

Тема 3 (2 час, лекция 1)

Лекция 10

Теплообмен при конденсации пара. Пленочная и капельная конденсация. Конденсация пара на вертикальных стенках. Теплоотдача при ламинарном течении пленки. Метод теоретического расчета. Влияние различных факторов на теплоотдачу. Теплоотдача при смешанном режиме стекания пленки конденсата; метод расчета; расчетные уравнения для теплоотдачи. Конденсация пара на горизонтальных трубах и пучках труб. Характер обтекания конденсатом пучков труб, изменение теплоотдачи по рядам, влияние скорости пара и других факторов. Расчет теплоотдачи при конденсации пара на горизонтальных пучках труб.



Конденсация - процесс перехода пара (газа) в жидкое или твердое состояние (фазовый переход первого рода).

При конденсации - выделение тепла фазового перехода (r – достаточно большая величина) , поэтому процесс конденсации неразрывно связан с теплообменом.

Конденсация - только при докритических состояниях газа (пара):

- путем его охлаждения
- путем сжатия до давления при котором конденсированная термодинамически более устойчивой, чем газообразная.

Конденсация либо в объеме пара (на центрах конденсации), либо на охлаждаемой поверхности теплообмена. В энергетике чаще всего имеет место поверхностная конденсация.

Полагается, что конденсирующийся пар не содержит примесей других паров или газов, т. е. является чистым.

Конденсация насыщенного или перегретого пара на твердой поверхности теплообмена происходит, если температура поверхности меньше температуры насыщения (t_s) при данном давлении.

1. Первое соприкосновении охлаждаемой стенки с паром - адсорбированный мономолекулярный слой пара;
2. Уплотнение - в тонкую жидкую пленку;
3. Рост пленки при неправильном изменении (флуктуацией) поверхности до достижения критической величины;
4. Дальнейшее монотонное увеличение толщины пленки;
5. Растекание и (или) стекание (от геометрии и ориентации поверхности) пленки конденсата под действием силы тяжести при непрерывной конденсации.

При критической толщине очень тонкая пленка (~ 1 мкм):

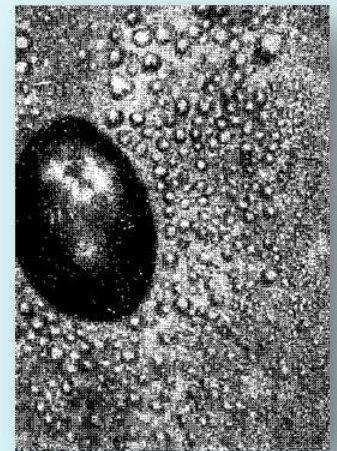
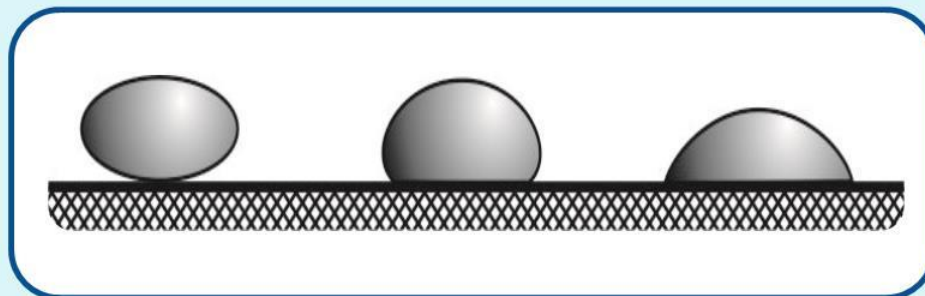
На большое количество капелек – с дальнейшей капельной конденсацией;

Сплошная устойчивая пленка - пленочная конденсация;

