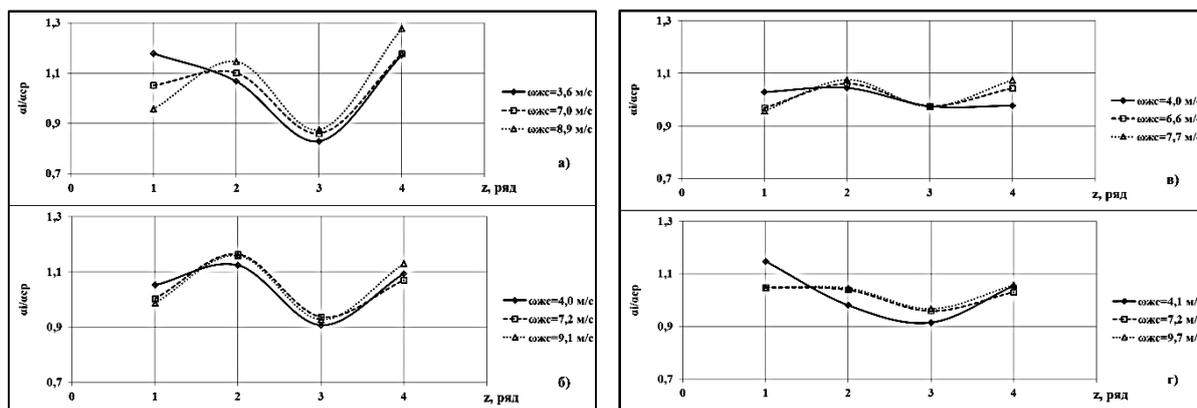
○ -  $\omega_{жс} = 5$  м/с; △ -  $\omega_{жс} = 7$  м/с; ◇ -  $\omega_{жс} = 8$  м/с;

При коридорной компоновке труб для варианта В, в диапазоне скоростей воздуха  $\omega_{ЖС} = 5 - 8$  м/с, значение поправки  $C_z$  на рядность пакета всегда больше единицы. Для варианта А, в диапазоне скоростей воздуха  $\omega_{ЖС} = 5 - 7$  м/с, величина поправки  $C_z \leq 1$ , а при скорости воздуха  $\omega_{ЖС} > 7$  м/с величина поправки  $C_z > 1$ , (рисунок 3).

Для малорядных шахматных пакетов труб значение поправки на рядность пакета, в пределах

точности опытов аэродинамических исследований 10%, можно принять  $C_z = 1$ .

Отношение значений коэффициентов теплоотдачи ряда  $\alpha_i$  к средним значениям коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{ср}$  соответствующих четырехрядных пакетов труб (пакеты № 1-4) при различных значениях скорости воздуха в живом сечении пакетов, представлены в виде зависимостей  $\alpha_i/\alpha_{ср} = f(z)$  на рисунке 4.



**Рисунок 4** – Зависимость  $\alpha_i/\alpha_{ср} = f(z)$  для пакетов труб:

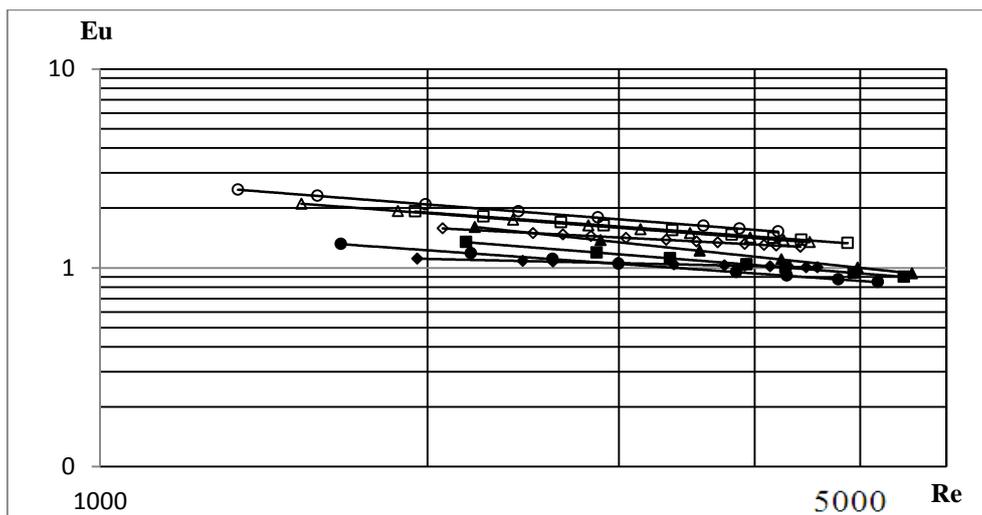
а) – шахматного пакета №3 (вариант А); б) – шахматного пакета №4 (вариант В);  
в) – коридорного пакета №1 (вариант А); г) – коридорного пакета №2 (вариант В);

