

$$v^+ = y^+; \quad (31)$$

при $5 \leq y^+ \leq 40$

$$v^+ = 5 \ln y^+ - 3,05. \quad (32)$$

В турбулентном ядре потока на основе обобщения опытных данных при $40 \leq y^+ \leq 2000$ имеем

$$v^+ = 1,012 \ln y^+ + 11,71. \quad (33)$$

На рис. 5 проведено сопоставление полученных нами данных с результатами работ [1, 2, 7—9]. При сопоставлении принято, что в пристенной области $v^+ \approx \omega_\varphi^+$ (ω_φ^+ — тангенциальная составляющая полной скорости потока). Следует отметить хорошее совпадение распределения (33) с данными работы [9]. Распределение v^+ в пограничном слое на боковой поверхности циклонной камеры более пологое, чем на поверхности пластины и трубы, что связано с более высоким уровнем турбулентности циклонного потока.

Выводы

1. Численно решена задача о движении газа в периферийной зоне рабочего объема циклонных камер.

2. Предложена схема расчета основных аэродинамических характеристик потока в периферийной области циклонных камер. Полученные расчетные соотношения для определения толщины пристенного пограничного слоя и скорости на его границе учитывают влияние ядра потока, числа Рейнольдса, радиуса кривизны поверхности, условий ввода потока в камеру и вполне удовлетворительно соответствуют опытным данным.

3. Результаты выполненного исследования позволяют перейти к решению задачи конвективного теплообмена на боковой поверхности циклонных камер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Бухман М. А., Вышенский В. В., Устименко Б. П. Гидродинамика и теплообмен циклонной камеры с многосторонним подводом воздуха // Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики.—Алма-Ата, 1970.—Вып. 6.—С. 184—194. [2]. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа.—М.: Наука, 1970.—904 с. [3]. Престон Дж. Г. Определение турбулентного поверхностного трения при помощи трубок Пито // Механика.—1955.—№ 6.—С. 64—68. [4]. Сабуров Э. Н. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных нагревательных устройствах.—Л.: Изд-во ЛГУ, 1982.—240 с. [5]. Сабуров Э. Н., Карпов С. В., Осташев С. И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах / Под ред. Э. Н. Сабурова.—Л.: Изд-во ЛГУ, 1989.—274 с. [6]. Сабуров Э. Н., Карпов С. В. Циклонные устройства / Под ред. Э. Н. Сабурова.—М.: Экология, 1993.—368 с. [7]. Сабуров Э. Н., Леухин Ю. Л. Аэродинамика и теплообмен закрученного потока в цилиндрической камере // Инж.-физ. журн.—1985.—Т. 48, № 3.—С. 375—396. [8]. Сакипов З. Б. Теория и методы расчета полуограниченных струй и настильных факелов.—Алма-Ата: Наука КазССР, 1978.—204 с. [9]. Устименко Б. П. Процессы турбулентного переноса во вращающихся течениях.—Алма-Ата: Наука КазССР, 1977.—228 с. [10.] Федяевский К. К., Гиневский А. О., Колесников А. В. Расчет турбулентного пограничного слоя несжимаемой жидкости.—Л.: Машиностроение, 1973.—256 с. [11]. Халатов А. А. Теория и практика закрученных потоков.—Киев: Наук. думка, 1989.—192 с.

УДК 536.24

В. Б. КУНТЫШ, А. Э. ПИИР, В. В. АКСЕНОВ



Кунтыш Владимир Борисович родился в 1941 г., окончил в 1963 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Архангельского государственного технического университета. Имеет 261 печатный труд в области интенсификации конвективного теплообмена развитых поверхностей при внешнем обтекании их однофазными газовыми теплоносителями и теоретических основ для проектирования высокоэффективных теплообменников воздушного охлаждения энергоносителей.



Пиир Адольф Эдвардович родился в 1940 г., окончил в 1962 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Архангельского государственного технического университета. Имеет свыше 100 печатных трудов в области теории термодинамических циклов энергоустановок и конвективного теплообмена в ребристых поверхностях нагрева.



Аксенов Василий Викторович родился в 1956 г., окончил в 1979 г. Архангельский лесотехнический институт, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры физики Архангельского государственного технического университета. Имеет 10 печатных трудов в области теплофизики и молекулярной физики.

