

УДК 536.24:533.6.011

Письменный Е.Н., Терех А.М., Баранюк А.В., Бурлей В.Д.

Национальный технический университет Украины «КПИ»

## ТЕПЛООБМЕН И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МАЛОРЯДНЫХ ПУЧКОВ ПЛОСКО-ОВАЛЬНЫХ ТРУБ С НЕПОЛНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Виконані дослідження конвективного теплообміну і аеродинамічного опору мало-рядних шахових і коридорних пучків плоско-овальних труб з неповним обрешеченням. Отримані узагальнюючі залежності для розрахунку поправок, що враховують вплив кількості поперечних рядів труб в пучку на його теплообмін та аеродинамічний опір.

Выполнены исследования конвективного теплообмена и аэродинамического сопротивления мало-рядных шахматных и коридорных пучков плоско-овальных труб с неполным обрешечением. Получены обобщающие зависимости для расчета поправок, учитывающих влияние числа поперечных рядов труб в пучке на его теплообмен и аэродинамическое сопротивление.

Researches of heat transfer and aerodynamic resistance of few rows staggered and in-line banks of flat-oval tubes with incomplete fins are executed. Generalizing dependences are obtained for calculation of correction accounting for the effect of the number of transversal rows of tubes in a bank on its heat transfer and aerodynamic resistance.

$S$  – шаг между трубами;

$w$  – скорость потока;

$z_2$  – число поперечных рядов труб;

АВО – аппарат воздушного охлаждения;

**Безразмерные комплексы:**

$Nu$  – число Нуссельта;

$Re$  – число Рейнольдса;

$Eu$  – Число Эйлера;

**Нижние индексы:**

$k$  – конвективный;

$0$  – на один поперечный ряд;

$1$  – поперечный;

$2$  – продольный.

### Введение

Малорядные пучки из ребристых труб применяют в калориферах для лесосушильных камер, подогрева дутьевого воздуха в котлах, в системах вентиляции, кондиционирования и воздушного отопления общественных зданий и промышленных предприятий, в теплообменных секциях аппаратов воздушного охлаждения (АВО). Число поперечных рядов труб  $z_2$  по направлению движения воздуха в таких устройствах обычно составляет 1...3, в АВО  $z_2 = 3...6$ .

Отсутствие рекомендаций по определению влияния количества поперечных рядов труб  $z_2$  на теплообмен и аэродинамическое сопротивление пучков способствует принятию противоречивых конструкторских решений при проектировании теплообменных устройств из ребристых труб.

В связи с этим актуальными являются вопросы создания надежных обобщенных за-

висимостей для расчета поправок, учитывающих влияние входных рядов на теплообмен и аэродинамическое сопротивление пучков труб. Неучет влияния входных рядов может привести к неоправданному занижению или завышению площади теплообменной поверхности и сопротивления устройства.

В НТУУ „КПИ” проведены экспериментальные исследования влияния на теплообмен и аэродинамическое сопротивление числа поперечных рядов шахматных и коридорных компоновок плоско-овальных труб с неполным обрешечением [1-4] (рис. 1, 2).

Влияние числа поперечных рядов труб на теплообмен и аэродинамическое сопротивление пучков обычно учитывается поправками  $C_z$  и  $C'_z$  в обобщенных уравнениях (1), (2):

$$Nu = C_z C_q Re^m, \quad (1)$$

$$Eu_0 = C'_z C_s Re^{-n} \quad (2)$$

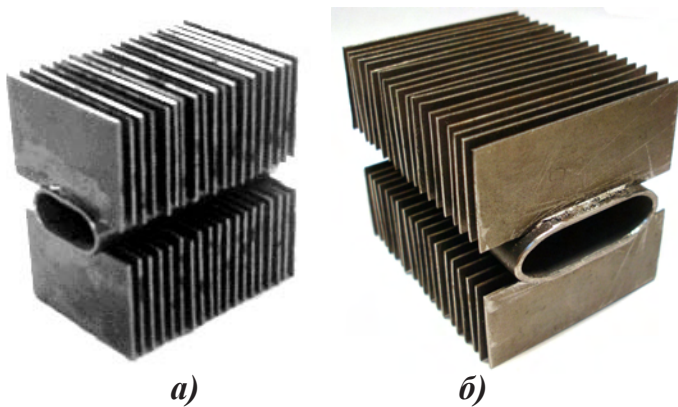


Рис. 1. Плоско-овальная труба с неполным ребрением: а – тип 1; б – тип 4.