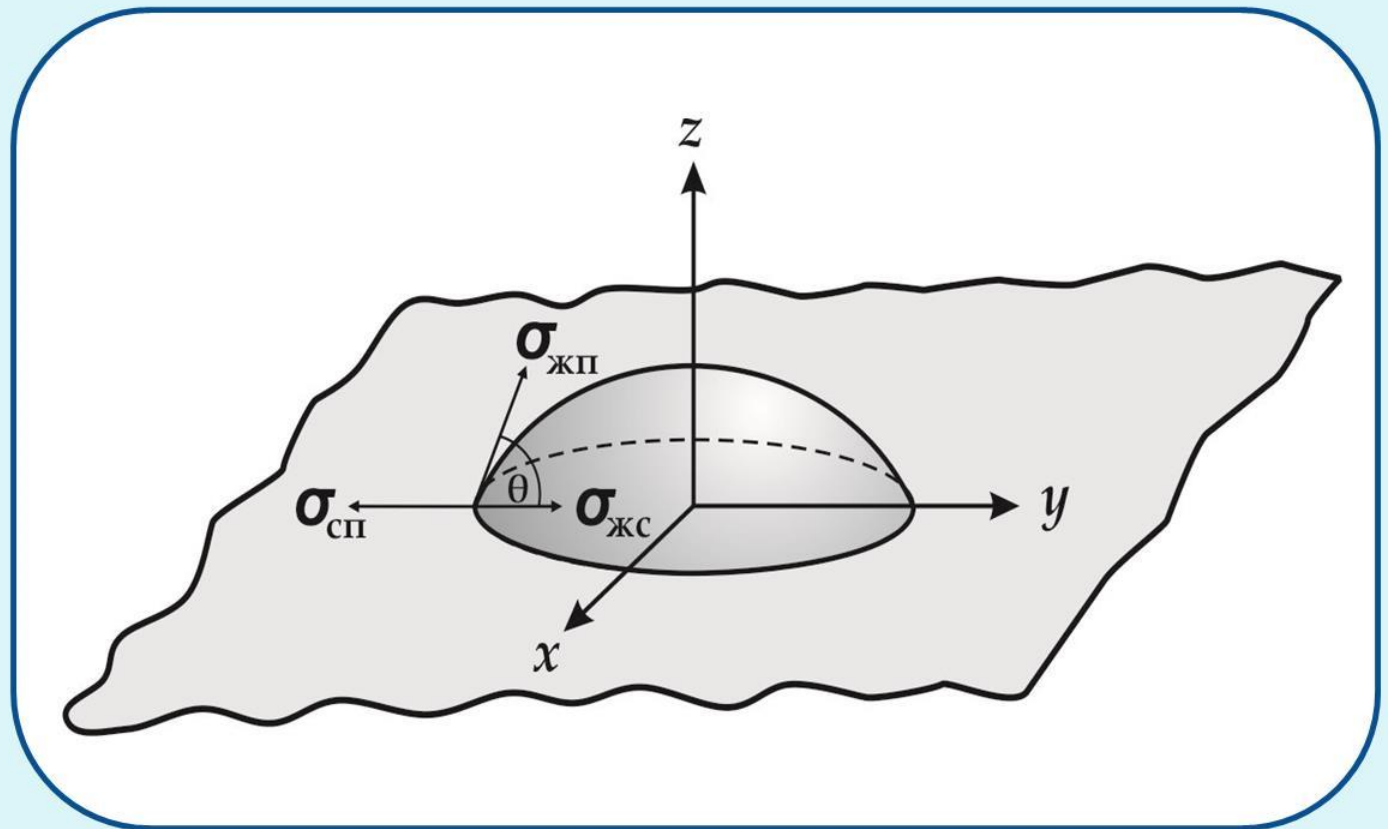
Иногда и смешанная конденсация.

Эффект смачивания или несмачивания

связан с действием сил поверхностного натяжения:



Ж – ЖИДКОСТЬ
П – пар
с - стенка

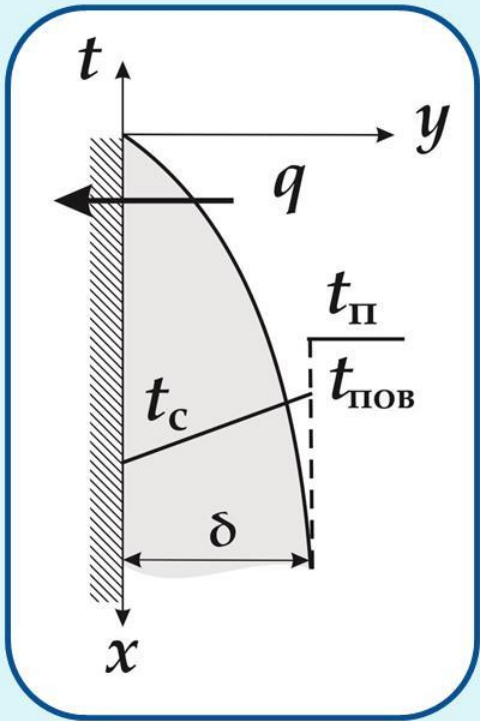


$$\sigma_{сп} = \sigma_{жс} + \cos(\theta) \cdot \sigma_{жп}$$

$\theta > \frac{\pi}{2}$ – поверхность не смачивается

Благодаря отсутствию термического сопротивления пленки конденсата интенсивность теплообмена при капельной конденсации намного выше, чем при пленочной, так коэффициент теплоотдачи в 5 – 10 раз (по некоторым оценкам в 15 – 20 раз) больше, чем при пленочной конденсации.

Для создания искусственной капельной конденсации (с целью интенсификации теплообмена) гидрофобизаторы или лнфобизаторы вносятся в пар или наносятся на поверхность теплообмена. Для устойчивой введении таких добавок необходимо осуществлять постоянно, т.к. они смываются конденсатом или растворяются в нем.



$$Q = q \cdot F = G \cdot r; \quad q = \alpha \cdot (t_{\text{II}} - t_c) = \frac{t_{\text{II}} - t_c}{R_{\text{конденсат}} + R_{\text{граница раздела фаз}}}$$

$$R_{\text{граница раздела фаз}} = \frac{t_{\text{ПОВ}} - t_{\text{II}}}{q} \quad - \text{ скоростью пара к поверхности.}$$

На поверхности раздела фаз - скачок температуры:

- разное кол.-о молекул пара удар-захват жидкостью (конденсация) и, отрыв (испарение);
- часть молекул отражается жидкостью.

