

УДК 536.25

## РАСЧЕТ ОРЕБРЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НА НИХ ЖИДКОСТЕЙ

**А. В. ОВСЯННИК**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

### **Введение**

Теплообменные аппараты широко применяются в энергетике, химической, нефтеперерабатывающей, авиационной и космической технике, пищевой промышленности, в холодильной и криогенной технике, в системах отопления и горячего водоснабжения, кондиционирования, в различных тепловых двигателях. Среди большого многообразия теплообменников особое место занимают теплообменные аппараты с фазовым переходом теплоносителей и, в частности, с кипением одного из теплоносителей. С ростом энергетических мощностей и объема производства все более увеличивается их масса и габариты, что приводит к расходу большого количества легированных и цветных металлов. В связи с этим уменьшение массогабаритных показателей теплообменных аппаратов является актуальной проблемой. Значительный вклад в решение этой проблемы может внести внедрение научно обоснованных и экспериментально проверенных методов интенсификации теплообмена при кипении и расчета интенсифицированных поверхностей, в частности оребренных. Опыт создания и эксплуатации различных теплообменных устройств показал, что разработанные к настоящему времени методы интенсификации теплообмена обеспечивают снижение габаритов и металлоемкости (массы) этих устройств в 1,5–2 и более раз по сравнению с аналогичными серийно выпускаемыми устройствами при одинаковой тепловой мощности. Поэтому создание теплообменных аппаратов с развитыми теплопередающими поверхностями представляет собой одно из перспективных направлений организации процесса теплообмена при кипении жидкостей.

Несмотря на большое количество работ по теплообмену при кипении, их результаты далеко не полностью отражают процессы теплообмена на оребренных поверхностях. Поэтому размеры и оптимальные параметры теплопередающих поверхностей ряда теплообменных аппаратов, применяемых в энергоустановках различных отраслей промышленности, не могут быть определены без достаточных знаний в этой области. При кипении жидкостей на оребренных поверхностях с различным типом оребрения еще недостаточно полно исследованы специфические особенности теплообмена и гидродинамики, связанные с влиянием параметров и ориентации ребер. Имеющихся данных недостаточно для определения оптимальных геометрических параметров ребра и межреберного расстояния, которые в значительной степени определяются свойствами рабочей жидкости и давлением в системе. Практически отсутствуют данные при кипении на оребренной поверхности в околокритической области. Известные расчетные соотношения для определения интенсивности теплообмена при кипении жидкостей на ребристых поверхностях применимы лишь в частных случаях, исследованных авторами, поскольку получены эмпирическим путем, а не на основе модельных представлений.

Интенсификация процессов теплообмена при кипении позволяет, кроме того, существенно снизить температурные напоры за счет повышения коэффициента теплоотдачи при тех же значениях плотностей тепловых потоков.

Поэтому создание более эффективных и компактных теплообменных аппаратов является актуальной и приоритетной научно-технической задачей, решение которой обеспечит существенную экономию энергетических, материальных и трудовых ресурсов.

### Основная часть

В большинстве случаев при расчете и проектировании теплообменного оборудования известна или задается тепловая мощность, которую необходимо отводить в процессе теплообмена. Связь между тепловым потоком  $Q$ , температурным напором  $\vartheta$  и геометрическими характеристиками ребра может быть установлена на основании уравнения Ньютона–Рихмана и выражений для определения коэффициентов теплоотдачи продольного и радиального ребер [1].

Плотность теплового потока  $q_0$ , отнесенная к площади несущей поверхности, оребренной продольными и радиальными ребрами, может быть записана как [4]:

$$q_0 = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left( \frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a \text{Ja}^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r} \right) \frac{f_{\text{р}}}{f_0} \vartheta, \quad (1)$$

где  $d_0$  – отрывной диаметр парового пузыря, м;  $\varphi$  – паросодержание;  $\gamma$  – краевой угол смачивания;  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $c_{\text{ж}}$  – теплоемкость жидкости при температуре насыщения, Дж/(кг · К);  $r$  – радиус несущей поверхности, м;  $f_0$  – площадь основной поверхности, занятой ребрами, м<sup>2</sup>;  $f_{\text{р}}$  – площадь ребер, м<sup>2</sup>;  $\text{Ja} = (c_{\text{ж}} \vartheta / r_{\text{ж}}) (\rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{п}})$  – число Якоба;  $\vartheta$  – температурный напор «поверхность – температура насыщения», К;  $r_{\text{ж}}$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг · К;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости при температуре насыщения, кг/м<sup>3</sup>.

Длина продольного ребра может быть определена как  $L = L_{\text{экр}} = 2\pi r$  [3].

С другой стороны, плотность теплового потока может быть выражена через тепловую нагрузку теплообменника  $Q$ , количество ребер  $n$ , площадь ребер в основании  $f_0$  и межреберную площадь  $f_{\text{мр}}$  в следующем виде:

$$q_0 = \frac{Q}{n(f_0 + f_{\text{мр}})}. \quad (2)$$

Или

$$q_0 = \frac{Q}{2\pi r n (\delta_0 + \delta_{\text{мр}})}. \quad (3)$$

Тогда тепловой поток для радиальных ребер, отводимый оребренной поверхностью, будет [4]:

$$Q = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left( \frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a \text{Ja}^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r} \right) \frac{f_{\text{р}}}{f_0} \vartheta [n(f_0 + f_{\text{мр}})]. \quad (4)$$

Выражение (4) может быть использовано для определения как локальных температурных напоров, так и среднего по высоте ребра, который может быть применен при определении площади поверхности теплообмена.