### 1. Теплообмен малорядных пучков плоско-овальных труб с неполным ребрением

Экспериментальные исследования теплообмена во входных рядах пучков проведены путем последовательного удаления поперечных рядов многорядного пучка ( $z_2 = 6 - 7$ ). Таким образом определялись значения чисел Нуссельта для 1-го, 2-х, 3-х, 4-х, 5-и, 6-и рядных компоновок пучка. В таблицах 1 - 3 приведены геометрические характеристики плоско-овальных труб и пучков для которых проведены исследования влияния на теплообмен числа поперечных рядов труб. Значения поправки  $S_z$  вычислялись относительно средних коэффициентов теплоотдачи десятирядных пучков.

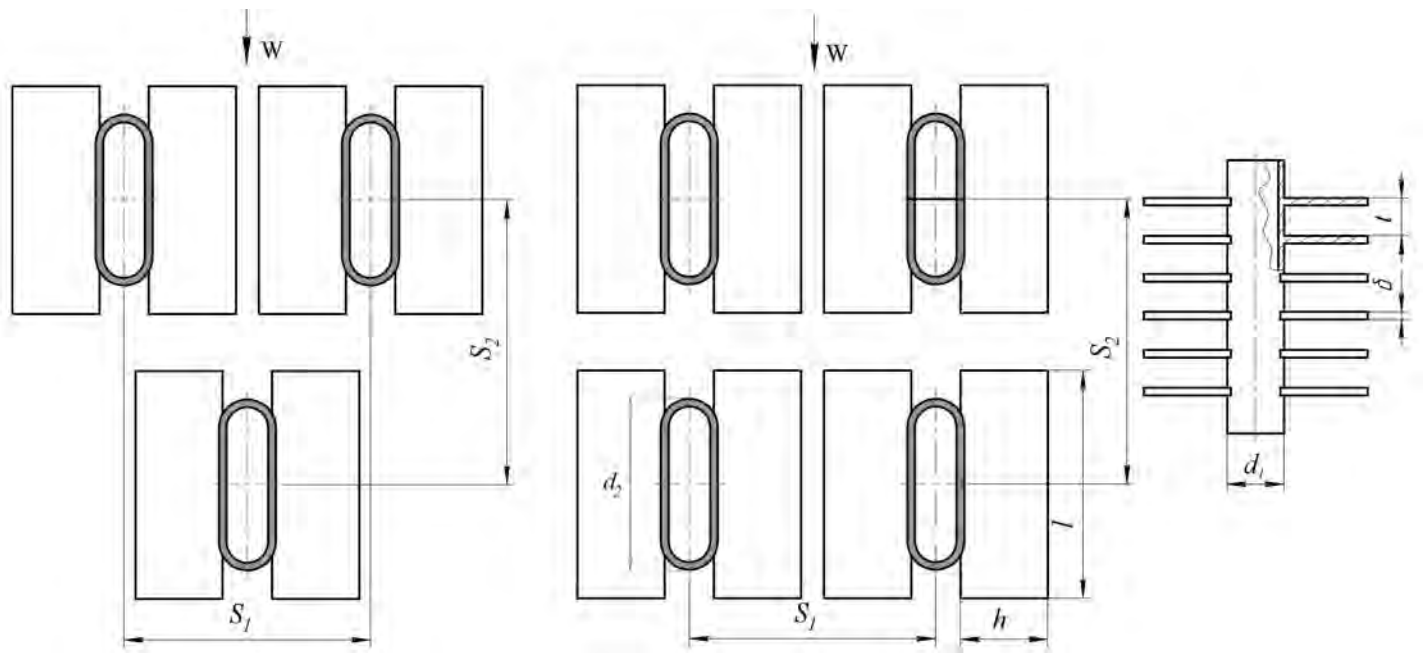


Рис. 2. Пучки труб: а – шахматный пучок; б – коридорный пучок; в – плоско-овальная труба.

