

На вертикальной плоской стенке, температура которой $t_{ст} = 78 \text{ }^\circ\text{C}$, происходит пленочная конденсация водяного пара из паровоздушной смеси. Давление смеси равно $7 \cdot 10^4 \text{ Па}$, парциальное давление воздуха вдали от стенки составляет $2,264 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Паровоздушная смесь движется сверху вниз относительно пленки конденсата со скоростью 8 м/с . Пренебрегая динамическим воздействием потока смеси на стекающую пленку, найдите для сечения $x = 0,1 \text{ м}$ температуру поверхности пленки t_c , плотность отводимого стенкой теплового потока q'_c .

КИПЕНИЕ ЖИДКОСТИ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Коэффициент теплоотдачи при пузырьковом режиме кипения воды

$$\alpha = \frac{3,4 p^{0,18}}{1 - 0,0045p} q^{2/3}, \quad (6.1)$$

где p — в барах; q — Вт/м². Формула (6.1) справедлива при $1 \text{ бар} \leq p \leq 200 \text{ бар}$.

2. Первая критическая плотность теплового потока при кипении в большом объеме

$$q_{\text{кр1}} = 0,14r \sqrt{\rho_{\text{п}}} \sqrt[4]{\sigma g (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}, \quad (6.2)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{п}}$ — плотность жидкости и пара на линии насыщения.

3. Минимальный (критический) радиус пузырька

$$R_{\text{min}} = \frac{2\sigma T_s}{\rho_{\text{п}} r \Delta t}. \quad (6.3)$$

4. Коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении на горизонтальной трубе

$$\alpha = 0,62 \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{п}}^3 (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}) g r_*}{\nu_{\text{п}} \Delta t d}}, \quad (6.4)$$

где $r_* = r + 0,5c_{p\text{п}}(t_c - t_s)$ — эффективная теплота парообразования, учитывающая перегрев пара в пленке. Физические свойства перегретого пара следует выбирать по $t_{\text{ср}} = 0,5(t_c + t_s)$.

5. Коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении на поверхности вертикальной трубы (турбулентное течение пленки)

$$\alpha = 0,25 \sqrt[3]{\frac{\lambda_{\text{п}}^2 c_{\text{рп}} g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}{\nu_{\text{п}}}}. \quad (6.5)$$

Физические свойства перегретого пара выбираются так же, как в п. 4.

6. Вторая критическая плотность теплового потока при кипении в большом объеме

$$q_{\text{кр2}} = \alpha_{\text{кр2}} \Delta t_{\text{кр2}}, \quad (6.6)$$

где $\alpha_{\text{кр2}}$ — по формулам (6.4) или (6.5), а

$$\Delta t_{\text{кр2}} = 0,9(t_{\text{пр}} - t_s).$$

Приближенная формула для температуры предельного перегрева воды:

$$t_{\text{пр}} = 300 + 0,33(p - 1),$$

где давление p — в барах.

7. Коэффициент теплоотдачи при кипении насыщенной жидкости в трубе

$$\alpha = \alpha_{\text{конв}} \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_{\text{кип}}}{\alpha_{\text{конв}}}\right)^2}, \quad (6.7)$$

где $\alpha_{\text{кип}}$ определяется по формуле (6.1), а $\alpha_{\text{конв}}$ — по формулам гл. 5 для жидкости при скорости циркуляции

$$w_{\text{ц}} = \frac{4G_{\text{см}}}{\rho_{\text{ж}} \pi d^2}. \quad (6.8)$$

В (6.8) $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости при $t = t_s$, $G_{\text{см}}$ — расход парожидкостной смеси.

