

**КОЭФФИЦИЕНТ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРЯМОУГОЛЬНОГО РЕБРА ПЛОСКО-ОВАЛЬНОЙ
ТРУБЫ**

E.PYSMENNYI, A.TEREKH, F.SEMENYAKO, P.BAGRIY

**EFFICIENCY FACTOR OF RECTANGULAR FIN OF
FLAT-OVAL TUBE**

Аннотація. Запропонована емпірична залежність для розрахунку коефіцієнта ефективності плоского прямокутного ребра, розташованого на прямих бічних сторонах плоско-овальної труби, що враховує, окрім відомих параметрів, довжину лінії контакту між ребром і несучою трубою.

Ключові слова: коефіцієнт ефективності, плоско-овальна труба, теплообмін.

Аннотация. Предложена эмпирическая зависимость для расчета коэффициента эффективности плоского прямоугольного ребра, расположенного на прямых боковых сторонах плоско-овальной трубы, учитывающая, кроме известных параметров, длину линии контакта между ребром и несущей трубой.

Ключевые слова: коэффициент эффективности, плоско-овальная труба, теплообмен.

Annotation. An empirical dependence for calculating the efficiency factor of a flat rectangular fin, located on the straight sides of the flat-oval tube, taking into account, apart from the known parameters the length of the contact line between the fin and the carrier tube are proposed. The

dependence can be used to calculate heat transfer coefficients for packages of flat-oval tubes with incomplete fins when designing new high-performance heat exchangers.

Key words: efficiency factor, flat-oval tube, heat exchange.

Введение

Одним из наиболее распространенных способов интенсификации теплообмена является применение в теплообменных аппаратах труб с наружным поперечным оребрением, энергетические показатели которых в несколько раз превышают показатели гладких труб.

В настоящее время освоены многочисленные технологии изготовления поперечно-ребренных труб из стали, алюминия, биметалла (стальные трубы и алюминиевые ребра), к которым можно отнести, например, цельнотянутые трубы с винтовым оребрением, стальные трубы с намотанными или насаженными ребрами с последующим горячим цинкованием [1,2]. Профиль труб при этом может быть круглым или овальным, а поперечное расположение ребер позволяет, используя современные технологии, максимально развить поверхность теплообмена за счет уменьшения шага и увеличения высоты ребер.

В НТУУ «КПИ» разработан новый тип теплообменной поверхности – плоско-овальная труба с неполным поперечным оребрением [3, 4] (рис.1). Отсутствие оребрения на лобовых и кормовых участках таких труб, имеющих значительную кривизну, не только снижает вес ребристой трубы практически без изменения уровня отводимого теплового потока [1, 5], но и делает ее более технологичной. Используемый дешевый и высокотехнологичный способ контактной сварки обеспечивает практически идеальный контакт между ребром и несущей трубой. Кроме того, предложенная конструкция ребристой трубы и технология ее изготовления дают возможность наращивать поверхность ребер не только за счет увеличения высоты и уменьшения шага ребер, но и за счет увеличения их длины за пределы границ профиля несущей трубы (рис. 2).

Пакеты из таких труб обладают еще одним важным достоинством – низкое аэродинамическое сопротивление по сравнению с пакетами из традиционных круглоребристых труб (в 1,4...1,6 раза), при этом уровень отводимой теплоты практически не уменьшается [6, 7].

При проектировании теплообменных устройств из плоско-овальных труб с неполным поперечным оребрением необходимо знать и правильно определять коэффициент эффективности прямоугольного пластинчатого ребра E .

В этой связи вопросы, связанные с расчетом эффективности ребра плоско-овальной трубы, являются актуальной задачей.

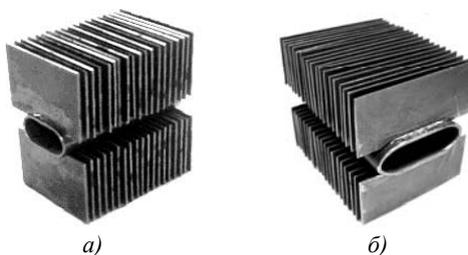


Рис. 1. Плоско-овальная труба с неполным оребрением: а – тип 1; б – тип 4.