Превышение захвата молекул - видимая конденсация.

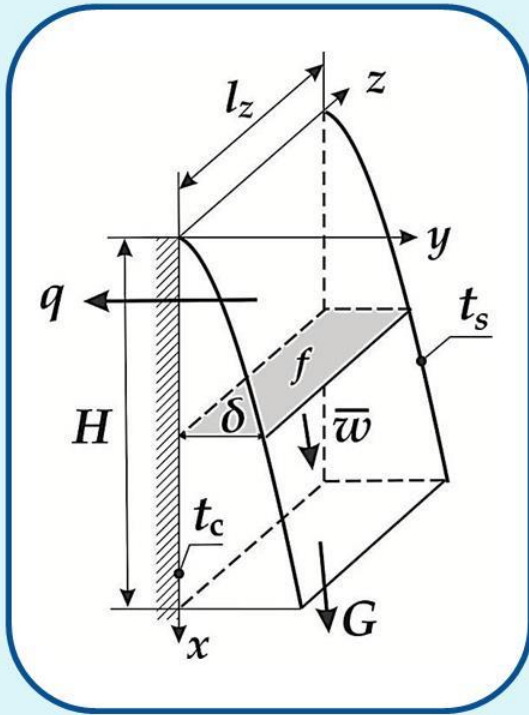
Для чистого водяного пара ... температурный скачок на границе раздела фаз отсутствует (все подошедшие

молекулы захватываются жидкостью) $\Rightarrow R_{\text{граница раздела фаз}} = 0$

Механизм образования вертикальной пленки

Пар насыщенный, неподвижный.

Перенос теплоты через пленку – только теплопроводностью.



$$Re = \frac{\bar{w} \cdot \delta}{\nu_{ж}}$$

Ламинарный, волновой и турбулентный.

Волновой - наличием волн на поверхности ламинарной конденсатной пленки.

Экспериментально : $Re_{кр} \approx 400$ (от 60 до 500).

При $Re < Re_{кр}$ - ламинарный режим (и волновой);

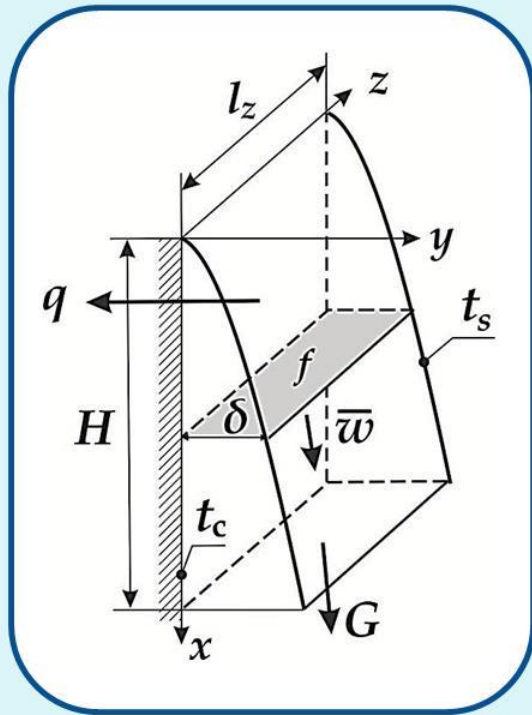
$Re \geq Re_{кр}$ - турбулентный.

$$Re_{волн} = 0.56 \left(\frac{\sigma}{\rho_{ж} \cdot g^{1/3} \nu^{4/3}} \right)^{3/11} - \text{устойчивый волновой режим с } \alpha \text{ на } 21 \% \text{ выше чисто ламинарного}$$

Получим определяемый критерий при конденсации – безразмерный коэффициент теплоотдачи.

$$\begin{aligned}
 Q &= G \cdot r = \bar{\alpha} \cdot (t_s - t_c) \cdot F = \bar{\alpha} \cdot (t_s - t_c) \cdot H \cdot l_z \\
 G &= \rho_{\text{ж}} \cdot \bar{w} \cdot f = \rho_{\text{ж}} \cdot \bar{w} \cdot \delta \cdot l_z
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} Q \\ G \end{aligned}} \right\} \rho_{\text{ж}} \cdot \bar{w} \cdot \delta \cdot l_z \cdot r = \bar{\alpha} \cdot (t_s - t_c) \cdot l_z \cdot H$$

$$\frac{\bar{w} \cdot \delta}{\rho_{\text{ж}} \cdot r} = \frac{\bar{\alpha} \cdot (t_s - t_c) \cdot H}{\rho_{\text{ж}} \cdot r} \Rightarrow \text{Re}_s = \frac{\bar{\alpha} \cdot \Delta t \cdot H}{\rho_{\text{ж}} \cdot v_{\text{ж}} \cdot r} = \frac{\bar{\alpha} \cdot \Delta t \cdot H}{\mu_{\text{ж}} \cdot r}$$



