

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА РАЗЛИЧНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ МАЛОРЯДНЫХ КОРИДОРНЫХ ПУЧКОВ ИЗ ТРУБ СО СПИРАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ

Докт. техн. наук, проф. КУНТЫШ В. Б.,  
асп. ПОЗДНЯКОВА А. В., канд. техн. наук САМОРОДОВ А. В.

*Архангельский государственный технический университет*

Коридорные пучки и отдельные одиночные ряды из труб со спиральными накатными и круглыми шайбовыми ребрами с протеканием теплообмена при естественной конвекции воздуха широко применяются в качестве теплопередающей поверхности преимущественно на базе тепловых труб в теплоутилизаторах паровоздушной смеси сушильной части бумаго- и картоноделательных машин, лесосушильных камер, систем вентиляции промышленных цехов и общественных зданий, систем воздушного отопления индивидуальных домов, в охлаждающих устройствах для искусственного замораживания и нагрева грунта, в калориферах для нагрева воздуха сушильных установок, в охлаждающих батареях холодильных камер, воздухоохлаждаемых конденсаторах пара вапортронов [1], а также при охлаждении различного электронного оборудования. Общим конструктивным свойством этих теплообменных устройств является небольшое число поперечных рядов труб, обычно не превышающее  $z = 4, 5$ . Расширение применения в аппаратах и установках промышленной энергетики тепловых процессов с естественной конвекцией теплоносителя является эффективным направлением энергосбережения. Однако это направление при практической реализации сдерживается и в некоторой мере даже тормозится недостаточной изученностью [2–4] свободно-конвективного теплообмена в пучках ребристых труб при изменении компоновочных и геометрических параметров в широком интервале. На протяжении целых десятилетий исследования теплообмена пучков из круглоребристых труб при естественной конвекции воздуха активно не проводились, считались не актуальными.

Цель работы – экспериментальное исследование влияния изменения в значительном интервале компоновочных параметров труб в коридорном пучке на интенсивность свободно-конвективной теплоотдачи и получение расчетных критериальных зависимостей.

Пучки собирались из биметаллических оребренных труб следующих геометрических параметров: наружный диаметр ребра  $d = 55,65$  мм; диаметр трубы 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; теплоотдающая длина оребренной части  $l = 300$  мм; коэффициент оребрения  $\phi = 16,8$ . Алюминиевые спиральные трехзаходные ребра, изготовленные по технологии ВНИИМЕТМАШа, накатаны на латунной трубе наружного диаметра  $d_{\text{н}} = 25$  мм с толщиной стенки  $\delta = 2$  мм.

Коридорный пучок характеризуется числом поперечных рядов труб  $z$ , абсолютными поперечным  $S_1$  и продольным  $S_2$  шагами разбивки труб, а также относительными шагами  $\sigma_1 = S_1/d$  и  $\sigma_2 = S_2/d$  (рис. 1а). В этой работе представлены результаты по двухрядным ( $z = 2$ ) коридорным

пучкам. Поперечный шаг составлял  $S_1 = 58; 61; 64; 70; 76$  мм ( $\sigma_1 = S_1/d = 1,043; 1,097; 1,151; 1,259; 1,367$ ). Каждому значению  $S_1$  соответствовало семь значений продольного шага  $S_2 = 58; 61; 64; 70; 76; 86; 100$  мм ( $\sigma_2 = S_2/d = 1,043; 1,097; 1,151; 1,259; 1,367; 1,547; 1,799$ ). Таким образом, было испытано тридцать пять моделей двухрядных пучков с горизонтальным расположением труб. Дополнительно на двух пучках с шагами  $S_1 = 70; S_2 = 61$  и  $S_1 = 76; S_2 = 64$  мм проведены опыты при расположении осей труб под углом наклона к горизонтальной плоскости  $\gamma = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; 90^\circ$ , а также при наклоне продольной оси пучка  $\omega = 15^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ$  (рис.1б, в).

