

А.Э. Пиир<sup>1</sup>, С.П. Роцин<sup>1</sup>, В.Б. Кунтыш<sup>2</sup>, А.Ш. Миннигалеев<sup>3</sup>

Архангельский государственный технический университет (1),  
Белорусский государственный технический университет (2),  
ЗАО «Октябрьскхиммаш», Россия (3)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКОВ ИЗ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РЕБРИСТЫХ ТРУБ ЗАО «ОКТЯБРЬСКХИММАШ»

### АННОТАЦИЯ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи и аэродинамического сопротивления шестирядных шахматных пучков из биметаллических ребристых труб (БРТ) с ленточным оребрением. Изучено влияние температуры стенки несущей оребрение стальной трубы на контактное термическое сопротивление.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

ЗАО «Октябрьскхиммаш» — молодое, динамично развивающееся предприятие, основной вид продукции которого составляют теплообменники воздушного охлаждения (ТВО), используемые в технологических процессах газовой, нефтяной и химической промышленности. ЗАО является единственным в России и в ближнем зарубежье предприятием, освоившим производство высокоэффективных теплообменных труб с ленточным алюминиевым оребрением.

На испытания в лабораторию кафедры ПТЭ Архангельского государственного университета поступили три типа биметаллических труб, изготовленных на заводе ЗАО «Октябрьскхиммаш» по технологии ВНИИПТХНА. Образцы 1, 2 имели стальную (сталь 20) несущую трубу с диаметром 25 мм, образец 3 — стальную (сталь 20) несущую трубу с диаметром 38 мм. Наружная поверхность несущих труб имела искусственную микрошероховатость в виде продольных рисок с шагом 0,6...0,8 мм., глубиной 0,2 мм. Оребрение труб однозаходное, типа KLM, изготовлено из алюминиевой ленты марки АМ толщиной 0,55 мм с хорошим натягом, что обусловило снижение толщины ленты у вершины ребра до 0,25...0,27 мм.

Подробные данные о геометрических параметрах опытных образцов ребристых труб приведены в табл.1.

### 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Теплоотдачу и аэродинамическое сопротивление трубных пучков изучали на экспериментальной установке, состоящей из аэродинамической трубы квадратного сечения 0,4×0,4 м центробежного вентилятора № 8 типа Ц-4-70 производительностью 10 000 м<sup>3</sup>/ч и рабочего участка. Установка и мето-

дика испытаний подробно описаны в [1]. Изучение приведенной теплоотдачи БРТ в пучках выполняли методом локального теплового подобия с помощью оригинального электропарового калориметра. Калориметры помещали в третьем и пятом стабилизированных рядах пучка.

Таблица 1. Геометрические характеристики калориметров и трубных пучков

№ п/п	Параметр	Единица измерения	Номер калориметра		
			1	2	3
1	Диаметр несущей трубы	мм	24,9	24,8	37,9
2	Диаметр у основания ребра	мм	25,4	25,6	38,9
3	Диаметр по вершине ребер	мм	56,2	56,0	69,8
4	Высота ребра	мм	15,4	15,2	15,45
5	Шаг ребра	мм	3,125	3,175	3,20
6	Толщина ребра: у вершины у основания средняя	мм	0,35	0,27	0,37
		мм	0,55	0,55	0,5
		мм	0,46	0,41	0,44
7	Коэффициент оребрения	—	17,01	16,41	14,6
8	Шаг насечки на поверхности несущей трубы	мм	0,8	0,6	0,8

Шахматные шестирядные пучки из БРТ с несущей трубой диаметром 25 мм имели стандартную равностороннюю компоновку с поперечным и диагональным шагом, равным 64 мм, а пучок 3 — из БРТ с несущей трубой диаметром 38 мм имел поперечный шаг 80 мм и продольный шаг 78 мм.

Наряду с теплоотдачей и аэродинамическим сопротивлением пучка важнейшим показателем тепло-технической эффективности БРТ является термическое сопротивление зоны контакта (ТКС) и ее изменение с ростом температуры.

Изучение зависимости ТКС от температуры стенки стальной несущей трубы проводили на тех же самых калориметрах при электропаровом или электрическом обогреве. Замеры данных выполнялись при ступенчатом повышении ее температуры от исходного до заданного значения 150 или 200,

250, 300 и даже 350 °С, а затем – при ступенчатом снижении температуры.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные данные по аэродинамическому сопротивлению показали, что теплоотдача пучков 1 и 2 полностью совпадает, а аэродинамическое сопротивление пучка 1 выше на 9 %. Увеличение аэродинамического сопротивления объясняется большей толщиной ребра у вершины (0,35 мм) по сравнению с 0,25...0,27 мм у пучка 2.

По сравнению с изученными ранее [2, с. 229] пучками БРТ с навитыми KLM ребрами с шагом ребер 2,5 мм и коэффициентом оребрения 21,75 теплоотдача в пучках 1 и 2 выше на 12,5 %, а аэродинамическое сопротивление на столько же ниже. Различие показателей объясняется разными шагом ребер и коэффициентом оребрения сравниваемых труб. Для пучка 3 среди ранее изученных труб аналогов не имеется.

