УДК 621.187

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ ДЛЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ ДВС ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Доктор технических наук Куликов Ю.А.,
Кандидат технических наук Гончаров А.В., Ажиппо А.Г., Оробцов Т.А.

Виконаний аналіз впливу параметрів оребрення труби і компоновки трубних пучків на ефективні показники процесу рекуперації тепла в апаратах підігрівання палива та охолоджування мастила ДВЗ.

The analysis of influence of parameters of finned of pipe and arrangement of pipe bunches is executed on the effective indexes of process of rekuperativ of heat in the exchanger of heating of fuel and cooling of oil ICE.

Постановка проблемы. К основным проблемам тепловозо- и автомобилестроения относятся обеспечение бесперебойной и устойчивой работы силовой установки транспортных средства в широком диапазоне окружающих температур 243…313 К. Гарантированная работоспособность систем смазки и питания топливом с одновременным решением острой проблемы экономии дизельных топлив и масел представляется важной предпосылкой для создания новых высокоэффективных теплообменных аппаратов.

Анализ последних достижений и публикаций. Исследования процессов течения теплоносителей в каналах сложной формы с рекуперацией тепловой энергии показали высокую тепловую эффективность труб с винтовым оребрением [1, 2]. Но некоторые задачи, связанные с вопросом выбора рациональных параметров оребрения (шага оребрения, высоты ребра и толщины ребра), требуют более глубокого исследования.

Постановка задачи. Целью данной работы является анализ влияния параметров оребрения на тепловую эффективность оребренной поверхности трубы.

Изложение основного материала. При конструировании теплообменников для вязких жидкостей основной задачей является обеспечение максимального теплообмена при минимальной его массе. В связи с этим возникает задача определения оптимальной формы сечения ребра, имеющего наименьшую массу при заданной величине теплового потока.

В практике широкое применение нашли ребра трапециевидного сечения. Если заданы размеры трапециевидного ребра (рис. 1) и избыточная температура ϑ_1 у его основания, то за начало координат целесообразно принять вершину треугольника, направив ось x вдоль оси симметрии ребра. При этом тепловой поток q будет направлен в сторону, противоположную положительному направлению оси ox [3, 4].

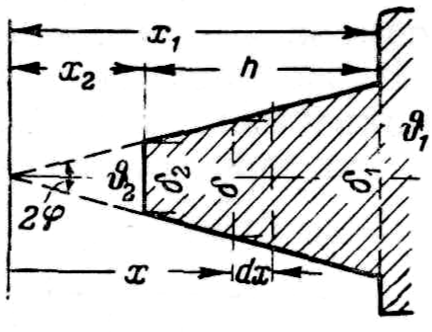

Рис. 1. Передача теплоты через прямое ребро трапециевидного сечения

Для такого ребра площадь поперечного сечения f будет только функцией координаты x, т. е.:

$$\mathrm{f} = 1 \cdot \delta = 2 1 \cdot \mathrm{x} \cdot \mathrm{tg}\varphi . \qquad (1)$$

Количество теплоты, которое будет отдаваться в окружающую среду с элемента ребра dx, будет равно:

$$\mathrm{d}\left(\lambda \cdot \mathrm{f} \frac{\mathrm{d}\vartheta}{\mathrm{dx}} \right) = \alpha \cdot u \cdot \vartheta \cdot dx' , \qquad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи на поверхности ребра, $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$;

λ – коэффициент теплопроводности материала, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

u – периметр сечения ребра на расстоянии x, который можно выразить, как $\mathrm{u} = 2 \cdot 1$; $dx' = \frac{dx}{\cos\varphi}$.

Произведя дифференцирование выражения (2) с учетом соотношения (1), получим:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2}+\frac{1}{x}\frac{d\vartheta}{dx}-\frac{1}{x}\frac{\alpha}{\lambda\sin\varphi}\vartheta=0\,. \tag{3}$$

После введения новой переменной $z=\frac{\alpha}{\lambda\sin\varphi}x$ уравнение (3) приобретает вид:

$$\frac{d^2\vartheta}{dz^2}+\frac{1}{z}\frac{d\vartheta}{dz}-\frac{1}{z}\vartheta=0\,. \tag{4}$$

Дифференциальное уравнение (4) является модифицированным уравнением Бесселя, решение которого имеет вид:

$$\vartheta=C_1I_0\left(2\sqrt{z}\right)+C_2K_0\left(2\sqrt{z}\right), \tag{5}$$

где I_0 и K_0 – модифицированные функции Бесселя первого и второго рода.