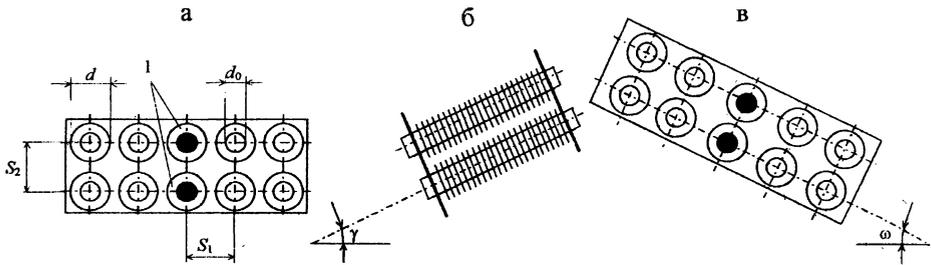


Рис. 1. Двухрядные коридорные пучки: а – горизонтальный; б – при угле наклона осей труб  $\gamma$ ; в – при угле наклона продольной оси пучка  $\omega$ ; 1 – трубы-калориметры

Эксперименты выполнены в условиях полного теплового моделирования. Каждый ряд состоял из пяти труб [5], обогреваемых переменным электрическим током. Центральная труба в каждом ряду являлась калориметром, у основания ребер которого по винтовой линии на половине окружности трубы заложено семь хромель-алюмелевых термопар. Расположение калориметров в каждом ряду позволило для заданного теплового режима одновременно получать первичные данные для определения средней теплоотдачи как каждого отдельного ряда, так и пучка в целом. Подробное описание экспериментальной установки, конструкции трубы-калориметра, методики исследования и порядка проведения опытов изложены в [6].

В ходе экспериментов средняя температура поверхности труб-калориметров у основания ребер изменялась в интервале  $t_{ст} = 30 \dots 215$  °С, температура окружающего воздуха  $t_0 = 10 \dots 25$  °С, подводимая к калориметрам электрическая мощность  $W = 10 \dots 200$  Вт.

Коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией отдельного ряда вычисляли по формуле, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_k = \frac{W - Q_{пот} - Q_{л}}{F(t_{ст} - t_0)} = \frac{Q_k}{F(t_{ст} - t_0)}, \quad (1)$$

где  $Q_{пот}$  – тепловые потери через торцы трубы-калориметра, принимаемые по результатам тарировочных опытов [6], Вт;  $Q_{л}$  – тепловой поток, отданный излучением, Вт;  $F = \pi d_0 l k$  – полная наружная теплоотдающая площадь поверхности калориметра, м<sup>2</sup>.

Среднее значение  $\alpha$  всего пучка для заданного теплового режима вычисляли также по (1), но  $t_{ст}$  определяли как среднеарифметическую по

показаниям термпар обоих калориметров; значения  $Q_k$  и  $F$  равны соответственно суммарным значениям этих величин обоих калориметров.

Теплоотдача излучением составляла 15...25 % от суммарного теплового потока. Эффективная степень черноты одиночной оребренной трубы была определена опытно-расчетным способом [7]; тепловой поток излучением от пучка в окружающее пространство вычисляли аналитически зональным методом по рекомендациям [4, 8]. В пучке выделяли две зоны: зона 1 — наружные половины труб поперечных рядов, зона 2 — внутренние половины труб поперечных рядов. Зоной 3 считается окружающая среда, состоящая из двух плоскостей, ограничивающих пучок. Установлено, что если для пучков с числом поперечных рядов два и более пользоваться обычным методом расчета, т. е. без разбиения пучка на зоны, то результат для  $Q_L$  получается завышенным на 20...50 %. Далее анализируется только теплоотдача конвекцией.

Опытные данные обрабатывались в числах подобия Нуссельта  $Nu = \alpha_k d_0 / \lambda$  и Релея  $Ra = g\beta d_0^3 (t_{CT} - t_0) / (\nu a)$ . Физические свойства воздуха  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\beta$ ,  $a$  принимались по температуре окружающего воздуха  $t_0$ . Относительная среднеквадратичная погрешность опытных значений  $Nu$  и  $Ra$  не превышала соответственно 5,7 и 3 %.

