

УДК 536.244

Влияние геометрических факторов на теплоотдачу трубы с квадратными поперечными ребрами при естественной конвекции

А. Б. Гаряев, Е. С. Рекуненко

Сведения об авторах

Гаряев Андрей Борисович — доктор технических наук, зав. кафедрой Теплообменных процессов и установок МЭИ, e-mail: GaryaevAB@mpei.ru

Рекуненко Екатерина Сергеевна — аспирантка кафедры Теплообменных процессов и установок МЭИ

Рассмотрена теплоотдача одиночной трубы с поперечным оребрением плоскими квадратными пластинами при естественной конвекции. Составлена математическая модель для определения теплового потока, передаваемого этим теплопередающим устройством, учитывающая реальное распределение температуры по высоте пластины. При определении эффективности квадратных ребер использовалось аналитическое решение, полученное Спэрроу и Лином. Для вычисления передаваемого теплового потока учитывалось изменение коэффициента теплоотдачи по высоте ребра, предложенное В.Ф. Юдиным. В качестве целевой функции для определения эффективности работы теплового прибора бралось отношение передаваемого теплового потока к массе прибора. Определено, что целевая функция имеет максимум в том случае, если в качестве теплопередающей поверхности рассматриваются как ребра, так и несущая трубка. В том случае, если рассматривается теплоотдача только от поверхности ребер, зависимость целевой функции от размера пластины носит монотонный характер и ее максимум не наблюдается. Выявлено влияние расстояния между ребрами и высоты квадратных ребер на передаваемый и удельный тепловые потоки, отнесенные к единице массы. Показано, что максимальный тепловой поток наблюдается на расстоянии между ребрами равном 5 мм, которое не зависит от высоты ребра; при заданных толщине ребер ($\delta = 0,6$ мм) и расчетных условиях. Максимальный удельный передаваемый тепловой поток, отнесенный к единице массы, наблюдается на расстоянии 6 — 8 мм и далее не меняется при изменении расстояния между ребрами. Установлен размер пластины, соответствующий максимальному значению отношения удельного теплового потока к единице массы. Доказано, что данный размер не зависит от расстояния между пластинами. Полученные результаты можно использовать для дальнейшей оптимизации геометрических параметров отопительных конвекторов, аппаратов воздушного охлаждения (АВО) и других устройств, применяемых для отопления или отвода теплоты.

Ключевые слова: естественная конвекция, теплоотдача, оребрение, оребренная труба, квадратные поперечные ребра.

The influence of geometrical parameters on the natural convection heat transfer in a pipe with transverse square-shaped fins

А. В. Garyaev, E. S. Rekunenko

Information about authors

Garyaev Andrey B. – Dr.Sci. (Techn.), Head of Heat-and-Mass Transfer Processes and Installations Dept., MPEI, e-mail: GaryaevAB@mpei.ru

Recunenko Ekaterina S. — Ph.D.-student of Heat-and-Mass Transfer Processes and Installations Dept., MPEI

The natural convection heat transfer in a single pipe transversely finned with square-shaped plates is considered. A mathematical model for determining the heat flux transferred by this heat transfer device is constructed, which takes into account the actual temperature distribution pattern over the fin height. The analytical solution obtained by Sparrow and Lin was used to determine the effectiveness of square fins. For determining the transferred heat flux, the heat-transfer coefficient variation pattern over the fin height proposed by V.F. Yudin was taken into account. The transferred heat flux to the device weight ratio was adopted as the objective function to determine the thermal device performance efficiency. It has been found that the objective function has a maximum if both the fins and the carrying pipe are considered as the heat transfer surface. If heat transfer from only the surface of fins is considered, the objective function dependence on the fin size has a monotonic pattern and its maximum is not observed. The effect the fin pitch and the square fin height have on the transferred heat flux and on the specific heat flux per unit mass is clarified. It is shown that the maximum heat flux is observed at the fin pitch equal to 5 mm, which

does not depend on the fin height at the given fin thickness ($\delta = 0.6$ mm) and the specified design conditions. The maximal transferred specific heat flux per unit mass is observed at a distance of 6–8 mm, which remains unchanged in further changing the fin pitch. The fin plate size at which the specific heat flux per unit mass reaches its maximum is determined. It is shown that this size does not depend on the fin pitch. The obtained results can be used for further optimization of the geometric parameters of space heating convectors, air cooling devices, and other devices used for space heating or heat removal purposes.

