## APPONHMENEPNA

DOI УДК 62-69

## ПЕРЕДАЧА ТЕПЛОТЫ В ТЕПЛООБМЕННИКАХ ОТ РЕБРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ НЕСИММЕТРИЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ОСНОВАНИЙ КОЛЛЕКТИВНОГО ОРЕБРЕНИЯ

**АКСЕНОВ Андрей Константинович,** Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Приведено решение задачи о тепловом потоке в теплобменниках с поверхности коллективного оребрения при различных температурах его концов. Полученные аналитические формулы позволяют дать количественную оценку влияния несимметричности граничных условий на теплопередачу через оребренную теплообменную поверхность. Расчетные зависимости могут быть использованы при проектировании высокоэффективных теплообменных устройств энергетики, сельскохозяйственного технологического оборудования, систем кондиционирования, вентиляции и теплоснабжения.

Введение. В теплообменных установках, где происходит передача теплоты от жидкой к газовой среде, повсеместно используются оребренные теплообменые поверхности. Оребрение теплообменных поверхностей позволяет существенно повысить интенсивность теплопередачи, создать компактные высокоэффективные теплообменные устройства, что особенно важно для установок систем подогрева воздуха в вентиляционных и технологических установках, используемых в сельскохозяйственном производстве. Относительно низкие значения коэффициентов теплоотдачи от поверхности охлаждения к воздуху вынуждают максимально развивать площади теплообменных поверхностей, что приводит к увеличению массы, габаритных размеров и расхода металла (большей частью цветного).

Теория передачи теплоты через ребра полуограниченной длины или при симметричных граничных условиях (равных температурах нагревателей или охладителей на концах, одинаковой температуры потока, омывающего поверхности ребер, и равных коэффициентах теплоотдачи) разработана достаточно полно, и для этого случая имеются надежные расчетные формулы, позволяющие выполнять конструкторские и поверочные расчеты теплообменных аппаратов, работающих в указанных или близких к ним условиях [1–6].

В действительности, как показывает практика, эти условия не всегда выполняются, а иногда и носят резко выраженный несимметричный характер. Например, при коллективном пластинчатом оребрении трубок воздухоподогревателя вследствие неравномерного

распределения теплоносителя по ним температура концов ребер становится неодинаковой. В большинстве воздухоподогревателей греющая вода движется внутри медной трубки, свернутой в виде U- или S-образной формы. Коллективное ребро в таком случае оказывается между двумя нагревателями, имеющими различную температуру. Например, если температура теплоносителя (воды) на входе составляет 70 °C, то на выходе меньше 20 °C. Это приводит к неправильному расчету теплообмена в целом и к размораживанию и аварийным режимам при эксплуатации оборудования. Если поверхность плоского ребра омывается с каждой стороны теплоносителями, имеющими разные температуры, то и коэффициенты теплоотдачи между теплоносителями и поверхностью ребер имеет неодинаковые значения. Например, в последнее время в целях интенсификации теплообмена в топках паровых и водогрейных котлов малой и средней мощности широко применяют так называемое плавниковое оребрение труб. Сплошное плавниковое оребрение труб в котлах типа КЕ используют и в качестве перегородок, образующих газоходы котла. Дымовые газы, омывающие указанные теплообменные поверхности с каждой стороны, имеют разные температуры и разные коэффициенты теплоотдачи.

Таким образом, становится актуальным исследование теплопередачи через оребренные теплообменные поверхностей при несимметричных граничных условиях.В настоящей работе дано теоретическое решение указанной задачи.

**Методика исследований.** Передача тепла через ребро постоянного сечения с разными температурами концевых источников.

**2** 2019



Рассмотрим задачу о передаче теплоты через тонкое ребро заданного постоянного сечения f длиной h, расположенное между двумя концевыми нагревателями (a и b) или охладителями, имеющими разные температуры  $t_a$  и  $t_b$  (рис. 1).