По трубкам парогенератора АЭС протекает теплоноситель (вода под давлением 13 МПа). Средняя температура воды $t = 285 \text{ }^\circ\text{C}$. На наружной поверхности кипит вода (рабочее тело). Давление производимого пара $p = 47 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ($t_s = 260 \text{ }^\circ\text{C}$). Скорость воды в трубках (их внутренний диаметр равен 13,2 мм) составляет 3 м/с. Найдите среднюю тепловую нагрузку q поверхности теплообмена. Известно, что сумма термических сопротивлений стенки трубы и оксидных пленок составляет $8,95 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

Решение. Рассчитаем коэффициент теплоотдачи от теплоносителя к стенке трубки. При $t = 285 \text{ }^\circ\text{C}$ для воды $\rho = 749 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 95,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\lambda = 0,578 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\text{Pr} = 0,876$. Число Рейнольдса для воды в трубке

$$\text{Re} = \frac{749 \cdot 3 \cdot 0,0132}{95,7 \cdot 10^{-6}} = 3,1 \cdot 10^5.$$

По формуле Петухова получаем $\text{Nu} = 509$. Тогда $\alpha_b = 509 \cdot 0,578 / 0,0132 = 22\,288 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Термическое сопротивление $R_\alpha = \alpha_b^{-1} = 4,48 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

Коэффициент теплоотдачи для кипящей воды

$$\alpha = \frac{3,4 \cdot 47^{0,18}}{1 - 0,0045 \cdot 47} q^{2/3} = 7,85 q^{2/3}.$$

Для определения q запишем уравнение теплопередачи:

$$q = \frac{285 - 260}{4,48 \cdot 10^{-5} + 8,95 \cdot 10^{-5} + 0,127 q^{-2/3}}.$$

Решая это уравнение, получаем $q = 136 \text{ кВт/м}^2$.

Ответ. Тепловая нагрузка $q = 136 \text{ кВт/м}^2$.

Плотность подводимого к поверхности нагрева теплового потока $q = 6 \text{ МВт/м}^2$. Возможен ли теплоотвод при пузырьковом кипении воды ($p = 4,7 \text{ МПа}$)?

Решение. Максимальная плотность теплового потока при пузырьковом кипении равна $q_{\text{кр1}}$. При $p = 4,7 \text{ МПа}$ $\rho'' = 23,7 \text{ кг/м}^3$; $\rho' = 784 \text{ кг/м}^3$; $\mu' = 1,06 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $\sigma = 2,37 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$; $r = 1,66 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$.

По формуле Кутателадзе

$$q_{\text{кр1}} = 0,14 \cdot 1,66 \cdot 10^6 \sqrt{23,7} \sqrt[4]{0,0237 \cdot 9,8(784 - 23,7)} = 4,13 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

В трубе диаметром $d = 8$ мм в условиях вынужденного движения кипит вода при $p = 11,8$ МПа. Массовый расход смеси $G = 0,0502$ кг/с. При каком паросодержании возникнет кризис теплообмена второго рода?

Решение. Массовая скорость

$$\overline{\rho v} = \frac{4 \cdot 0,0502}{\pi \cdot 0,008^2} = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

При этом значении $\overline{\rho v}$ и $p = 11,8$ МПа из табл. П.12 находим: $x_{\text{гр}}^0 = 0,45$.

Ответ. Кризис теплообмена будет в том сечении трубы, для которого $x = 0,45$.

Граничные паросодержания $x_{\text{гр}}^0$ при кипении воды в трубе диаметром $d_0 = 8$ мм*

Массовая скорость, кг/(м ² ·с)	Давление, МПа					
	2,94	4,9	6,9	9,8	11,8	13,8
750	0,75	0,70	0,75	0,60	0,55	0,45
1000	0,65	0,60	0,65	0,50	0,45	0,35
1500	0,55	0,45	0,55	0,40	0,35	0,30
2000	0,45	0,40	0,45	0,30	0,30	0,30
2500	0,40	0,35	0,40	0,30	0,30	—
3000	0,35	0,30	0,35	0,30	—	—
4000	0,30	0,25	0,30	—	—	—
5000	—	—	0,30	—	—	—

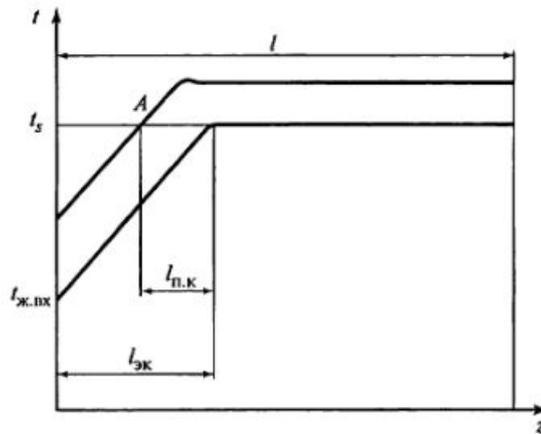
* Для труб других диаметров $x_{\text{гр}} = x_{\text{гр}}^0 (d_0/d)^{0,15}$.

