

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА КОРИДОРНЫХ РЕБРИСТЫХ ПУЧКОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ НАКЛОНА ТРУБ

А.В. Новожилова<sup>1</sup>, З.Г. Марьина<sup>1</sup>, А.Ю. Верещагин<sup>1</sup>, В.Б. Кунтыш<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия

<sup>2</sup>Белорусский государственный технический университет, г. Минск, Белоруссия

Теплообменные аппараты с оребренными трубными пучками по эксплуатационным и технико-экономическим показателям можно эффективно использовать в режиме свободной конвекции. Естественно-конвективные процессы распространены в таких областях промышленности, как воздушное охлаждение мощных полупроводниковых преобразователей энергии, в радиаторах охлаждения масла силовых трансформаторов, солнечной энергетике, в системах вентиляции и воздушного отопления зданий, при охлаждении теплонапряженных электронных приборов, в системах аварийного расхолаживания ядерных реакторов и др. Все это делает актуальным обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований пучков из оребренных труб в условиях свободной конвекции [1, 2, 3].

Практическая реализация процессов естественной конвекции на ребристых поверхностях сдерживается недостаточной изученностью. На данный момент исследования по коридорным пучкам оребренных труб, как горизонтальным, так и установленным под углом к горизонтальной плоскости, практически отсутствуют.

Режим обтекания коридорных пучков при их размещении под некоторым углом к горизонтальной плоскости приближается к режиму обтекания шахматных пучков, что, соответственно, позволяет получить большие коэффициенты теплоотдачи при меньшем аэродинамическом сопротивлении пучка при меньших габаритах теплообменных аппаратов. Использование наклонных пучков является одним из направлений интенсификации свободно-конвективного теплообмена на ребристых поверхностях.

Схема экспериментальной установки для проведения исследований теплоотдачи при свободной конвекции воздуха в пучках ребристых труб и методика обработки данных представлены в [4]. Опыты проводились в условиях полного теплового моделирования при обогреве всех труб. Измерения выполнялись только на калориметрах, которые устанавливались в центре каждого ряда пучка. Это позволяло в стационарном тепловом режиме одновременно получать необходимые первичные данные для определения средней теплоотдачи как любого отдельного ряда, так и пучка в целом.

Особая ценность опытов состоит в том, что использовались промышленные биметаллические оребренные трубы со спиральными трехзаходными накатными ребрами, изготовленные по технологии ВНИИМЕТМАШа. Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – латунь Л68. Диаметр несущей трубы  $d_n = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм, геометрические параметры оребрения: наружный диаметр ребра  $d = 55,65$  мм; диаметр у основания ребра  $d_0 = d - 2h = 26,63$  мм; высота ребра  $h = 14,51$  мм; шаг ребра  $s = 2,91$  мм; средняя толщина ребра  $\Delta = 0,75$  мм; коэффициент оребрения трубы  $\varphi = 16,8$ .

Полная длина биметаллической трубы, включая торцевые участки, 340 мм, теплоотдающая длина оребренной части – 300 мм.

При обработке опытных данных необходимо учитывать лучистую составляющую теплового потока, т.к. она может составлять до 30% от конвективной. Расчет проводился по методике [4].

За определяющий размер принят диаметр трубы по основанию ребер  $d_0$ . Определяющей температурой для теплофизических свойств воздуха  $\nu$ ,  $a$ ,  $\lambda$  являлась температура стенки  $t_{ст}$ , а для  $\beta$  – температура окружающего воздуха  $t_0$ .

Во время экспериментов электрическая мощность, подводимая к каждому калориметру, изменялась в пределах  $W_i = 8 \dots 202$  Вт, температура стенки у основания ребер калориметра составляла  $t_{ст} = 26 \dots 231$  °С; температуры окружающего воздуха в камере –  $t_0 = 10 \dots 25$  °С.

