

# ОБЩЕИНЖЕНЕРНЫЕ ВОПРОСЫ ЛЕСОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

---

УДК 536.24:66.045

**В. Б. Кунтыш<sup>1</sup>, А. Б. Сухоцкий<sup>1</sup>, А. Э. Пиир<sup>2</sup>, В. П. Мулин<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет

<sup>2</sup>Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова  
(Российская Федерация)

<sup>3</sup>ЗАО «Октябрьскхиммаш» (Российская Федерация, Республика Башкортостан)

## ТЕПЛООТДАЧА И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ШАХМАТНЫХ ПУЧКОВ ИЗ ТЕРМОАЭРОЗАЩИТНЫХ ТРУБ ПРИМЕНЕНИЕМ СПИРАЛЬНЫХ ПОДОГНУТЫХ РАЗНОВЫСОТНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ РЕБЕР

Экспериментальное исследование теплоаэродинамических характеристик пучков из труб с подогнутыми алюминиевыми спиральными ребрами в поперечном потоке воздуха обусловлено актуальной задачей повышения эксплуатационной надежности и тепловой эффективности аппаратов воздушного охлаждения (АВО), в частности теплообменных секций, как доминирующего элемента любого аппарата. Это предопределило выбор типоразмера и конструктивного исполнения поверхности теплообмена, компоновочных параметров пучка, интервала скорости воздуха. В пучках современных АВО для достижения высокой тепловой эффективности применяют биметаллические ребристые трубы (БРТ) с максимально достигнутым коэффициентом оребрения  $\phi \approx 20\text{--}21$  при серийном производстве, расположенных в вершинах равностороннего треугольника с шагом  $S_1 = S_2' = 63\text{--}64$  мм для наружного диаметра ребра  $d = 56\text{--}57$  мм.

Однако в эксплуатации находится значительное количество АВО, теплообменные секции которых состоят из БРТ с  $\phi \approx 9,4$  и  $15,2$ , собранных в пучках с  $S_1 = S_2' = 52$  и  $58$  мм. При модернизации этих пучков с целью повышения аппаратной мощности таких АВО целесообразны трубы с параллельной подгибкой ребер, что позволяет реализовать указанные значения шага трубами с  $\phi \approx 21$ . Подгибка изменяет гидродинамику потока воздуха в межреберных каналах, интенсифицируется теплоотдача при умеренном росте аэродинамического сопротивления, но наиболее существенным свойством является рост компактности пучка до 22%.

Подгибка ребер вдоль образующей трубы «на квадрат в плане» позволяет ощутимо уменьшить теплоотдачу пучка, так как образовавшиеся близкие к полной замкнутости межреберные каналы очень слабо вентилируются с удалением из них нагретого воздуха, отводимого теплом от охлаждаемого продукта. Количество отводимого тепла уменьшается, что предотвращает его переохлаждение с возможностью замерзания в трубах, что недопустимо. Труба превращается в термоизолятор. Применение подобных конструкций БРТ возможно в первом, втором рядах пучка по ходу охлаждающего воздуха. При этом увеличивается эксплуатационная надежность, исключается предварительный подогрев воздуха на входе в секции, упрощаются конструкция и управление тепловым режимом АВО.

Для подгибки наилучшим типом являются БРТ с навитыми спиральными алюминиевыми ребрами по технологии ЭНИКмаш. Подгибка накатных алюминиевых ребер из-за большей их жесткости усложняется технологически.

В связи с изложенным проведены исследования шестирядных шахматных пучков из БРТ с алюминиевыми КЛМ-ребрами с разновысокими прямыми, параллельно подогнутыми и подогнутыми «на квадрат». Приведены уравнения для расчетов средней теплоотдачи и сопротивления пучков, а также теплоотдачи каждого поперечного ряда в диапазоне числа  $Re = (3\text{--}25) \cdot 10^3$ .

**Ключевые слова:** аппарат воздушного охлаждения, биметаллическая ребристая труба, шахматный пучок, приведенная средняя теплоотдача, теплоотдача поперечного ряда, аэродинамическое сопротивление.

V. B. Kuntys<sup>1</sup>, A. B. Sukhotski<sup>1</sup>, A. E. Piir<sup>2</sup>, V. P. Mulin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Technological University

<sup>2</sup>Northern (Arctic) Federal University of M. V. Lomonosov (Russian Federation)

<sup>3</sup>ISC "Oktoberkhimmash" (Russian Federation)

**CONVECTIVE HEAT EXCHANGE AND AERODYNAMIC RESISTANCE  
OF CHESS BUNCHES FROM THERMOAEROPROTECTIVE TUBES  
APPLICATION OF THE SPIRAL  
TURNED IN DIFFERENT HIGH-RISE ALUMINIUM RIBS**

The experimental research thermal and aerodynamic characteristics of bunches from tubes with the turned in aluminium spiral ribs in air cross flux is caused by an actual problem of raise of operate reliability and thermal efficiency of apparatuses of an air cooling (AVO), in particular heat exchange sections, as dominating element of any apparatus. It predetermined sampling of a standard size and a design of a heat-exchange surface, layout parameters of a bunch, an interval of speed of air. In bunches modern AVO for achievement of high thermal efficiency apply bimetallic ribbed tubes (BRT) with as much as possible attained factor оребрения  $\varphi = 20-21$  by a batch production, had in apexes of an equilateral triangle with step  $S_1 = S_2' = 63-64$  mm to rib outside diameter  $d = 56-57$  mm.