**ТЕПЛОБМЕН И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ
В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО УСТАНОВЛЕННЫХ
ПУЧКАХ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ**

Даны рекомендации и расчетные зависимости теплоаэродинамических характеристик шахматных пучков из труб с алюминиевыми накатными ребрами в потоке воздуха, установленных с различными расстояниями между ними.

Heat aerodynamical characteristics recommendations and calculation relationships of aluminium rolled finned tubes staggered arrays with different distances between them in air stream, have been given.

В промышленных теплообменных установках, например в аппаратах воздушного охлаждения, встречаются компоновки из последовательно установленных пучков оребренных труб, особенности закономерностей теплообмена и аэродинамики в которых изучены недостаточно. Поэтому решение этой задачи представляется актуальным.

Эксперименты по исследованию теплоотдачи и аэродинамического сопротивления в последовательно установленных пучках оребренных труб проводили в горизонтальной аэродинамической трубе разомкнутого типа сечением 300×300 мм. В рабочем участке трубы устанавливали два одинаковых трехрядных шахматных пучка оребренных труб, схемы расположения которых представлены на рис. 1. При проведении эксперимента изучали влияние первого (по ходу воздуха) пучка на характер теплообмена во втором в зависимости от расстояния l . Для этого использовали известный метод локального теплового моделирования с помощью пароэлектрического калориметра [6], устанавливаемого в средней части соответствующего ряда пучка.

При проведении эксперимента измеряли динамический напор воздуха, перепад статического давления в пучках, температуру воздуха до пучка и за ним, среднюю температуру поверхности трубы под основанием ребер, электрическую мощность, подводимую к калориметру.

В опытах использовали стальные трубы с накатным алюминиевым оребрением, изготовленные в акционерном обществе «Таллинский машиностроительный завод». Трубы имели следующие параметры: наружный диаметр ребра $d = 56,5$ мм; диаметр по основанию ребра $d_0 = 29,5$ мм; высота ребра $h = 13,5$ мм; шаг ребра $t = 2,52$ мм; толщина ребра $\Delta = 0,55$ мм; коэффициент оребрения $\varphi = 16,9$.

Поперечный S_1 , продольный S_2 и среднедиагональный S'_2 шаги в пучках составляли соответственно 64,7; 56,0; 64,7 мм.

Расстояние l между последним рядом первого (по ходу воздуха) пучка и первым рядом второго пучка изменялось пропорционально величине продольного шага S_2 и составляло соответственно $2S_2$, $3S_2$ и $4S_2$ (рис. 1).

Коэффициент теплоотдачи α_i в каждом ряде пучка определяли по формуле

$$\alpha_i = \frac{Q_i}{F(t_{ст} - t_1)}, \quad (1)$$

где Q_i — количество теплоты, передаваемое калориметром воздуху в ряде i (i — номер ряда);

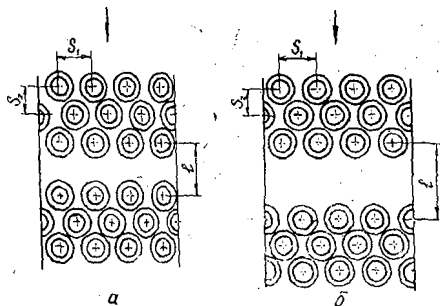


Рис. 1. Схемы компоновки труб в последовательно установленных пучках: а — коридорная; б — шахматная (стрелками показано направление потока воздуха)

F — полная наружная поверхность калориметра;
 $t_{ст}$ — температура стенки калориметра;
 t_1 — температура набегающего потока воздуха.

Коэффициент теплоотдачи α пучка принимали равным среднему арифметическому значению коэффициентов теплоотдачи всех рядов пучка.