Угол  $\gamma$  – это угол, образованный осями труб коридорного пучка и горизонтальной поверхностью. Наклон пучка в экспериментальной камере обеспечивался специальной системой растяжек

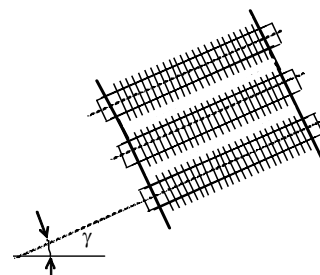


Рисунок 1 – Схема расположения пучка под углом  $\gamma$ .

(рисунок 1).

Исследовались углы  $\gamma = 0, 15, 30, 45$  и  $60^\circ$ .

Было исследовано два варианта компоновки коридорных пучков: первый – тесный – с продольным и поперечным шагами  $S_1 = 70$  мм и  $S_2 = 61$  ( $\sigma_1 = 1,258$  и  $\sigma_2 = 1,096$ ), второй – разреженный – с шагами  $S_1 = 76$  мм и  $S_2 = 64$  мм ( $\sigma_1 = 1,366$  и  $\sigma_2 = 1,150$ ). Исследовались двух-, трех- и четырехрядные пучки в диапазоне чисел Рэлея  $(3,0 \dots 8,0) \cdot 10^5$ .

На рисунке 2 показаны данные по теплоотдаче двух-, трех-, четырехрядных пучков с  $S_1 = 70$  мм,  $S_2 = 61$  мм при углах наклона оси труб  $\gamma = 0 \dots 60^\circ$ .

Исследования показали, что для всех пучков ребристых труб общим является монотонный рост интенсивности теплоотдачи с увеличением числа Ra.

Средняя теплоотдача двухрядных пучков выше, чем трех- и четырехрядных, вследствие более высокой эффективности каждого ряда.

Из графиков очевидно, теплоотдача пучков, установленных под углами  $\gamma = 15$  и  $30^\circ$ , практически не отличается от горизонтальных независимо от числа