Поверхность ребра омывается потоком газа с постоянной температурой  $t_f$  Пусть  $t_a > t_b$ , а  $t_f < t_b$ , или  $t_a < t_b$ ,а  $t_f > t_b$  (рис. 2), т. е. направление теплового потока от поверхности ребра к среде или от среды к поверхности ребра по всей длине ребра однозначно. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  будем считать постоянным. Характер изменения температуры по длине ребра  $t = \varphi(x)$  для указанных выше случаев представлен на рис. 1, 2.

Требуется установить аналитический закон изменения температуры  $t = \varphi(x)$  и получить выражение для полного количества теплоты Q, воспринимаемого (отдаваемого) ребром в единицу времени, т.е. полный тепловой поток при заданных выше условиях. На произвольном расстоянии от основания ребра между двумя поперечными сечениями ребра выделим элемент длиной  $\mathrm{d}x$ .

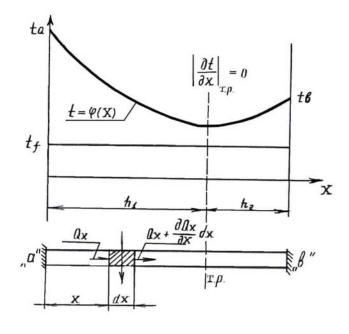


Рис. 1. Распределение температуры вдоль ребра с концевыми нагревателями при  $t_a\!>t_b\!>t_f$ 

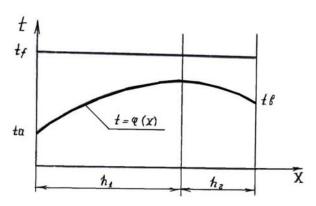


Рис. 2. Распределение температуры вдоль ребра с концевыми нагревателями при  $t_a < t_b < t_f$ 

Выражение для секундного количества тепла, Вт, поступающего в выделенный элемент через левое сечение путем теплопроводности, согласно закону Фурье будет иметь следующий вид:

$$Q_x = -\lambda f \frac{\partial t}{\partial x},\tag{1}$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала ребра,  $BT/(M \cdot K)$ .

Количество тепла,Вт, теряемого элементом путем теплопроводности через правое сечение, с точностью до бесконечно малых высшего порядка

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx =$$

$$= -\lambda f \frac{\partial t}{\partial x} - \lambda f \frac{\partial t}{\partial x^2} dx.$$
 (2)

Количество тепла, передаваемого в единицу времени через боковую поверхность этого элемента в результате конвективного теплообмена, согласно закону Ньютона-Рихмана

$$dQ_u = \alpha (t - t_f) u \, dx, \tag{3}$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); u – периметр поперечного сечения ребра, м.

На основании баланса энергии для выделенного элемента ребра при установившемся тепловом режиме можем написать следующее уравнение:

$$Q_x - Q_{x+\mathrm{d}x} - \mathrm{d}Q_u = 0, \tag{4}$$

или

$$\lambda f \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx - \alpha u (t - t_f) dx = 0.$$
 (5)

Введя обозначение  $\alpha u/\lambda f = m^2$ , перепишем уравнение (5) в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - m^2(t - t_f) = 0. \tag{6}$$

Общее решение этого линейного дифференциального уравнения имеет следующий вид:

$$t = c'e^{mx} + c''e^{-mx} + t_f. (7)$$

Постоянные c' и c'' найдем из граничных устовий

Формулируя граничные условия, разделим ребро на две части.

Левую — длиной  $h_1$  и правую — длиной  $h_2$  ( $h_1 + h_2 = h$ ). В сечении  $x = h_1$ , которое назовем



59

сечением теплораздела  $(t_0)$ , производная  $\frac{\partial t}{\partial x}$  меняет знак.

