

УДК 621.18.063

М.М. Вознюк, мл. научн. сотр., А.В. Семеняко, асист., В.А. Бондарь, магистр
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ОПТИМАЛЬНАЯ ВЫСОТА ПОПЕРЕЧНЫХ РЕБЕР ПЛОСКООВАЛЬНОЙ ТРУБЫ

На основании экспериментальных исследований и анализа интенсивности теплообмена и аэродинамического сопротивления пучков плоскоовальных труб проведена оптимизация высоты поперечного оребрения. Проанализировано влияние материала ребер на оптимальную высоту оребрения. Впервые в Украине предложена обобщенная зависимость для определения оптимальной высоты ребра в зависимости от материала оребрения и относительной длины линии контакта ребра с несущей трубой. Результаты проведенного анализа представлены в виде сравнительных теплоаэродинамических и массогабаритных характеристик экономайзера-утилизатора для котла ПТВМ-30м. Показано что, использование оптимизированного оребрения позволяет улучшить массогабаритные характеристики теплообменного устройства на (15-20) %.

Ключевые слова: труба, плоскоовальный, ребро, оптимизация, тепловой поток, теплоаэродинамика

Введение

Экспериментальные исследования теплообмена и гидродинамики потока (визуализация течения на ребрах, поля давлений на ребрах и несущей трубе), проведенные на натурных образцах плоскоовальных труб с неполным оребрением [1-2] позволили подойти к важному вопросу – оптимизации геометрических характеристик оребрения (табл.1, рис.1). Оптимизация проведена на примере труб показанных в табл.1, при этом учтена необходимость изготовления плоскоовальных труб с неполным оребрением из различных материалов (углеродистые, аустенитные стали, алюминий).

Актуальность предлагаемой статьи состоит в том, что оптимизация геометрических размеров теплообменной поверхности тесно связана с улучшением массогабаритных показателей теплообменного аппарата в целом.

Таблица 1 – Геометрические характеристики плоскоовальных труб с неполным оребрением выпускаемых

ООО «Научно-производственная фирма «Ганза».

Наименование величин	Обозначение	Значение
Поперечный размер трубы, мм	d_1	10 - 25,0
Продольный размер трубы, мм	d_2	30,0 - 60
Полная высота ребер, мм	h	5 - 40,0
Шаг ребер, мм	t	1,5 - 3,5
Толщина ребер, мм	δ	0,8 - 1,2
Длина ребра, мм	l	15 - 50
Коэффициент оребрения	ψ	7-20

Оптимизация размеров ребер

Под оптимизацией оребрения подразумевается определение экспериментальным и (или) аналитическим путем наиболее выгодных размеров (длины, высоты, толщины), в нашем случае, прямоугольных ребер, а также шага между ними, обеспечивающих заданный передаваемый оребренной поверхностью тепловой поток при минимальной массе ребер, которая вносят наибольший вклад в общую массу теплообменной поверхности.

О наличии оптимальных значений параметров оребрения (h, t, l, δ) можно судить по тому обстоятельству, что для достижения заданного максимального значения теплового потока Q за счет увеличения конвективного коэффициента теплоотдачи α_k , эффективности ребра E , поверхности оребренной трубы H необходимо изменять параметры оребрения (h, t, l, δ) в противоположных направлениях [3]. Так, для увеличения площади теплоотдающей поверхности H необходимо увеличить

высоту h , длину l ребер и уменьшить шаг t между ними. В то же время такое изменение размеров оребрения приводит к снижению интенсивности конвективной теплоотдачи [4]. В рассматриваемом случае, прямоугольные ребра, расположенные на прямых участках плоскоовальной трубы, образуют систему полуоткрытых плоских каналов.

