УДК 536.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗВИТОМ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ НА ШИПАХ

Канд. техн. наук ОВСЯННИК А. В.

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Снижение металлоемкости и повышение надежности поверхностей нагрева энергетического оборудования, термостатирование различных элементов энерготехнологических установок, воспринимающих большие тепловые потоки и имеющих жесткие ограничения по термическим деформациям, охлаждение элементов микроэлектронной техники и т. д. требуют разработки новых и совершенствования существующих методов интенсификации теплообмена, обеспечивающих как высокие коэффициенты теплоотдачи, так и отвод тепловых потоков большой мощности. В различных энергетических и технологических аппаратах разнятся требования, предъявляемые к системам охлаждения по условиям надежности, эксплуатации, геометрическим характеристикам, стоимости, технологичности. Поэтому для интенсификации теплообмена применяют довольно широкий ряд тех или иных технических решений.

Объектом исследования являются процессы теплообмена на развитых неизотермических поверхностях, в частности на оребренных (ребра образованы шипами).

Существующие физические модели процессов теплообмена при кипении жидкостей на изотермических и неизотермических (оребренных) поверхностях представляют собой системы, предлагаемые либо для определенных поверхностей теплообмена, либо модели, которым присущи следующие недостатки:

- в существующих моделях процесса кипения на изотермической поверхности постоянные, входящие в расчетные уравнения определяются эмпирическим путем на основе опытных данных, что не всегда возможно;
- при анализе и разработке некоторых физических моделей процесса кипения используется формальный метод анализа значимости для теплоотдачи при кипении некоторых, произвольно выбранных безразмерных комплексов или теплофизических величин;
- зачастую встречаются противоречивые данные о влиянии режимных параметров на внутренние характеристики процесса кипения;
- при постановке задачи авторы моделей используют в качестве одного из определяющих параметров коэффициент теплоотдачи, который должен быть заранее известен или определен опытным путем, что не всегда возможно или крайне затруднительно;
- физические модели предложены для гладких горизонтальных теплоотдающих поверхностей, не учитывающих ориентацию последних в пространстве;
- в своей структуре физические модели содержат константы, которые необходимо определять экспериментально, либо они должны быть заранее заданы или известны;

В [1, 2] получена теплофизическая модель процессов теплообмена при кипении жидкостей на радиальных и продольных сплошных ребрах, в результате решения которой определяются коэффициенты теплоотдачи, плотность теплового потока и распределение температуры по высоте ребра.

Ниже предлагается теплофизическая модель процесса теплообмена при развитом пузырьковом кипении жидкостей на неизотермических оребренных поверхностях в виде шипов.

Суть способа решения поставленной задачи заключается в том, что рассматривается уравнение теплового баланса, в котором теплота dQ, передаваемая ребром, расходуется на образование парового пузыря dQ_1 и преодоление его сил инерции dQ_2. Однако силы инерции пренебрежимо малы по сравнению с теплотой, идущей на парообразование, поэтому эти силы в уравнении теплового баланса можно не учитывать. На основании этого уравнение теплового баланса запишется

$$dQ = dQ_1.$$

Для шипов с постоянным поперечным сечением: $f_1\ x\ = \pi r_0^2$ – для круглого шипа; $f_1\ x\ = ab$ – для прямоугольного шипа.

Для шипов с переменным поперечным сечением $f_1\ x\ = \pi r^2\ x$.

Количество теплоты, передаваемой теплопроводностью в единицу времени в шипе [1]:

$$dQ = \lambda \frac{d}{dx}\left[f_1\ x\ \frac{d\vartheta}{dx} \right] dx. \qquad (1)$$

Заменив $f_1\ x$ на формулу площади поперечного сечения $\pi r^2\ x$ и продифференцировав это выражение, получим

$$dQ = \lambda \left[\pi r^2\ x\ \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2\pi r\ x\ \frac{dr\ x}{dx}\frac{d\vartheta}{dx} \right] dx. \qquad (2)$$