Для всех исследованных пакетов труб порядное изменение отношений конвективных коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_i/\alpha_{ср}$  в пределах погрешности  $\pm 10\%$  можно принять равным 1.

Для пакетов труб характеристики, которых

приведены в таблице 1, результаты тепловых и аэродинамических испытаний представлены на рис. 5, б критериальными зависимостями вида:

$$Nu_K = C_1 Re^m, \quad Eu = C_2 Re^{-n}.$$



**Рисунок 5** – Зависимость  $Eu = f(Re)$ : ○ – пакет № 1; ● – пакет № 2; □ – пакет № 3; ■ – пакет № 4; ◇ – пакет № 5; ◆ – пакет № 6; △ – пакет № 7; ▲ – пакет № 8.

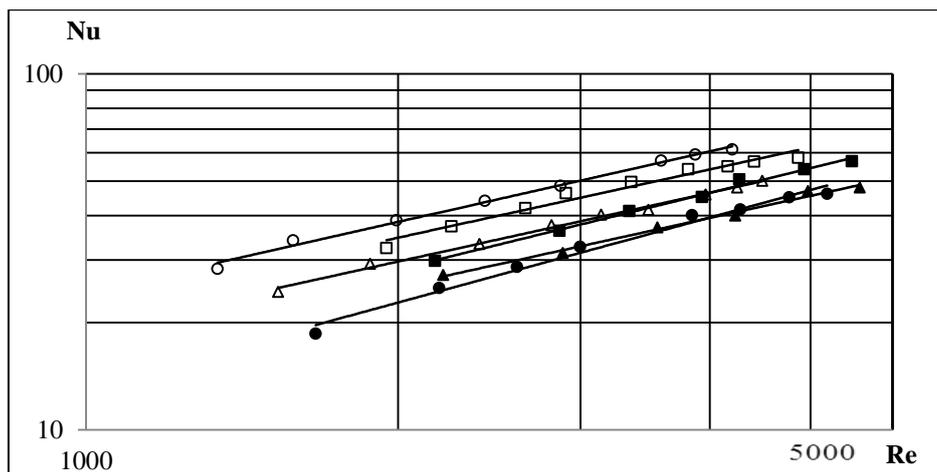


Рисунок 6 – Зависимость  $Nu_K = f(Re)$ : ○ – пакет № 1; ● – пакет № 2; □ – пакет № 3; ■ – пакет № 4; △ – пакет № 7; ▲ – пакет № 8.

Значения коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$  и показателей степени  $m$ ,  $n$ , полученных зависимостей  $Eu = f(Re)$  и  $Nu_K = f(Re)$  сведены в таблицу 2. В качестве определяющих параметров были выбраны скорость воздуха в «живом» сечении пакета и

гидравлический диаметр сечения. Область использования полученных уравнений можно принять по графикам, представленным на рис. 5, 6 и характеристикам пакетов, приведенным в таблице 1.

Таблица 2 – Значения коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$  и показателей степени  $m$ ,  $n$ .