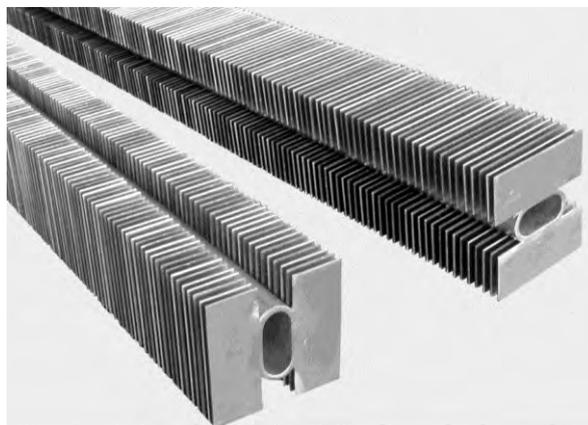


Рисунок 1 – Плоскоовальная труба с неполным оребрением [1]

При увеличении их относительной глубины, характеризующейся отношением h/t , а также длины l возрастает эффект вытеснения потока из межреберных каналов из-за нарастания толщины пограничного слоя на ребрах, что в целом приводит к снижению интенсивности теплоотдачи и росту аэродинамического сопротивления ребристой поверхности. Исходя из этого, шаг пластинчатых ребер для плоскоовальных труб рекомендуется выбирать в диапазоне $t = 3,5-4,0$ мм.

Толщина ребра δ также является важным геометрическим параметром ребра от правильности выбора которого зависит общая масса ребристой поверхности. Уменьшение его толщины приводит с одной стороны к уменьшению массы поверхности, с другой - к уменьшению коэффициента эффективности ребра и ухудшению теплопроводящих возможностей самого ребра. Зависимость плотности теплового потока от толщины ребра $q_{р.} = f(\delta)$ носит экстремальный характер с максимумом значений толщины ребра $\delta = 0,8-0,9$ мм. [4]

Изменение высоты ребра влияет на коэффициент эффективности ребра E и площадь поверхности теплообмена в противоположных направлениях. В связи с этим при анализе следует использовать комплекс, который представляет собой произведение коэффициента эффективности ребра E на площадь единицы длины развитой поверхности H_L .

Как отмечают авторы работы [4], коэффициент эффективности ребра при применении упрощенного подхода Т. Шмидта, основанного на замене ребра сложной формы эквивалентным по эффективности условным прямым прямоугольным ребром высотой h_y , определяется выражением

$$E = \frac{\text{th}(mh_y)}{mh_y}, \quad (1)$$

где $m = \sqrt{\frac{2\alpha_k}{\delta \cdot \lambda}}$ - параметр; h_y - условная высота ребра с учетом приближения Харпера-Брауна определяется из выражения

$$h_y = \left(h + \frac{\delta}{2} \right) \left[1 + b(1 + 2K_L) \ln \left(\frac{1}{K_L} \right) \right], \quad (2)$$

где b – эмпирический коэффициент, K_L – обобщенный параметр, характеризующий различие прямых прямоугольных ребер, полностью расположенных на плоском основании и ребер плоскоовальных труб, $K_L = l_k/l$ (рис. 2).

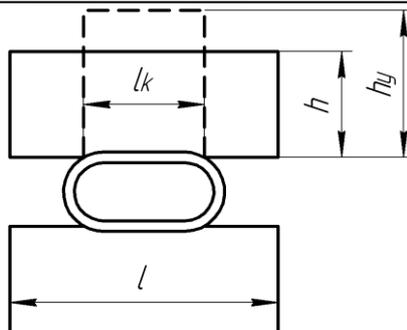


Рисунок 2 – К определению условной высоты ребра.

Так как зависимость передаваемого теплового потока Q от h определяется асимптотической функцией, значение которой при $mh_{\text{вн}} > 2$ практически не изменяется ($\text{th}(3)/\text{th}(2) \approx 1,0,3$), то приняв в качестве «порогового» значения аргумента гиперболической функции $mh_{\text{вн}}=2$, получим приближенное выражение для определения оптимальной высоты ребер плоскоовальных труб $h_{\text{опт}}$.

$$h_{\text{опт}} = \frac{2}{\left\{ m \left[1 + b(1 + 2K_L) \ln \left(\frac{1}{K_L} \right) \right] \right\}} \quad (3)$$

Как видно из выражения (3), значительное влияние на коэффициент эффективности оказывает теплопроводность ребра λ , входящая в параметр m .