However in maintenance there is significant amount AVO, heat exchange sections consist from BRT with  $\varphi = 9,4$  and  $15,2$ , collected in bunches with  $S_1 = S_2' = 52$  and  $58$  mm. At modernisation of these bunches for the purpose of raise of apparatus power such ABO pipes with parallel turn in ribs that allows to realise the specified values of a step pipes with  $\varphi = 21$  are expedient. Turned in changes hydrodynamics of a stream of air in intercostal channels, the convective heat exchange is intensified at moderate growth of an aerodynamic resistance, but the most essential property is growth of compactness of a bunch to 22%.

Turn in ribs along a forming pipe «by a square in the plot» allows to reduce in times a bunch convective heat exchange as the formed intercostal channels close to full isolation are very poorly fanned with removal from them нагретого air, taken away heat from a chilled product. The quantity of taken away heat decreases that prevents its super-cooling with solidification possibility in pipes that is inadmissible. The tube turns to thermoinsulator. Application of similar designs BRT is possible in the first, second rows of a bunch on a course of chilling air. Operate reliability thus increases, air preheating on an entry in section is expelled, the design and management of thermal regime AVO becomes simpler.

For turn in the best type are BRT with the wound spiral aluminium ribs on production engineering ENIKmash. Turn in ribbed aluminium ribs because of their big rigidity becomes complicated technologically.

In connection with stated researches six rows chess bunches from BRT with aluminium KLM-edges with unequal height direct, in parallel turned in and turned in «on a square» are conducted. The equations for calculations of an average convective heat exchange and resistance of bunches, and also a convective heat exchange of each transverse row over the range numbers  $Re = (3-25) 10^3$  are resulted.

**Key words:** air cooled heat exchange, bimetallic ribbed tube, chess bunch, resulted average convective heat exchange, convective heat exchange of the transverse row an aerodynamic resistance.

**Введение.** Круглые трубы со спиральными навитыми ребрами нашли применение в водяных экономайзерах и паровых калориферах парогенерирующих установок, в теплообменных секциях аппаратов воздушного охлаждения (АВО) энергоносителей и технологических продуктов в процессах нефтеперерабатывающей, химической, нефтехимической промышленности [1], электроэнергетике, холодильной технике и других отраслях народного хозяйства. Несмотря на различия в материальном исполнении, геометрических параметрах ребер и компоновочных характеристиках труб в пучке, общим является невысокая теплоотдача ( $\approx 40-90$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) от оребрения к газовой (воздушному) потоку, следствием чего является низкий коэффициент теплопередачи и значительные габариты теплообменника «газ-жидкость».

Для повышения тепловой эффективности этих теплообменников, снижения габаритов и

массы применяют интенсификацию теплоотдачи оребренной поверхности. Предложено и изучено значительное количество методов интенсификации теплоотдачи при внешнем поперечным обтекании пучков ребристых труб [2]. Одним из относительно новых из многообразия способов интенсификации теплоотдачи является подгибка ребер [3]. В основе способа находится совершенствование гидродинамики обтекания ребристых труб, и он исследован для шахматных пучков труб с навитыми стальными приварными ребрами, коэффициент оребрения которых  $\varphi = 3-8$  [3-6].

При параллельной подгибке ребер интенсификация (рост) теплоотдачи составляет 10-13% и сопровождается увеличением сопротивления в 1,46 раза. Основной вывод этих исследований – параллельную подгибку целесообразно применять только для уменьшения габаритов. Он базируется на результатах тепло-

аэродинамических экспериментов поверхностей нагрева с малыми коэффициентами оребрения применительно к парогенераторам, не применяемыми в промышленных АВО.

В теплообменных секциях современных АВО последнего поколения исключительно используются биметаллические трубы со спиральными алюминиевыми ребрами с большим значением коэффициента оребрения  $\phi \approx 20-21$  при высоте ребра  $h \approx 15-15,5$  мм с шагом  $s \approx 2,3-2,5$  мм и наружным диаметром ребра  $d = 57$  мм [7]. Применяется шахматная равносторонняя компоновка труб с шагом разбивки  $S_1 = S_2' = 63-64$  мм. Указанные значения  $\phi$  являются предельно достигнутыми в серийном промышленном оребрении труб методами поперечно-винтовой накатки ВНИИметмаш или спиральной навивки поставленной на ребро алюминиевой ленты толщиной  $\Delta = 0,4$  мм L-образного поперечного сечения с использованием технологии и оборудования ЭНИКмаш [7, 8]. Таким образом, повышение тепловой эффективности теплообменных секций и всего АВО в целом увеличением площади поверхности оребрения достигло потенциальной возможности, и на этом направлении не следует ожидать существенных количественных значений снижения массы аппарата или увеличения теплового потока в неизменных габаритах.