В трубку диаметром $d = 8$ мм поступает вода с температурой t_c (давление $p = 13,8$ МПа). Ее массовая скорость $\bar{\rho}v = 1000$ кг/(м²·с). Найдите такие значения q , при которых в трубке не будет кризиса теплоотдачи первого рода. Определите также длину участка кипения без кризиса.

Критические тепловые потоки $q_{кр}^0$, МВт/м², при кипении воды в условиях вынужденного движения в трубе диаметром $d_0 = 8$ мм*

Давление, МПа	Массовая скорость, кг/(м ² ·с)	Массовое паросодержание						
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
13,8	750	2,05	1,70	1,40	1,20	—	—	—
	1000	2,00	1,60	1,30	1,05	—	—	—
	1500	1,95	1,45	0,90	—	—	—	—
	2000	1,95	1,30	—	—	—	—	—
	2500	1,95	1,10	0,75	0,50	0,30	—	—
	3000	1,90	1,15	0,80	0,55	0,35	—	—
	4000	2,05	1,30	0,90	0,65	0,45	—	—
	5000	2,20	1,50	1,05	0,75	0,50	—	—

В равномерно обогреваемую трубу поступает вода со следующими параметрами: $t = 240 \text{ }^\circ\text{C}$; $p = 6,42 \text{ МПа}$; $w = 0,6 \text{ м/с}$. Внутренний диаметр трубы $d = 14 \text{ мм}$, ее длина $l = 3,5 \text{ м}$. Тепловая нагрузка на внутренней поверхности $q = 150 \text{ кВт/м}^2$. Найдите длину участка подогрева воды до температуры насыщения $l_{\text{эж}}$ (длину экономайзерного участка); координату точки A начала поверхностного кипения z_A ; расходное массовое паросодержание на выходе из трубы $x_{\text{вых}}$ и температуру стенки t_c на участке кипения насыщенной жидкости



Для воды при $p = 6,42 \text{ МПа}$ $\rho = 750,4 \text{ кг/м}^3$; $r = 1540 \text{ кДж/кг}$; $\lambda = 0,581 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $\nu = 0,1245 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\text{Pr} = 0,85$. При средней температуре воды $t = 260 \text{ }^\circ\text{C}$ $c_p = 4,984 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Экранная поверхность нагрева парового котла выполнена из труб диаметром и толщиной стенки 40×5 мм. Теплопроводность стенок труб $\lambda = 40$ Вт/(м · К). Рассчитайте температуры внутренней и незагрязненной наружной поверхностей труб при движении в них кипящей воды (пузырьковый режим). Давление $p = 18,67$ МПа; массовая скорость $\bar{\rho v} = 1500$ кг/(м² · с). Считайте, что плотность теплового потока $q = 3 \cdot 10^5$ Вт/м² равномерно распределена по наружному периметру труб.

При $p = 18,67$ МПа $t_s = 360$ °С. Для воды $\lambda = 0,423$ Вт/(м · К); $\mu = 0,602 \cdot 10^{-4}$ Па · с; $Pr = 2,13$.

Рассчитайте температуру поверхности нагрева (горизонтальная трубка диаметром $d = 12$ мм) для двух случаев: а) режим кипения воды пузырьковый; б) режим кипения пленочный. Для обоих случаев $q = 1,54 \cdot 10^5$ Вт/м², $p = 0,101$ МПа.

$$\rho_n = 0,281 \text{ кг/м}^3;$$

$\lambda_n = 6,69 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м · К); $\mu_n = 28,58 \cdot 10^{-6}$ Па · с; $c_{pn} = 2,135$ кДж/(кг · К). При $t_s = 100$ °С $r = 2257$ кДж/кг и плотность воды $\rho_{ж} = 958,4$ кг/м³.