Результаты опытов в критериальной обработке по средней теплоотдаче свободной конвекцией горизонтальных двухрядных коридорных пучков представлены на рис. 2. Опытные значения теплоотдачи каждой серии, изображенные точками, с отклонением до  $\pm 5$  % аппроксимированы формулами вида

$$Nu = ARa^n [1 - \exp(-B/Ra)]. \quad (2)$$

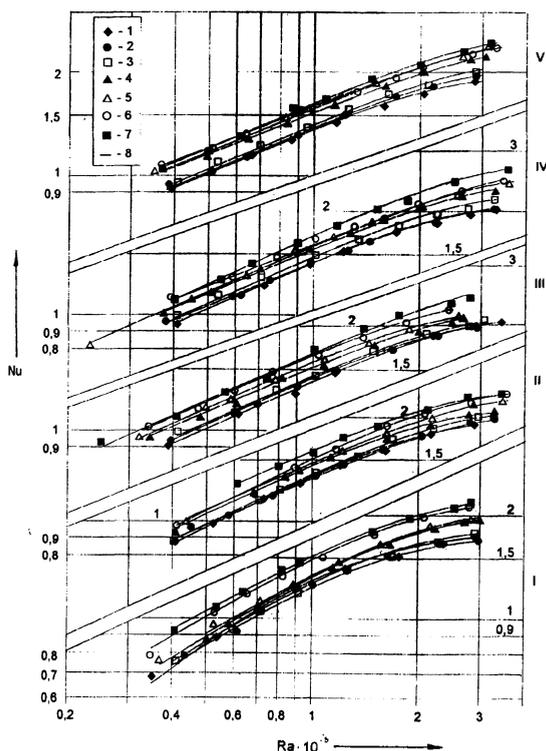


Рис. 2. Средняя теплоотдача пучков: I—V — номера пучков по табл. 1, для которых соответственно  $S_1 = 58; 61; 64; 70; 76$  мм; 1—7 —  $S_2 = 58; 61; 64; 70; 76; 86; 100$  мм; 8 — расчет по (2)

Численные значения постоянных  $A$ ,  $B$ ,  $n$  в (2) для средней теплоотдачи горизонтальных двухрядных пучков даны в табл. 1.

Таблица 1

$S_2$ , мм	58	61	64	70	76	86	100
I. $S_1 = 58$ мм							
$A \cdot 10^3$	0,23	1,27	1,30	1,34	1,70	1,90	2,73
$n$	0,76	0,60	0,60	0,60	0,58	0,58	0,55
$B \cdot 10^{-5}$	2,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,1	4,5
II. $S_1 = 61$ мм							
$A \cdot 10^3$	4,30	7,50	5,45	6,50	8,30	4,80	9,00
$n$	0,50	0,45	0,48	0,47	0,45	0,50	0,45
$B \cdot 10^{-5}$	5,0	6,6	6,0	5,5	6,9	6,0	6,2
III. $S_1 = 64$ мм							
$A \cdot 10^3$	7,80	8,00	8,10	10,80	8,90	9,30	9,40
$n$	0,45	0,45	0,45	0,43	0,45	0,45	0,45
$B \cdot 10^{-5}$	6,7	6,0	6,2	6,5	5,5	5,8	7,8
IV. $S_1 = 70$ мм							
$A \cdot 10^3$	8,0	11,3	8,3	11,0	10,0	16,0	7,6
$n$	0,45	0,43	0,45	0,43	0,44	0,40	0,47
$B \cdot 10^{-5}$	5,9	6,8	6,5	7,5	7,5	10,0	7,0
V. $S_1 = 76$ мм							
$A \cdot 10^3$	9,7	9,8	10,0	15,3	12,5	16,0	11,5
$n$	0,43	0,43	0,43	0,40	0,42	0,40	0,43
$B \cdot 10^{-5}$	5,9	6,5	7,0	8,0	8,0	8,0	7,5

Как следует из рис. 2, средняя теплоотдача пучка для каждого поперечного шага  $S_1 = \text{const}$  возрастает с увеличением продольного шага  $S_2$ , вследствие приращения высоты столба нагретого воздуха, а следовательно, и подъемной силы. Увеличение числа  $Nu$  при изменении продольного шага  $S_2$  от 58 до 100 мм составляет для  $S_1 = 58; 61; 64; 70; 76$  мм соответственно 20; 17; 18; 19; 17 %.