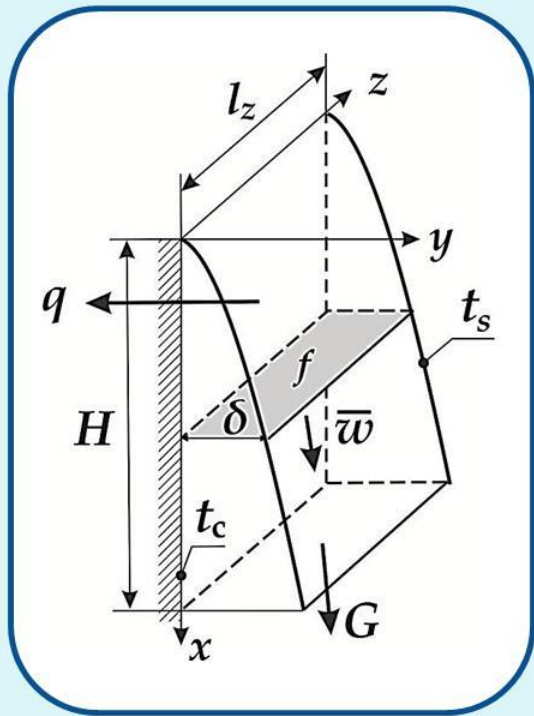
Нуссельт (1916 г.):

1. Стационар;
2. На стенке – равенство температур;
3. Трение и гравитация (сила инерции мала);
4. Теплоперенос – только поперек пленки;
5. Теплофизические параметры пленки при t_s ;
6. $\rho_{\text{ж}} \gg \rho_{\text{пара}}$;
7. q_v – внутри пленки нет;
8. Трение пленки о пар пренебрежимо мало.

$$\frac{d^2 t}{dy^2} = 0 \text{ – линейный от } t_c \text{ до } t_s$$

$$q = \alpha(t_s - t_c) = \frac{t_s - t_c}{\delta / \lambda} = \frac{\lambda}{\delta} (t_s - t_c)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta}$$



$$\underbrace{\mu \frac{d^2 w_x}{dy^2} = -\rho g : w_x|_{x=0} = 0; \quad \mu \frac{dw_x}{dy} \Big|_{x=\delta} = 0.}_{}$$

$$w_x = -\frac{\rho g}{2\mu} y^2 + \frac{\rho g \delta}{\mu} y$$

$$\bar{w}_x = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w_x dy = \frac{1}{\delta} \left(-\frac{\rho g}{2 \cdot \mu} \frac{\delta^3}{3} + \frac{\rho g \delta}{\mu} \frac{\delta^2}{2} \right) = \frac{\rho g \delta^2}{3\mu}$$

$$G = \rho \bar{w}_x \delta \cdot l_z \quad (\text{положим } l_z = 1) \quad G = \frac{\rho^2 g \delta^3}{3\mu}$$

$$dG = \frac{\rho^2 g \delta^2}{\mu} d\delta \quad - \text{ за счет конденсации}$$

$$dQ = dG \cdot r = \bar{\alpha} \cdot (t_s - t_c) \cdot dx \cdot 1 \quad (l_z = 1)$$

$$dQ = dG \cdot r = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_s - t_c) \cdot dx$$

$$\frac{\rho^2 gr}{\mu} \delta^2 d\delta = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_s - t_c) \cdot dx$$

$$\underbrace{\delta^3 d\delta = \frac{\mu\lambda(t_s - t_c)}{\rho^2 gr} \cdot dx}_{\delta(0) = 0}$$

$$\delta(x) = \sqrt[4]{\frac{4\mu\lambda(t_s - t_c)x}{\rho^2 gr}}$$

$$\alpha(x) = \frac{\lambda}{\delta(x)} = \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 gr}{4\mu(t_s - t_c)x}} \Rightarrow \bar{\alpha} = \frac{1}{H} \int_0^H \alpha(x) dx = \frac{4}{3} \cdot \alpha(H)$$

$$\bar{\alpha}_N = 0.9434 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 gr}{\mu(t_s - t_c)H}}$$