Номер пакета	$C_1$	$m$	R	$C_2$	$n$	R
1	0,26	0,66	0,99	52,68	0,43	1
2	0,05	0,79	0,99	23,21	0,39	1
3	0,27	0,64	0,97	39,68	0,40	1
4	0,12	0,71	0,99	37,61	0,43	1
5	-	-	-	13,37	0,28	1
6	-	-	-	2,76	0,12	1
7	0,22	0,64	0,99	43,86	0,41	1
8	0,20	0,64	0,99	139,69	0,58	1

При определении аэродинамического сопротивления малорядных коридорных пакетов труб с учетом поправки на рядность необходимо использовать зависимость:

$$Eu_i = Cz (C_2/4) Re^{-n} z$$

Для малорядных шахматных пакетов труб значение поправки на рядность пакетов можно принять равным единице. В приведенных критериях подобия  $Nu_K$  физические параметры воздуха принимались по его средней температуре.

### III. ВЫВОДЫ

Для всех исследованных пакетов труб вариант обтекания (B) более предпочтителен с точки зрения потерь напора. Увеличение продольного шага  $S_2$  в пределах 0,05 - 0,06 м. для варианта A (пакеты №3, №7) и варианта B (пакеты №4, №8),

практически не оказывает влияния на аэродинамическое сопротивление, но при любом варианте обтекания труб при увеличении продольного шага наблюдалось снижение коэффициентов теплоотдачи на 17%.

Результаты тепловых исследований показали, что при равных относительных шагах труб ( $\sigma_1 = idem$   $\sigma_2 = idem$ ) наибольшее влияние на значения конвективных коэффициентов теплоотдачи оказывает вариант обтекания пакетов труб потоком воздуха.

Особенно ошутимое снижение  $Nu_K$  наблюдалось при переориентации труб для тесного коридорного пакета труб. Здесь вариант переориентации ребер с варианта A на вариант B привел к снижению конвективных коэффициентов теплоотдачи на 50-75%. Для шахматных пакетов труб при переориентации ребер с варианта A на вариант B снижение коэффициентов теплоотдачи также присутствует, но оно менее выражено. При расчете

коэффициентов теплоотдачи малорядных пакетов ( $z < 4$ ) можно использовать полученные уравнения  $Nu_K = C_1 Re^m$  для четырехрядных пакетов труб.

Для коридорных малорядных пакетов труб ( $z < 4$ ) при определении потерь напора необходимо учитывать поправку на его рядность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Стоянов П. Ф., Лагутин А. Е.** Тепло-аэродинамические характеристики поперечно-ребренных пучков труб // Холодильная техника и технология, 2010, №4(126), с. 28-33.
2. **Стоянов П. Ф., Лагутин А. Е.** Совершенствование теплообменных систем в технологиях охлаждения и нагрева газов // Холодильная техника и технология, 2009, №1 (117), с. 9-14
3. **Стоянов П. Ф., Лагутин А. Е.** Численное моделирование обтекания поперечно ребренной поверхности теплоотвода // Холодильная техника и технология, 2010, №2 (124), с. 35-41
4. **Лагутин А. Е., Князюк В. И., Стоянов П. Ф.** Исследование аэродинамического сопротивления пакетов труб с поперечными наклонными ребрами

// Холодильная техника и технология, 2012, №1 (135), с. 28-32.

5. **Князюк В. И., Лагутин А. Е., Стоянов П. Ф.** Исследование тепловых характеристик пакетов труб с поперечными наклонными ребрами // Холодильная техника и технология, 2013, №1 (141), С. 5-9.
6. **Юдин В. Ф.** Теплообмен поперечно-ребренных труб // Ленинград, Машиностроение, 1982, 189 с., ил.
7. **Письменный Е. Н.** Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-ребренных труб. – Киев: Альтерпрес, 2004. -244 с.
8. **Горбатенко В. Я., Галушак И. В.** Аэродинамические характеристики поперечно-омываемых пучков труб с просечным спирально-ленточным оребрением // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование, 2008, №6, с. 131-136.

---

Получена в редакции 16.05.2013, принята к печати 04.06.2013