Key words: natural convection, heat transfer, finning, finned pipe, transverse square-shaped fins.

Введение

В настоящее время одним из самых распространенных отопительных приборов является конвектор. Он широко применяется как в жилых зданиях, так и на объектах социального назначения. Несмотря на недостатки (низкий коэффициент теплопередачи, поднятие пыли конвективным потоком) является дешевым, технологичным в изготовлении, а кроме того при незначительной модификации может использовать теплоноситель с относительно низкой температурой при пониженном температурном графике, например получаемого при работе конденсационных котлов или при работе геотермальных тепловых насосов в системе отопления [1].

Объемы выпускаемых конвекторов в России составляют порядка 16% от объема всех выпускаемых отопительных приборов в год [2], что составляет около 100 тыс. шт. только по данным ОАО «Сантехпром» [3]. Поэтому экономия даже небольшого количества металла за счет улучшения геометрии конвекторов приводит к существенной денежной экономии.

На настоящий момент влияние геометрических размеров и режимных параметров конвекторов рассматривалось в основном экспериментально [3, 4], а теоретические исследования проводились в предположении о постоянстве температуры по высоте ребер, т.е. для идеальных ребер [5, 6]. Ряд исследователей считают, что геометрические параметры конвекторов на настоящий момент не являются оптимальными [7]. Поэтому возникла задача исследования теплоотдачи при естественной конвекции с одиночной трубой, поперечно оребренной квадратными плоскими пластинами. Следует отметить, что естественная конвекция имеет место также при теплоотдаче оребренных труб в определенных режимах работы аппаратов воздушного охлаждения (АВО).

Целью данной работы является определение влияния различных геометрических факторов на эффективность передачи теплоты и определения наилучшей высоты и расстояния между пластинами для трубы с квадратными поперечными плоскими ребрами.

Описание математической модели

Приведем математическую модель для расчета теплового потока, передаваемого окружающему воздуху трубой диаметром $d = 0,02$ м с квадратными плоскими поперечными ребрами, представленной схематически на рис. 1. Примем, что наличие трубы между ребрами

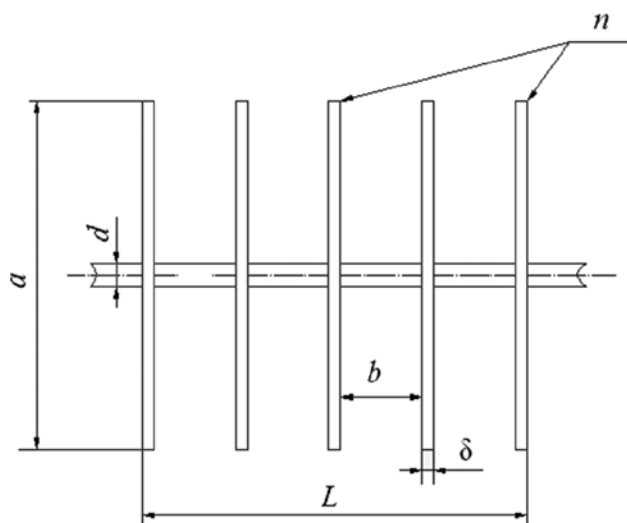


Рис. 1. Схема трубы с квадратными плоскими поперечными ребрами:

a, δ — высота и толщина пластины; d, L — диаметр и длина трубы; b — расстояние между пластинами; n — количество пластин

не влияет на конвективное движение воздуха между пластинами.

Кроме указанного выше, примем следующие допущения математической модели:

- температурный градиент в направлении, перпендикулярном к поверхности ребра, пренебрежимо мал (ребро термически тонкое);

- количество теплоты, переданной через торцевую поверхность ребра, пренебрежимо мало по сравнению с количеством теплоты, переданной через его боковую поверхность;

- в контакте между поверхностью и ребром нет термического сопротивления;

- температура основания ребра практически равна температуре теплоносителя.

Безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта Nu) между двумя нагретыми вертикальными параллельными пластинами, имеющими постоянную температуру можно определить по формуле Эленбааса [5]:

$$Nu = \frac{1}{24} \frac{b}{a} Ra \left(1 - \exp\left(-\left(35 \frac{a}{bRa}\right)\right) \right)^{\frac{3}{4}},$$

где характерным размером для числа Рэлея Ra является расстояние между пластинами b , а теплофизические свойства определяются по температуре воздуха между

пластинами, которая в нашем случае определялась как среднеарифметическая между средней температурой ребер и температурой окружающего воздуха.

Поскольку температура по поверхности ребра меняется, в расчете передаваемого потока необходимо учесть эффективность ребер и оребренной поверхности. Для определения эффективности квадратных плоских ребер мы используем данные Спэрроу и Лина [8], которые получили аналитическое решение для эффективности такого вида ребра. При этом вместо постоянной температуры поверхности, которую использовал в своей формуле Эленбаас [5], в данном случае использовалась среднеинтегральная температура по поверхности ребра \bar{t} . Она рассчитывалась из выражений для теплового потока, передаваемого идеальным и реальным ребром [9, 10]:

$$\bar{t} = (t_o - t_{oc})\eta_p + t_{oc},$$

где η_p — КПД ребра; t_o , t_{oc} — температура основания ребра и окружающей среды.

Кроме того использовалась поправка на изменение коэффициента теплоотдачи α , связанная с неравномерностью распределения температуры по поверхности ребра в форме, предложенной В.Ф. Юдиным [11], который определил ее экспериментальным путем:

$$\psi = 1 - 0,058ml,$$

где $m = \sqrt{2\alpha / \lambda \delta}$; l — эффективная высота ребра, которая определяется как разность эффективного радиуса R окружности, соответствующей по площади плоскому квадратному ребру, и радиуса трубы конвектора r :

$$l = R - r = \frac{2a}{\sqrt{\pi}} - r.$$

Тогда приведенный коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности α_{np} имеет вид:

$$\alpha_{np} = (F_p / F_n)\eta_p\psi\alpha,$$

где F_p — площадь поверхности ребер; F_n — полная площадь поверхности оребренной трубы.

Формулу для определения теплового потока Q , передаваемого оребренной трубой, можно записать следующим образом:

$$Q = \alpha_{np} F_n (t_{ocn} - t_{oc}) \eta_p \psi. \quad (1)$$

Подставляя в (5) значения поверхности ребер F_p и поправочного коэффициента ψ , получим расчетную формулу для определения теплового потока, передаваемого конвектором с учетом принятых допущений:

$$Q = 2\alpha(a^2 - \pi r^2)(t_{ocn} - t_{oc})\eta_p n(1 - 0,058ml).$$

Отметим, что данный тепловой поток передается с 1 м длины основной трубы и расстояние между ребрами определяет количество установленных пластин n .

Таким образом, мы получили систему нелинейных алгебраических уравнений, связывающих передаваемый тепловой поток, геометрические параметры ребра, температуры теплоносителя и окружающей среды. Данная система решалась итерационным путем. При ее решении использовались графические зависимости для определения эффективности квадратного сплошного ребра [12], а также учитывалось изменение теплофизических свойств воздуха, находящегося между пластинами, при изменении среднеинтегральной температуры поверхности ребра.

Результаты исследования

Результаты расчетов приведены на рис. 2 — 6.

Расчеты проводились при следующих условиях:

температура основания ребра, принятая равной температуре теплоносителя, составляет $t_o = 80$ °С, а температура окружающей среды $t_{oc} = 20$ °С;

толщина пластин была принята 0,6 мм, что соответствует толщине пластин реальных отопительных конвекторов ОАО «Сантехпром»;

теплопроводность для материала ребер и трубы (углеродистая сталь) была принята $\lambda = 45$ Вт/(м·°С), плотность материала ребер и трубы, необходимая для расчета массы составляла $\rho = 7700$ кг/м³.

