

УДК 536.24:533.6.011

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОРИДОРНЫХ ПУЧКОВ ПОПЕРЕЧНО- ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ РАЗЛИЧНОГО ПРОФИЛЯ

Е. Н. Письменный

Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой*

Контактный тел. (044) 406-86-18

E-mail: evgnik@i.com.ua

А. М. Терех

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*

Контактный тел. (044) 454-97-87

E-mail: teram57@meta.ua

А. В. Семеняко

Ассистент*

Контактный тел. (044) 454-97-87

E-mail: infinitum@lan.com.ua

В. А. Рогачев

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел. (044) 454-97-87

В. Д. Бурлей

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник*

*Кафедра атомных электростанций и инженерной
теплофизики

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Контактный тел. (044) 454-97-87

Виконана порівняльна оцінка теплової ефективності коридорних пучків плоско-овальних труб з неповним оребрінням, розроблених в НТУУ «КПІ» і круглих труб з поперечним привареним та накатаним спірально-стрічковим оребрінням. Показані переваги поверхонь нагріву з плоско-овальних труб з неповним оребрінням

Ключові слова: плоско-овальний, труба, оребріння, пучок, коридорний, ефективність

Выполнена сравнительная оценка тепловой эффективности коридорных пучков плоско-овальных труб с неполным оребрением, разработанных в НТУУ «КПИ» и круглых труб с поперечным приваренным и накатанным спирально-ленточным оребрением. Показаны преимущества поверхностей нагрева из плоско-овальных труб с неполным оребрением

Ключевые слова: плоско-овальный, труба, оребріння, пучок, коридорний, ефективність

The comparative assessment of the thermal efficiency of the in-line tube bundles of the flat-oval tubes with partial finning developed in the NTUU "KPI" and of the round tubes with cross-welded and rolled-on spiral-strip finning were analyzed. The advantages of the heat transfer surfaces of the flat-oval tubes with partial finning were shown

Keywords: flat-oval, tube, finning, bundles, in-line, efficiency

1. Введение

Разработке методов сравнения теплоаэродинамической эффективности оребрённых поверхностей на основе разных условий и критериев посвящено достаточно много исследований [1 – 5].

В них, как правило, совершенство того или другого типа поверхности характеризуется соотношением переданного количества теплоты через данную поверхность и энергии, затраченной на преодоление сопротивления движущимся теплоносителем.

Сравнение оребренных поверхностей между собой (или с эталонной) и выявление самой эффективной из них осуществляется путем установления взаимосвязи между теплоотдачей и сопротивлением при равенстве чисел Рейнольдса с привлечением сведений о массогабаритных характеристиках сравниваемых объектов. Разработчику необходимо выбирать такую конструкцию оребренной поверхности, которая может передать заданное количество теплоты при ее минимальных габаритах и возможно меньшей затрате энергии на прокачку теплоносителя через поверхность.

С целью определения эффективности новой поверхности из поперечно-орбренных плоско-овальных труб коридорных пакетов, проведены экспериментальные исследования по изучению их теплоаэродинамических характеристик, предложена методика сравнительной оценки их эффективности с наиболее распространенными типами поверхностей из поперечно-орбренных труб [6 - 8].

2. Объект исследований

Объектом исследований является плоско-овальная труба [9], установленная в коридорном пакете (рис. 1, 2). Подробное описание конструкции такой трубы приведено в работе [10].



Рис. 1. Плоско-овальная труба КПИ с неполным поперечным оребрением:
а – труба типа 1; б – труба типа 2

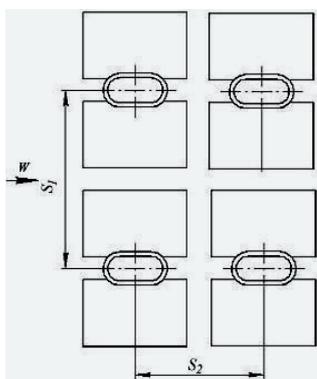


Рис. 2. Коридорный пучок плоско-овальных труб с неполным оребрением

Основные геометрические характеристики исследованных в [11] коридорных пучков плоско-овальных труб типов 1, 2 с неполным оребрением и сравниваем

ых коридорных пучков круглых труб с полным оребрением [6,7] (тип 3 - 5) приведены в табл. 1 и на рис. 3. Шаговые характеристики пучков плоско-овальных труб с неполным оребрением (пакеты №№ 1 – 8), круглых [6, 7] (пакеты №№ 9 - 11) труб с полным оребрением представлены в табл. 2.