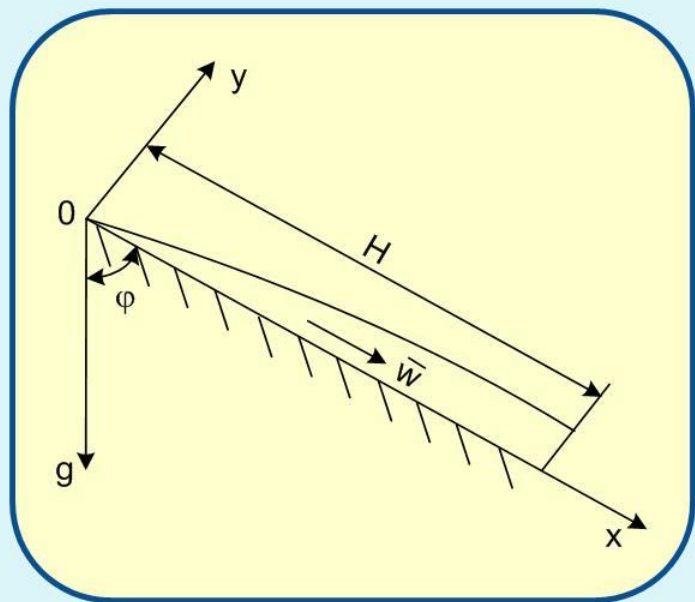
Более точное решение с учетом влияния сил инерции конвективного переноса тепла получено Г.Н. Кружилиным и Д.А. Лабунцовым, но для значений

$$K \equiv \frac{r}{c_{pж} \Delta t} \text{ (критерий Кутателадзе С.С.)} > 5 \quad \text{и} \quad 1 < Pr < 100$$

решение Нуссельта хорошо совпадает с более точными решениями.

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_N \cdot \varepsilon_t \cdot \varepsilon_{\text{волновое}} \quad \varepsilon_t = \left[\left(\frac{\lambda_c}{\lambda_{ж}} \right)^3 \cdot \left(\frac{\mu_{ж}}{\mu_c} \right)^3 \right]^{\frac{1}{8}} = \left[\left(\frac{\lambda_c}{\lambda_s} \right)^3 \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu_c} \right)^3 \right]^{\frac{1}{8}} \approx \left(\frac{Pr_s}{Pr_c} \right)^{0.25}$$

$$\varepsilon_{\text{волновое}} = Re_s^{0.04} \quad \text{или} \quad \begin{cases} Re_s < 400 & \varepsilon_{\text{волновое}} \approx 1 \\ Re_s \approx 400 & \varepsilon_{\text{волновое}} = 1.27 \end{cases}$$



$$\bar{\alpha}_{\text{накл}} = \bar{\alpha}_{\text{вертик}} \cdot \sqrt[4]{\cos(\varphi)}$$

Решение Нуссельта может быть приведено с помощью приведенной длины Z

$$Z = H \cdot \left(\frac{g}{v_{\text{ж}}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\lambda_{\text{ж}} \cdot \Delta t}{\mu_{\text{ж}} \cdot r} = \text{Ga}^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\lambda_{\text{ж}} \cdot \Delta t}{\mu_{\text{ж}} \cdot r}$$

Полагают $\text{ж} \equiv \text{s}$, учитывая (приблизительно) волновое движение и $\varepsilon_t \approx \left(\frac{\text{Pr}_s}{\text{Pr}_c} \right)^{0.25}$

$$\text{Re}_s = \frac{\bar{\alpha} \cdot \Delta t \cdot H}{\mu_s \cdot r}$$

$$\text{Re}_s = 0.95 \cdot Z_s^{0.78} \varepsilon_t,$$

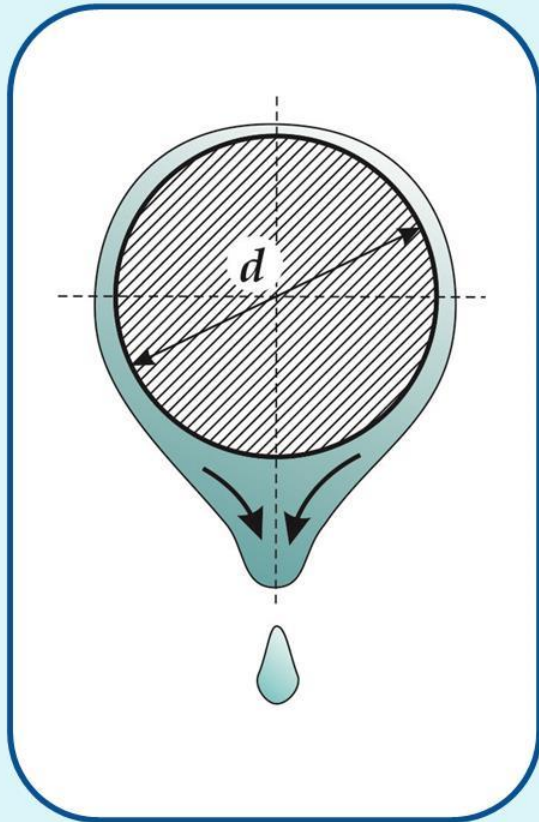
$$Z_s < 2300$$

$$\text{Re}_s = \left[89 + 0,024 \cdot \left(\frac{\text{Pr}_s}{\text{Pr}_c} \right)^{0.25} \cdot \text{Pr}_s^{0.5} \cdot (Z_s - 2300) \right]^{\frac{4}{3}},$$