На рис. 2 приведена зависимость передаваемого теплового потока от расстояния между пластинами b при различных размерах стороны квадратного ребра a в диапазоне 0,03 — 0,06 м.

Графики имеют четко выраженный максимум. При этом положение этого максимума не зависит от высоты стороны ребра a и всегда лежит при $b = 5$ мм, что близко к рекомендуемому значению $b = 6$ мм, определенному экспериментальным путем [4]. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от расстояния между ребрами представлена на рис. 3.

До определенного предела коэффициент теплоотдачи α является малым, потому что скорость движения воздуха, определяемая равенством сил плавучести и сил трения, невелика. При увеличении расстояния между пластинами a стремится к постоянному значению, которое наблюдается на одиночной вертикально нагретой пластине, и зависит от ее высоты. Также следует отметить, что расчетные значения α находятся в диапазоне, полученном в экспериментах, результаты которых приведены в [4].

С практической точки зрения важно определить оптимальные геометрические параметры оребренной трубы. В случае идеальных ребер такая задача решена Эленбаасом [5].

Для формирования целевой функции имеют важное значение, прежде всего следующие показатели качества:

- передаваемый оребренной трубой тепловой поток Q ;
- масса оребренной трубы $m = m_p + m_{tr}$ (m_p — масса ребер; m_{tr} — масса трубы);

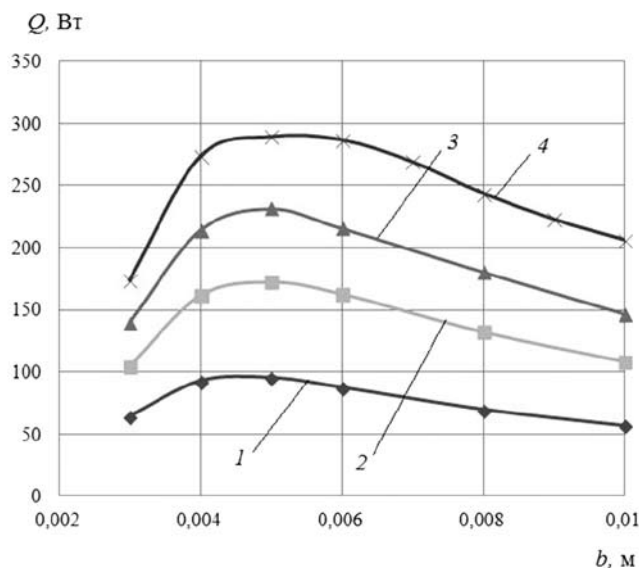


Рис. 2. Зависимость теплового потока Q , передаваемого трубой с квадратными плоскими поперечными ребрами в зависимости от расстояния между ребрами: $a = 0,03$ (1), 0,04 (2), 0,05 (3), 0,06 (4) м

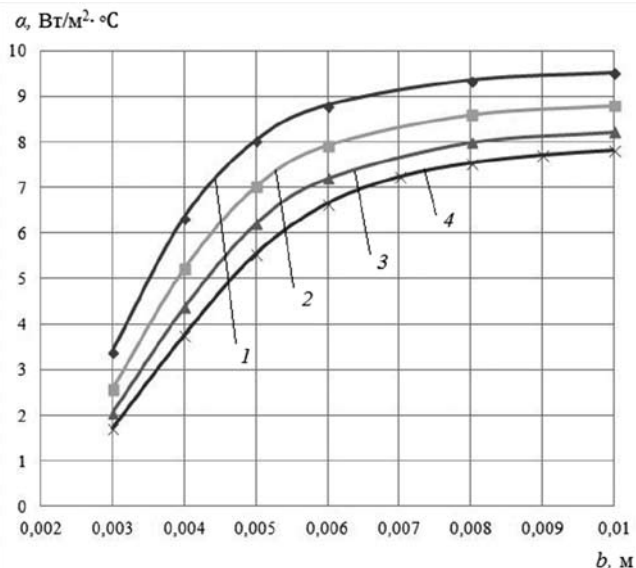


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи со стороны воздуха α от расстояния между пластинами: $a = 0,03$ (1), 0,04 (2), 0,05 (3), 0,06 (4) м