В Беларуси и странах СНГ находятся в эксплуатации тысячи АВО первого поколения, в которых теплообменные секции состоят из тесных шахматных равносторонних пучков с шагом  $S_1 = S_2' = 52$  мм из биметаллических труб  $d = 49$  мм и  $\phi = 15,2$ . Биметаллические ребристые трубы имеют поперечно-винтовые накатные алюминиевые ребра средней толщины  $\Delta \approx 0,7-0,8$  мм повышенной жесткости. Однако БРТ с навитыми ребрами легко подгибаются без приложения ощутимых усилий в осевом направлении. В большинстве случаев БРТ этих АВО физически изношены (сильно загрязнены, алюминий подвергнут воздействию атмосферной коррозии) и требуют замены. Это возможно достигнуть двумя путями: применением вновь изготовленных БРТ с геометрическими параметрами демонтируемых труб или применением БРТ повышенной тепловой эффективности ( $\phi \approx 20-21$ ) с  $d = 57$  мм (трубы второго поколения), что позволит увеличить отводимый тепловой поток аппаратом при неизменных габаритах. Но для такой сборочной операции потребуется осуществить параллельную подгибку ребер, чтобы осуществить их размещение с шагом в трубной решетке  $S_1 = 52$  мм или  $S_1 = 58$  мм.

Известна теплообменная труба [9] с поперечными ребрами разной высоты для воздухо-

охлаждаемых теплообменников, в которой между ребрами большой высоты размещены ребра на  $1/3$  меньшей высоты. Промысленный интерес к этой конструкции применительно к АВО заключается в отработанном технологическом процессе изготовления [10] навитых алюминиевых ребер на оборудовании ЭНИКмаш, возможности повышения эксплуатационной надежности теплообменных секций из-за меньшей загрязняемости поверхности оребрения и предотвращения при подгибке защемления с ребрами соседних труб поперечного ряда для очень тесных компоновок. Трубы с разновысокими ребрами увеличивают высоту подогнутого сегмента  $h_c$  ребра приблизительно в два раза ( $h_c \approx 2s$ ) в сравнении с его величиной для БРТ с ребрами одинаковой высоты, которая не может быть больше шага ребер  $s$ . Компактность пучка возрастет в 1,22 раза против 1,06–1,11 раза. Известно, что компактным пучкам свойственна повышенная тепловая (энергетическая) эффективность, позволяющая увеличивать тепловой поток секции до 20%.

Применение БРТ АВО с параллельной подгибкой равновысоких [10] спиральных навитых алюминиевых ребер с шагом  $s = 2,53$  мм,  $\Delta = 0,4$  мм и  $\phi \approx 20,77$  при условно свободной компоновке  $S_1 = S_2' = 63,5$  мм в шахматном шестирядном пучке интенсифицирует теплоотдачу до 10% при таком же росте аэродинамического сопротивления, но переход к тесной компоновке этих труб до  $S_1 = 52$  мм сопровождается повышением теплоотдачи до 18% при опережающем росте аэродинамического сопротивления до 68% по сравнению с соответствующим характеристиками исходного пучка до подгибки ребер. Однако недостаточно изучена теплоотдача шахматных пучков труб с параллельной подгибкой высокого ребра до соприкосновения с вершиной низкого ребра и подгибкой высоких ребер «на квадрат». На рис. 1 приведены фотографии труб с разной формой ребер.



Рис. 1. Внешний вид ребристых труб

Цель работы – экспериментальное исследование теплоаэродинамических характеристик пучков из труб с навитыми KLM-ребрами различной формы.

**Основная часть.** Объектом теплоаэродинамических исследований являлись три (I, II, III) шахматных шестирядных пучка, обтекаемых поперечным изотермическим потоком воздуха. Пучки собирали из БРТ натуральных размеров с высотой (длиной) оребрения  $H = 400$  мм, а отрезная длина труб составила 430 мм. БРТ изготовлены ЭНИКмаш (г. Воронеж) с двухзаходными навитыми спиральными алюминиевыми KLM-ребрами [10], у которых горизонтальная полка механически закатана в предварительно нанесенные на наружной поверхности несущей стальной трубы диаметром  $25 \times 2$  мм продольно-радиальные бороздки – выступы небольших размеров. Геометрические параметры ребер характерны для теплообменных секций АВО.

Пучок I собирали из БРТ с разновысокими прямыми ребрами (рис. 2), расположенными в вершинах равностороннего треугольника с шагом  $S_1 = S_2' = 63,5$  мм,  $S_2 = 55$  мм. Геометрические параметры оребрения: наружный диаметр ребра первого  $d_1 = 55,74$  мм и второго  $d_2 = 46,5$  мм захода; высота ребра первого  $h_1 = 14,92$  мм и второго  $h_2 = 10,3$  мм захода; диаметр по основанию ребра  $d_0 = d_1 - 2h_1 = d_2 - 2h_2 = 25,9$  мм; шаг ребра  $s_1 = s_2 = 5,2$  мм; средняя

толщина ребра  $\Delta = 0,4$  мм; коэффициент оребрения трубы  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 10,2 + 6,6 = 16,8$ .

Высота низких ребер (второго захода) выбиралась такой, чтобы после подгибки высоких ребер до касания с низкими БРТ могли быть установлены в решетках с поперечным шагом  $S_1 = 52$  мм, применяемым в секциях АВО из труб с накатными алюминиевыми ребрами при  $\varphi = 9,4$ .