$$Z_s > 2300$$

При $Z_s = 2300$ получаем $\text{Re} = 89^{4/3} \approx 400$

Горизонтальная труба



$$d < 20 \cdot \left(\frac{\sigma_{\text{ж}}}{g \cdot \rho_{\text{ж}}} \right)^{0.5}$$

$$d \gg \delta$$

$$\bar{\alpha}_{\text{N}} = 0.7284 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 g r}{\mu (t_s - t_c) d}}$$

$$Z_s < 3900$$

$$\text{Re}_s = 3.25 \cdot Z_s^{0.75}$$

$$\text{Re}_s = \frac{\bar{\alpha} \cdot \Delta t \cdot 2 \cdot \pi \cdot d}{\mu_s \cdot r}$$

$$Z_s = \pi \cdot \frac{d}{2} \cdot \left(\frac{g}{v_s^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\lambda_s \cdot \Delta t}{\mu_s \cdot r}$$

Влияние влажности и перегрева пара

Для влажного насыщенного водяного пара $Q = G \cdot r \cdot x$

x – степень сухости пара

Для перегретого пара $Q = G \cdot (r + q_{\text{пер}}) = G \cdot (r + c_{\text{рп}} \cdot \Delta t_{\text{пер}}) = G \cdot [r + (h - h'')]$

Влияние неконденсирующихся газов в паре

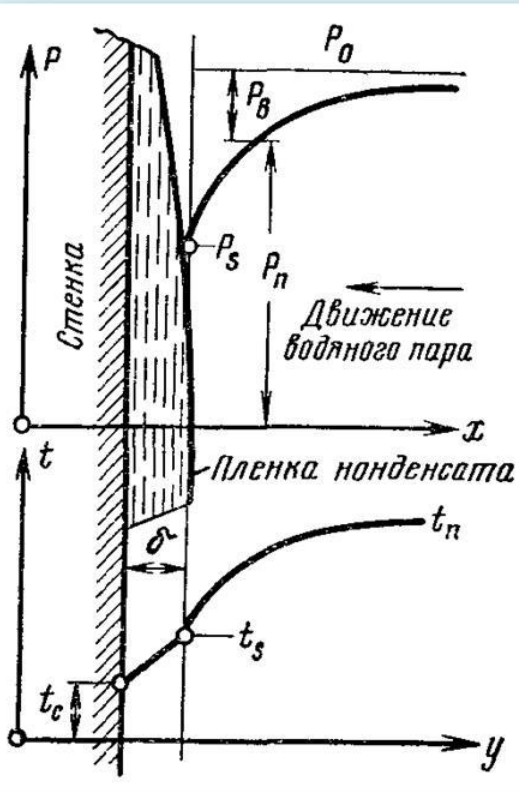
Если в водяном паре присутствуют неконденсирующиеся газы (например, воздух), то теплоотдача резко снижается. В этом случае воздух на поверхности пленки конденсата создает воздушную прослойку, препятствующую конденсации пара.

Экспериментально получено, что присутствие в паре 1% воздуха уменьшает теплоотдачу приблизительно в два раза.

Влияние плотности пара

$$\rho_{\text{пар}} = O(\rho_{\text{ж}})$$

$$Ga \leftarrow Ar \equiv \frac{gH^3}{\nu_{\text{ж}}^2} \left(1 - \frac{\rho_{\text{пар}}}{\rho_{\text{ж}}} \right)$$



Влияние скорости движения пара

Движение пара совпадает по направлению с движением пленки конденсата, толщина пленки уменьшается, а коэффициент теплоотдачи увеличивается.

При встречном движении пара и пленки конденсата толщина пленки увеличивается, коэффициент теплоотдачи уменьшается.

При значениях $\rho_{\text{пар}} w^2 > 1$ необходимо учитывать влияние скорости движения пара на теплоотдачу.

Чаще всего относится к одиночной горизонтальной трубе и трубному горизонтальному пучку: бо́льшие скорости - бо́льшее влияние.