График, представленный на рис.3, иллюстрирует зависимость комплекса $EH_{\text{л}}$ от высоты ребер h при разных значениях теплопроводности ребер λ , фиксированных значениях длины ребер $l = 50$ мм, их шага $t = 3,5$ мм и толщины $\delta = 0,8$ мм; поперечном размере трубы $d_{\text{л}}=15$ мм, продольном размере трубы $d_{\text{вн}}=30$ мм, толщине стенки трубы $\delta_{\text{ст}}=2$ мм, числе Рейнольдса $Re=5,3 \cdot 10^3$.

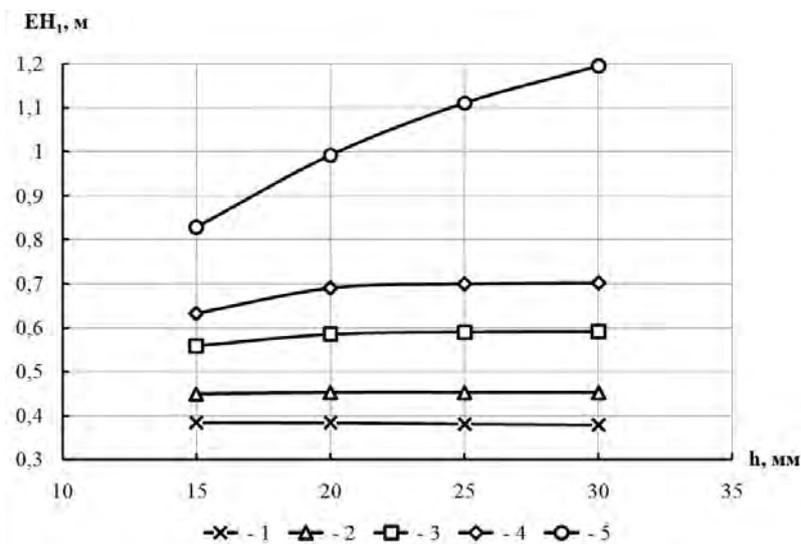


Рисунок 3 – Зависимость комплекса $EH_{\text{л}}$ от высоты ребра h для ребер, выполненных из различных материалов:

1 – сталь 08X18H10 (AISI 304) $\lambda = 17$ Вт/(м·К); 2 – сталь 08X17 (AISI 430) $\lambda = 24$ Вт/(м·К); 3 – сталь 15XM $\lambda = 41,6$ Вт/(м·К); 4 – сталь 08кп $\lambda = 60,6$ Вт/(м·К); 5 – алюминий марки АД1 $\lambda = 225$ Вт/(м·К).

Приведенные на рис.3 зависимости комплекса $EH_{\text{л}}$ от высоты ребра h показывают, что необходимо учитывать влияние материала ребер при определении их оптимальной высоты. Так, для углеродистой

стали 08кп, имеющей достаточно высокий коэффициент теплопроводности, кривую, в выбранном диапазоне, можно разбить на два участка – первый, участок роста комплекса EH_L , по мере увеличения высоты ребер до значений 19-21 мм, и второй участок, в котором комплекс EH_L с ростом высоты ребер ($h > (20-21)$ мм остается практически неизменным. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что увеличение высоты ребра больше чем 20-21 мм ведет только к возрастанию массы теплообменной поверхности без увеличения теплового потока, передаваемого через нее. Следовательно, оптимальная высота ребер для стали 08кп составит $h = 20-21$ мм.

Для рассмотренных сталей 15ХМ и 08Х18Н10, обладающих низкой теплопроводностью, в выбранном диапазоне значений высоты ребра комплекс EH_L является практически неизменным, что свидетельствует о том, что для этих сталей более целесообразно использование низких ребер (менее 15 мм). И, напротив, для рассмотренного материала с высокой теплопроводностью – алюминия АД1 наблюдается стремительный рост значения комплекса EH_L в рассматриваемом диапазоне, следовательно, является целесообразным дальнейшее увеличение поверхности трубы с помощью увеличения высоты ребра.