Результаты определения теплоотдачи и аэродинамического сопротивления обрабатывали в критериальной форме [3]:

$$Nu_i = c_i Re^{n_i}; \quad (2)$$

$$Nu = c Re^n; \quad (3)$$

$$Eu/\varphi = B Re^{-m}, \quad (4)$$

где Nu_i , Nu — числа Нуссельта для отдельного ряда и пучка в целом, $Nu_i = \alpha_i d_0/\lambda$; $Nu = \alpha d_0/\lambda$;
 α — коэффициент теплоотдачи;
 Re — число Рейнольдса, $Re = \omega d_0/\nu$;
 ω — скорость воздуха в сжатом сечении пучка;
 ν — коэффициент кинематической вязкости;
 Eu — число Эйлера, $Eu = \Delta p/\rho \omega^2$;
 Δp — перепад статического давления воздуха;
 ρ — плотность воздуха;
 φ — коэффициент оребрения;
 c_i , c , n_i , n , B , m — константы.

Теплофизические характеристики воздуха λ , ρ , ν приняты по средней температуре воздуха в пучке. Эксперименты проводили в диапазоне изменения чисел $Re = (5 \dots 35) \cdot 10^3$. Среднеквадратичная ошибка при определении констант c_i , c , n_i , n , B , m не превышала 3 %.

Значения постоянных коэффициентов в критериальных уравнениях теплоотдачи для 1-го (c_1 , n_1), 2-го (c_2 , n_2) и 3-го (c_3 , n_3) рядов первого (числитель) и второго (знаменатель) пучков в зависимости от расстояния l между ними, а также средние значения этих констант (c , n) для первого и второго пучков в целом приведены в таблице.

Как показывает анализ экспериментальных данных, изменение расстояния l влияет на теплоотдачу в рядах этих пучков (см. таблицу, рис. 2, 3). Однако характер ее изменения по рядам пучков существенно различен: если в первом пучке теплоотдача 1-го ряда в среднем составляет 63 %, а 2-го — 95 % от уровня теплоотдачи 3-го ряда этого пучка, то в 1-м ряду второго пучка теплоотдача составляет 95 %, а 2-го — 100 % от уровня теплоотдачи 3-го ряда этого пучка, что приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи второго пучка по сравнению с первым в среднем на 11,4 % (см. таблицу).

Такое изменение теплоотдачи в рядах пучков обусловлено особенностями аэродинамики обтекания пучков потоком воздуха.

l , мм	$c_1 \times 10^2$	$c_2 \times 10^2$	$c_3 \times 10^2$	$n_1 \cdot 10$	$n_2 \cdot 10$	$n_3 \cdot 10$	$c \cdot 10^2$	$n \cdot 10$
112	20,00	6,30	6,65	5,6	7,0	7,0		
	6,30	6,65	6,65	7,0	7,0	7,0		
168	20,00	6,30	6,65	5,6	7,0	7,0	5,72	7,0
	6,30	6,65	6,65	7,0	7,0	7,0		
224	20,00	6,30	6,65	5,6	7,0	7,0		
	6,30	6,65	6,65	7,0	7,0	7,0		

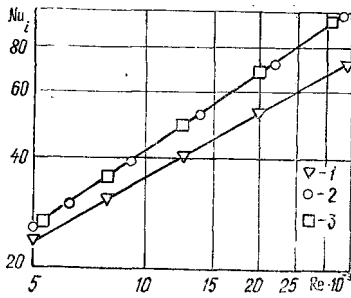


Рис. 2. Теплоотдача различных рядов первого пучка: 1, 2, 3 — соответственно 1-й, 2-й и 3-й ряды

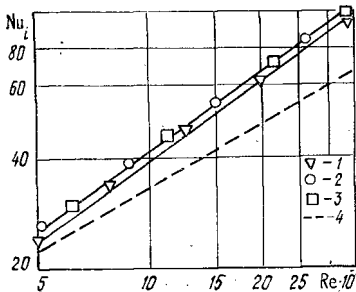


Рис. 3. Теплоотдача различных рядов: 1, 2, 3 — соответственно 1-й, 2-й и 3-й ряды второго пучка; 4 — 1-й ряд первого пучка

На обтекание 1-го ряда труб в первом пучке влияет начальная турбулентность потока [2], что близко к обтеканию одиночной оребренной трубы. При прохождении через 1-й ряд пучка воздушный поток дополнительно турбулизируется. В кормовой зоне оребренной трубы образуется клинообразная вихревая область, быстро диффундирующая в основной поток [1, 2]. Кроме того, происходит деформация поля скоростей последующим 3-м рядом этого пучка. Именно поэтому теплоотдача 2-го ряда в первом пучке резко возрастает, достигая примерно 95 % от уровня теплоотдачи в 3-м. После прохождения 2-го ряда первого пучка турбулизация потока возрастает из-за образования вихревой области в кормовой зоне 2-го ряда, что приводит к интенсификации теплообмена в 3-м ряду первого пучка.