Обработка экспериментальных данных для шахматных и коридорных компоновок показала увеличение интенсивности теплообмена при переходе от первого ко второму- третьему рядам пучка, что можно объяснить ростом степени турбулентности потока по мере его продвижения вглубь пучка (рис. 3).

Для коридорных пучков рост интенсивности теплоотдачи при переходе от ряда к ряду проявляется слабее нежели для шахматного (рис. 4, 5), что объясняется различным механизмом обтекания труб пучков этих компоновок [5, 6].

Таблица 1. Геометрические характеристики оребренных труб

Наименования величин	Обозн.	Труба тип 1	Труба тип 2	Труба тип 3	Труба тип 4	Труба тип 5
Поперечный размер несущей трубы	$d_1$ , мм	15,0	16,0	15,0	15,0	15,0
Продольный размер несущей трубы	$d_2$ , мм	30,0	40,0	30,0	42,0	42,0
Высота ребер	$h$ , мм	27,5	28,5	22,0	23,0	23,0
Шаг ребер	$t$ , мм	3,65	3,40	3,65	3,75	3,50
Длина ребер	$l$ , мм	48,5	48,5	48,5	55,5	55,5
Коэф. оребрения	$\psi$	21,50	18,47	17,68	15,16	16,2

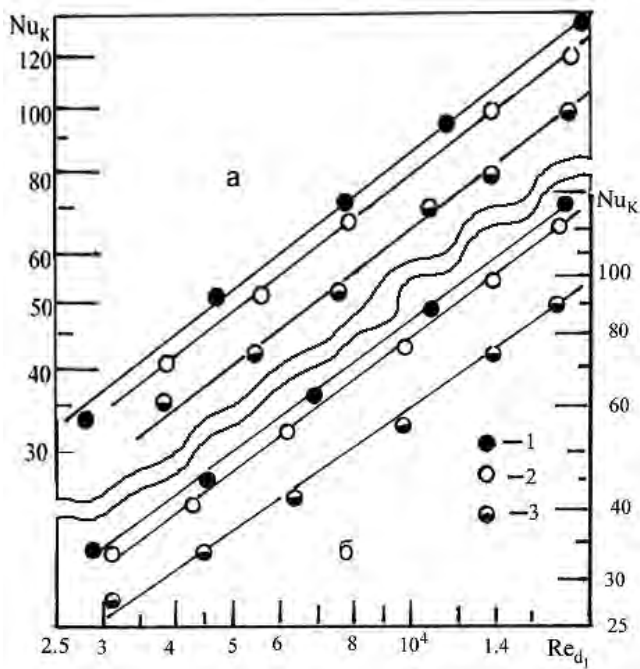


Рис. 3. Теплообмен входных рядов шахматных пучков труб: а – пучок Ш1; б – пучок Ш5; 1 – пятый ряд, 2 – третий, 3 – первый.

На рис. 6 нанесены осредненные по экспериментальным данным расчетные кривые зависимости поправки  $S_z$  от числа рядов пучка плоско-овальных труб: кривая 1 для шахматных пучков, кривая 2 для коридорных. Кривая для шахматных пучков более крутая и распола-

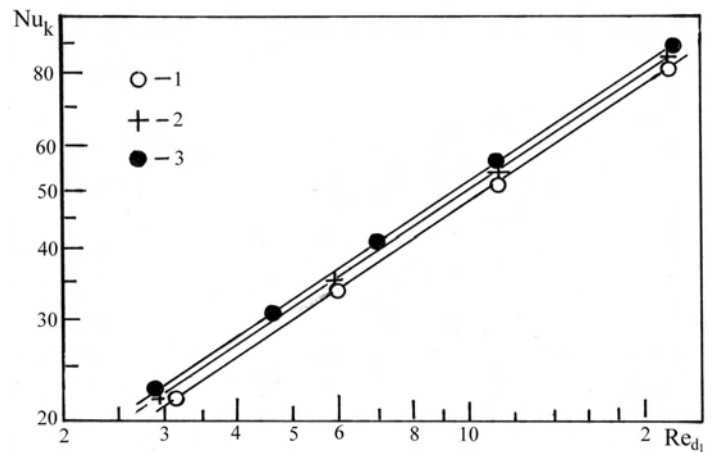


Рис. 4. Теплообмен входных рядов коридорного пучка К1: 1 – первый ряд; 2 – третий; 3 – пятый.