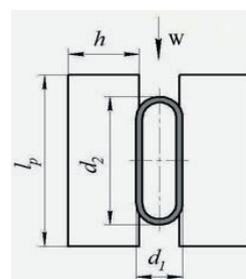
Таблица 1

Геометрические характеристики сравниваемых труб

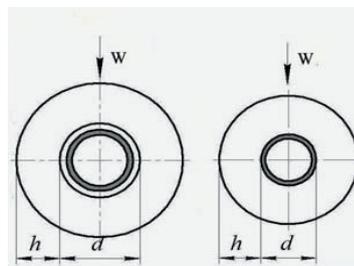
Тип труб	d ₁ мм	d ₂ мм	d мм	h мм	t мм	δ мм	ψ	N _{1mm} М ² /М	Источ.
1	15	30	-	22.0	3.65	1.0	17.68	1.363	КПИ
2	15	42	-	23.0	3.75	0.8	15.16	1.533	КПИ
3	-	-	27.4	14.8	2.54	0.4	19.12	1.642	[6]
4	-	-	33.8	14.85	2.54	0.4	17.97	1.892	[6]
5	-	-	32.0	11.5	5.0	1.0	7.40	0.744	[7]

3. Сравнение эффективности пакетов труб

Оценка теплоаэродинамических и массогабаритных характеристик проведена для коридорных пакетов плоско-овальных труб типов 1, 2 (табл. 2), а для сравнения их характеристик с другими типами труб, использовались биметаллические трубы с накатанными алюминиевыми ребрами круглого профиля типов 3, 4, [6] (рис. 3, б) и типа 5 [7, 8] с приваренным стальным спирально-ленточным оребрением (рис. 3, в) (табл. 2). Труба типа 3 выбиралась таким образом, чтобы ее внутреннее сечение было одинаковым с внутренним проходным сечением трубы типа 2, обеспечивая одинаковые скорости внутреннего теплоносителя. Трубы типов 2, 4, 5 имели, примерно, равные внешние поверхности несущих труб.



а)



б)

в)

Рис. 3. Типы сравниваемых оребренных труб:
а - трубы КПИ [9] (тип 1, 2); б- трубы [6] (тип 3, 4);
в- трубы [7] (тип 5)

Таблица 2

Характеристики сравниваемых пакетов труб

№ паче-а	Тип труб	S ₁ мм	S ₂ мм	ΔP Па	опрψ Вт/(м ² К)	q _т кВт/м	L м	G кг	Π м ² /м ³	Источ
a x b=const ≈ 1.235x3.94 (мхм) ΔP=var										
1	1	66	60	204	722	2.590	493	2960	344	Табл.1
2	1	66	120	231	783	2.816	455	2728	172	Табл.1
3	1	86	60	120	649	2.330	549	3292	264	Табл.1
4	1	105	60	102	542	1.947	657	3945	197	Табл.1
5	2	66	60	152	609	2.872	446	2585	387	Табл.1
6	2	66	120	184	617	2.91	440	2553	194	Табл.1
7	2	86	60	100	552	2.600	492	2850	297	Табл.1
8	2	105	60	103	456	2.153	594	3448	221	Табл.1
9	3	66	60	154	675	2.330	551	1300	414	[6]
10	4	86	70	125	620	2.70	473	1360	314	[6]
11	5	65	60	227	350	1.642	780	3580	191	[7]
axb=var ΔP=const=100 Па										
1	1	66	60	100	607	2.181	587	3522	344	Табл.1
3	1	86	60	100	622	2.237	572	3434	264	Табл.1
5	2	66	60	100	558	2.631	487	2822	387	Табл.1
7	2	86	60	100	552	2.60	492	2850	297	Табл.1
9	3	66	60	100	584	2.050	625	1455	414	[6]
10	4	86	70	100	558	2.5	501	1440	314	[6]
11	5	65	60	100	267	1.254	1020	4690	191	[7]