Теплоотдача в 1-м ряду второго пучка в 1,5 раза больше, чем в 1-м ряду первого по ходу воздуха пучка, так как начальная турбулизация потока, набегающего на этот ряд, выше, чем в первом пучке, и не зависит от расстояния между пучками (см. таблицу, рис. 3).

Можно предположить, что в нашем случае, как и в [1], степень турбулентности потока максимально локализована в кормовой области, находящейся непосредственно за рядом труб. Именно здесь масштаб турбулентных пульсаций самый высокий.

Как установлено [1], при удалении от этой зоны вниз по потоку происходит выравнивание поля скоростей и степени турбулентности потока, что приводит на достаточно больших расстояниях от ряда оребренных труб к практической однородности характеристик потока. Именно по этой причине теплоотдача 1-го ряда второго пучка в нашем случае не зависит от расстояния между пучками, оставаясь в то же время выше, чем в 1-м ряду первого пучка.

После прохождения 1-го ряда второго пучка поток воздуха дополнительно турбулизируется из-за образования клинообразной вихревой

зоны в кормовой области за трубами этого пучка. Происходит также деформация поля скоростей следующим 3-м рядом этого пучка. Поэтому уровень теплоотдачи во 2-м ряду второго пучка выше, чем в 1-м.

Однако, уровень теплоотдачи во 2-м ряду второго пучка возрастает лишь на 5 % по сравнению с 1-м рядом. Интенсивность теплоотдачи во 2-м ряду первого пучка выше, чем в 1-м, на 34 %.

Это объясняется тем, что наиболее интенсивно поле скоростей потока воздуха перестраивается при прохождении первых двух рядов в первом пучке. Поэтому уровень теплоотдачи изменяется наиболее существенно именно при продвижении воздуха с 1-го ряда этого пучка на 2-й.

После прохождения первого пучка поле скоростей потока воздуха, набегающего на второй пучок, перестраивается менее существенно, чем потока, надвигающегося на первый пучок. Следовательно, теплоотдача во втором пучке при переходе с 1-го на 2-й ряд возрастает менее интенсивно, чем в первом пучке.

В дальнейшем, при переходе потока воздуха со 2-го на 3-й ряд второго пучка, происходит слабое увеличение уровня турбулентности потока, что компенсируется отсутствием деформаций поля скоростей в следующем 3-м ряду, который является в этом пучке последним. Поэтому уровень теплоотдачи в 3-м ряду второго пучка остается таким же, как и во 2-м.

Зависимость аэродинамического сопротивления пучков труб от числа Re при изменении расстояния l между ними представлена на рис. 4, 5.

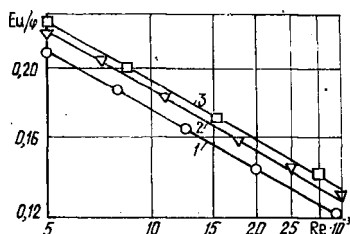


Рис. 4. Аэродинамическое сопротивление пучков оребренных труб при различных значениях l : 1 — $l = 112$; 2 — 168; 3 — 224 мм

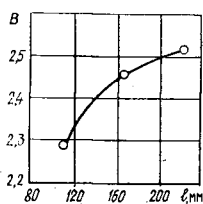


Рис. 5. Зависимость параметра B от расстояния между пучками l : (о — расчетные значения)

Как видно из рис. 4, все кривые располагаются параллельно друг другу. Поэтому константа m в уравнении (4) имеет одинаковое значение и равна 0,28 независимо от l .

Однако константа B в уравнении (4) монотонно возрастает от 2,29 до 2,52 при увеличении l (рис. 5). Этому соответствует увеличение аэродинамического сопротивления пучков примерно на 10 %.

Характер изменения аэродинамического сопротивления в зависимости от расстояния между пучками определяется особенностями их компоновки.