Предположим, что величина теплового потока dQ_1, отводимого с элемента поверхности шипа dx при развитом пузырьковом кипении, пропорциональна массе пара, поступившего в паровой пузырь с элемента криволинейной поверхности парового пузыря dM/dF, скорости роста парового пузыря dR/dt, температурному напору между теплоотдающей поверхностью и температурой насыщения кипящей жидкости ϑ и теплоемкости жидкости $c_ж$ при температуре насыщения. Тогда тепловой поток, расходуемый на испарение жидкости на поверхности элемента шипа, запишется следующим образом:

$$dQ_1 = 2\frac{dM}{dF}\left(\frac{dR}{d\tau}\right) c_ж \vartheta dx. \qquad (3)$$

Определив $\dfrac{dM}{dF}$ и $\dfrac{dR}{d\tau}$ [1], получим количество теплоты в единицу времени, передаваемой паровому пузырю от теплоотдающей поверхности шипа:

$$dQ_1 = 2\gamma^2 \rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}} \vartheta dx. \tag{4}$$

В развернутом виде формула (4) будет иметь вид

$$dQ_1 = 2\gamma^2 \frac{\lambda_{\text{ж}} c_{\text{ж}}^2 \vartheta^3}{r_*^2} \left(\frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}}} \right) dx. \tag{5}$$

Здесь γ − коэффициент, зависящий от краевого угла смачивания θ и равный 0,1–0,49 при θ = 40–90 °С [3].

На основании (1) уравнение теплового баланса для шипа можно записать:

$$dQ = \pi\lambda \left[r^2 \; x \; \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2r \; x \; \frac{dr \; x}{dx} \frac{d\vartheta}{dx} \right] dx = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \; \gamma^2 \rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}} \vartheta \; dx;$$

$$\left[r^2 \; x \; \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2r \; x \; \frac{dr \; x}{dx} \frac{d\vartheta}{dx} \right] = \frac{4\varphi}{\pi^2 \lambda d_0^2} \; \gamma^2 \rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}} \vartheta \; . \tag{6}$$

Здесь $\dfrac{4\varphi}{\pi d_0^2}$ – число паровых пузырей с отрывным диаметром d_0; φ – паросодержание.

Разделив правую и левую части уравнения (6) на $r \; x$, получим

$$\left[r \; x \; \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2 \frac{dr \; x}{dx} \frac{d\vartheta}{dx} \right] = \frac{4\varphi}{\pi^2 r \; x \; \lambda d_0^2} \; \gamma^2 \rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}} \vartheta \; . \tag{7}$$

Уравнение (7) представляет собой дифференциальное уравнение теплопроводности шипа произвольного профиля при кипении на нем жидкости при граничных условиях:

$$\text{при } x = h_{\text{ш}} \quad \vartheta = \vartheta_0; \quad \text{при } x = 0 \quad \frac{d\vartheta}{dx} = -\frac{\alpha_{*e} \vartheta_e}{\lambda}. \tag{8}$$

Для круглого шипа постоянного поперечного сечения при $r \; x = r_0^{\text{пр}}$ дифференциальное уравнение выглядит следующим образом:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{4\varphi}{\pi^2 (r_0^{\text{пр}})^2 \lambda d_0^2} \; \gamma^2 \rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}} \vartheta \; . \tag{9}$$

Для шипа постоянного поперечного прямоугольного сечения $f_1 \; x = ab$ дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} = \frac{4\varphi}{\pi \lambda ab d_0^2} \; \gamma^2 \rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}} \vartheta$$

при граничных условиях (8).