Сравнение и выбор наиболее эффективного пучка выполнены на базе методики [1] на примере воздушного конденсатора (рис. 4). Конденсатор имеет следующие параметры: температура насыщенного пара на входе $t' = 115^{\circ}\text{C}$, температура воды на выходе $t'' = 95^{\circ}\text{C}$, температура воздуха на входе $\vartheta_1 = 27^{\circ}\text{C}$, температура воздуха на выходе из теплообменной секции $\vartheta_2 = 76^{\circ}\text{C}$, расход пара $D = 0.556 \text{ кг/с}$, расход воздуха $G_{\text{п}} = 24 \text{ м}^3/\text{с}$, тепловая мощность $Q = 1280 \text{ кВт}$, средний температурный напор $\Delta t = 52^{\circ}\text{C}$. Расчеты проведены для двух случаев: при фиксированном фронтальном сечении на входе воздуха в теплообменную секцию $axb = \text{const}$ (ширина секции $a \approx 1.235 \text{ м}$, длина $b = 3.94 \text{ м}$) и при фиксированном аэродинамическом сопротивлении секции ΔP (при одинаковой мощности на перекачивание воздуха через секцию).

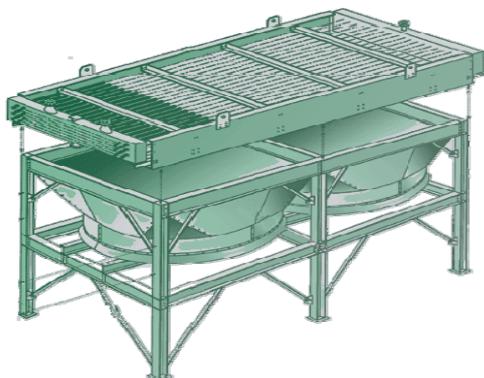


Рис. 4. Воздушный конденсатор

Результаты сравнения коридорных пучков по тепловой эффективности и другим важным техническим показателям представлены в таблице 2, а также в виде графических зависимостей (рис. 5) и диаграмм (рис. 6, 7).

Коридорные пакеты плоско-овальных труб с неполным оребрением имеют приблизительно одинаковую тепловую эффективность с пакетами биметаллических круглых труб типа 3, 4 [6] (табл. 1) за исключением пакетов № 4, 8 с большим поперечным шагом S1 и невысокой компактностью. Тепловая эффективность этих пакетов на 20 – 30 % ниже, чем у пучков №№ 1 - 3, 5 - 10.

Следует отметить, что тепловая эффективность коридорных пакетов плоско-овальных труб типа 1 на 5 – 10 % выше, чем пакетов из труб типа 2. Такой факт можно объяснить тем, что коэффициент оребрения труб типа 1 выше более чем на 15 % по сравнению с трубами типа 1. В то же время полная внешняя поверхность одного погонного метра труб типа 2 на 10 % больше поверхности труб типа 1. Увеличение площади внешней поверхности отразится на уменьшении массогабаритных характеристик теплообменной поверхности конденсатора (табл. 2).

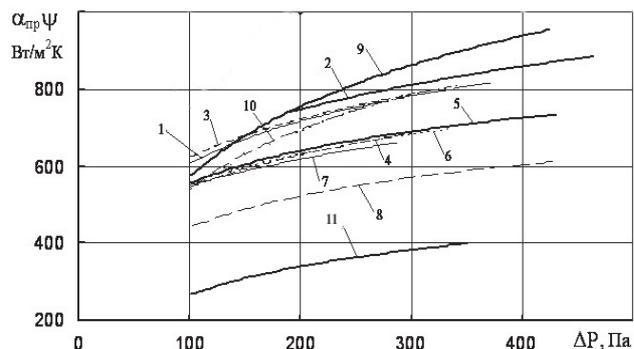


Рис. 5. Тепловая эффективность коридорных пакетов: 1 – 11 номера пакетов согласно табл. 2

Худшим по характеристикам из сравниваемых пакетов оказался пакет круглых труб с приварным спирально-ленточным оребрением № 11 [7] (труба типа 5). Эта труба имеет низкий коэффициент оребрения и высокое аэродинамическое сопротивление пакета.

Из сказанного следует, что для комплексной оценки пучков, данных только по теплоаэродинамической эффективности недостаточно. Необходимо вводить дополнительные характеристики, которые позволяют более полно оценить использованные для сравнения поверхности. Такими характеристиками являются: тепловой поток с одного погонного метра трубы q_t ; общая длина труб теплообменника L ; связанная с длиной труб масса труб устройства G и его компактность Π .

На диаграммах (рис. 6) наглядно показано влияние типа труб, шаговых характеристик коридорных пакетов на такие показатели как q_t , ΔP , L , G при фиксированном значении поперечного сечения канала на входе в пакет. Из сравнения, представленного на диаграммах исключены пакеты №2 и №4 труб типа 1 и №6, №8 труб типа 2 ввиду их низкой компактности.