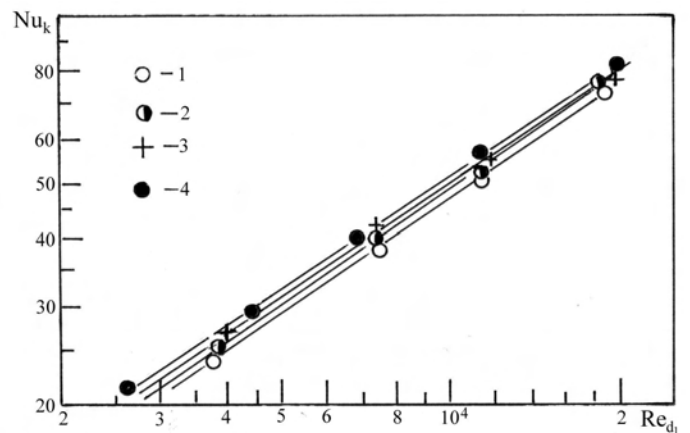


Рис. 5. Теплообмен входных рядов коридорного пучка К3: 1 – первый ряд; 2 – второй; 3 – третий; 4 – шестой.

Таблица 2. Геометрические характеристики шахматных пучков оребренных труб

Номер размещения	$S_1$ , мм.	$S_2$ , мм	$S_1/d_1$	$S_2/d_1$	$S_1/S_2$
Плоскоовальная труба с неполным оребрением типа 1					
Ш1	79	53	5,27	3,53	1,490
Ш2	79	80	5,27	5,33	0,988
Ш3	101	53	6,75	3,53	1,910
Ш4	135	53	9,00	3,53	2,547
Плоскоовальная труба с неполным оребрением типа 2					
Ш5	79	53	4,94	3,31	1,490
Ш6	79	80	4,94	5,00	0,988
Ш7	101	53	6,33	3,31	1,910
Ш8	135	53	8,44	3,31	2,547
Плоскоовальная труба с неполным оребрением типа 4					
Ш9	79	80	5,27	5,33	0,988
Плоскоовальная труба с неполным оребрением типа 5					
Ш10	86	60	5,73	4,00	1,433

Таблица 3. Геометрические характеристики коридорных пучков оребренных труб

Номер размещения	$S_1$ , мм.	$S_2$ , мм	$S_1/d_1$	$S_2/d_1$	$S_1/S_2$
Плоскоовальная труба с неполным оребрением типа 3					
К1	66	60	4,40	4,0	1,100
К2	86	60	5,73	4,0	1,433
Плоскоовальная труба с неполным оребрением типа 4					
К3	86	60	5,73	4,0	1,433

гается ниже кривой для коридорной компоновки. Это свидетельствует о том, что: во-первых стабилизация течения и теплообмена для шахматных пучков происходит быстрее нежели для коридорных, и во-вторых входные ряды коридорной компоновки в меньшей степени влияют на интенсивность теплообмена, чем шахматные.

Математическое описание опытного массива данных (кривые 1 и 2 рис. 6) с точностью  $\pm 4\%$  дает следующие зависимости для расчета поправки на малорядность пучка в формуле (1):

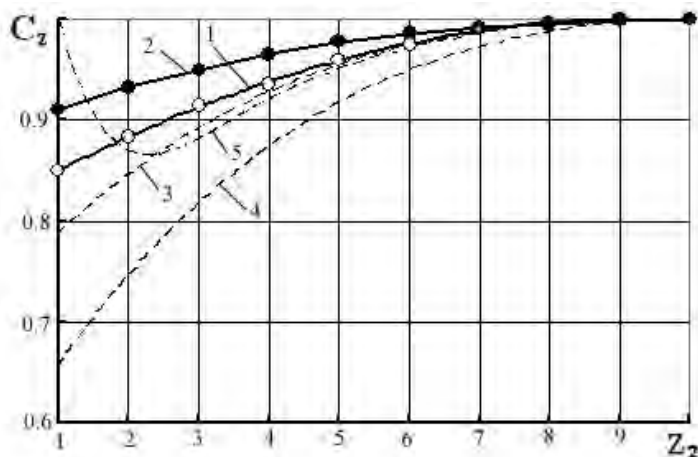
шахматные пучки плоско-овальных труб с неполным оребрением