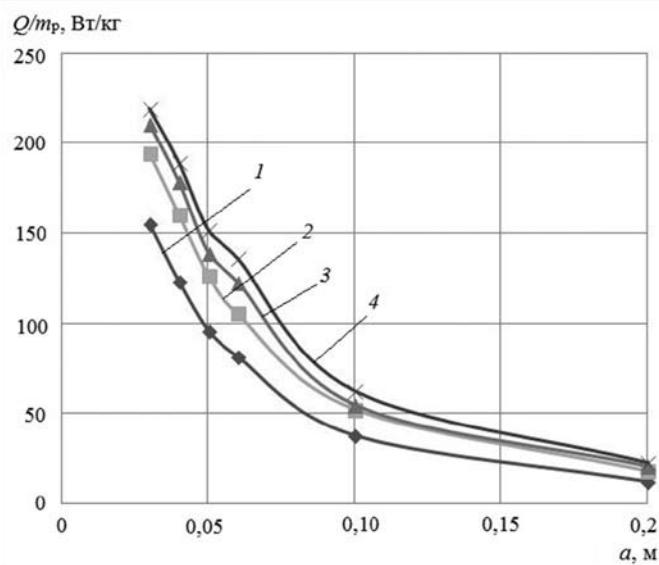


Рис. 4. Зависимость отношения теплового потока к массе ребер от их высоты: $b = 0,004$ (1), 0,005 (2), 0,006 (3), 0,008 (4)

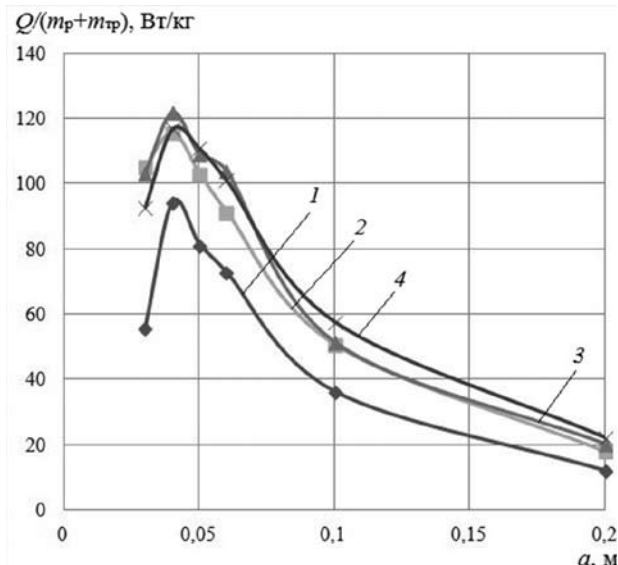


Рис. 5. Зависимость отношения теплового потока к суммарной массе трубы и ребер от высоты ребра: $b = 0,004$ (1), 0,005 (2), 0,006 (3), 0,008 (4)

— геометрические размеры оребренной трубы: a , b , δ .

Затраты на прокачку теплоносителя в данном случае не являются важным показателем, поскольку для воды они невелики, а для воздуха отсутствуют.

Предварительный анализ показывает, что одной из возможных целевых функций может быть отношение передаваемого теплового потока к массе оребренной трубы. Нами были получены:

— зависимость отношения теплового потока к массе ребер от b и a (рис. 4, 6);

— зависимость отношения теплового потока к суммарной массе трубы и ребер от b и a (рис. 5).

Для наглядности полученные зависимости представлены в разных координатах.

Из графиков видно, что отношение передаваемого теплового потока к массе ребер носит монотонный характер и резко увеличивается с ростом высоты ребра. Однако учет массы трубы существенно изменяет характер зависимости, которая при этом имеет экстремум по высоте ребра. В данном случае его значение составляет $a = 0,04$ м.