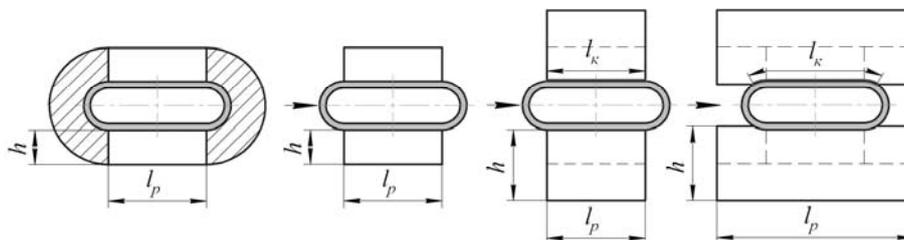


Рис. 2. Принцип формирования неполного оребрения труб плоско-овального профиля

С этой целью в НТУУ «КПИ» проведены комплексные исследования теплообмена шахматных и коридорных пакетов из плоско-овальных труб [3, 4], в том числе и по определению коэффициента эффективности прямоугольного пластинчатого ребра для таких труб.

Целью данной статьи является получение на базе экспериментальных данных надежной зависимости для определения E .

Определение и расчет эффективности ребра

Согласно законам теплопередачи тепловой поток, передаваемый через стенку от одного

теплоносителя к другому, прямо пропорционален площади стенки и температурному перепаду между теплоносителями. Если поверхность теплоотдачи одной стороны стенки увеличить при помощи ребер, то следует ожидать увеличения теплового потока, относящегося к единице поверхности стенки, несущей оребрение, пропорционально площади теплоотдачи. Но ввиду наличия температурного градиента в ребре эффективный температурный напор снизится. Поэтому общее увеличение теплового потока будет меньше ожидаемого. Для более удобного расчета теплопередачи оребренной поверхности введено понятие коэффициента эффективности ребра.

Коэффициентом эффективности ребра называют отношение количества теплоты, действительно переданного ребром, к количеству теплоты, которое передало бы идеально проводящее ребро ($\lambda_p = \infty$) с однородной температурой, равной температуре у основания [8, 9]. Идеальным пределом эффективности является величина, равная 1 (100%). Например, если ребро имеет эффективность 65%, то можно считать, что 65% всей развитой поверхности работает при температурном напоре, соответствующем основанию ребра.

Использование в расчетах теплопередачи ребристых труб коэффициента эффективности ребра позволяет отказаться от довольно сложных аналитических выражений и прийти к более простому и удобному для практического использования виду расчета.

Если для удобства принять, что температура жидкости, окружающей ребристую трубу, равна 0, то количество теплоты, отдаваемое поверхностью ребра Q_p , можно определить, согласно сказанному выше, выражением

$$Q_p = \alpha_k t_0 E F_p \quad (1)$$

Количество теплоты, отдаваемое гладкой частью оребренной трубы Q_{mp} ,

$$Q_{mp} = \alpha_0 t_0 F_{mp} \quad (2)$$

Тогда выражение для общего количества теплоты Q можно записать

$$Q = Q_p + Q_{mp} = \alpha_k t_0 E F_p + \alpha_0 t_0 F_{mp} \quad (3)$$

В этом выражении α_k – коэффициент теплоотдачи ребра, называемый конвективным; α_0 – коэффициент теплоотдачи гладкой части трубы; F_p, F_{mp} – соответственно поверхность ребер и гладкой части несущей трубы; t_0 – температура основания ребра.

Если в качестве коэффициента теплоотдачи условно ввести осредненное его значение α_{np} , которое учитывает теплоотдачу от поверхности ребра, поверхности неоребренной части трубы, а также учитывает эффективность работы ребра, то выражение (3) можно записать следующим образом:

$$Q = \alpha_{np} t_0 F \quad (4)$$

В выражении (4) F – полная поверхность оребренной трубы. Принимая, что $\alpha_0 \cong \alpha_k$, получим выражение для определения α_{np}

$$\alpha_{np} = \alpha_k \left(\frac{F_p}{F} E + \frac{F_{mp}}{F} \right) \quad (5)$$

Приведенный коэффициент теплоотдачи α_{np} учитывает термическое сопротивление теплопроводности, обусловленное формой, сечением, материалом ребра и термическое сопротивление конвективной теплоотдачи при омывании ребристой поверхности теплоносителем.

Опытные значения E определялись из выражения (5) при экспериментальном исследовании теплообмена шахматных и коридорных пучков плоско-овальных труб с неполным поперечным оребрением. В процессе проведения экспериментов на аэродинамической трубе открытого типа определялись конвективные α_k и приведенные α_{np} коэффициенты теплоотдачи по зависимостям (6), (7) непосредственно по результатам измерений температурного поля ребра и стенки трубы у корня ребра:

$$\alpha_k = \frac{Q}{(\bar{t}_{nos} - \bar{t}_g) F} \quad (6)$$

$$\alpha_{np} = \frac{Q}{(\bar{t}_{cm} - \bar{t}_g) F} \quad (7)$$

В выражениях (6), (7) $\bar{t}_{nos}, \bar{t}_{cm}$ – соответственно среднеповерхностная температура оребренной трубы и средняя температура стенки несущей трубы; \bar{t}_g – средняя температура потока в исследуемом пакете труб.