$$C_z = 3,23z_2^{0,021} - 2,38, \quad (3)$$

коридорные пучки плоско-овальных труб с неполным оребрением

$$C_z = 3,67z_2^{0,01} - 2,77. \quad (4)$$

На рис. 6 для сравнения полученных результатов нанесены и кривые поправки  $C_z = f(z_2)$  для шахматных (кривая 3 с  $S_1/S_2 > 2$ , кривая 4 с  $S_1/S_2 < 2$ ) и коридорных (кривая 5) пучков круглых труб с шайбовым и спирально-ленточным оребрением [5, 6]. Кривые 3, 4 по мере увеличения  $z_2$  возрастают как и для пучков плоско-



**Рис. 6. Зависимость поправки  $C_z$  от числа рядов для пучков поперечно-оребранных труб: 1 – шахматные пучки плоско-овальных труб с неполным оребрением; 2 – коридорные пучки плоскоовальных труб с неполным оребрением; 3 – шахматные пучки кругло-ребристых труб при  $S_1/S_2 > 2$  [5, 6]; 4 – шахматные пучки кругло-ребристых труб при  $S_1/S_2 < 2$  [5, 6]; 5 – коридорные пучки кругло-ребристых труб [5, 6].**

овальных труб с неполным оребрением, однако входные ряды труб в этом случае оказывают более сильное влияние на интенсивность теплообмена, а сама поправка для шахматных пучков круглоребристых труб изменяется от 0,8 до 1 при изменении  $z_2$  от 1 до 8 для  $S_1/S_2 > 2$  и от 0,67 до 1 для  $S_1/S_2 < 2$ . Такую довольно большую разницу в кривизне кривых 3 и 4 по мере увеличения  $z_2$  можно объяснить тем, что для шахматных пучков с  $S_1/S_2 < 2$  стабилизация течения и теплообмена в пучке происходит быстрее чем для  $S_1/S_2 > 2$ .

Для коридорных пучков круглоребристых труб поправка  $C_z$  имеет клюшкообразный вид (кривая 5 рис. 6) с минимумом величины поправки при  $z_2 = 2-3$ . В то же время значения  $C_z$  в области  $z_2 \geq 2$  достаточно хорошо аппроксимируются зависимостью, полученной для малорядных шахматных круглоребристых пучков с отношением шагов труб  $S_1/S_2 > 2$ . Это обстоя-

тельство не является случайным, так как шахматная компоновка с  $S_1/S_2 > 2$  по характеру обтекания труб приближается к коридорной [5].

Расчетные зависимости для поправки  $C_z$  пучков из круглых труб с шайбовым и спирально-ленточным оребрением имеют вид [5, 6]:

шахматные пучки при  $z_2 < 8$  и коридорные при  $2 \leq z_2 < 8$  с  $S_1/S_2 > 2$

$$C_z = 3,5z_2^{0,03} - 2,72, \tag{5}$$

шахматные пучки при  $z_2 < 8$  с  $S_1/S_2 < 2$

$$C_z = 3,15z_2^{0,05} - 2,5. \tag{6}$$

Для всех рассмотренных компоновок пучков из различных видов труб при  $z_2 \geq 8$  поправка  $C_z = 1$ .