Для различных профилей шипа дифференциальные уравнения запишутся [1]:

• треугольный профиль: $r^{\text{тр}}\ \ x\ = \dfrac{r_0^{\text{тр}} x}{h_{\text{ш}}};\quad \dfrac{dr^{\text{тр}}\ \ x}{dx} = \dfrac{r_0^{\text{тр}}}{h_{\text{ш}}};$

$$\frac{r_0^{\text{тр}} x}{h_{\text{ш}}}\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2\frac{r_0^{\text{тр}}}{h_{\text{ш}}}\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{4\varphi h_{\text{ш}}}{\pi^2 r_0^{\text{тр}} x\lambda d_0^2}\ \ \gamma^2\rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}}\vartheta\ \ ;$$

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{2}{x}\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{h_{\text{ш}}{}^2}{\pi(r_0^{\text{тр}})^2 x^2\lambda}\gamma^2\rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}}\vartheta\right); \qquad (10)$$

• параболический профиль: $r^{\text{пар}}\ \ x\ = \dfrac{r_0^{\text{пар}} x^2}{h_{\text{ш}}{}^2};\quad \dfrac{dr^{\text{пар}}\ \ x}{dx} = 2\dfrac{r_0^{\text{пар}} x}{h_{ш}{}^2};$

$$\frac{r_0^{\text{пар}} x^2}{h_{\text{ш}}{}^2}\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 4\frac{r_0^{\text{пар}}}{h_{\text{ш}}{}^2}\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{4\varphi h_{\text{ш}}{}^2}{\pi^2 r_0^{\text{пар}} x^2\lambda d_0^2}\ \ \gamma^2\rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}}\vartheta\ \ ;$$

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{4}{x}\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{h_{\text{ш}}{}^4}{\pi(r_0^{\text{пар}})^2 x^4\lambda}\gamma^2\rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}}\vartheta\right); \qquad (11)$$

• трапециевидный профиль: $r^{\text{трп}}\ \ x\ = \dfrac{r_0^{\text{трп}} x}{h_{\text{ш}}} + r_e;\quad \dfrac{dr^{\text{трп}}\ \ x}{dx} = \dfrac{r_0^{\text{трп}}}{h_{\text{ш}}};$

$$\left(r_0^{\text{трп}}\frac{x}{h_{\text{ш}}} + r_e\right)\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + 2\frac{r_0^{\text{трп}}}{h_{\text{ш}}}\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{h_{\text{ш}}}{\pi(r_0^{\text{трп}} x + h_{\text{ш}} r_e)\lambda}\gamma^2\rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}}\vartheta\right);$$

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} + \frac{2}{x + h_{\text{ш}}\ \ r_e / r_0^{\text{трп}}}\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{h_{\text{ш}}{}^2}{\pi\lambda(r_0^{\text{трп}} x + h_{\text{ш}} r_e)^2}\gamma^2\rho_{\text{п}} aJa^2 c_{\text{ж}}\vartheta\right). \qquad (12)$$

Если в качестве масштаба линейных величин принять высоту ребра $h_{\text{ш}}$, а в качестве масштаба температуры – температуру ребра в основании ϑ_0, то безразмерный профиль ребра $F_2\ \ x$, безразмерная координата X, безразмерная температура θ и безразмерный радиус R будут:

$$F_2\ \ x\ = \frac{f_2\ \ x}{h_{\text{ш}}};\quad f_2\ \ x\ = h_{\text{ш}} F_2\ \ x\ ;\quad X = \frac{x}{h_{\text{ш}}};\quad x = h_{\text{ш}} X;\quad \theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0};$$

$$\vartheta = \vartheta_0\theta;\quad R = \frac{r\ \ x}{h_{\text{ш}}};\quad r\ \ x\ = h_{\text{ш}} R.$$

В результате подстановки и преобразований дифференциальное уравнение обобщенного шипа и граничные условия преобразуются

$$\left[\frac{d^2\theta}{dX^2} + \frac{2}{R}\frac{dR}{dX}\frac{d\theta}{dX}\right] = \frac{Z\gamma^2 Ja^2\theta}{R^2}\left(\frac{\rho_{\text{п}} ac_{\text{ж}}}{\pi\lambda}\right). \qquad (13)$$

Граничные условия:

$$\text{при} \quad X = 1 \quad \theta = 1; \quad \text{при} \quad X = 0 \quad \frac{d\theta}{dX} = -\frac{\mathrm{Nu}_{*e}\theta_e b}{l_*}\left(\frac{\lambda_{\text{ж}}}{\lambda}\right). \tag{14}$$

Здесь $\theta_e = \vartheta_e/\vartheta_0$; l_* − капиллярная постоянная.