Конденсация движущегося пара на одиночной трубе

$$\frac{\bar{\alpha}}{\alpha_N} = \left(1 + 3.62 \chi^4 \frac{\text{Fr}}{\text{Pr}_s K}\right)^{1/4}$$

$$\text{Fr} = \frac{w^2}{g d}; \quad K = \frac{r}{c_{p_{\text{ж}}} (t_s - t_c)};$$

$$\chi = 0.9 \left[1 + \left(\text{Pr}_s \frac{K}{R} \right)^{1/3} \right]; \quad R = \left(\frac{\rho_{\text{ж}} \mu_{\text{ж}}}{\rho_{\text{п}} \mu_{\text{п}}} \right)^{0.5} .$$

Для пучка труб при движении сверху вниз

$$\frac{\bar{\alpha}}{\alpha_N} = 25.7 \cdot \Pi^{0.08} \text{Nu}_s^{-0.5};$$

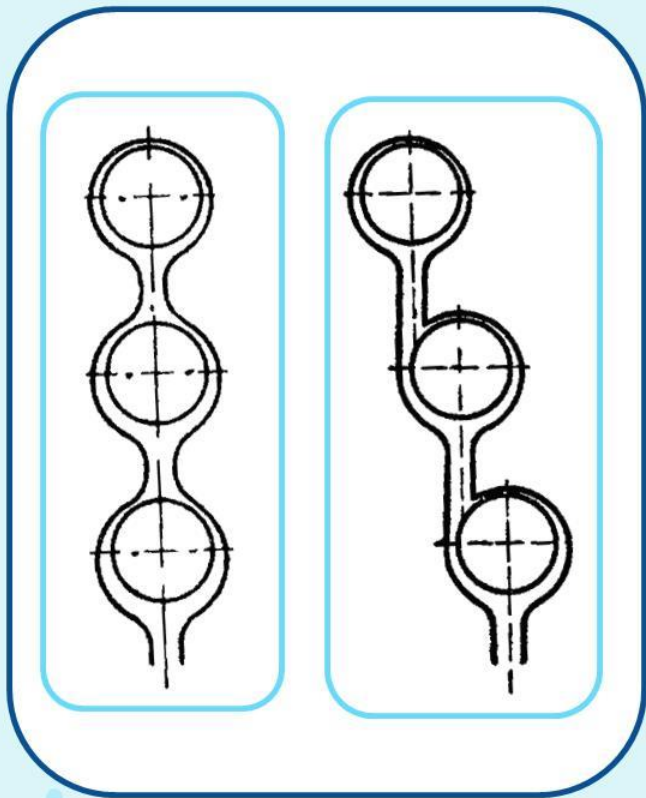
$$\Pi = \frac{w^2}{g \cdot d} \frac{\rho_{\text{пар}}}{\rho_s}; \quad \text{Nu}_s = \frac{\alpha_N d}{\lambda_s};$$

$$p_{\text{пар}} = 3.2 \div 89 \text{ кПа}; \quad \Delta t = 0.6 \div 12^\circ \text{C}; \quad \text{Re} \equiv \frac{\rho_{\text{пар}} w d}{\mu_s} = 46 \div 864.$$

Конденсация движущегося пара на горизонтальном пучке труб

Тепло-и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник /Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

- Частичная конденсация - скорость пара уменьшается;
 - Конденсат стекает - толщина пленки конденсата с увеличением номера ряда растет за счет с верхних рядов.
- Все это уменьшает коэффициент теплоотдачи.



$$\frac{\bar{\alpha}_{\text{пучка}}}{\bar{\alpha}_N} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_N} \cdot \frac{0.84 \varepsilon}{[1 - (1 - \varepsilon)^{0.84}] n^{0.70}};$$
$$\varepsilon = \frac{G_{\text{ВХ}} - G_{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{ВХ}}};$$

n – число рядов труб

по высоте коридорного

или половина числа рядов труб

по высоте шахматного.

Капельная конденсация пара

Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен: Учебное пособие для ВУЗов/ Ф.Ф. Цветков, Б.А. Григорьев – 3-е изд., перераб. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 550 с., ил.

В общем случае при капельной конденсации на поверхности теплообмена возможно одновременное существование и отдельных капель, и пленки конденсата.

В настоящее время не разработана достаточно строгая теория теплообмена при капельной конденсации, поэтому для инженерных расчетов используют уравнения подобия теплообмена :

$$\text{Nu}_* = 3.2 \cdot 10^{-4} \text{Re}_*^{0.84} \Pi_*^{1.16} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}, \quad 8 \cdot 10^{-4} \leq \text{Re}_* \leq 3.3 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Nu}_* = 5 \cdot 10^{-6} \text{Re}_*^{-1.16} \Pi_*^{1.16} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}, \quad 3.3 \cdot 10^{-3} \leq \text{Re}_* \leq 1.8 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{Nu}_* = \frac{\bar{\alpha}R}{\lambda_s} = \frac{\bar{\alpha} \cdot 2 \cdot \sigma \cdot T_s}{\lambda_s \cdot \rho_s \cdot r \cdot \Delta t}; \quad \text{Re}_* = \frac{\lambda_s \cdot \Delta t}{\rho_s \cdot v_s}; \quad \Pi_* = \frac{2 \cdot \xi \cdot \sigma^2 \cdot T_s}{r \cdot (\rho_s \cdot v_s)^2}; \quad \xi = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} \right).$$