На рис. 3 приведены графики, дающие представление об изменении числа  $Nu$  порядной и средней теплоотдачи исследованных горизонтальных пучков от относительных шагов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  для постоянного значения числа  $Ra = 150000$ . Теплоотдача первого ряда имеет очевидный минимум в области шага  $\sigma_2 \approx 1,043 \dots 1,259$  (рис. 3а), причем он более выражен для значений  $\sigma_1 = 1,043; 1,097$  и  $1,151$ . Это можно объяснить следующим образом. Каждый из рядов образует свою область теплового следа [9]. В коридорном пучке, особенно в первом ряду, создаются условия гидродинамического следа, неблагоприятные для интенсивного теплообмена. При шагах  $\sigma_2 \approx 1,043 \dots 1,259$  взаимодействие следов первого и второго рядов приводит к противотоку (встречному движению), что вызывает уменьшение теплоотдачи первого ряда. С увеличением продольного шага  $\sigma_2$  данный показатель интенсифицируется. Для более разреженных пучков с  $\sigma_1 = 1,259$  и  $1,367$  теплоотдача первого ряда практически одинакова. Теплоотдача пучка IV для всего диапазона изменения  $\sigma_2$  на 2...8 % выше теплоотдачи других пучков.

Теплоотдача второго ряда пучков (рис. 3б) плавно возрастает с увеличением  $\sigma_2$ .

В области  $\sigma_2 = 1,043 \dots 1,151$  средняя теплоотдача пучков (рис. 3в) практически одна и та же в пределах погрешности эксперимента. В области изменения шага  $\sigma_1 = 1,547 \dots 1,799$  темпа ее прироста практически

не наблюдается, расхождение в значениях числа Nu не превышает погрешности эксперимента.

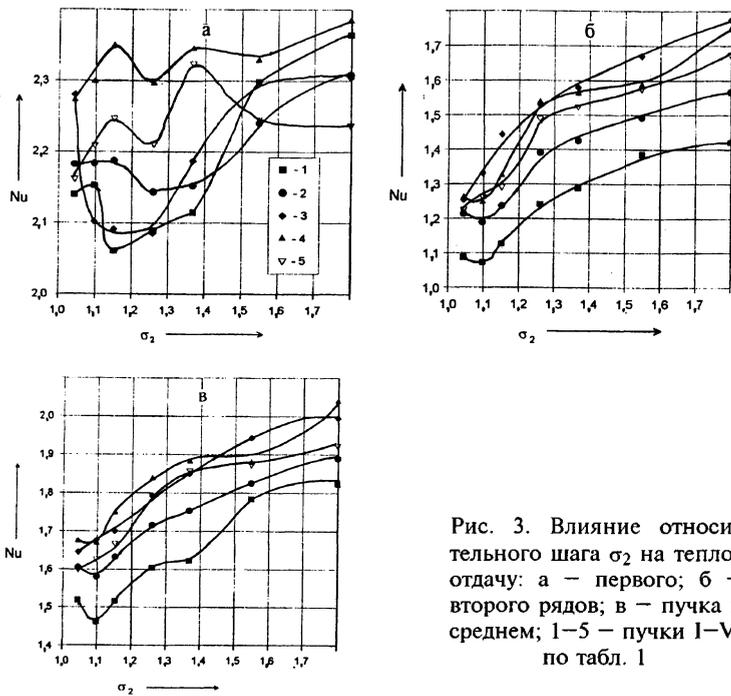


Рис. 3. Влияние относительного шага  $\sigma_2$  на теплоотдачу: а – первого; б – второго рядов; в – пучка в среднем; 1–5 – пучки I–V по табл. 1

В целом теплоотдача пучков с поперечным шагом  $S_1 = 61; 64; 70; 76$  мм выше теплоотдачи пучков с шагом  $S_1 = 58$  мм соответственно на 2...8, 7...13, 5...14, 4...13 %, что, возможно, объясняется более высоким аэродинамическим сопротивлением движению потока воздуха в пучке с более тесной компоновкой труб. Теплоотдача пучков с поперечным шагом  $S_1 = 76$  мм ниже теплоотдачи пучков с  $S_1 = 70$  мм и  $S_1 = 64$  мм. Поэтому более свободные пучки с поперечным шагом  $S_1 \geq 86$  мм в тепловом отношении применять на практике нецелесообразно, а их исследования представляют в большей мере теоретический интерес. Линии графиков теплоотдачи второго ряда и средней теплоотдачи пучка располагаются эквидистантно.