После завершения испытаний пучка I прямые высокие ребра БРТ были подогнуты параллельно друг другу вдоль образующей с двух боковых сторон (рис. 3) до размера  $b = 49$  мм. Степень подгибки ребра  $h_n / h_1 = 4,62 / 14,92 = 0,31$ . Из этих труб был собран пучок II с шагами размещения труб в решетке  $S_1 = 52$  мм и  $S_2 = 55$  мм (шаг  $S_2$  остался прежним, как в пучке I). Направление движения воздуха было параллельно подогнутым ребрам.

Далее оставшиеся сегменты прямых высоких ребер БРТ пучка II были дополнительно подогнуты вдоль образующей с боковых сторон до размера  $b = 49$  мм, в итоге исходные трубы I с прямыми разновысокими ребрами трансформировались в БРТ с полностью подогнутыми ребрами «на квадрат» в плане (рис. 4). Из них собран пучок III с шагами  $S_1 = 52$  мм и  $S_2 = 55$  мм, которые были в пучке II. Возникли замкнутые межреберные каналы с небольшими открытыми для прохода воздуха угловыми пространствами (рис. 4) [11].

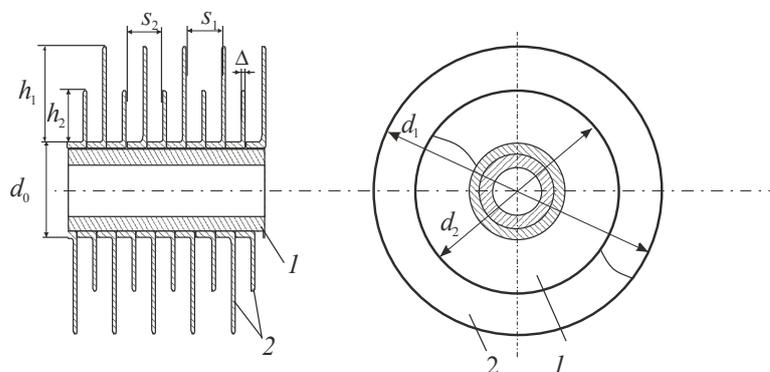


Рис. 2. Схема биметаллической трубы с разновысокими прямыми KLM-ребрами:  
1 – несущая труба; 2 – KLM-ребра

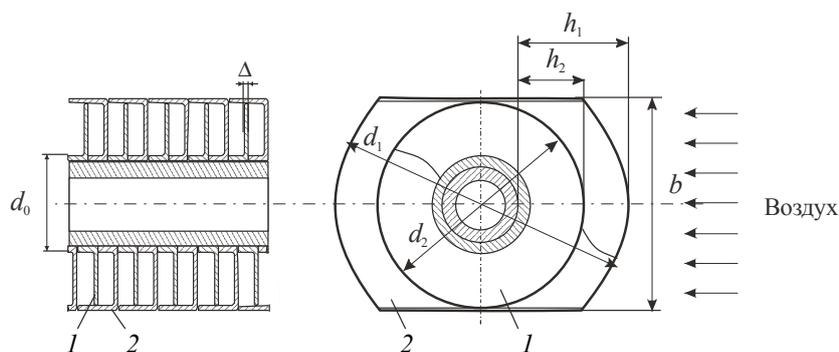


Рис. 3. Схема биметаллической трубы с параллельно подогнутыми KLM-ребрами:  
1 – низкое прямое ребро; 2 – высокое подогнутое ребро

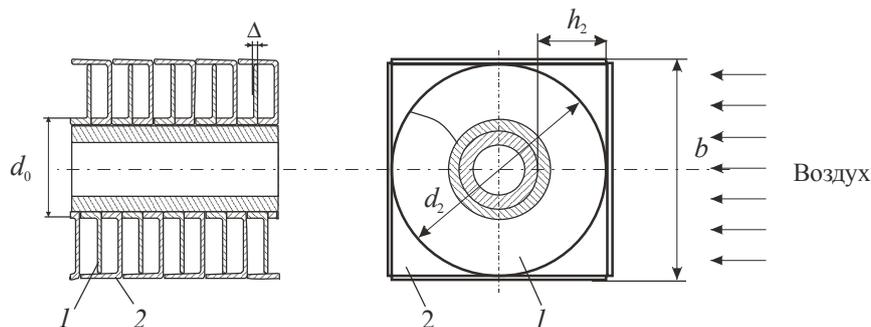


Рис. 4. Схема биметаллической трубы с подогнутыми «на квадрат» KLM-ребрами:

1 – низкое прямое ребро; 2 – высокое подогнутое ребро

Опытные пучки устанавливали в рабочем участке с поперечным сечением 400×400 мм разомкнутой аэродинамической трубы [12]. Схема трубы, аппаратное оформление и методика исследования изложены в работах [8, 10]. Теплоотдача изучалась локальным тепловым моделированием. Применен парозлектрический калориметр [8]. Средний приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  вычисляли как среднее арифметическое коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_i$  всех шести поперечных рядов. Тепловая проводимость контакта не учитывалась. Коэффициенты  $\alpha_i$ ,  $\alpha$  отнесены к полной площади поверхности оребрения трубы-калориметра.