Таким образом можно сделать вывод о том, что существует комбинация геометрических параметров, при которых максимальное отношение $Q/(m_p + m_r)$ для

такой трубы, а возможно и для отопительных конвекторов имеет оптимальное значение, которое не зависит от расстояния между ребрами.

Заключение

Определены зависимости передаваемого теплового потока и удельного теплового потока на единицу массы от расстояния между ребрами-пластинами и высоты ребра для оребренной трубы.

Показано, что максимальное значение передаваемого теплового потока не зависит от расстояния между пластинами и достигается при значении $b = 5$ мм при заданных расчетных условиях.

Установлено, что существует значение высоты ребер, соответствующее максимальному значению удельного передаваемого теплового потока как массе оребренной трубы, и оно не зависит от расстояния между пластинами. При рассматриваемых условиях максимальное значение $Q/(m_p + m_{тр})$ составляет 120 Вт/кг при $a = 0,04$ м.

Литература

1. Kerrigan K., Jouhara H., O'Donnell G.E., Robinson A.J. A naturally aspirated convector for domestic heating application with low water temperature sources // Energy and Buildings. 2013. V. 67. P. 187 — 194.
2. Сасин В.И. Мастер-класс «Отопительные приборы в современном строительстве» // АВОК. 2007. № 8.
3. ОАО «Сантехпром» [Официальный сайт]. <http://www.santexprom.ru/> (дата обращения 26.05.2016).
4. Сканави А.Н., Махов Л.М. Отопление. М.: Изд-во АСВ, 2006.
5. Elenbaas W. Heat dissipation of parallel plates by free convection // Physica IX. 1942. N 1.
6. Wankhade S.D, Bhor S.K, Nagraj A.M. Investigation of thermal performance in natural convection from rectangular interrupted fins – a review // Intern. J. Innovative Research in Sci., Eng. and Tech. 2015. Vol. 4. Iss. 1. P. 18528 — 18535.

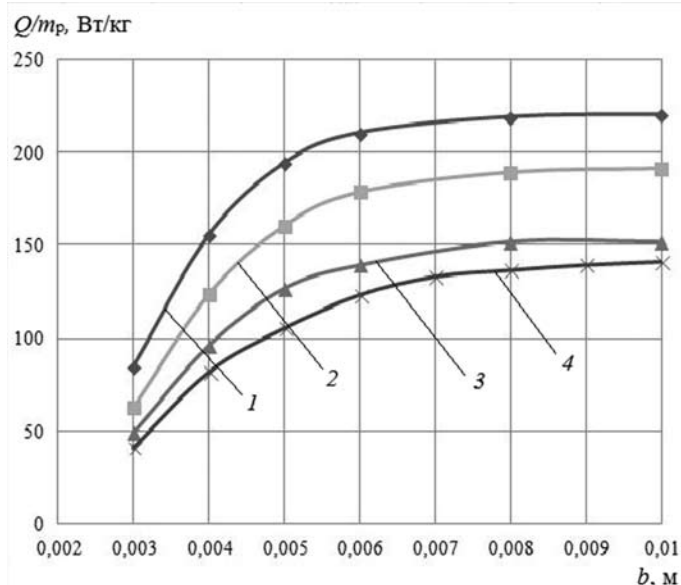


Рис. 6. Зависимость отношения теплового потока к массе ребра от расстояния между ребрами: $a = 0,03$ (1), $0,04$ (2), $0,05$ (3), $0,06$ (4) м

7. Аронов И.З., Фиалко Н.М., Пресич Г.А. Анализ работы отопительных конвекторов // Промышленная теплотехника. 2003. Т. 25. № 1. С. 78 — 81.
8. Sparrow E.M., Lin S.H. Heat-Transfer Characteristics of Polygonal and Plate Fins // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1964. V. 7. P. 951 — 953.
9. Бакластов А.М. и др. Промышленные тепломассообменные процессы и установки. М.: Энергоатомиздат, 1986.
10. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982.
11. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечнооребранных труб. Л.: Машиностроение, 1982.
12. Керн Д., Краус А. Развитые поверхности теплообмена. М.: Энергия, 1977.

Статья поступила в редакцию 02.06.2016