С целью выбора оптимальной высоты оребрения в конкретном теплообменном аппарате были проведены несколько вариантов теплоаэродинамических расчетов экономайзера для котла ПТВМ-30м, на базе плоскоовальных труб с неполным оребрением с учетом данных, представленных в этой статье. Требуемые технические характеристики данного экономайзера при максимальном режиме работы котла представлены в таблице 2.

Расчеты проведены с учетом использования стали 08кп, для четырех значений высоты ребра $h = 30; 25; 20; 15$ мм при постоянных других параметрах оребрения: $t = 3,5$ мм, $\delta = 0,8$ мм и $l = 50$ мм. Продольный шаг труб принимался минимально возможным в связи с технологическими ограничениями. Внешняя площадь поверхности одного погонного метра плоскоовальной трубы для четырех значений высоты ребра равнялась соответственно $1,817 \text{ м}^2/\text{м}$, $1,527 \text{ м}^2/\text{м}$, $1,238 \text{ м}^2/\text{м}$, $0,948 \text{ м}^2/\text{м}$.

При сравнении результатов теплоаэродинамических расчетов экономайзера использовался подход, основанный на сопоставлении аэродинамического сопротивления ΔP , массы труб M , компактности поверхности Π , общей длины оребренных труб L , теплосъема с погонного метра длины трубы q_l , учитывающий влияние на теплоотдающие свойства поверхности не только характеристик интенсивности теплообмена, но и степени развития поверхности H [5].

Таблица 2 – Требуемые технические характеристики экономайзера

Наименование величины	Значение
Теплопроизводительность экономайзера Q_{ek} , МВт	1,4
Температура дымовых газов перед экономайзером ϑ_1 , °С	207
Температура дымовых газов после экономайзера ϑ_2 , °С	130
Температура воды на входе в экономайзер t_1 , °С	48
Температура воды на выходе из экономайзера t_2 , °С	61,9
Расход воды через экономайзер D , т/ч	77
Аэродинамическое сопротивление экономайзера ΔP , Па, не более	200

Результаты сравнения расчетных характеристик экономайзера при четырех значениях высоты ребер плоскоовальных труб с неполным оребрением и неизменных других параметрах оребрения (t, l, δ) представлены в табл. 3 и на рис. 4.

Таблица 3 – Характеристики экономайзера при различных высотах ребер

№ вар	h мм	S_1 мм	S_2 мм	ΔP Па	$\alpha_{пр\psi}$ Вт/(м ² К)	q_l кВт/м.п	L м	M кг	Π м ² /м ³
$t = 3,5$ мм; $l = 50$ мм; $\delta = 0,8$ мм									
1	30	80	100	296	1180	7,46	189	1209	240
2	25	70	100	235	1124	7,46	189	1041	230
3	20	60	100	155	1059	7,46	189	872	217
4	15	60	100	130	948	6,4	220,5	820	165