Опытные данные обрабатывали и представляли в безразмерных числах подобия Нуссельта  $Nu_i = \alpha_i d_0 / \lambda$ ,  $Nu = \alpha d_0 / \lambda$ , Рейнольдса  $Re = \omega d_0 / \nu$ , Эйлера  $Eu = \Delta p / (\rho \omega^2)$ , где  $\alpha_i$  – приведенный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной теплоотдающей площади поверхности оребрения калориметра  $i$ -го ряда, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);  $\omega$  – скорость воздуха в сжатом поперечном сечении пучка, м/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с;  $\Delta p$  – перепад статического давления воздуха в пучке, Па;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>. Физические параметры воздуха  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  определялись по его средней температуре в пучке.

Максимальная относительная квадратичная погрешность полученных в опытах значений  $Nu_i$ ,  $Re$  и  $Eu$  не превышала соответственно 6,5; 4,1; 5%.

Обобщение полученных результатов выполнено с помощью уравнений подобия степенного вида:

$$Nu_i = C_i Re^{n_i}; \quad Nu = C Re^n; \quad (1)$$

$$Eu = B Re^{-m}, \quad (2)$$

где  $C_i$ ,  $C$ ,  $B$  – коэффициенты пропорциональности;  $n$ ,  $n_i$ ,  $m$  – показатели степени. Скорость

воздуха в сжатом поперечном сечении пучков изменялась в диапазоне  $\omega = 2-15$  м/с.

Значения коэффициентов в уравнениях подобия (1), (2), компактность пучка  $\Pi = \pi d_0 \phi / (S_1 S_2)$  и значения чисел подобия Нуссельта и Эйлера для характерных значений  $Re = 3000$  и  $20\,000$  представлены в табл. 1.

Уравнения (1), (2) действительны в интервале значений  $Re = (3-25) \cdot 10^3$ .

Таблица 1

**Значения коэффициентов в уравнениях подобия (1), (2)**

Коэффициент	Номер рядов в пучке	Номер пучка		
		I	II	III
$C_i \cdot 10$	1	1,07	0,74	0,30
	2–6	0,69	0,84	0,36
$n_i \cdot 10$	1	6,4	6,7	7,8
	2–6	7,1	6,8	7,6
$C \cdot 10$	–	0,784	0,825	0,349
$n \cdot 10$	–	6,98	6,78	7,63
$B$	–	15,5	10,4	9,3
$m \cdot 10$	–	2,2	1,7	1,2
$S_1$ , мм	–	63,5	52,0	52,0
$\Pi$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	–	391	478	478
<b>Re = 3000</b>				
$Nu$	–	19,89	18,79	15,7
$Eu$	–	2,66	2,67	3,56
<b>Re = 20 000</b>				
$Nu$	–	74,8	68,0	66,8
$Eu$	–	1,75	1,93	2,83

Характер изменения теплоотдачи (рис. 5) по рядам пучка I из труб с разновысокими прямыми ребрами качественно подобен этому процессу для пучка с прямыми ребрами одинаковой высоты [10].

Теплоотдача стабилизированных рядов (второго – шестого) пучка I на 17% при  $Re = 5 \cdot 10^3$  и на 29% при  $Re = 20 \cdot 10^3$  выше теплоотдачи первого ряда, что объясняется турбулизацией воздуха трубами первого ряда.

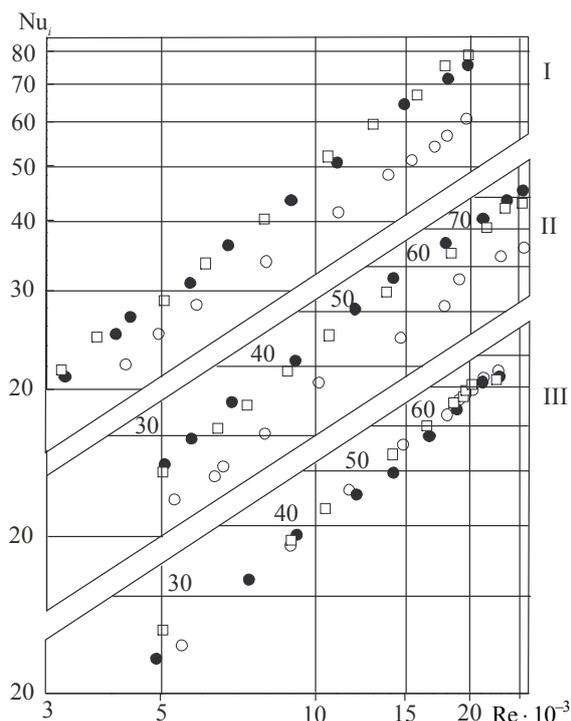


Рис. 5. Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи  $Nu_i$  поперечных рядов пучков I–III с прямыми и подогнутыми KLM-ребрами от безразмерной скорости воздуха  $Re$ :  
 ○, ●, □ – опытные данные для первого, третьего и пятого рядов в пучке

В пучке II с параллельно подогнутыми ребрами, так же как и в пучке I, теплоотдача стабилизированных рядов в среднем на 24% больше во всем диапазоне  $Re$  этой характеристики первого ряда. Сравнение данных с пучком I показывает следующее. Параллельная подгибка сопровождается уменьшением теплоотдачи на 8% как в первом, так и стабилизированных рядах с соответствующими характеристиками пучка I. На указанное значение произошло и снижение средней теплоотдачи пучка II, но аэродинамическое сопротивление (рис. 6) в среднем возросло на 6% в интервале  $Re = (3–25) \cdot 10^3$ .