**2. Аэродинамическое сопротивление малорядных пучков плоско-овальных труб с неполным оребрением**

Влияние на аэродинамическое сопротивление входных рядов пучков плоско-овальных труб экспериментально исследовано для шахматных и коридорных компоновок. Поправка на малорядность  $C'_z$  представлена как функция отношения чисел Эйлера, приходящихся на один ряд малорядного пучка  $Eu_{0i}$ , к числам Эйлера  $Eu_0$ , приходящихся также на один ряд, но многорядного пучка ( $z_2 \geq 6$ ) для которого при дальнейшем увеличении количества поперечных рядов труб  $z_2$  числа  $Eu_0$  достигают своего предельного значения:

$$C'_z = \frac{Eu_{0i} / z_{2i}}{Eu_0 / z_2} = f(z_2). \tag{7}$$

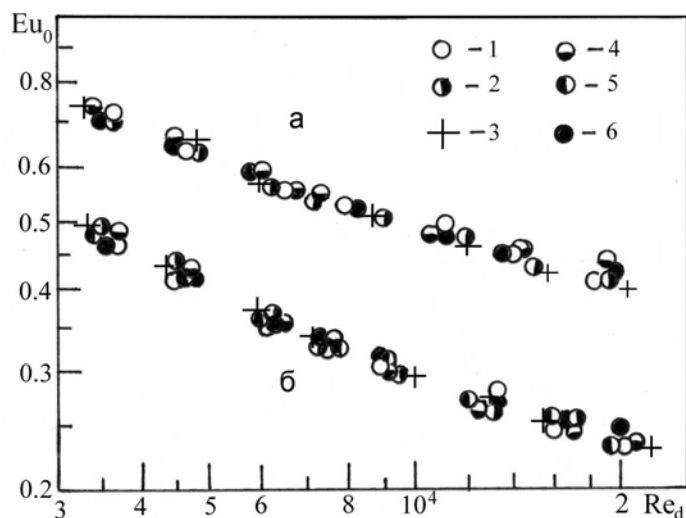
На рис. 7 представлены в логарифмических координатах зависимости чисел Эйлера  $Eu_0$  от чисел Рейнольдса при изменении числа поперечных рядов для шахматных пучков плоско-овальных труб (пучки Ш 2, Ш 10). С уменьшением  $z_2$ , как свидетельствует рис. 7, для исследованных шахматных пучков не наблюдается увеличения сопротивления

пучка, т.е. можно сказать, что поправка  $C'_z = 1$  не зависит от количества поперечных рядов  $z_2$ . Такой же результат исследования влияния входных рядов шахматных пучков на аэродинамическое сопротивление для круглых труб с завальцованным спирально-ленточным оребрением получили авторы [7].

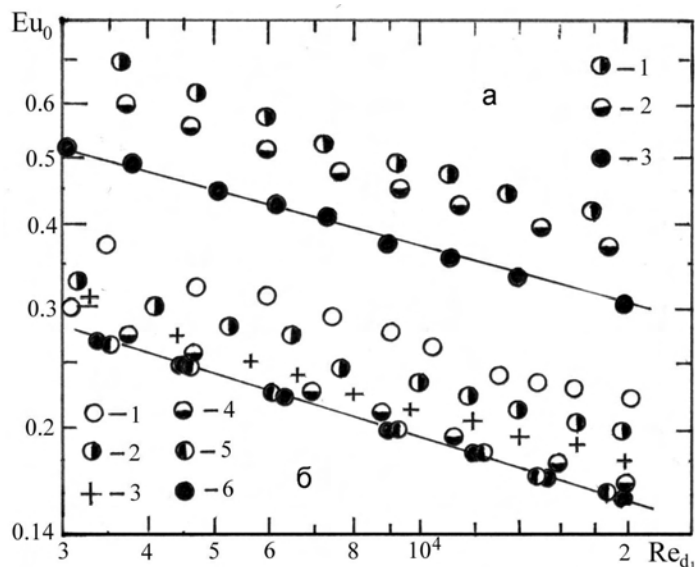
Для коридорных пучков плоско-овальных труб (рис. 8, рис. 9) с ростом числа поперечных рядов в пучке числа Эйлера, отнесенные к одному поперечному ряду уменьшаются и при  $z_2 = 5-6$  достигают своего предельного значения.

На рис. 10 нанесены расчетные кривые зависимости поправки  $C'_z$  от числа рядов для шахматных (кривая 1) и коридорных (кривая 2) пучков плоско-овальных труб. Кривая 1, как указывалось выше, описывается прямой, параллельной оси  $z_2$ :  $C'_z = 1$ . На рис. 10 нанесена также кривая 3 для шахматных пучков круглых труб с приварным спирально-ленточным оребрением [8, 9].