ИСПАРЕНИЕ В ПАРОГАЗОВУЮ СРЕДУ

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

1. Плотность полного (диффузионного и конвективного) потока массы паров воды при испарении в паровоздушную среду

$$J_{1c} = \frac{j_{1c}}{1 - c_{1c}}, \quad (8.1)$$

где c_{1c} — массовая концентрация водяных паров на межфазной границе; j_{1c} — плотность диффузионного потока массы, связанная с коэффициентом массоотдачи β формулой

$$j_{1c} = \beta(c_{1c} - c_{1\infty}). \quad (8.2)$$

2. Соотношение энергетического баланса

$$J_{1c} r_{1c} + q_c'' = q_c', \quad (8.3)$$

где r_{1c} — теплота парообразования при температуре насыщения, равной t_c — температуре межфазной границы; q_c' — плотность теплового потока, подводимого к межфазной поверхности со стороны жидкой фазы; q_c'' — то же, но со стороны газообразной фазы, причем

$$q_c'' = \alpha(t_c - t_{\infty}) - E_{\text{рез.с.}} \quad (8.4)$$

При отсутствии теплообмена излучением $E_{\text{рез.с.}} = 0$.

3. Диффузионные аналоги чисел Нуссельта, Грасгофа и Прандтля

$$\text{Nu}_D = \frac{\beta l_0}{\rho D}; \quad (8.5)$$

$$\text{Gr}_D = g \frac{(\rho_c - \rho_{\infty}) l_0^3}{\rho \nu^2}; \quad (8.6)$$

$$\text{Pr}_D = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{\nu}{D}. \quad (8.7)$$

4. Коэффициент диффузии в смеси водяной пар—воздух

$$D = D_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,8} \frac{p_0}{p}, \quad (8.8)$$

где $D_0 = 0,216 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ соответствует $T_0 = 273 \text{ К}$ и $p_0 = 0,101 \text{ МПа}$.

5. Теплоемкость смеси водяной пар—воздух

$$c_p = c_{p1}c_1 + c_{p2}c_2. \quad (8.9)$$

6. Коэффициент теплопроводности смеси

$$\lambda = \frac{\lambda_1 c_1}{c_1 + c_2 \Psi_{12}} + \frac{\lambda_2 c_2}{c_2 + c_1 \Psi_{21}}, \quad (8.10)$$

где λ_1 и λ_2 — коэффициенты теплопроводности пара и воздуха соответственно, а

$$\Psi_{12} = \frac{M_1/M_2}{\sqrt{8} (1 + M_1/M_2)^{1/2}} \left[1 + \left(\frac{\mu_1}{\mu_2} \right)^{1/2} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1/4} \right]^2; \quad (8.11)$$

$$\Psi_{21} = \frac{M_2/M_1}{\sqrt{8} (1 + M_2/M_1)^{1/2}} \left[1 + \left(\frac{\mu_2}{\mu_1} \right)^{1/2} \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^{1/4} \right]^2; \quad (8.12)$$

M_1 и M_2 — молекулярные массы.

7. Динамический коэффициент вязкости смеси

$$\mu = \frac{\mu_1 c_1}{c_1 + c_2 \Psi_{12}} + \frac{\mu_2 c_2}{c_2 + c_1 \Psi_{21}}, \quad (8.13)$$

где μ_1 и μ_2 — вязкость пара и воздуха соответственно.

8. Число Льюиса

$$Le = \frac{D}{a}. \quad (8.14)$$

9. Число Нуссельта для частицы сферической формы

$$Nu = Nu_D = 2. \quad (8.15)$$

Плоское влажное изделие длиной $l_0 = 0,5$ м продольно омывается потоком сухого воздуха, для которого температура $t_\infty = 20$ °С, давление $p = 0,202$ МПа, скорость $w_\infty = 1$ м/с. Температура изделия постоянна по всей длине ($t_c = 20$ °С).

Найдите коэффициент массоотдачи при $x = l_0$.

Найдите число Льюиса для влажного воздуха, температура которого $t = 20$ °С, давление $p = 0,101$ МПа, относительная влажность $\varphi = 0,7$.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