Параллельная подгибка, несмотря на применение тесной компоновки труб в пучке II (уменьшение  $S_1$  от 63,5 до 52 мм), не способствовала интенсификации процесса теплоотдачи. Компактность пучка увеличилась на 22%. Подгибка ребер сопровождается образованием в области миделева сечения труб замкнутых межреберных каналов, в которых поток воздуха движется линейно и не перемешивается в поперечном направлении с той частью потока, которая движется в межтрубном пространстве, что снижает общую турбулентность потока и ухудшает интенсивность теплоотдачи в сравнении с пучком I.

Зазор  $S_1 - b$  между трубами в пучке II приблизительно одинаков с межреберным зазором

$s - \Delta$ , поэтому расходы воздуха через эти сечения одного порядка.

Изменился характер зависимости  $Eu = f(Re)$  пучков II, III с подогнутыми ребрами, кривые сопротивления располагаются более полого в сравнении с кривой пучка I с прямыми ребрами, что свидетельствует о новой гидродинамической картине обтекания воздухом труб с подогнутыми ребрами.

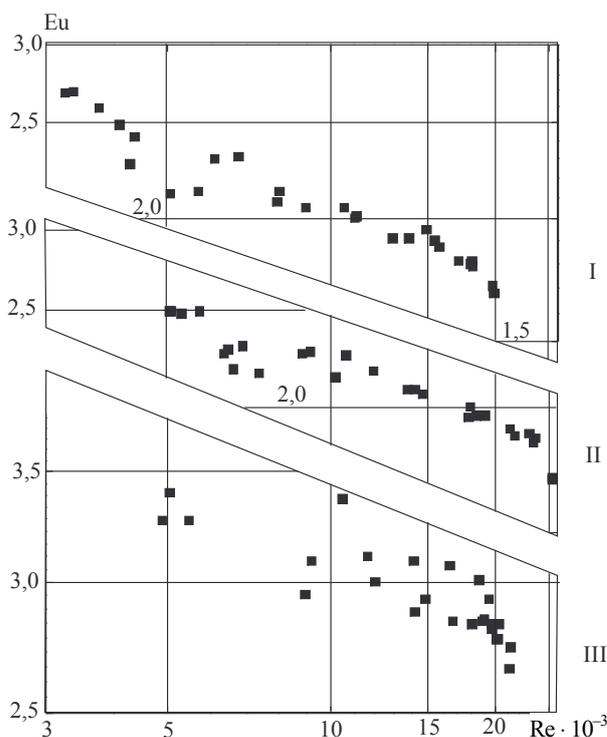


Рис. 6. Зависимость аэродинамического сопротивления шестирядных пучков I–III с прямыми и подогнутыми KLM-ребрами от безразмерной скорости воздуха  $Re$ :  
 ■ – опытные данные

Несколько иначе протекает процесс теплоотдачи в пучке III с подогнутыми ребрами «на квадрат». Не отмечено изменения теплоотдачи в поперечных рядах по направлению движения воздуха. Она практически одинакова, т. е. теплоотдача первого (начального) ряда повысилась до уровня теплоотдачи стабилизированных рядов и выше приблизительно на 3–20% теплоотдачи первого ряда пучка II. Видимо, дополнительная подгибка ребер с лобовой и кормовой половины труб положительно сказалась на межреберной турбулентности воздуха. Но теплоотдача стабилизированных рядов ухудшилась в 1,18–1,06 раза в сравнении с аналогичной характеристикой таких рядов пучка II. В целом применение квадратичной подгибки ребер вызвало ухудшение средней теплоотдачи пучка III в сравнении с пучком II на 26% для  $Re = 3 \cdot 10^3$ , на 2% для  $Re = 20 \cdot 10^3$ , а в сравнении

с исходным пучком I (прямые ребра) это будет соответственно 27 и 12%.

Ожидания ощутимого снижения теплоотдачи вследствие квадратной подгибки ребер не оправдались. Предполагали, что процесс переноса тепла в закрытых прямоугольного сечения межреберных каналах окажется подобным теплопередаче в замкнутых узких воздушных прослойках с теплопроводностью под воздействием конвективных токов.

В рассматриваемой конструкции трубы III в углах квадратных межреберных каналов подогнутые ребра лишь частично перекрывали друг друга, возникали небольшие сквозные входные с лобовой и выходные с тыльной стороны щели, которые продувались небольшой частью вынужденного потока воздуха, что улучшало развитие теплопередачи между ребрами и исключало подобие процессов. Создание процесса термоаэрозашиты в чистом виде реализовать не удалось, но заложенные предпосылки для этого правильны и работоспособны.

Трубу III нельзя рассматривать как конструкцию с организованной 100%-ной термоаэрозашитой, но ухудшенный теплообмен в ней позволяет предотвратить переохлаждение до замерзания жидкого энергоносителя в первых рядах АВО.

Квадратная подгибка (пучок III) сопровождается значительным ростом аэродинамического сопротивления в 1,34–1,62 раза по отношению к сопротивлению исходного пучка I с разновысокими ребрами. Собственно, влияние подгибки на этот результат несколько меньше, так как в отмеченную величину включена часть сопротивления от перехода на тесную компоновку труб в пучке III.

