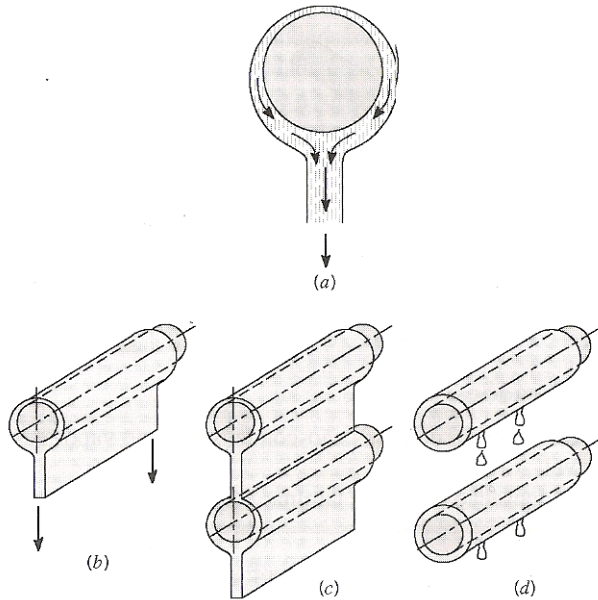


TRANSMISSÃO DE CALOR II

Prof. Eduardo C. M. Loureiro, DSc.

CONDENSAÇÃO

CONDENSAÇÃO EM FILME SOBRE ESFERAS E TUBOS



O coeficiente convectivo médio pode ser representado por:

$$\bar{h}_D = C \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4}$$

onde $C = 0,826$ para esferas (a) e $C = 0,729$ para tubos (b). As propriedades do líquido são tomadas na temperatura de filme e as do vapor na temperatura de saturação.

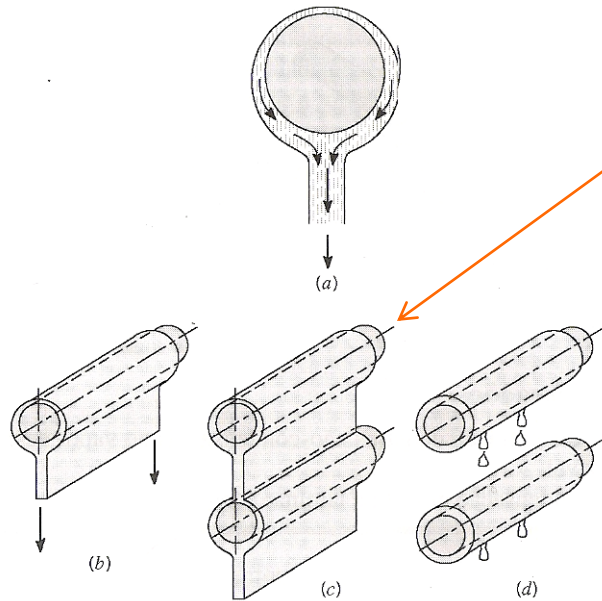
Para uma fileira vertical com N tubos horizontais (c), o coeficiente convectivo médio (nos N tubos) pode ser calculado por:

$$\bar{h}_{D,N} = 0,729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{N \mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4}$$

Ou seja, $\bar{h}_{D,N} = \bar{h}_D N^{-1/4}$, onde \bar{h}_D é o coeficiente de transferência de calor para o primeiro tubo (superior). Tal configuração é usada com frequência no projeto de condensadores.

CONDENSAÇÃO

CONDENSAÇÃO EM FILME SOBRE ESFERAS E TUBOS



Para a matriz de tubos , admite-se que o condensado escoe na direção descendente na forma de uma lâmina contínua e despreza-se a transferência de calor para a lâmina de condensado entre os tubos, que intensifica a troca de calor. Para $Ja < 0,1$ esta intensificação é menor que 15%.

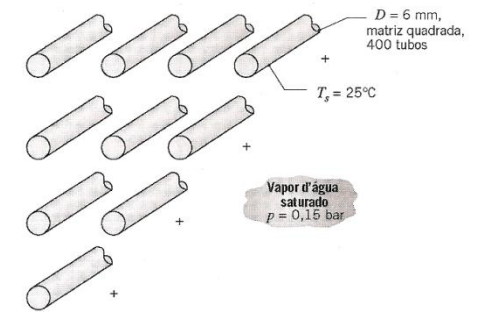
O gotejamento reduz a espessura do filme de condensado, provendo turbulência, e intensifica a troca de calor.

CONDENSAÇÃO

CONDENSAÇÃO EM FILME SOBRE ESFERAS E TUBOS

EXEMPLO

Um condensador de vapor d'água possui uma matriz quadrada composta por 400 tubos, cada um com 6 mm de diâmetro. Se os tubos estão expostos ao vapor saturado a uma pressão de **0,15 bar** e a temperatura superficial dos tubos é mantida a **25°C**, qual é a taxa de condensação do vapor por unidade de comprimento dos tubos?