Если торец ребра теплоизолирован (теплоотдача с торца шипа отсутствует), то граничные условия будут:

$$\text{при} \quad X = 1 \;\; \theta = 1; \;\; \text{при} \;\; X = 0 \;\; \frac{d\theta}{dX} = 0.$$

Дифференциальные уравнения теплопроводности шипов различного профиля в безразмерной форме:

• прямоугольный профиль: $r^{\text{пр}} \;\; x \; = r_0^{\text{пр}}$;

$$\frac{\vartheta_0}{h_{\text{ш}}^2}\frac{d^2\theta}{dX^2} = \frac{4\varphi}{\pi^2 (r_0^{\text{пр}})^2 \lambda d_0^2} \;\; \gamma^2 \rho_{\text{п}} a Ja^2 c_{\text{ж}} \vartheta_0 \theta \; . \tag{15}$$

После преобразований получим дифференциальное уравнение теплопроводности шипа прямоугольного профиля в безразмерной форме

$$\frac{d^2\theta}{dX^2} = \frac{Z\gamma^2 Ja^2\theta}{\pi (R_0^{\text{пр}})^2}\left(\frac{\rho_{\text{п}} a c_{\text{ж}}}{\lambda}\right); \tag{16}$$

• треугольный профиль: $r^{\text{тр}} \;\; x \; = \dfrac{r_0^{\text{тр}} x}{h_{\text{ш}}}$; $\quad \dfrac{dr^{\text{тр}} \;\; x}{dx} = \dfrac{r_0^{\text{тр}}}{h_{\text{ш}}}$.

После преобразований получим дифференциальное уравнение теплопроводности шипа треугольного профиля в безразмерной форме

$$\frac{d^2\theta}{dX^2} + \frac{2}{X}\frac{d\theta}{dX} = \frac{Z\gamma^2 Ja^2\theta}{\pi (R_0^{\text{тр}})^2 X^2}\left(\frac{\rho_{\text{п}} a c_{\text{ж}}}{\lambda}\right); \tag{17}$$

• параболический профиль: $r^{\text{пар}} \;\; x \; = \dfrac{r_0^{\text{пар}} x^2}{h_{\text{ш}}{}^2}$; $\quad \dfrac{dr^{\text{пар}} \;\; x}{dx} = 2\dfrac{r_0^{\text{пар}} x}{h_{\text{ш}}{}^2}$;

$$\frac{d^2\theta}{dX^2} + \frac{4}{X}\frac{d\theta}{dX} = \frac{Z\gamma^2 Ja^2\theta}{\pi (R_0^{\text{тр}})^2 X^4}\left(\frac{\rho_{\text{п}} a c_{\text{ж}}}{\lambda}\right); \tag{18}$$

• трапециевидный профиль: $r^{\text{трп}} \;\; x \; = \dfrac{r_0^{\text{трп}} x}{h_{\text{ш}}} + r_e$; $\quad \dfrac{dr^{\text{трп}} \;\; x}{dx} = \dfrac{r_0^{\text{трп}}}{h_{\text{ш}}}$;

$$\frac{d^2\theta}{dX^2} + \frac{2}{\left[X + \;\; r_e / r_0^{\text{трп}}\;\right]}\frac{d\theta}{dX} = \frac{Z\gamma^2 Ja^2\theta}{\pi \;\; R_0^{\text{трп}} \;\; {}^2\left[X + \;\; r_e / r_0^{\text{трп}}\;\right]^2}\left(\frac{\rho_{\text{п}} a c_{\text{ж}}}{\lambda}\right). \tag{19}$$

Коэффициенты теплоотдачи для шипов различного профиля и обобщенного шипа можно получить из уравнений теплопроводности.