Выполненное исследование позволило определить термическое контактное сопротивление (ТКС)  $R_k$  трубы I с навитыми прямыми разновысокими спиральными алюминиевыми KLM-ребрами. Получено по методике [8] значение  $R_k \approx 3,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  для интервала средней температуры контактной зоны  $t_k = 89,8\text{--}72,2^\circ\text{C}$ . Тепловая проводимость контакта  $\alpha_k = 1 / R_k \approx 2940 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , которая является приемлемой и находится на уровне теплоотдачи однофазных органических энергоносителей при вынужденном движении [8].

Также изучена возможность применения обобщенных уравнений подобия АЛТИ – АГТУ [7, 8] В. Б. Кунтыша и КПИ (Киевского политехнического института) [5] Е. Н. Письменного для расчета средней теплоотдачи шахматного шестирядного пучка из труб с разновысотными ребрами (пучок I). Погрешность обобщенных уравнений составляет  $\pm 15\%$ .

При расчете теплоотдачи по указанным обобщенным уравнениям предполагали замену в пучке I труб с разновысотными ребрами на трубы с ребрами одинаковой высоты средних параметров  $h = 0,5 (h_1 + h_2) = 12,61 \text{ мм}$ ;  $d = d_0 + 2h = 51,12 \text{ мм}$ ;  $s = 0,5 s_1 = 0,5 s_2 = 2,6 \text{ мм}$ .

Расчеты выполнены для температуры воздуха в пучке  $50^\circ\text{C}$  и скорости воздуха в сжатом сечении пучка  $w = 2,61; 13,05 \text{ м/с}$ . В опытные значения теплоотдачи вводилась поправка на локальный метод моделирования [8]. Сходимость опытных  $Nu_{оп}$  и расчетных значений  $Nu_p$  теплоотдачи оценивали выражением  $\delta Nu = (Nu_{оп} - Nu_p) \cdot 100\%$ . Сравнительные результаты расчета сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Данные расчета теплоотдачи по разным методикам**

Наименование	$w = 2,61 \text{ м/с}$		$w = 13,05 \text{ м/с}$	
	$Nu_{оп}$	$Nu_p$	$Nu_{оп}$	$Nu_p$
АЛТИ – АГТУ	19,56	21,94	65,78	64,56
$\delta Nu, \%$	–12,2		+1,85	
КПИ	19,56	22,91	65,78	66,28
$\delta Nu, \%$	–17,1		–0,75	

Таким образом, расчеты теплоотдачи пучка из труб с разновысокими ребрами по уравнениям АЛТИ – АГТУ и КПИ приведут к согласованным с опытными данными результатам в случае применения модели пучка труб со средними параметрами оребрения.

**Заключение.** Предложены критериальные уравнения подобия для теплоотдачи и аэродинамического сопротивления шахматных шестирядных пучков аппаратов воздушного охлаждения из труб с навитыми алюминиевыми KLM-ребрами с параллельной и квадратной подгибкой их.

Параллельная боковая подгибка ребер ухудшила интенсивность теплоотдачи на 8% при росте аэродинамического сопротивления шахматных пучков на 6% для труб с разновысокими ребрами. Основное преимущество пучков с подогнутыми ребрами – повышенная компактность в сравнении с прямыми ребрами. Необходим дальнейший поиск оптимальной степени подгибки ребер, которая окажет интенсифицирующее влияние на теплоотдачу и повышение энергетической эффективности пучков АВО.

Подгибка ребер «на квадрат» снизила теплоотдачу пучка до 26% при одновременном повышении его сопротивления до 62%. Конструкция трубы с подогнутыми квадратными ребрами может рассматриваться лишь частично в качестве трубы с термоаэрозашитой.

### Литература

1. Сухорукова В. Г., Ревенков Л. Н. Аппараты воздушного охлаждения для технологических установок в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. М.: НИИТЭхим, 1968. 35 с.
2. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982. 472 с.
3. Экспериментальное исследование новой поверхности нагрева из труб со спиральными поогнутыми ребрами / В. Н. Фомина [и др.] // Теплоэнергетика. 1990. № 9. С. 53–56.
4. Липец А. У., Андреева А. Я., Поверхность нагрева из труб со спирально-ленточным оребрением // Энергетика. 1996. № 10. С. 15–17.
5. Письменный Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб. Киев: Альтерпресс, 2004. 182 с.
6. Письменный Е. Н., Терех А. М., Руденко А. И. Конвективный теплообмен шахматных пакетов труб с параллельной подгибкой поперечных ребер // Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 2. С. 31–41.
7. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
8. Кунтыш В. Б., Кузнецов Н. М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат, 1992. 280 с.
9. Теплообменная труба: а. с. СССР 1725062 / В. П. Мулин [и др.]; заявл. 07.05.90; опубл. 07.04.92 // Бюл. изобр. 1992. № 13. С. 54.
10. Теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пучков из круглых труб с поогнутыми спиральными KLM-ребрами / В. Б. Кунтыш [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2003. № 11. С. 10–14.
11. Теплообменная секция: патент РФ 2213920 / В. П. Мулин, В. И. Кочетов, Р. Ф. Теляев, В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов, А. В. Самородов; заявл. 16.07.2001; опубл. 10.10.2003 // Бюл. изобр. 2003. № 28. С. 63.
12. Экспериментальное исследование теплоотдачи и сопротивления пучков АВО из биметаллических труб / В. Б. Кунтыш [и др.] // Изв. вузов. Энергетика. 1998. № 12. С. 89–93.