Постоянные C_1 и C_2 в уравнении (5) находятся из граничных условий, которые для рассматриваемого случая запишутся так: $x = x_1$ и $\vartheta=\vartheta_1$.

В связи с тем, что высота ребра $h_р$ мала, то значением x_2 можно пренебречь (т.е. принять x_2 = 0) и считать ребро треугольным. В этом случае после определения постоянных C_1 и C_2 получим:

- для текущей температуры в ребре

$$\vartheta=\vartheta_1\frac{I_0\left(2\sqrt{z}\right)}{I_0\left(2\sqrt{z_1}\right)}; \tag{6}$$

- для температуры на конце ребра

$$\vartheta_2=\vartheta_1\frac{1}{I_0\left(2\sqrt{z_1}\right)}. \tag{7}$$

Тепловой поток можно определить по закону Фурье:

$$Q=\frac{\alpha\cdot\delta_1\cdot\vartheta_1\cdot l}{\sqrt{z_1}\sin\varphi}\cdot\frac{I_1\left(2\sqrt{z_1}\right)}{I_0\left(2\sqrt{z_1}\right)},\ \text{Вт}. \tag{8}$$

Максимальный тепловой поток через ребро треугольного сечения данной массы будет иметь место при выполнении условия:

$$\frac{h}{\delta_1/2}=1{,}309\sqrt{\frac{2\lambda}{\alpha\cdot\delta_1}}\,. \tag{9}$$

Однако в этом случае эффективность ребра не превышает 76 % [5]. Под эффективностью оребрения понимается отношение полного количества теплоты, рассеиваемого ребром, к теплоте, которая рассеивалась бы им в случае, если бы вся поверхность ребра имела температуру стенки $t_{ст}$.

Таким образом, 100 %-ной эффективности ребра можно достигнуть при условии, когда средняя температура ребра равна температуре стенки. Если обозначить тепловую эффективность оребрения через Е, то для прямого ребра [5]

$$E_р=\frac{1}{\beta\cdot h_{пр}}\,\mathrm{th}\left(\beta\cdot h_{пр}\right), \tag{10}$$

где $\beta = \sqrt{\dfrac{\alpha}{\lambda \cdot \delta}}$ – параметр ребра;

$h_{пр} = h_р + \delta$ – приведенная высота ребра.

Если ввести значение площади поперечного сечения ребра $f_р = 0{,}5 \cdot \delta_1 \cdot h_{пр}$ (см. рис. 1), то формула (10) для трапециевидного ребра примет вид [5]:

$$E = \frac{1}{\xi}\frac{J_1(2\xi)}{J_0(2\xi)}, \tag{11}$$

где: J_0 и J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка;

$\xi = h_{пр}^{3/2}\sqrt{\dfrac{\alpha}{f_р \cdot \lambda}}$.

Применение для оребрения металла более высокой теплопроводности равносильно увеличению площади теплоотдачи оребренной поверхности. В свою очередь, уменьшение высоты ребра $h_р$, увеличение его толщины δ, снижение коэффициента теплоотдачи α способствуют повышению эффективности ребра E [5].

В связи с вышесказанным, выбор оптимальных параметров ребра (высоты и толщины) производился на основе эффективности ребра по уравнению (11). Исходные данные и результаты расчетов по выбору параметров представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчетов по выбору оптимальных параметров ребра труб теплообменника

Толщина ребра, δ_1, мм	Высота ребра, h, мм	Коэффициент теплоотдачи, α, Вт/м^{2}К	Коэффициент теплопроводности материала, λ, Вт/мК	Эффективность ребра, E
0,2835	1,0	1300	386	0,980394
	1,5			0,966339
	2,0			0,946097
	2,5			0,920865
	3,0			0,894506
0,567	1,0			0,98492
	1,5			0,979666
	2,0			0,964606
	2,5			0,952685
	3,0			0,935389
0,8505	1,0			0,987696
	1,5			0,982713
	2,0			0,971268
	2,5			0,962524
	3,0			0,949574

Как видно из результатов расчета по выбору параметров ребра, представленных на рис. 2,