На двух моделях пучков  $S_1 = 70; S_2 = 61$  и  $S_1 = 76; S_2 = 64$  мм были проведены опыты с расположением осей труб под углом  $\gamma$  к горизонтальной плоскости (рис. 16). Геометрические параметры, а также численные значения постоянных  $A, n$  и  $B$  при различных углах наклона  $\gamma$  в (2) по средней теплоотдаче этих пучков приведены в табл. 2.

Таблица 2

$\gamma$	0°	15°	30°	45°	60°	90°
$S_1 = 70; S_2 = 61$ мм						
$A \cdot 10^3$	11,3	8,0	7,7	8,9	7,4	13,2
$n$	0,42	0,45	0,45	0,43	0,43	0,36
$B \cdot 10^{-5}$	6,8	7,5	6,3	6,0	7,5	10,5
$S_1 = 76; S_2 = 64$ мм						
$A \cdot 10^3$	10,0	10,3	14,3	13,0	13,0	—
$n$	0,43	0,43	0,40	0,40	0,39	—
$B \cdot 10^{-5}$	7,0	6,0	8,0	8,5	10,0	—

При увеличении угла наклона  $\gamma$  от 0 до 90° средняя теплоотдача пучка с  $S_1 = 70$  мм;  $S_2 = 61$  мм уменьшается на 42 %. Для вертикального пучка теплоотдача первого и второго рядов идентична, что объясняется теплогидродинамической симметрией рядов труб. С увеличением угла наклона  $\gamma$  от 0 до 60° средняя теплоотдача пучка при  $S_1 = 76$  мм;  $S_2 = 64$  мм понижается на 21 %. На рис. 4 изображена зависимость поправочного коэффициента  $C_\gamma = Nu_\gamma / Nu_{\gamma=0^\circ}$  от угла  $\gamma$ . На величину  $C_\gamma$  очень слабо влияет значение числа Ra. Теплоотдача наклонных пучков с  $S_1 = 76$ ;  $S_2 = 64$  мм выше по всему диапазону угла  $\gamma$  теплоотдачи пучка с  $S_1 = 70$ ;  $S_2 = 61$  мм, расхождение составляет 9 %. Для обеих этих компоновок при угле наклона  $\gamma = 15^\circ$  теплоотдача одинакова и выше теплоотдачи соответствующих горизонтальных пучков примерно на 3 %.

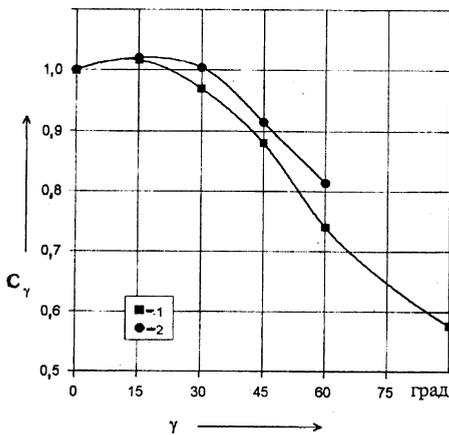


Рис. 4. Зависимость поправочного коэффициента  $C_\gamma$  от угла наклона труб  $\gamma$ : 1, 2 – расчет по (2) соответственно для пучка с  $S_1 = 70$ ;  $S_2 = 61$  и пучка с  $S_1 = 76$ ;  $S_2 = 64$  мм

На двухрядном пучке с  $S_1 = 70$ ;  $S_2 = 61$  мм выполнены опыты при различных углах наклона продольной оси пучка  $\omega = 15^\circ$ ;  $30^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $60^\circ$  (рис. 1в). Численные значения постоянных  $A$ ,  $n$ ,  $B$  в (2) для средней теплоотдачи пучка при различных углах наклона  $\omega$  приведены в табл. 3.