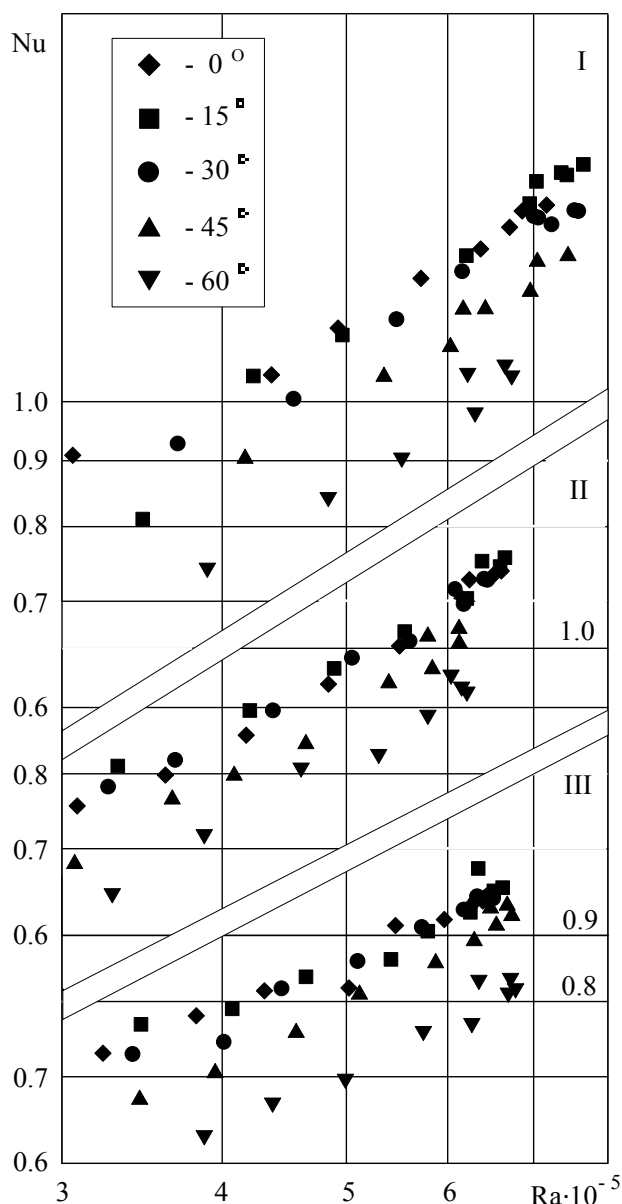


Рисунок 2 – Теплоотдача ребристых пучков с продольным шагом  $S_1 = 70$  мм и поперечным шагом  $S_2 = 61$  мм под углом наклона к горизонтальной плоскости  $\gamma$ : I, II, III – двух-, трех- и четырехрядные пучки соответственно.

рядов. Но при этом существенно уменьшаются габариты пучка в пространстве. При дальнейшем росте угла наклона  $\gamma > 30^\circ$  происходит резкое снижение теплосъема с поверхности труб, т.к. режим обтекания таких пучков приближается к режиму обтекания вертикальных пучков труб, механизм теплоотдачи с поверхности которых имеет совершенно иной характер. При вертикальном расположении трубы в межреберном пространстве практически отсутствует циркуляция воздуха, и весь конвективный тепловой поток отводится с торцевой поверхности ребер.

У четырехрядных пучков, в отличие от двух- и трехрядных, теплоотдача при изменении угла наклона пучка в меньшей степени зависит от числа Ra. Небольшой угол наклона  $\gamma = 15$  и  $30^\circ$  также практически не влияет на теплоотдачу.

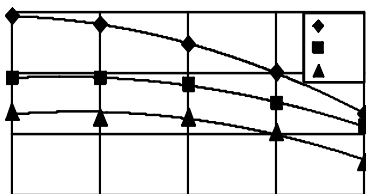


Рисунок 3 – Зависимость числа Nu от угла наклона  $\gamma$  в пучках с  $S_1 = 70$  мм,  $S_2 = 61$  мм: 1, 2, 3– двух-, трех- и четырехрядные пучки соответственно при числе  $Ra = 50000$ .

Для оценки влияния угла наклона на теплоотдачу представим эти графики при постоянном числе  $Ra = 50000$  (рисунок 3). Для двухрядных пучков средняя теплоотдача пучка уменьшается на 42 % при достижении угла наклона  $\gamma = 60^\circ$ . Теплоотдачу горизонтального пучка и пучков, установленных под углами 15 и  $30^\circ$  можно считать практически постоянной (изменение в пределах 5 %). Теплоотдача пучков, установленных под углом  $45^\circ$ , ниже теплоотдачи горизонтального пучка в среднем на 19 %.

Кривые для трех- и четырехрядных пучков проходят эквидистантно. Для них при увеличении угла наклона график зависимости теплоотдачи принимает

более пологий характер, и при изменении  $\gamma$  до  $60^\circ$  теплоотдача снижается на 15 %.

На рисунке 4 представлены данные по экспериментальному исследованию теплоотдачи разреженных двух- и трехрядных пучков при углах наклона оси труб  $\gamma = 0 \dots 60^\circ$ . Наблюдается

монотонный рост теплоотдачи с увеличением числа Ra. Количественно это выглядит следующим образом: повышение Ra в 2,3 раза от 30000 до 70000, сопровождается ростом коэффициента теплоотдачи в интервале 1,6...2,2 раза.

Графики двух- и трехрядных разреженных пучков имеют сходный характер. Теплоотдача при  $\gamma = 15, 30^\circ$  практически одинакова, что объясняется особенностями обтекания разреженных пучков. Как для тесных пучков, так и для разреженных, с  $\gamma = 45, 60^\circ$  теплоотдача снижается по сравнению с горизонтальным пучком.