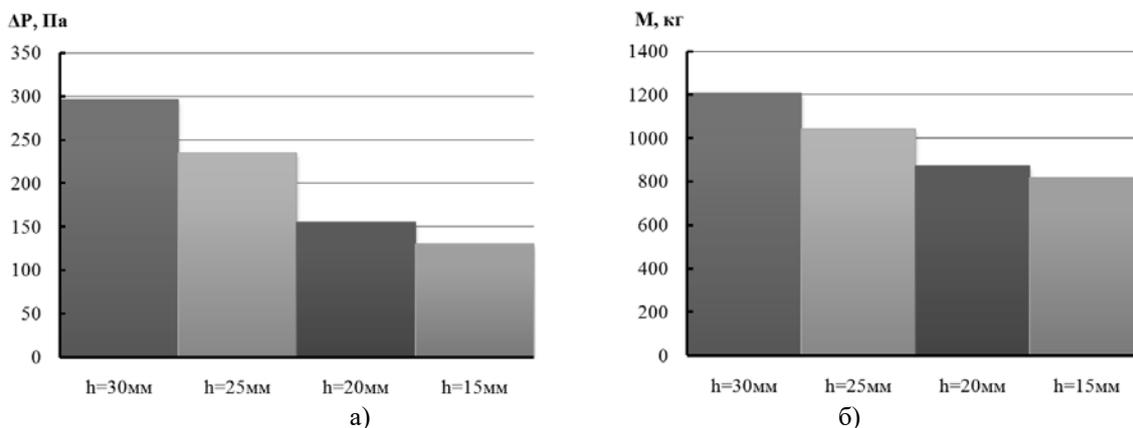


Рисунок 4 – Влияние высоты ребра на аэродинамическое сопротивление (а) и массу труб экономайзера (б).

Анализ табличных и графических данных показывает, что теплосъем с погонного метра длины трубы q_l для высоты ребра $h=20,25,30$ мм остается неизменным и составляет около 6,6 кВт/м.п., для высоты ребра 15 мм он снижается до значения 5,6 кВт/м.п., аэродинамическое сопротивление экономайзера при $h = 20$ мм снижается более чем в 1,9 раза (рис. 4,а) по сравнению с вариантом для которого высота ребер составляет 30 мм, при этом масса трубной части уменьшается более чем на 330 кг (27%) (рис. 4,б). Следовательно, увеличение высоты ребра более 20 мм является нецелесообразным.

При сравнении вариантов №3 и №4 (табл.3) было обнаружено что масса труб и аэродинамическое сопротивление экономайзера незначительно снижаются, но при этом происходит увеличение длины и общего количества труб, а, следовательно, и количества сварных соединений, что снижает надежность экономайзера и приводит к его удорожанию.

С учетом вышесказанного при проектировании экономайзера была выбрана высота ребра $h=20$ мм при всех остальных равных характеристиках оребрения (t, l, δ).

Такой компактный экономайзер с высотой поперечных ребер плоскоовальных труб 20 мм был установлен между котлом и дымососом в пределах здания котельной в г. Вишневое Киевской области (рис.5). Производственные испытания показали соответствие технических характеристик экономайзера требуемым показателям, его эффективность, простоту эксплуатации и надежность. За счет использования плоскоовальных труб с неполным оребрением с учетом оптимальных геометрических размеров ребра было получено низкое аэродинамическое сопротивление экономайзера, при котором не потребовалось производить замену дымососа и его регулирование на большую мощность.



Рисунок 5 – Экономайзер, установленный за котлом ПТВМ-30м, г. Вишневое Киевской области

Выводы

Проведенная оптимизация оребрения плоскоовальных труб позволила определить выгодную высоту пластинчатого ребра. При этом показано, что оптимальная высота ребра сильно зависит от применяемого материала (его теплопроводности). Использование оптимизированных ребер для плоскоовальных труб позволяет на 20-30% уменьшить массу трубной части теплообменного аппарата без ухудшения его теплопередающей способности, уменьшить аэродинамическое сопротивление в 1,9 раза, значительно улучшить компактность и снизить геометрические размеры и металлоемкость теплообменного аппарата.

Список использованной литературы

1. Багрий П.И. Сравнение тепловой эффективности шахматных пучков поперечно-ребренных труб различного профиля/ П.И. Багрий, А.М. Терех, В. А. Рогачов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5(30). – С. 51-56 .
2. Письменный Е.Н. Новые теплообменные поверхности из плоскоовальных труб с неполным оребрением / Е.Н. Письменный, А.М. Терех, П.И. Багрий // тез. докл. VI Минский международный форум по тепло-и массообмену. 19-23 мая 2008 г., г. Минск, Беларусь. – С.281-283.
3. Письменный Е.Н. Новые эффективные развитые поверхности теплообмена для решения задач энерго- и ресурсосбережения/ Е.Н. Письменный // Промышленная теплотехника. – 2007. – Т. 29. - №5. – С. 7-16.
4. Письменный Е.Н. Оптимизация оребрения новой теплообменной поверхности на основе плоскоовальных труб/ Е.Н. Письменный, П.И. Багрий, А.М. Терех, А.В. Семеняко // Инженерно-физический журнал. 2013. Т.86 №5. С. 1002-1007.
5. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева./ В.М. Антуфьев – М. Л.:Энергия, 1966. – 184 с.