Таблица 3

$\omega$	0°	15°	30°	45°	60°
$S_1 = 70$ ; $S_2 = 61$ мм					
$A \cdot 10^3$	11,3	12,5	11	10,2	11,5
$n$	0,42	0,42	0,44	0,44	0,42
$B \cdot 10^{-5}$	6,8	9,0	7,0	7,0	7,0

На рис. 5 представлена зависимость  $C_\omega = Nu_\omega / Nu_{\omega=0^\circ}$  от угла наклона  $\omega$ . С увеличением угла в интервале  $\omega = 0 \dots 30^\circ$  средняя теплоотдача пучка возрастает, расхождение с горизонтальным пучком достигает 19 %. Это объясняется тем, что при  $\omega = 30^\circ$  трубы второго ряда оказываются расположены в свободном пространстве между трубами первого ряда и омываются набегающим воздухом без предварительного подогрева первым рядом. С последующим увеличением  $\omega = 45 \dots 60^\circ$  средняя теплоотдача пучка снижается, различие с горизонтальным пучком составляет 2 % при  $\omega = 60^\circ$ .

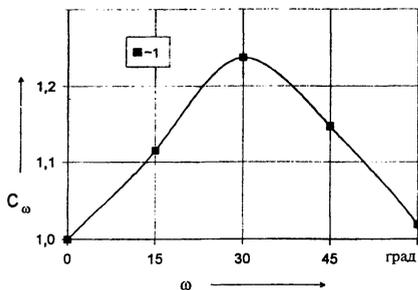


Рис. 5. Зависимость поправочного коэффициента  $C_\omega$  от угла наклона  $\omega$  для пучка с  $S_1 = 70$ ;  $S_2 = 61$  мм; 1 – расчет по (2)

Таким образом, получены уравнения для расчетов свободно-конвективного теплообмена двухрядных коридорных пучков из ребристых труб в неограниченном объеме воздуха для диапазона  $Ra = (0,3...3,5) \cdot 10^5$ , широком интервале изменения шагов труб  $S_1 = (1,043...1,367)d$ ;  $S_2 = (1,043...1,799)d$  и различном их пространственном расположении.

#### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);  $\nu$  – то же, кинематической вязкости воздуха,  $m^2/c$ ;  $a$  – то же, температуропроводности воздуха,  $m^2/c$ ;  $\beta = 1/(273 + t_0)$  – то же, объемного расширения воздуха,  $K^{-1}$ ;  $\alpha_k$  – приведенный коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией, Вт/( $m^2 \cdot K$ );  $Q_k$  – тепловой поток, переданный свободной конвекцией, Вт;  $Q_l$  – тепловой поток, переданный излучением, Вт;  $Q_{\text{пот}}$  – торцевые тепловые потери калориметра, Вт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тиктин С. А. Вapотронная техника. – Киев: Техніка, 1975. – 152 с.
2. Позднякова А. В., Самородов А. В., Кунтыш В. Б. Исследование теплообмена при естественной конвекции воздуха в горизонтальных малорядных коридорных пучках из оребренных труб // Ресурсосберегающие технологии в лесной и деревообрабатывающей промышленности: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. 24–25 ноября 1999 г. – Мн.: БГУ, 1999. – С. 283–285.
3. Позднякова А. В., Самородов А. В. Влияние угла наклона на свободно-конвективный теплообмен двухрядных коридорных пучков из оребренных труб // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: Материалы II междунар. науч.-техн. конф. 19–22 апреля 2000 г. – Вологда: ВоГТУ, 2000. – С. 58–61.
4. Самородов А. В. Исследование свободно-конвективного теплообмена шахматных оребренных пучков аппаратов воздушного охлаждения // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 1999. – 23 с.
5. Кунтыш В. Б., Позднякова А. В. Исследование влияния числа оребренных труб в поперечном ряду пучка на теплоотдачу при свободной конвекции воздуха // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: Сб. науч. тр. – Архангельск: АГТУ, 1999. – Вып. 5. – С. 59–63.
6. Самородов А. В., Кунтыш В. Б. Влияние наклона однорядного пучка труб со спиральными ребрами на свободно-конвективный теплообмен // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: Сб. науч. тр. – Архангельск: АГТУ, 1996. – Вып. 1. – С. 63–69.
7. Самородов А. В., Рощин С. П., Кунтыш В. Б. Лучистый теплообмен одиночной ребристой трубы с окружающей средой // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: Сб. науч. тр. – Архангельск: АГТУ, 1997. – Вып. 2. – С. 102–113.
8. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.
9. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен / Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

Представлена кафедрой  
промышленной теплоэнергетики

Поступила 7.09.2000