Физические свойства воды на линии насыщения

t °C	p бар	ρ кг/м ³	h $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$a\cdot 10^8$ м ² /с	$\mu\cdot 10^6$ Па·с	$\nu\cdot 10^6$ м ² /с	$\beta\cdot 10^4$ К ⁻¹	$\sigma\cdot 10^4$ Н/м	Pr
10	0,0123	999,7	41,99	4,193	0,586	14,0	1299,2	1,300	0,70	744	9,3
20	0,0234	998,3	83,86	4,182	0,602	14,4	1001,5	1,003	1,82	729	6,96
30	0,0424	995,8	125,66	4,179	0,617	14,8	797,0	0,800	3,21	712	5,40
40	0,0737	992,3	167,45	4,179	0,630	15,2	651,3	0,656	3,87	695	4,32
50	0,123	988,0	209,26	4,181	0,643	15,6	544,0	0,551	4,49	678	3,54
60	0,199	983,2	251,09	4,185	0,653	15,9	463,0	0,471	5,11	661	2,97
70	0,312	977,7	292,97	4,190	0,662	16,2	400,5	0,410	5,70	644	2,54
80	0,474	971,6	334,92	4,197	0,669	16,4	351,0	0,361	6,32	627	2,20
90	0,701	965,2	376,94	4,205	0,675	16,6	311,3	0,322	6,95	609	1,94
100	1,013	958,1	419,06	4,216	0,680	16,8	279,0	0,291	7,52	590	1,73
110	1,433	950,7	461,3	4,229	0,683	17,0	252,2	0,265	8,08	570	1,56
120	1,985	942,7	503,7	4,245	0,685	17,1	230,0	0,244	8,64	550	1,43
130	2,701	934,6	546,3	4,263	0,687	17,2	211,0	0,226	9,19	529	1,31
140	3,614	925,8	589,1	4,285	0,687	17,3	195,0	0,211	9,72	508	1,22
150	4,760	916,8	632,2	4,310	0,686	17,4	181,0	0,197	10,3	487	1,14
160	6,180	907,3	675,5	4,339	0,684	17,4	169,0	0,186	10,7	466	1,07
170	7,920	897,3	719,1	4,371	0,681	17,4	158,5	0,177	11,3	444	1,02
180	10,03	886,9	763,1	4,408	0,676	17,3	149,3	0,168	11,9	422	0,97
190	12,55	876,0	807,5	4,449	0,671	17,2	141,2	0,161	12,6	400	0,94
200	15,55	864,7	852,4	4,497	0,664	17,1	133,8	0,155	13,3	378	0,91

$t, ^\circ\text{C}$	p бар	ρ кг/м ³	h $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\lambda\cdot 10^2$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$a\cdot 10^6$ м ² /с	$\mu\cdot 10^6$ Па·с	$\nu\cdot 10^6$ м ² /с	Pr
10	0,0123	0,00934	2519,4	2477,4	1,868	1,82	1043	8,45	904,7	0,87
20	0,0234	0,0173	2537,7	2453,8	1,874	1,88	579,9	8,85	511,6	0,88
30	0,0424	0,0304	2555,9	2430,2	1,883	1,94	338,9	9,26	304,6	0,90
40	0,0737	0,0512	2574,0	2406,5	1,894	2,01	207,3	9,66	188,7	0,91
50	0,123	0,0830	2591,8	2382,5	1,907	2,09	132,0	10,0	120,5	0,92
60	0,199	0,130	2609,5	2358,4	1,924	2,16	86,36	10,5	80,77	0,94
70	0,312	0,198	2626,8	2333,8	1,944	2,23	57,94	10,9	55,05	0,95
80	0,474	0,293	2643,8	2643,8	1,969	2,31	40,04	11,3	38,57	0,96
90	0,701	0,423	2660,3	2660,3	1,999	2,39	28,26	11,7	27,66	0,98
100	1,013	0,598	2676,3	2257,2	2,034	2,48	20,39	12,1	20,23	0,99
110	1,433	0,826	2691,8	2230,5	2,075	2,58	15,05	12,4	15,01	1,00
120	1,985	1,121	2706,6	2202,9	2,124	2,67	11,21	12,8	11,42	1,02
130	2,701	1,496	2720,7	2174,4	2,180	2,78	8,524	13,2	8,82	1,04
140	3,614	1,966	2734,0	2144,9	2,245	2,88	6,525	13,5	6,87	1,05
150	4,760	2,547	2746,3	2114,1	2,320	3,00	5,077	13,9	5,46	1,08
160	6,180	3,259	2757,7	2082,2	2,406	3,13	3,992	14,2	4,36	1,09
170	7,920	4,122	2768,0	2048,9	2,504	3,26	3,158	14,6	3,54	1,12
180	10,03	5,160	2777,1	2014,0	2,615	3,41	2,527	14,9	2,89	1,14
190	12,55	6,398	2784,9	1977,4	2,741	3,57	2,036	15,3	2,39	1,17
200	15,55	7,865	2791,4	1939,0	2,883	3,75	1,654	15,6	1,98	1,20