M. Voznyuk, JRF, A. Semenyako, TF, V. Bondar, Msc.

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
OPTIMAL HEIGHT OF TRANSVERSAL FINS OF FLAT-OVAL TUBE**

Based on experimental studies and analysis of intensity of heat transfer and aerodynamic drag of flat-oval tubes bundles the optimization of transversal finning height is carried out. The influence of the used material on optimal finning height is analyzed. For the first time in Ukraine offered generalized dependence for determining the optimal height of fins depending on the material and the relative length of the line of contact with the fins and tube. The results of the analysis are presented as comparative heat-aerodynamic and weight and size characteristics of the waste economizer for boiler PTVM-30m. It is shown that the using the optimized finning will allow to improve mass-dimensions characteristics of heat-transfer device on the (15-20) %.

Keywords: tube, flat-oval, fin, optimization, heat flux, heat-aerodynamic

References

1. Bagriy P.I. Comparison of heat efficiency of staggered bundles of transversal finned tubes of different shape/P.I. Bagriy, A.M. Terekh, V.A. Rogachov// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies– 2007. – №6/5(30). – P. 51-56 .
2. Pis'mennyi E.N. New heat transfer surfaces assembled from partially finned flat-oval tubes / E.N. Pis'mennyi, A.M. Terekh, P.I. Bagriy// theses of the report VI Minsk International heat and mass transfer forum. 19-23 May 2008, Minsk, Belarus. – P.281-283.
3. Pis'mennyi E.N. New effective advanced heat transfer surfaces for solving the problems of energy and resource saving/ E.N. Pis'mennyi// Industrial Heat Engineering. – 2007. – V. 29. - №5. – P. 7-16.
4. Pis'mennyi E.N. Optimization of finning of new heat transfer surface assembled from partially finned flat-oval / E.N. Pis'mennyi, P.I. Bagriy, A.M. Terekh, A.V. Semenyako // Engineering Physics Journal. 2013. V.86 №5. P. 1002-1007.
5. Antufyev V.M. Efficiency of different shapes of convective heat transfer surfaces./ V.M. Antufyev – М. L.:Energiya, 1966. – 184 p.

УДК 621.18.063

М.М. Вознюк, мл. науч. сотр., О.В. Семеняко, асс., В. А. Бондар, магистр.

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ОПТИМАЛЬНА ВИСОТА ПОПЕРЕЧНИХ РЕБЕР ПЛОСКООВАЛЬНОЇ ТРУБИ**

На підставі експериментальних досліджень і аналізу інтенсивності теплообміну та аеродинамічного опору пучків плоскоовальних труб проведена оптимізація висоти поперечного оребрення. Проаналізовано вплив використовуваного матеріалу на оптимальну висоту оребрення. Вперше в Україні запропонована узагальнююча залежність для визначення оптимальної висоти ребра в залежності від матеріалу оребрення та відносної довжини лінії контакту ребра з несною трубою. Результати проведеного аналізу представлені у вигляді порівняльних теплоаеродинамічних і масогабаритних характеристик економайзера-утилізатора для котла ПТВМ-30м. Показано що, використання оптимізованого оребрення дозволяє полішити масогабаритні характеристики теплообмінного пристрою на (15-20)%.

Ключові слова: труба, плоскоовальний, ребро, оптимізація, тепловий потік, теплоаеродинаміка

Надійшла 22.12.2016

Received 22.12.2015