### References

1. Sukhorukova V. G., Revenkov L. N. *Apparaty vozdušnogo okhlazhdeniya dlya tekhnologicheskikh ustanovok v khimicheskoy, neftekhimicheskoy i neftepererabatyvayushchey promyshlennosti* [Air-cooled apparatuses for technological installations in the chemical, petrochemical and oil refining industries]. Moscow, NIITEKhim Publ., 1968. 35 p.
2. Zhukauskas A. A. *Konvektivnyy perenos v teploobmennikakh* [Convective transfer in heat exchangers]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 472 p.
3. Fomina V. N., Abramova T. V., Titova Ye. Ya., Barbakadze I. N., Andreyeva A. Ya. Experimental study of the new heating surface from tubes with spiral bent ribs. *Teploenergetika* [Thermal Energy], 1990, no. 9, pp. 53–56 (In Russian).
4. Lipets A. U., Andreyeva A. Ya. Heating surface from tubes with spiral-ribbon finning. *Energetika* [Energy], 1996, no. 10, pp. 15–17 (In Russian).
5. Pis'mennyy Ye. N. *Teploobmen i aerodinamika paketov poperechno-orebrennykh trub* [Heat transfer and aerodynamics of packages of transverse-finned tubes]. Kiev, Al'terpress Publ., 2004. 182 p.
6. Pis'mennyy Ye. N., Terekh A. M., Rudenko A. I. Convective heat transfer between stacks of tubes with parallel bending of transverse ribs. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2010, vol. 32, no. 2, pp. 31–41 (In Russian).
7. Kuntyshev V. B., Bessonnyy A. N. (eds.) *Osnovy rascheta i proyektirovaniya teploobmennikov vozdušnogo okhlazhdeniya: spravochnik* [Fundamentals of Calculation and Design of Heat Exchangers of Air Cooling: handbook]. St. Petersburg, Nedra Publ., 1996. 512 p.
8. Kuntyshev V. B., Kuznetsov N. M. *Teplovoy i aerodinamicheskiy raschety orebrennykh teploobmennikov vozdušnogo okhlazhdeniya* [Thermal and Aerodynamic Calculations of Finned Air Cooling Heat Exchangers]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1992. 280 p.
9. Mulin V. P., Kochetov V. I., Chernikin N. I., Varma K. A., Bil'din M. P. *Teploobmennaya truba* [Heat exchange tube]. A. s. USSR, no. 1725062, 1992.
10. Kuntyshev V. B., Piir A. E., Mulin V. P., Telyayev R. F. Heat transfer and aerodynamic resistance of chess beams from round tubes with bent spiral KLM ribs. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye* [Chemical and Oil and Gas Engineering], 2003, no. 11, pp. 10–14 (In Russian).

11. Mulin V. P., Kochetov V. I., Telyayev R. F., Kuntyshev V. B., Melekhov V. I., Samorodov A. V. *Теплообменная секция* [Heat transfer section]. Patent RF, no. 2213920, 2003.

12. Kuntyshev V. B., Piir A. E., Yegorov A. I., Shmerkovich V. M. Experimental study of heat transfer and resistance of AVO beams from bimetallic tubes. *Izvestiya vuzov. Energetika* [Higher Education News. Energy], 1998, no. 12, pp. 89–93 (In Russian).

#### Информация об авторах

**Кунтыш Владимир Борисович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [egit@belstu.by](mailto:egit@belstu.by)

**Сухоцкий Альберт Борисович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергосбережения, гидравлики и теплотехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: [alk2905@mail.ru](mailto:alk2905@mail.ru)

**Пиир Адольф Эдвардович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теплотехники и теплоэнергетики. Северный (Арктический) федеральный университет (САФУ) имени М. В. Ломоносова (163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, Российская Федерация). E-mail: [ado@piir.ru](mailto:ado@piir.ru)

**Мулин Виктор Петрович** – инженер ЗАО «Октябрьскхиммаш» (452613, г. Октябрьский, ул. Трудовая, 2/1, Республика Башкортостан, Российская Федерация).

#### Information about the authors

**Kuntyshev Vladimir Borisovich** – DSc (Engineering), Professor, Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [egit@belstu.by](mailto:egit@belstu.by)

**Sukhotski Al'bert Borisovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Energy-saving, Hydraulics and Heat Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [alk2905@mail.ru](mailto:alk2905@mail.ru)

**Piir Adol'f Edvardovich** – DSc (Engineering), Professor, the Department of Heat Engineering and Heat Power Engineering. Northern (Arctic) Federal University of M. V. Lomonosov (17, Emb. of Northern Dvina, Arkhangel'sk, 163002, Russian Federation). E-mail: [ado@piir.ru](mailto:ado@piir.ru)

**Mulin Victor Petrovich** – engineer of Joint-Stock Company "Oktoberkhimmash" (2/1, Trudovaya str., 452613, Otyabr'skiy, Republic of Bashkortostan, Russian Federation).

*Поступила 11.09.2019*