Теплоаэродинамические характеристики исследованных труб свидетельствуют о высоком качестве их изготовления. В табл. 2 приведены постоянные коэффициенты и показатели степени в расчетных формулах:

для приведенной теплоотдачи в стабилизированных рядах

$$Nu = A Re^n, \delta = \pm 0,03;$$

для аэродинамического сопротивления шестирядного пучка

$$Eu = B Re^{-m}, \delta = \pm 0,05.$$

Таблица 2. Теплоаэродинамические характеристики шестирядных шахматных пучков

№ п/п	Величина	Номер пучка		
		1	2	3
1	Шаг компоновки пучка, мм	64x55	64x55	80x78
2	Коэффициент <i>A</i> показатель <i>n</i>	0,0792	0,0792	0,0353
		0,7	0,7	0,78
3	Коэффициент <i>B</i> показатель <i>m</i>	47,0	43,1	21,2
		0,31	0,31	0,25
4	Коэффициент <i>C</i> коэффициент <i>p</i>	3,5	4	4,25
		0,01	0,02	0,0075
5	Толщина ребра у вершины, мм	0,35	0,27	0,37

Экспериментальные данные по ТКС для калориметра 2 получены в режиме с постоянной температурой кипения 100 °С и переменным тепловым потоком. Значения ТКС хорошо согласуются между собой, хотя ТКС примерно в 1,6...2 раза превышает показатели для ранее изученных образцов БРТ с KLM ребрами [2], что можно объяснить наличием окалины на поверхности стальных несущих труб.

В данном эксперименте при росте теплового потока за счет увеличения скорости охлаждающего оболочку воздуха температура стенки снижается, снижается температурный перепад на контакте,

плотность контакта увеличивается, а термическое контактное сопротивление падает.

Базисные значения ТКС для калориметров 1...3 в режиме испытаний с постоянной температурой кипения в калориметре приведены в табл. 3.

Таблица 3. Термическое контактное сопротивление калориметров  $R_k \cdot 10^4, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  при испытаниях в режиме кипения

№ п/п	Тепловой поток, $q_k \text{ Вт}/\text{м}^2$	Номер калориметра			[3]
		1	2	3	
1	20 000	3,75	3,75	3,75	3,5
2	60 000	2,0	2,25	2,25	2,0

При нагреве стенки до температуры 200 и 250 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры ТКС принимает значения, которые близки к исходной. При повышении температуры стенки до 300 °С и выше конечное значение ТКС после охлаждения трубы заметно (в 1,3 раза) отличается от исходного, но все же остается приемлемым по техническим требованиям.

Повышение температуры стенки в калориметре 2 от 75 °С до 362 °С вызвало увеличение ТКС с  $5,6 \cdot 10^{-4}$  до  $10,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , т.е. менее чем в 2 раза, что является хорошим показателем качества накатки.

Сравнение значений ТКС при различной температуре стенки стальной несущей трубы приведено в табл. 4.

Таблица 4. Термическое контактное сопротивление БРТ при изменении температуры стенки несущей трубы,  $R_k, \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$

№ п/п	Температура стенки	Номер калориметра		
		1	2	3
1	Исходная, 100 °С	0,40	0,45	0,45
2	Конечная, 100 °С	0,47	0,71	0,54
3	Текущая, 250 °С	0,6	0,8	0,62
4	Максимальная по факту	0,66 при 315 °С	1,06 при 365 °С	0,63 при 265 °С

Коэффициенты обобщенной зависимости ТКС в калориметрах 1...3,  $\text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ ,

$$R_k \cdot 10^4 = C + p \cdot t_k, \delta_{cp} = \pm 0,1,$$

приведены в табл. 2.

Определение ТКС в ходе повышения и снижения температуры стальной несущей трубы выполнено в нашей стране впервые и авторы не располагают сведениями о проведении подобных испытаний за рубежом. Результаты испытаний свидетельствуют о хорошем качестве прикатки ленточного оребрения к стальной несущей трубе при различных вариантах нанесения искусственной шероховатости.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Биметаллические ребристые трубы типа 1,2,3 производства ЗАО «Октябрьскхиммаш» по своим теплоаэродинамическим характеристикам, значению термического контактного сопротивления аналогичны выпускаемым ранее трубам по технологии ТМЗ и ВНИИПТХНА.

2. Однократное повышение рабочей температуры стальной несущей трубы до 300 °С не выявило существенного необратимого изменения термического контактного сопротивления. Это позволяет поставить вопрос об увеличении температурной границы применения данного типа труб до 250 °С.

3. Для определения предельно допустимой рабочей температуры при эксплуатации биметаллических труб с ленточным оребрением необходимы дальнейшие сравнительные испытания по единой методике ребристых труб с накатным и ленточным оребрением.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$Nu$ ,  $Eu$ ,  $Re$  – числа подобия;

$n$ ,  $m$  – показатели степени;

$A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $p$  – постоянные коэффициенты;

$R_k$  – контактное термическое сопротивление.

$t_k$  – температура в зоне контакта.

$\delta$  – относительная погрешность формулы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Экспериментальное** исследование теплоотдачи и сопротивление пучков АВО из биметаллических труб // В.Б. Кунтыш, А.Э. Пиир, А.И. Егоров и др. Изв. вузов. Энергетика. 1977. № 12. С. 89—93.
2. **Основы** расчета и проектирования ТВО: Справочник/ Под общ. ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Наука, 1996. 212 с.
3. **Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М.** Тепловой и аэродинамический расчеты теплообменников воздушного охлаждения. СПб.: Энергоатомиздат 1992. 280 с.