Кривая 2 на рис. 10 показывает влияние входных рядов труб для коридорной ком-

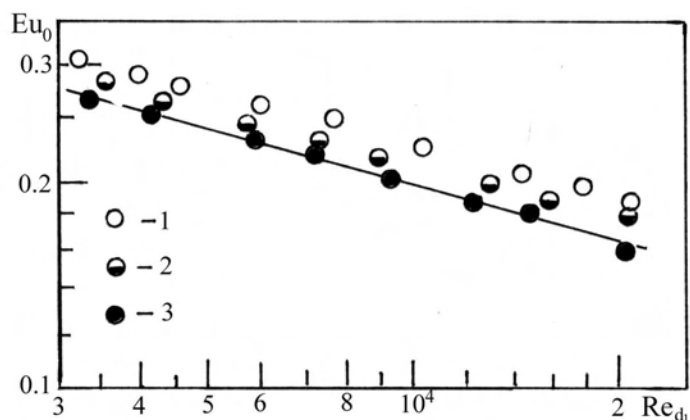


**Рис. 7. Аэродинамическое сопротивление входных рядов шахматных пучков плоско-овальных труб:** а – пучок Ш 2:  $1 - z_2 = 1; 2 - z_2 = 2; 3 - z_2 = 3; 4 - z_2 = 4; 6 - z_2 = 6$ . б – пучок Ш 10:  $1 - z_2 = 1; 2 - z_2 = 2; 3 - z_2 = 3; 4 - z_2 = 4; 5 - z_2 = 5; 6 - z_2 = 6$ .



**Рис. 8. Аэродинамическое сопротивление входных рядов коридорных пучков плоско-овальных труб:**

а – пучок К 1:  $1 - z_2 = 2; 2 - z_2 = 4; 3 - z_2 = 6$ .  
б – пучок К 3:  $1 - z_2 = 1; 2 - z_2 = 2; 3 - z_2 = 3; 4 - z_2 = 4; 5 - z_2 = 5; 6 - z_2 = 7$ .

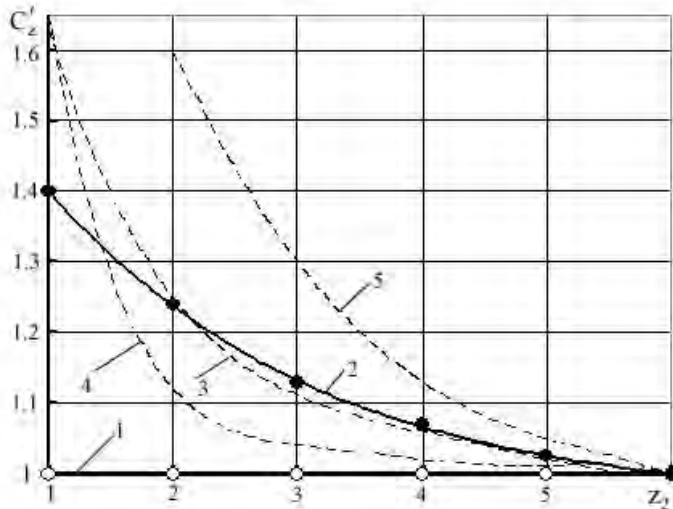


**Рис. 9. Аэродинамическое сопротивление входных рядов коридорного пучка К 2:**  $1 - z_2 = 1; 2 - z_2 = 4; 3 - z_2 = 6$ .

поновки из плоско-овальных труб с неполным оребрением и описывается следующим соотношением:

$$C'_z = 1,4z_2^{-0,192}, \tag{8}$$

при  $z_2 \geq 6$   $C'_z = 1$ .



**Рис. 10.** Зависимость поправки  $C'_z$  от числа рядов для пучков поперечно-ребренных труб: 1 – шахматные пучки плоско-овальных труб с неполным оребрением; 2 – коридорные пучки плоско-овальных труб с неполным оребрением; 3 – шахматные пучки кругло-ребристых труб [8, 9]; 4 – коридорные пучки кругло-ребристых труб [5]; 5 – коридорные пучки кругло-ребристых труб [8, 9].