Расчетные данные, представленные на диаграммах (рис. 6) свидетельствуют:

- коридорные пакеты труб типа 2 имеют меньшее аэродинамическое сопротивление чем пакеты труб типа 1 (рис. 6, а). Плоско-овальная труба типа 1 имеет меньший шаг ребер и на 20 % большую толщину ребра, что и приводит к увеличению потерь давления. Сопротивление пакетов плоско-овальных труб меньше, чем у пакетов круглоребристых биметаллических труб. Например, пакет № 10 [6] имеет большее сопротивление на 45 и на 20 %, чем пакеты №3, №7 (рис. 6, а);

- тепловой поток q_l пакетов плоско-овальных труб (рис. 6, б) приблизительно одинаков или с немного превышает тепловой поток пакетов из биметаллических круглых труб типов 3,4 [6]. Самый низкий показатель q_l , равный 1.6 - 1.7 кВт/м у пучка труб типа 5 [7] ввиду относительно невысокой площади внешней поверхности теплообмена;

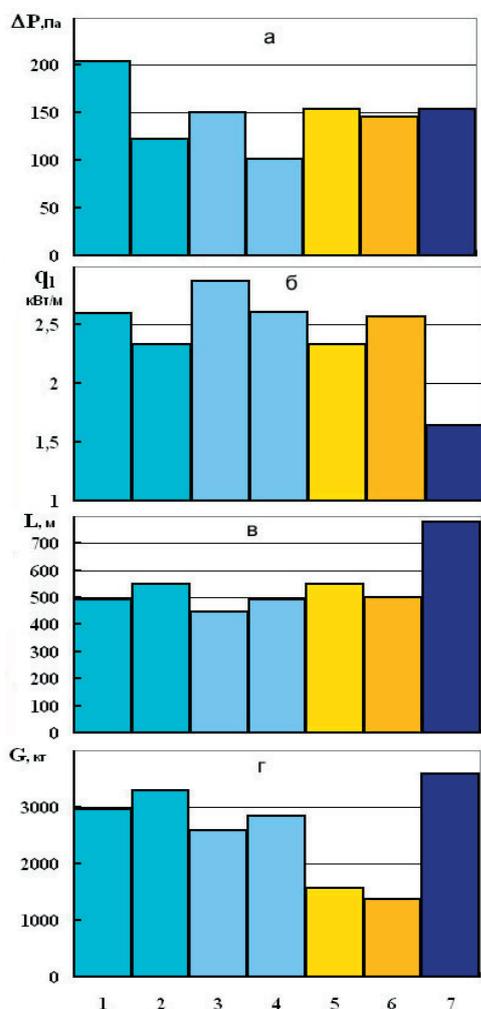


Рис. 6. Критерии эффективности оребренных поверхностей при $\Delta P = var$:
1- пакет № 1; 2- №3; 3-№5; 4-№7;
5-№9 [6]; 6-№10 [6]; 7 - №11 [7]

- длина оребренных плоско-овальных стальных труб (рис. 6, в) воздушного конденсатора на 5 – 15 % меньше длины круглоребристых биметаллических

труб типа 3, 4 [6] и на 60 – 70 % меньше длины кругло-ребристых стальных труб типа 5 [7];

- масса оребренных труб непосредственно связана с общей длиной труб и плотностью материала из которого они изготовлены (рис. 6, г). Масса трубной части воздушного конденсатора, выполненного из биметаллических труб типа 3, 4 в 1.7 - 2 раза меньше массы стальных труб плоско-овального профиля (плотность материала ребер отличается приблизительно в 3 раза). Масса стальных труб типа 5 коридорного пучка №11 оказалась наибольшей среди всех сравниваемых коридорных пакетов.

На диаграммах (рис. 7) показано влияние шаговых характеристик рассмотренных коридорных пакетов и типов труб на показатели q_l , ΔP , L, G и П при фиксированном значении мощности на прокачку теплоносителя через теплообменную поверхность ($\Delta P = 100 \text{ Па} = const$).