Следовательно, для левой части ребра имеем следующие граничные условия:

при x = 0

$$t=t_{a}$$
;

 $при x = h_1$ 

$$\frac{\partial t}{\partial x} = 0.$$

Согласно решению (7) будем иметь (для левой части ребра):

$$t_a = c_1' + c_1'' + t_f; (8)$$

$$\left| \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x} \right|_{x=h_1} = mc_1' e^{mh_1} - mc_1'' e^{-mh_1} = 0. \tag{9}$$

Решая совместно уравнения (6) и (9), найдем

$$c_1' = \frac{(t_a - t_f)e^{-mh_1}}{e^{mh_1} + e^{-mh_1}};$$
(10)

$$c_1'' = \frac{(t_a - t_f)e^{mh_1}}{e^{mh_1} + e^{-mh_1}}. (11)$$

Подставляя полученные значения постоянных  $\mathbf{c}_1'$  и  $\mathbf{c}_1''$  в (7), получим

$$t_1 = (t_a - t_f) \frac{e^{-m(h_1 - x)}}{e^{mh_1} + e^{-mh_1}} +$$

$$+\left(t_{a}-t_{f}\right)\frac{e^{m(h_{1}-x)}}{e^{mh_{1}}+e^{-mh_{1}}}+t_{f},$$
 (12)

или

$$t_1 = t_f + (t_a - t_f) \frac{ch[m(h_1 - x)]}{ch(mh_1)}.$$
 (13)

При  $x = h_1$ 

$$t_{h_1} = t_f + \frac{t_a - t_f}{ch(mh_1)}. (14)$$

Тепловой поток через левое основание ребра

$$Q_{1} = -\lambda f \left| \frac{\partial t}{\partial x} \right|_{x=0} = -\lambda f m \left( c_{1}' - c_{1}'' \right). \quad (15)$$

Подставляя в полученное уравнение значения постоянных  $c_1'$  и  $c_1''$ , будем иметь

$$Q_1 = -\lambda fm(t_d - t_f)th(mh_1).$$
 (16)

Формулы, аналогичные выражениям (13) и (16), могут быть получены и для правой части ребра ( $h_2$ ):

$$t_2 = t_f + (t_b - t_f) \frac{ch[m(h_2 - x)]}{ch(mh_2)};$$
 (17)

$$Q_2 = -\lambda f m \left(t_{\rm B} - t_f\right) t h(m h_2),\tag{18}$$

где  $0 \le x \le h_1$  (отсчет от основания «b»), т.е. переменная х в выражении (17) изменяется от x=0 у правого основания ребра, где  $t_2=t_b$ , до  $x=h_2$  в сечении теплораздела, где  $t_2=t_b$ . Согласно (17)

$$t_{h_2} = t_f + \frac{t_{\rm B} - t_f}{ch(mh_2)}. (19)$$

Так как температуры  $t_{h_1}$  и  $t_{h_2}$  принадлежат одному и тому же сечению (теплораздела), то согласно (14) и (19)

$$\frac{t_a - t_f}{ch(mh_1)} = \frac{t_b - t_f}{ch[m(h - h_1)]}.$$
 (20)

Полученное уравнение позволяет найти координату сечения теплораздела в ребре и, следовательно, расчетные значения длин ребра  $h_1$  и  $h_2 = h - h_1$ .

При наличии тепловой симметрии, когда  $t_a = t_b$ , имеем  $h_1 = h_1 = h/2$ .

Результирующее количество тепла Q определяется суммой:

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Рассмотрим случай, когда температура среды  $t_f$  меньше, чем температура одного из оснований ребра, например,  $t_a$ , но больше, чем температура другого основания  $t_b$ , т.е.

$$t_a > t_f > t_b$$
.

В этом случае одна часть поверхности ребра, где  $t > t_f$ , является теплоотдающей, а другая, где  $t < t_f$  – тепловоспринимающей. Характер изменения температуры по длине ребра приведен на рис.3.