Обобщенное дифференциальное уравнение теплопроводности шипа произвольного профиля (7), описывающее процесс передачи теплоты в ребрах в виде шипов, можно записать

$$\lambda \frac{d}{dx}\left[\pi r^2 \;\; x \;\; \frac{d\vartheta}{dx}\right]dx = \frac{4\varphi}{\pi^2 \lambda d_0^2} \;\; \gamma^2 \rho_{\text{п}} a J a^2 c_{\text{ж}} \vartheta \;\; dx. \tag{20}$$

Обобщенное дифференциальное уравнение теплопроводности из [1]

$$\lambda \frac{d}{dx}\left[f_1 \;\; x \;\; \frac{d\vartheta}{dx}\right]dx = 2\alpha_* \vartheta \pi r \;\; x \;\; dx. \tag{21}$$

Приравняв правые части уравнений (20) и (21), получим:

$$2\alpha_* \vartheta \pi r \;\; x \;\; = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \;\; \gamma^2 \rho_{\text{п}} a J a^2 c_{\text{ж}} \vartheta$$

или

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a J a^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r \;\; x}\right). \tag{22}$$

Уравнение (22) представляет собой выражение для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении жидкости на шипе произвольного профиля.

Для шипов различного профиля коэффициенты теплоотдачи будут:

- прямоугольный профиль: $r^{\text{пр}} \;\; x \;\; = r_0^{\text{пр}}$;

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a J a^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r_0^{\text{пр}}}\right); \tag{23}$$

- треугольный профиль: $r^{\text{тр}} \;\; x \;\; = \dfrac{r_0^{\text{тр}} x}{h_{\text{ш}}}$;

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a J a^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r_0^{\text{тр}}} \frac{h_{\text{ш}}}{x}\right); \tag{24}$$

- параболический профиль: $r^{\text{пар}} \;\; x \;\; = \dfrac{r_0^{\text{пар}} x^2}{h_{\text{ш}}{}^2}$;

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a J a^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r_0^{\text{пар}}} \frac{h_{\text{ш}}{}^2}{x^2}\right); \tag{25}$$

- трапециевидный профиль: $r^{\text{трп}} \;\; x \;\; = \dfrac{r_0^{\text{трп}} x}{h_{\text{ш}}} + r_e$;

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2}\left(\frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a J a^2 c_{\text{ж}}}{2\pi (r_0^{\text{трп}} x + h_{\text{ш}} r_e)} h_{\text{ш}}\right). \tag{26}$$

Исходя из условия равенства теплоотдающих площадей шипов различного профиля, определяются их коэффициенты теплоотдачи:

- прямоугольный профиль шипа: коэффициент теплоотдачи находится по уравнению (23);
- треугольный профиль:

исходя из условия $F_{\text{пр}} = F_{\text{тр}}$, получим:

$$2\pi r_0^{\text{пр}} h_{\text{ш}} = 2\pi r^{\text{тр}}\ \ x\ \ h_{\text{ш}} = 2\pi \frac{r_0^{\text{тр}} x}{h_{\text{ш}}} h_{\text{ш}} = 2\pi r_0^{\text{тр}} x; \quad r_0^{\text{пр}} h_{\text{ш}} = r_0^{\text{тр}} x; \quad r_0^{\text{тр}} = \frac{h_{\text{ш}}}{x} r_0^{\text{пр}}.$$

Проведя подстановку в (24) и преобразования, запишем:

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left(\frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a Ja^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r_0^{\text{пр}}} \right); \tag{27}$$

• параболический профиль:

исходя из условия $F_{\text{пр}} = F_{\text{пар}}$, получим:

$$2\pi r_0^{\text{пр}} h_{\text{ш}} = 2\pi r^{\text{пар}}\ \ x\ \ h_{\text{ш}} = 2\pi \frac{r_0^{\text{пар}} x^2}{h_{\text{ш}}^{\ 2}} h_{\text{ш}}; \quad r_0^{\text{пар}} = r_0^{\text{пр}} \frac{h_{\text{ш}}^2}{x^2}. \tag{28}$$

Проведя подстановку в (25) и преобразования, запишем:

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left(\frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a Ja^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r_0^{\text{пр}}} \right); \tag{29}$$

• трапециевидный профиль шипа:

исходя из условия $F_{\text{пр}} = F_{\text{трп}}$, получим:

$$2\pi r_0^{\text{пр}} h_{\text{ш}} = 2\pi \left(\frac{r_0^{\text{трп}} x + r_e h_{\text{ш}}}{h_{\text{ш}}} \right) h_{\text{ш}}; \quad r_0^{\text{пр}} h_{\text{ш}} = r_0^{\text{трп}} x + r_e h_{\text{ш}}.$$

Проведя подстановку в (26) и преобразования, запишем:

$$\alpha_* = \frac{4\varphi}{\pi d_0^2} \left(\frac{\gamma^2 \rho_{\text{п}} a Ja^2 c_{\text{ж}}}{2\pi r_0^{\text{пр}}} \right). \tag{30}$$

Здесь $r_0^{\text{пр}}$ – радиус основания шипа прямоугольного профиля площадью теплообмена, равной площади теплообмена шипов других профилей.

Умножив правую и левую части уравнения (22) на ($l_* / \lambda_{\text{ж}}$) и проведя преобразования, получим уравнение интенсивности теплоотдачи при кипении на шипах произвольного профиля в безразмерной форме

$$\text{Nu}_* = Z\gamma^2 Ja^2 \left(\frac{l_*}{2\pi r\ \ x} \right) \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right). \tag{31}$$

Используя уравнения профилей шипа и уравнения (23)–(26), получим числа Нуссельта для шипов различного профиля:

• прямоугольный профиль

$$\text{Nu}_* = Z\gamma^2 Ja^2 \left(\frac{l_*}{2\pi r_0^{\text{пр}}} \right) \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right); \tag{32}$$

• треугольный профиль

$$\mathrm{Nu}_* = Z\gamma^2 Ja^2 \left(\frac{h_{\text{ш}} l_*}{2\pi r_0^{\text{тр}} x} \right) \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right); \tag{33}$$

• параболический профиль

$$\mathrm{Nu}_* = Z\gamma^2 Ja^2 \left(\frac{h_{\text{ш}}^{\;2} l_*}{2\pi r_0^{\text{пар}} x^2} \right) \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right); \tag{34}$$

• трапециевидный профиль

$$\mathrm{Nu}_* = Z\gamma^2 Ja^2 \left(\frac{h_{\text{ш}} l_*}{2\pi (r_0^{\text{трп}} x + h_{\text{ш}} r_e)} \right) \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right). \tag{35}$$

Приведя коэффициенты теплоотдачи к одному профилю (прямоугольному), получим выражение для определения интенсивности теплоотдачи на шипе любого профиля в безразмерной форме

$$\mathrm{Nu}_* = Z\gamma^2 Ja^2 \left(\frac{l_*}{2\pi r_0^{\text{пр}}} \right) \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}}} \right), \tag{36}$$

где $Z = \dfrac{4\varphi}{\pi d_0^2}$ – число паровых пузырей на теплоотдающей поверхности.

Здесь $r_0^{\text{пр}}$ – радиус основания шипа прямоугольного профиля, боковая площадь поверхности которого равна боковой площади поверхности любого другого шипа.

ВЫВОД

Полученные уравнения показывают, что коэффициент теплоотдачи при кипении на шипах не зависит от профиля шипа, а определяется только внутренними характеристиками процесса кипения, режимными параметрами, теплофизическими свойствами жидкости и геометрическими характеристиками шипа.

ЛИТЕРАТУРА

1. О в с я н н и к, А. В. Теплообмен при кипении на развитых поверхностях / А. В. Овсянник. – Гомель: УО ГГТУ им. П. О. Сухого, 2004. – 371 с.

2. О в с я н н и к, А. В. Модель процессов теплообмена при кипении на неизотермической (поперечно-оребренной) поверхности / А. В. Овсянник // Холодильная техника и технология. – 2004. – № 2 (88). – С. 72–76.

3. Я г о в, В. В. Исследование кипения жидкостей в области низких давлений: автореф. дис. … канд. техн. наук / В. В. Ягов. – М., 1971. – 34 с.

Представлена кафедрой ПТЭ и Э Поступила 5.05.2007