На рис. 10 для сравнения нанесены кривые поправки на малорядность  $C'_z = f(z_2)$  для коридорных пучков круглых труб с шайбовым и спирально-ленточным оребрением из [5] (кривая 4) и [8, 9] (кривая 5). Как видно из рисунка при сохранении общей тенденции роста величины  $C'_z$  с уменьшением  $z_2$  наблюдается заметное отклонение обобщающей кривой 4 от нормативной зависимости (кривая 5), которая получена в работе [10] только в графическом виде. Нормативная кривая 5 располагается значительно выше нормативной кривой 3, что не соответствует характеру изменения величины  $Eu_0$  по глубине трубных пакетов с коридорной компоновкой. В этом случае с ростом числа поперечных рядов в области  $1 \leq z_2 < 6$  величина  $Eu_0$  должна падать быстрее, чем падает  $Eu_0$  в случае шахматной компоновки при прочих равных условиях. Кроме того, значения этих вели-

чин должны совпадать при  $z_2 = 1$ . Отмеченное обстоятельство свидетельствует о недостаточной точности нормативной зависимости (кривая 5) для коридорных пучков кругло-ребристых труб.

Зависимость для определения поправки  $C'_z$  на малорядность коридорных пучков кругло-ребристых труб (кривая 4) соответствует указанной выше тенденции и описывается следующим соотношением:

$$\text{При } z_2 < 6 \quad C'_z = 1 + \frac{0,65}{(z_2)^3} \quad (9)$$

$$\text{При } z_2 \geq 6 \quad C'_z = 1.$$

### Выводы

- Входные ряды существенно влияют на интенсивность теплообмена и аэродинамическое сопротивление пучков. Это влияние проявляется тем больше, чем меньше число поперечных рядов труб в пучке.

- При расчете и проектировании малорядных трубчато-ребристых теплообменников, например калориферов, теплообменных секций АВО и др. неучет влияния входных рядов труб может привести к занижению поверхности нагрева и сопротивления пучка, что в свою очередь влечет к росту температуры внутреннего теплоносителя на выходе (при его охлаждении), неправильному выбору тяго-дутьевых устройств или работе их не в оптимальном режиме и к снижению надежности теплообменного аппарата в целом.

- Величину поправки  $C'_z$ , учитывающую влияние на теплообмен числа поперечных рядов плоско-овальных труб с неполным оребрением для шахматной компоновки, предлагается определять по формуле (3), для коридорной – по (4).

- Входные ряды шахматных пучков плоско-овальных труб не влияют на аэродинамическое сопротивление пучка, поправка при этом равна 1.

- Величину поправки  $C'_z$ , учитывающей влияние на сопротивление числа поперечных рядов плоско-овальных труб с неполным оре-

брением для коридорной компоновки, предлагается определять по зависимости (8).

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Письменный С.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д.* Теплообмінна труба. Деклараційний патент на корисну модель. Україна. №4871. 15.02.2005. Бюл. № 2.

2. *Письменный С.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д.* Теплообмінна труба. Патент на корисну модель. Україна. № 25025 25.07.2007. Бюл. №11.

3. *Письменный Е.Н.* Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго-и ресурсосбережения // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №5. – С. 7-16.

4. *Багрий П.И., Терех А.М., Рогачев В.А.* Сравнение тепловой эффективности шахматных пучков поперечно-оребранных труб различного профиля // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5 (30). – С. 51-56.

5. *Письменный Е.Н.* Теплообмен и аэроди-

намика пакетов поперечно-оребранных труб.- Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.

6. *Письменный Е.Н., Терех А.М.* Теплообмен малорядных пучков поперечно-оребранных труб // Пром. теплотехника. – 1991. – Т.13, №3. – С.55-60.

7. *Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М.* Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения // С-Пб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд., 1992. – 280 с.

8. *Аэродинамический расчет котельных установок (Нормативный метод) /под ред. С.И. Мочана.* Изд.3-е. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.

9 *РТМ 108..030.140-87* Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребранных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. – М.: Минэнергомаш – 1988. – 30 с.

10. *Юдин В.Ф., Тохтарова Л.С.* Сопротивление пучков ребристых труб при поперечном омывании потоком // Энергомашиностроение. – 1974. – №6. – С. 30-32.

*Получено 17.12.2009 г.*