Так как при x=0

$$t=t_{a}$$

а при  $x = h_1$ 

$$t=t_{f}$$

то согласно (7):

$$t_a = c_1' + c_1'' + t_f$$
;  $t_b = c_2' + c_2'' + t_f$ ;

**2** 2019



$$c_1'e^{mh_1} + c_1''e^{-mh_1} = 0;$$

$$c_2'e^{mh_2} + c_2''e^{-mh_2} = 0.$$

Таким образом, имеем те же уравнения для определения произвольных постоянных  $c_1'$ ;  $c_2''$ ;  $c_2''$ , что и выше (8), (9), а следовательно, те же решения (13), (16), (17) и (18) для

$$t_1(x); t_2(x);$$

$$Q_1(h_1); Q_2(h_2).$$

Результирующее количество тепла в данном случае определится следующим образом:

$$Q = Q_2 + Q_1.$$

Сечение теплораздела находят из условия:

$$t_{o} = t_{f}$$

т.е. в том месте, где направление теплового потока в конвективном теплообмене между средой и поверхностью меняет знак.

Или

$$\frac{t_a - t_f}{ch(mh_1)} = \frac{t_f - t_b}{ch[m(h - h_1)]}.$$
 (21)

Заключение. Полученные аналитические решения позволяют дать количественную оценку влияния несимметричности граничных условий на теплопередачу через оребренную теплообменную поверхность.

Расчетные формулы (20),(21) могут быть использованы как при конструкторских расчетах различных теплообменных аппаратов оребренными теплообменными поверхностями ,так и при поверочных расчетах, например, для анализа изменения эффективности оребрения при

нарушении симметричности в граничных условиях в процессе эксплуатации теплообменных устройств.

Полученные расчетные формулы могут оказаться весьма полезными при анализе надежности работы теплообменного устройства в условиях резкой неравномерности температуры коллективного оребрения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Кунтыш В.Б., Сухоцкий А.Б.* Интенсификация теплоотдачи пластическим расчленением накатных алюминиевых ребер биметаллических труб в потоке воздуха. Серия 1. Минск, 2017.
- 2. *Михеев М.А.*, *Михеева И.М.* Основы теплопередачи. 2-е изд. М., 1977. 344 с.
- 3. Овсянник А.В. Расчет оребренных поверхностей теплообмена при кипении на них жидкостей // Весник ГГТУ. -2012. -№ 4. -C. 47-51.
- 4. *Письменный Е.Н.* Теплообмен аэродинамика пакетов поперечно-оребренных труб. Киев, 2004. 244 с.
- 5. Трубчатые ребристые поверхности с интенсифицированным теплообменом и технология их изготовления для аппаратов воздушного охлаждения энергетического комплекса / В.Б. Кунтыш [и др.].—Минск, 2013.
- 6. *Ivanov M.V., Russu N.A., Lobdenko E.I.* Estimation of intensity of heat exchange helically ribbed tube / Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, 2010.

Аксенов Андрей Константинович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия.

129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26. Тел.: (495) 583-73-81.

**Ключевые слова:** теплообменная поверхность; коллективное оребрение труб; сельскохозяйственное технологическое оборудование; несимметричные граничные температурные условия.

## HEAT TRANSFER IN HEAT EXCHANGERS FROM A RIBBED SURFACE UNDER CONDITIONS OF ASYMMETRIC TEMPERATURE OF THE BASES OF COLLECTIVE FINNING

Aksenov Andrey Konstantinovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Heat and Gas Supply and Ventilation", Moscow State National Research University of Civil Engineering. Russia.

**Keywords:** heat exchange surface; collective tube finning; agricultural technological equipment; asymmetric boundary temperature conditions.

The solution of the problem of heat flow in heat exchangers from the surface of collective finning at different temperatures of its ends is given. The obtained analytical formulas allow us to quantify the influence of the asymmetry of the boundary conditions on the heat transfer through the finned heat exchange surface. Calculated dependencies can be used in the design of high-performance heat exchangers for power engineering, agricultural process equipment, air conditioning systems, ventilation and heat supply.



**2** 2019