На рисунке 5 показано изменение теплоотдачи пучка с  $S_1 = 76$  мм,  $S_2 = 64$  мм при углах наклона оси  $\gamma = 0 \dots 60^\circ$  для числа Рэлея  $Ra = 50000$ . Очевидно, при  $\gamma = 15$  и  $30^\circ$  наблюдается незначительное отклонение значения числа Nu по сравнению с горизонтальными пучками

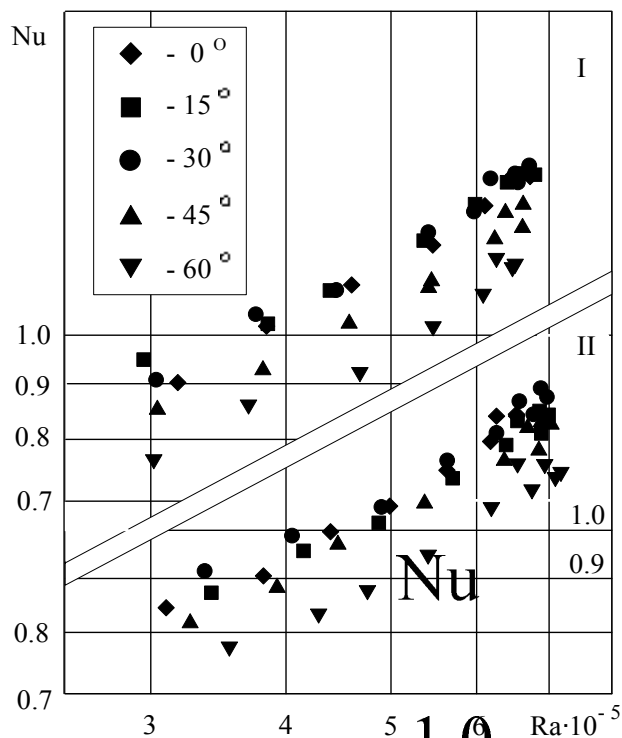


Рисунок 4 – Теплоотдача ребристых пучков с продольным шагом  $S_1 = 76$  мм и поперечным шагом  $S_2 = 64$  мм под углом наклона к горизонтальной плоскости  $\gamma$ : I, II – двух- и трехрядные пучки соответственно.

0,8

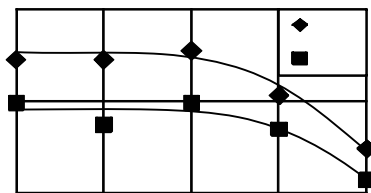


Рисунок 5 – Зависимость числа Nu от угла наклона  $\gamma$  в пучках с  $S_1 = 76$  мм,  $S_2 = 64$  мм: 1, 2 – двух- и трехрядные пучки соответственно при числе  $Ra = 50000$

для двух- и трехрядных пучков. Расхождение не превышает  $\pm 3\%$

Теплоотдача двухрядного пучка при  $\gamma = 60^\circ$  значительно ниже теплоотдачи пучков с  $\gamma = 0^\circ$ , разница составляет  $17\%$ .

Теплоотдача трехрядных пучков с  $\gamma = 30^\circ$  практически одинакова с теплоотдачей горизонтального пучка и выше теплоотдачи пучка с  $\gamma = 45^\circ$  примерно на  $7\%$ . При увеличении угла наклона  $\gamma$  до  $60^\circ$  средняя теплоотдача пучка плавно снижается, достигая при  $\gamma = 60^\circ$   $20\%$ .

Теплоотдача разреженных наклонных пучков

выше по всему диапазону углов  $\gamma$  теплоотдачи тесных пучков.

**Nu**

С увеличением числа рядов в пучке его средняя теплоотдача снижается. Первый ряд во всех моделях при любых пространственных положениях имеет наибольшее значение коэффициента теплоотдачи.

Результаты экспериментальных исследований (рисунки 2 и 4) для каждого угла наклона аппроксимированы с отклонением опытных данных  $\pm 5\%$  степенной зависимостью вида (таблица):

1,1

$$Nu = A \cdot Ra^n.$$

Таблица

Значения постоянных  $A$  и  $n$  в аппроксимационном уравнении.