Исследования проведены для четырех типов плоско-овальных труб, отличающихся геометрическими характеристиками и длиной контакта ребра и несущей трубы (табл.1). Всего

экспериментами охвачено 20 шахматных и 12 коридорных пучков с различными поперечными S_1 и продольными шагами S_2 между трубами.

Анализ полученных опытных значений коэффициентов эффективности пластинчатого прямоугольного ребра плоско-овальной трубы показал, что E зависит от параметра $\beta h'$ и от относительной длины линии контакта K_L , который представляет собой отношение длины линии контакта ребра и несущей трубы l_k к длине ребра l_p ($K_L=l_k/l_p$) (рис. 2). В основу функции $E=f(\beta h')$ положена известная зависимость для коэффициента эффективности прямоугольного пластинчатого ребра, расположенного на плоском основании [9]:

$$E = \frac{\text{th } \beta h'}{\beta h'}, \quad (8)$$

где $\beta = \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\delta\lambda_p}}$, $h' = h + \delta/2$.

Таблица 1

Геометрические характеристики оребренных труб

Наименование величины	Обозн.	Труба тип 1	Труба тип 2	Труба тип 3	Труба тип 4
Поперечный размер несущей трубы	d_1 , мм	15,0	16,0	15,0	15,0
Продольный размер несущей трубы	d_2 , мм	30,0	40,0	30,0	42,0
Высота ребер	h , мм	27,5	28,5	22,0	23,0
Шаг ребер	t , мм	3,65	3,40	3,65	3,75
Толщина ребер	δ , мм	1,0	1,0	1,0	0,8
Длина ребра	l_p , мм	48,5	48,5	48,5	55,5
Относительное удлинение профиля	d_2/d_1	2,0	2,5	2,0	2,87
Коэффициент оребрения	ψ	21,50	18,47	17,68	15,16
Относительная длина контакта	K_L	0,557	0,70	0,557	0,61

Поперечные ребра плоско-овальных труб с неполным оребрением отличаются от обычных прямых ребер [9] тем, что их длина может превышать длину линии контакта с основанием ($l_p > l_k$, $K_L < 1$). Очевидно, что E такого ребра будет ниже, чем для ребра, у которого $K_L = 1$. Это обстоятельство можно учесть в выражении (8) путем введения в него условной высоты ребра h_y , связанной с высотой h' зависимостью

$$h_y = C_k \cdot h', \quad (9)$$

в которой C_k является функцией относительной длины линии контакта $C_k = f(K_L)$.

При $K_L = 1$ условная высота ребра $h_y = h' + \delta/2$. Уменьшение K_L приводит к увеличению h_y . Используя зависимость $E_{on} = f(\beta h)$, можно найти значение параметра βh , которое соответствует данному значению E_{on} и далее, рассчитав соответствующее β_{on} , легко найти условную высоту h_y для каждого типа труб, которые имеют определенную относительную длину контакта K_L . В то же время опытным значениям E_{on} соответствуют опытные значения параметра β_{on} . Зная величины βh и β_{on} легко определить условную высоту h_y для каждого типа труб, имеющих определенную относительную длину контакта K_L (см. таблицу). На рис. 3 представлены графические зависимости $h_y = f(h')$ для различных относительных длин контакта K_L . Для $K_L = 1$ поправка $C_k = 1$. По мере уменьшения K_L поправка C_k возрастает, достигая максимального значения для $K_L = 0,557$. Математическое описание зависимости поправки C_k от K_L дает следующее выражение:

$$C_k = \ln \left(\frac{A}{e^{K_L}} - 1,96 \cdot e^{K_L} + B \cdot K_L \right), \quad (10)$$

где A и B – эмпирические коэффициенты.