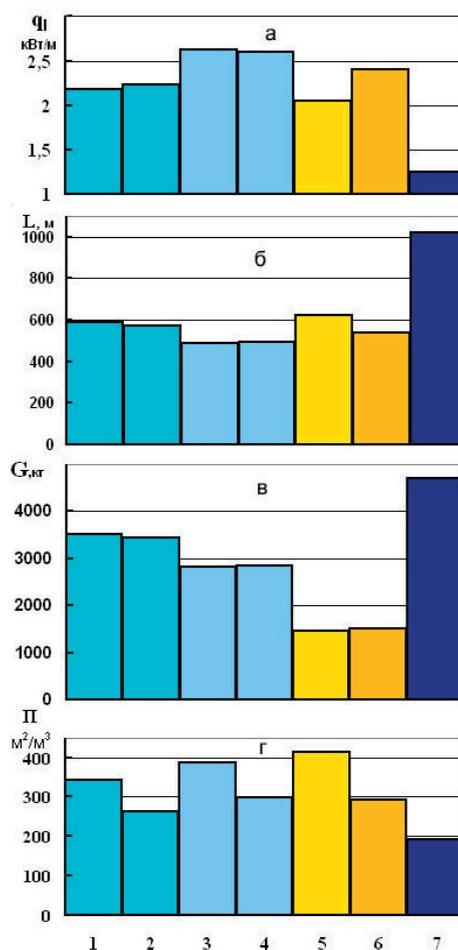


Рис. 7. Критерии эффективности оребренных поверхностей при $\Delta P = const$:
1- пакет № 1; 2- №3; 3-№5; 4-№7;
5-№9 [6]; 6-№10 [6]; 7 - №11[7]

Для всех сравниваемых пакетов, в которых аэродинамическое сопротивление было больше 100 Па при приведении их к условиям одинаковых расходов мощности на прокачку теплоносителя, показатели q_l , L, G оказались хуже (табл. 2, рис. 7, а - в). Для пакета № 9 это составило 11 – 13 %, для № 10 – 7 – 8 % и №11 – до 30 %. Для пакетов № 1, № 3 плоско-овальных труб типа 1 снижение показателей q_l , L, G составило соот-

ветственно 19 % и 4.5 %. Для пакета № 5 ухудшение этих показателей составило около 9 %.

Компактность сравниваемых коридорных пакетов П (рис. 7, г) изменяется в пределах от $\Pi = 260 \text{ м}^2/\text{м}^3$ до $\Pi = 414 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и зависит от шаговых характеристик пучка и полной внешней поверхности нагрева. Самый низкий коэффициент компактности у пакета №11 и составляет $191 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

4. Выводы

1. Плоско-овальные трубы с неполным оребрением показали свою конкурентоспособность при

использовании их в качестве поверхностей теплообмена для систем воздушного охлаждения технологических продуктов (аммиака, воды, масла, керосина, бензина и т. п.), а также при конденсации различных паров.

2. Сравнение пакетов труб показало, что теплообменные поверхности из плоско-овальных труб имеют достаточно высокие теплоаэродинамические и массогабаритные характеристики.

3. Основным преимуществом плоско-овальных труб с поперечным неполным оребрением по сравнению с трубами круглоребристого профиля является их низкое аэродинамическое сопротивление и высокая степень развития поверхности.

Литература

1. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. – М. Л.: Энергия, 1966. – 184 с.
2. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечно оребренных труб. – Л.: Машиностроение, 1982. – 189 с.
3. Кирпичев М.В. О наиболее выгодной форме поверхности нагрева. // Известия энергетического института им. Кржижановского. Т. XII. 1944 с. 5-9.
4. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
5. Гухман А.А. Интенсификация конвективного теплообмена и проблема сравнительной оценки теплообменных поверхностей. – Теплоэнергетика, 1977, №4, с. 5-8.
6. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. – С-Пб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд., 1992. – 280 с.
7. РТМ 108.030.140-87. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно- оребренных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. -Л.: Минэнергомаш, 1988. – 30 с.
8. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-орбренных труб. – Киев: Альгерпрес, 2004. – 244 с.
9. Письменный Е.М., Терех О.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д. Теплообмінна труба. Патент на корисну модель. Україна. № 25025 25.07.2007. Бюл. №11.
10. Багрий П.И., Терех А.М., Рогачев В.А. Сравнение тепловой эффективности шахматных пучков поперечно-орбренных труб различного профиля // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. - №6/5 (30). – С. 51-56.
11. Терех О.М., Семеняко О.В., Пузанов І. В. Узагальнений метод розрахунку конвективного теплообміну коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням // Енергетика, економіка, технології, екологія. – 2009. – №1. – С. 100-105.