Средний температурный напор по высоте ребра определяется из выражения (4), если принять  $\vartheta = \vartheta_{\text{cp}}$  и  $r = r_{\text{cp}}$ . Тогда

$$\begin{aligned} Q &= \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left( \frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a \text{Ja}^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r_{\text{cp}}} \right) \vartheta_{\text{cp}} \frac{4\pi r_{\text{cp}} l_{\text{p}}}{2\pi r_{\text{cp}} \delta_0} \left[ n 2\pi r_{\text{cp}} (\delta_0 + \delta_{\text{мп}}) \right] = \\ &= \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left( \frac{2\gamma^2 \rho_{\text{п}} a \text{Ja}^2 c_{\text{ж}}}{\delta_0} \right) \vartheta_{\text{cp}} \left[ l_{\text{p}} n (\delta_0 + \delta_{\text{мп}}) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $l_{\text{p}}$  – длина профиля ребра.

Как видно из выражения (5), мощность теплового потока, передаваемая продольными и радиальными ребрами, определяется по одному уравнению и она не зависит от типа ребра, а определяется только средним температурным напором «ребро – кипящая жидкость», геометрическими параметрами ребра (толщина ребра в основании, межреберное расстояние и длина профиля ребра), количеством ребер, теплофизическими свойствами пара и жидкости и внутренними характеристиками процесса кипения [4].

Плотность теплового потока  $q_0$ , отнесенная к площади несущей поверхности, может быть определена по (2) или по (3).

Тогда тепловой поток, отводимый оребренной поверхностью, может быть определен по выражениям (4) или (5).

Если необходимо определить геометрические размеры оребренной поверхности, то уравнение (5) следует записать в виде [4]:

$$Q = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left( \frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a \text{Ja}^2 c_{\text{ж}}}{r} \right) \vartheta_{\text{cp}} \frac{2l_{\text{p}}}{\delta_0} \left[ nr (\delta_0 + \delta_{\text{мп}}) \right] = \alpha_* \vartheta_{\text{cp}} F. \quad (6)$$

Здесь

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left( \frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a \text{Ja}^2 c_{\text{ж}}}{r} \right) - \text{коэффициент теплоотдачи}. \quad (7)$$

Площадь поверхности теплообмена оребренной поверхности

$$F = \frac{2l_{\text{p}}}{\delta_0} \left[ nr (\delta_0 + \delta_{\text{мп}}) \right]. \quad (8)$$

При определении площади поверхности теплообмена оребренной поверхности, как правило, неизвестными являются: для *поперечно оребренной поверхности* – радиус оребренной поверхности  $r$ , число ребер  $n$ , межреберное расстояние  $\delta_{\text{мп}}$ , средняя температура ребра  $\vartheta_{\text{cp}}$ , а заданными величинами – температура в основании ребра  $\vartheta_0$ ; длина продольного ребра  $L_{\text{экв}}$  [3]; радиус несущей поверхности ребра  $r_0$ ; толщина ребра в основании  $\delta_0$ ; тепловой поток  $Q$ .

Средний температурный напор  $\vartheta_{\text{cp}}$  определяется из численного решения дифференциального уравнения соответствующего ребра при развитом кипении на нем жидкости и полученного при этом распределения температуры по высоте ребра [2]. Высота ребра  $b$  определяется из этого же распределения температуры при условии, что на вершине ребра температурный напор ограничен условием  $\vartheta_e \geq \vartheta_{\text{нк}}$ . Здесь  $\vartheta_{\text{нк}}$  – температурный напор начала развитого кипения, а  $\vartheta_e$  – температурный напор на вершине ребра.

Определив высоту ребра  $b$ , можно теперь найти длину профиля ребра  $l_p$ . Так, для прямоугольного ребра  $l_p = b$ , для треугольного –  $l_p = \sqrt{b^2 + (\delta_0/2)^2}$  и т. д.

Коэффициент теплоотдачи на ребре определяется по (7), а количество радиальных ребер по (8):

$$n = \frac{\delta_0}{2l_p} \frac{F}{r(\delta_0 + \delta_{\text{mp}})}. \quad (9)$$

Площадь радиально оребренной поверхности определяется как

$$F = Q_p / (\alpha_{*\text{рад}} \vartheta_{\text{cp}}), \quad (10)$$

а длина радиально оребренной поверхности может быть определена по выражению

$$L_{\text{рад}} = n(\delta_0 + \delta_{\text{mp}}). \quad (11)$$

Длина одного продольного ребра:

$$L_{\text{пр}}^{\text{1р}} = l_{\text{рад}} n_{\text{рад}} = 2\pi r n_{\text{рад}}. \quad (12)$$

Количество продольных ребер на цилиндрической поверхности:

$$n_{\text{пр}} = \frac{2\pi r}{\delta_0}. \quad (13)$$

Длина продольно оребренной поверхности:

$$L_{\text{пр}} = \frac{L_{\text{пр}}^{\text{1р}}}{n_{\text{пр}}} = \frac{2\pi r n_{\text{рад}}}{n_{\text{пр}}} = 2\pi r \frac{n_{\text{рад}}}{n_{\text{пр}}}. \quad (14)$$

### Заключение

Предложена методика расчета площади поверхности и геометрических размеров интенсифицированных оребренных поверхностей теплообмена различного типа и профиля при кипении на них жидкостей.

### Литература

1. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – 4-е изд. – М. : Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. Асенчик, О. Д. Численное решение задачи теплообмена при кипении на неизотермической поверхности / О. Д. Асенчик, А. В. Овсянник, М. Н. Новиков // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2004. – № 3. – С. 23–26.

3. Овсянник, А. В. Интенсивность теплообмена при кипении жидкости на ребрах различного типа и профиля / А. В. Овсянник // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2011. – № 2. – С. 31–35.
4. Овсянник, А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 284 с.

*Получено 12.11.2012 г.*