$\gamma$ , град	0	15	30	45	60
$S_1 \times S_2$ , мм	70 x 61				
Двухрядные пучки					
$A \cdot 10^3$	1,3	1,27	1,2	1,1	0,95
$n$	0				
Трехрядные пучки					
$A \cdot 10^3$	2,3	2,3	2,25	2,11	1,93
$n$	0,56				
Четырехрядные пучки					
$A \cdot 10^3$	5,4	5,3	5,3	5,0	4,4
$n$	0,47				
$S_1 \times S_2$ , мм	76 x 64				
Двухрядные пучки					
$A \cdot 10^3$	3,1	3,1	3,15	2,9	2,6
$n$	0,55				
Трехрядные пучки					
$A \cdot 10^3$	2,3	2,2	2,3	2,18	1,95
$n$	0,57				

Анализ результатов показал, что данная зависимость для каждой модели пучка имеет одну и ту же степень  $n$  и не зависит от угла наклона пучка. Это неудобно в практических расчетах. Была сделана попытка обобщения экспериментальных данных одной зависимостью и получено следующее уравнение с точностью  $\pm 15\%$ :

$$Nu = 1,54 \cdot 10^{-3} \cos^{0,32}(\gamma - 14) \cdot Ra^{0,6}. \quad (1)$$

Зависимость числа Nu от числа Ra имеет степенной характер, а зависимость теплоотдачи от угла  $\gamma$  имеет косинусоидально-степенную зависимость. Уравнение (1) не учитывает число рядов в пучке, которое влияет на среднюю теплоотдачу. Учет числа рядов в степени числе Ra позволил снизить погрешность до 7,6 % и получить следующее уравнение:

$$Nu=3,05 \cdot 10^{-3} Ra^{(0,58-0,014z)} \cdot \cos^{0,296} \gamma. \quad (2)$$

На основании результатов теоретических, экспериментальных и расчетно-аналитических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведены экспериментальные исследования наклонных коридорных пучков из труб с накатным оребрением со следующими геометрическими характеристиками  $\sigma_1 = 1,258$ ,  $\sigma_2 = 1,096$  и  $\sigma_1 = 1,366$ ,  $\sigma_2 = 1,150$ , числе рядов  $z = 2 \dots 4$ , углах наклона  $\gamma = 0 \dots 60^\circ$ .
2. Получены обобщающие критериальные уравнение для расчета среднего коэффициента теплоотдачи наклонных пучков труб с учетом и без учета числа рядов в пучке:

$$Nu=3,05 \cdot 10^{-3} Ra^{(0,58-0,014z)} \cdot \cos^{0,296} \gamma;$$

$$Nu=1,54 \cdot 10^{-3} \cos^{0,32}(\gamma - 14) \cdot Ra^{0,6}.$$

Диапазон применимости Ra от 20000 до 75000.

3. С увеличением числа рядов в пучке при всех углах наклона его средняя теплоотдача снижается.
4. Целесообразно использовать двух-, трех-, четырехрядные пучки из биметаллических ребристых труб с углом наклона  $\gamma$  менее  $45^\circ$ .

### Литература

1. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. В 2-х кн.: Пер. с англ./ Б. Гебхарт, Й. Джалурия, Р.Л. Махаджан, Б. Саммакия. М.: Мир, 1991. 528 с.
2. Мартыненко О.Г. Свободно-конвективный теплообмен: Справочник / О.Г.Мартыненко, Ю.А. Соковишин. Мн.: Наука и техника, 1982. 400 с.
3. Позднякова А.В., Кунтыш В.Б. Теплоотдача переходных коридорно-шахматных пучков из оребренных труб при естественной конвекции воздуха // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2000. – № 9-10. – С. 15-19.
4. Позднякова А.В. Совершенствование характеристик и разработка методики расчета промежуточных калориферов лесосушильных камер // Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2003. 24 с.