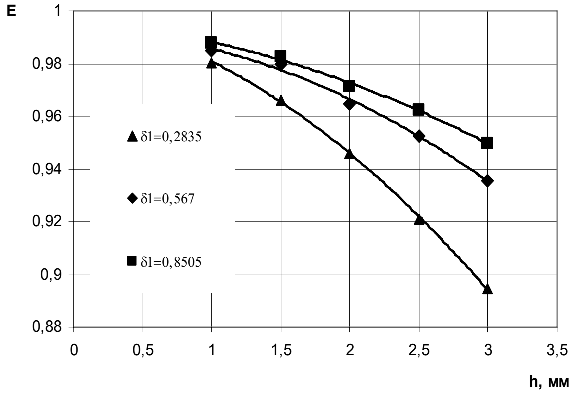

Рис. 2. Зависимость эффективности ребра от его толщины и высоты

эффективность ребра возрастает с увеличением его толщины и уменьшением высоты. Увеличение толщины ребра в 2 раза (с 0,2835 мм до 0,567 мм) при средней высоте 2 мм приводит к тому, что эффективность возрастает на 2 %. А при том же увеличении толщины в 2 раза, но с 0,567 мм до 0,8505 мм, эффективность возрастает всего на 0,7 %. Поэтому дальнейшее увеличение толщины ребра является не целесообразным, а эффективность ребра, обеспечиваемая при толщине ребра δ_1 = 0,567 мм, достаточна. С целью обеспечения минимальной массы теплообменника при высокой эффективности ребер можно рекомендовать высоту ребра в диапазоне h = 2…2,2 мм.

Сравнение пучков ребристых труб по энергетическому показателю kF/G показывает преимущество труб с диаметром по ребру d_{op} = 10,22 мм (рис. 3).

Анализ компоновки пучков оребренных труб показывает (рис. 4), что с уменьшением шага компоновки пучка S_1 (рис. 4) от 19 до 13 мм значение показателя kF увеличивается от 294 до 1980 Вт/К.

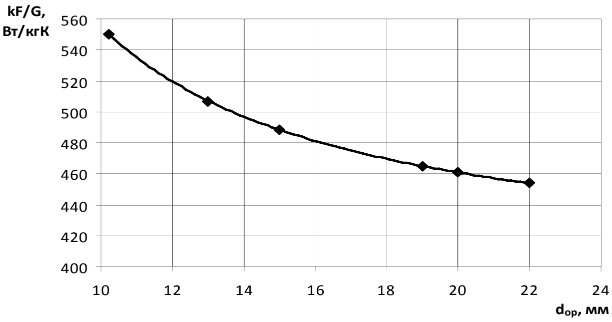

Рис. 3. Показатель kF/G оребренных труб в зависимости от диаметра труб (по ребру)

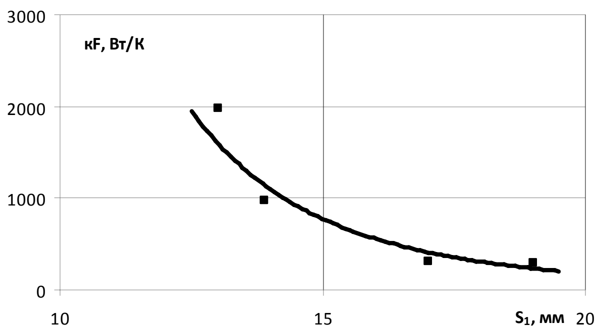

Рис. 4. Зависимость показателя kF от шага расположения труб в пучке

Выводы: на основании проведенного анализа для компоновки высокоэффективных пучков оребренных труб теплообменного апарата для вязких жидкостей двигателя внутреннего сгорания транспортного средства выбирается оребренная труба, изготовленная по технологии ВНИИМетМаша [6], с размерами: диаметр трубы по ребру d_{op} = 10,22 мм; шаг ребра t_p = 1,59 мм; диаметр трубы, несущей оребрение $d_{нт}$= 5,8 мм; толщина ребра у основания δ = 0,567 мм. Трубы распологаются в пучке по вершинам равностороннего треугольника со стороной S_1 = 13 мм.

Список литературы

1. Куликов Ю. А. Исследование теплоотдачи при течении воды в круглых трубках с накатным ребром / Ю. А. Куликов, А. Г. Ажиппо, А. Н. Кинщак // Вісник Східноукраїнського державного університету. Серія Транспорт. – 1999. – № 1(16). – С. 22 – 30.
2. Куликов Ю. А. Математическая модель расчета топливоподогревателя двигателя внутренного сгорания / Ю. А. Куликов, А. Г. Ажиппо // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2011. – № 6 (160). – С. 153 – 161.
3. Исаченко В. П. Теплопередача: [учебник для вузов] / Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. – М.: Энергоиздат, 1981.
4. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – [изд. 2-е, стереотип]. – М.: Энергия, 1977. – 342 с.
5. Малинов М. С. Охлаждающие устройства тепловозов / Малинов М. С., Куликов Ю. А., Черток Е. Б. – М.: Машгиз, 1962. – 239 с.
6. Трубы ребристые, изготовленные методом прокатки. – М.: ВНИИМетМаш, 1962.