Окончательные выражения для условной высоты h_y и коэффициента эффективности E пластинчатого ребра плоско-овальной трубы принимают вид:

$$h_y = \left(h + \frac{\delta}{2} \right) \cdot \ln \left(\frac{A}{e^{K_L}} - 1,96 \cdot e^{K_L} + B \cdot K_L \right), \quad (11)$$

$$E = \frac{\text{th } \beta h_y}{\beta h_y}. \quad (12)$$

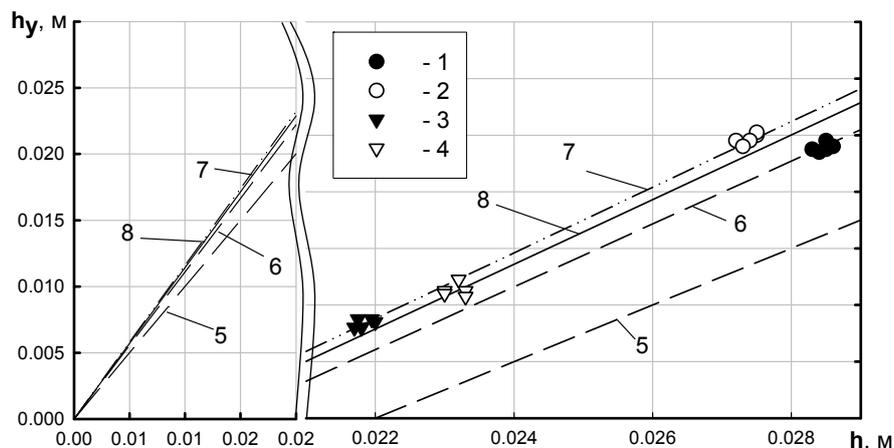


Рис. 3. Влияние относительной длины контакта K_L на условную высоту ребра:
 1 - труба тип 1; 2 - тип 2; 3 - тип 3; 4 - тип 4; 5 - $K_L = 1,0$; 6 - $K_L = 0,7$; 7 - $K_L = 0,557$; 8 - $K_L = 0,61$

На рис. 4 представлена в графическом виде зависимость $E=f(\beta h_y)$. Штриховыми линиями ограничена область рассева опытных значений E_{on} , сплошной линией обозначена расчетная зависимость (12), которая с точностью $\pm 6,5\%$ описывает все опытные данные для коэффициентов эффективности ребра.

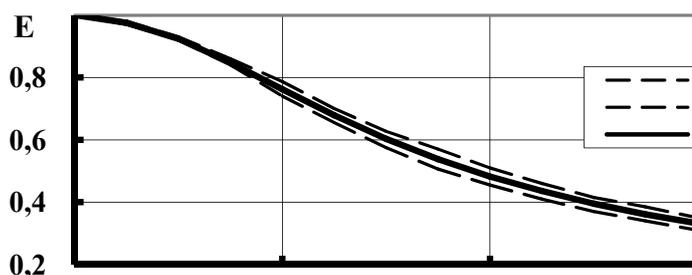


Рис. 4. Коэффициент эффективности пластинчатого прямоугольного ребра плоско-овальной трубы:
 1, 2 – зона рассева опытных данных; 3 – расчетная кривая (12).

Выводы

Результаты исследований, проведенные для определения коэффициентов эффективности пластинчатого ребра плоско-овальной трубы с неполным оребрением, показали:

1. При определении $\alpha_{пр}$, α_k необходимо уделять должное внимание правильному расчету коэффициента эффективности ребра E , недостаточный учет которого приводит к немалым погрешностям.
2. На эффективность ребра плоско-овальной трубы оказывает влияние относительная длина контакта K_L , которая учитывается поправкой S_k .
3. Для расчета коэффициента эффективности пластинчатого прямоугольного ребра плоско-овальных труб с неполным оребрением рекомендуется зависимость (12).

Литература

1. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб.- Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
2. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения// С-Пб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербург. отд., 1992.- 280 с.
3. Письменный С.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д. Теплообмінна труба. Деклараційний патент на корисну модель. Україна. № 4871U 15.02.2005. Бюл. №2.
4. Письменный С.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д. Теплообмінна труба. Патент на корисну модель. Україна. № 25025 25.07.2007. Бюл. №11.

5. Письменный Е.Н., Терех А.М. Конструктивные методы повышения теплоаэродинамической эффективности трубчатых поперечно-оробренных поверхностей теплообмена. Часть 3. Поверхности из профилированных труб с неполным оребрением // Пром. теплотехника. – 1999. – Т. 21. – № 6. – С. 5-11.
6. Багрий П.И., Терех А.М., Рогачев В.А. Сравнение тепловой эффективности шахматных пучков поперечно-оробренных труб различного профиля.//Восточно-Европейский журнал передовых технологий.- 2007.- №6/5 (30).- С. 51-56.
7. Письменный Е.Н. Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго - и ресурсосбережения// Пром. теплотехника.-2007.- Т.29.- №5.- С. 7-16.
8. Стасюлявичюс Ю.К., Скринска А.Ю. Теплоотдача поперечно- обтекаемых пучков ребристых труб. - Вильнюс: Минтис, 1974. - 243 с.
9. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена М.: Энергия, 1977. - 464 с.