Dados do vapor saturado ,
estimados a $p = 0,15 \text{ bar}$,
interpolando os dados da tabela:

$$T_{sat} = 54^\circ \text{C}$$

$$\rho_v = \frac{1}{v_v} = 0,098 \text{ kg/m}^3$$

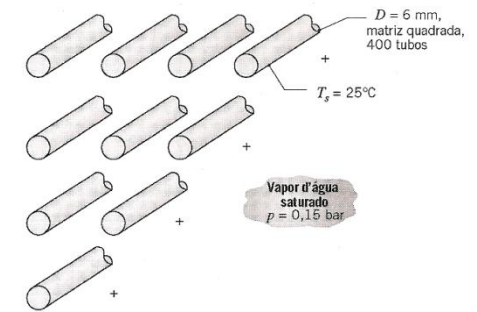
$$h_{fg} = 2373 \text{ kJ/kg}$$

TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada^a

Temperatura, T (K)	Pressão, p (bar) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m ²)		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_s \cdot 10^6$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_s \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura, T (K)
		$v_f \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,f}$	$c_{p,g}$	$\mu_f \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_f \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_f	Pr_g			
273.15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273.15
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,5	295
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,1	300
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,6	305
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,9	310
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,4	315
320	0,1053	1,011	13,98	2390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,7	320
325	0,1351	1,013	11,06	2378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,2	325
330	0,1719	1,016	8,82	2366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,0	330
335	0,2167	1,018	7,09	2354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,5	335
340	0,2713	1,021	5,74	2342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,0	340
345	0,3372	1,024	4,683	2329	4,191	1,941	389	10,89	668	22,6	2,45	0,933	64,1	595,4	345
350	0,4163	1,027	3,846	2317	4,195	1,954	365	11,09	668	23,0	2,29	0,942	63,2	624,2	350
355	0,5100	1,030	3,180	2304	4,199	1,968	343	11,29	671	23,3	2,14	0,951	62,3	652,3	355
360	0,6209	1,034	2,645	2291	4,203	1,983	324	11,49	674	23,7	2,02	0,960	61,4	697,9	360
365	0,7514	1,038	2,212	2278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,1	365
370	0,9040	1,041	1,861	2265	4,214	2,017	289	11,89	679	24,5	1,80	0,978	59,5	728,7	370
373.15	1,0133	1,044	1,679	2257	4,217	2,029	279	12,02	680	24,8	1,76	0,984	58,9	750,1	373.15
375	1,0815	1,045	1,574	2252	4,220	2,036	274	12,09	681	24,9	1,70	0,987	58,6	761	375
380	1,2869	1,049	1,337	2239	4,226	2,057	260	12,29	683	25,4	1,61	0,999	57,6	788	380
385	1,5233	1,053	1,142	2225	4,232	2,080	248	12,49	685	25,8	1,53	1,004	56,6	814	385
390	1,794	1,058	0,980	2212	4,239	2,104	237	12,69	686	26,3	1,47	1,013	55,6	841	390
400	2,455	1,067	0,731	2183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400

CONDENSAÇÃO

CONDENSAÇÃO EM FILME SOBRE ESFERAS E TUBOS EXEMPLO



Um condensador de vapor d'água possui uma matriz quadrada composta por 400 tubos, cada um com 6 mm de diâmetro. Se os tubos estão expostos ao vapor saturado a uma pressão de **0,15 bar** e a temperatura superficial dos tubos é mantida a **25°C**, qual é a taxa de condensação do vapor por unidade de comprimento dos tubos?

Dados do líquido saturado, à temperatura de filme, T_f , interpolando os dados da tabela:

$$T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2} = \frac{54 + 25}{2} = 39,5^\circ C = 312,5K$$

$$\rho_l = 992 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu_l = 663 \times 10^{-6} \frac{Ns}{m^2}$$

$$k_l = 0,631 \frac{W}{mK}$$

$$c_{p,l} = 4178 \frac{J}{kgK}$$

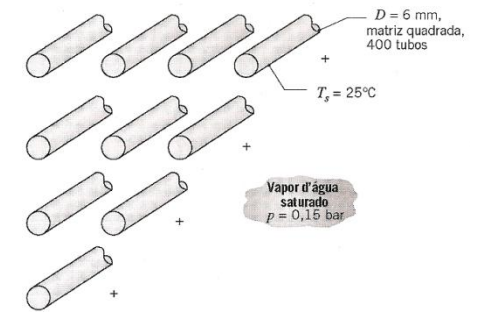
TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada*

Temperatura, T (K)	Pressão, p (bar) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m ²)		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_s \cdot 10^3$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_s \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	Temperatura, T (K)
		$v_e \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,e}$	$c_{p,g}$	$\mu_e \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_e \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	Pr_e	Pr_g			
273,15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273,15
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,5	295
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,1	300
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,6	305
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,9	310
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,4	315
320	0,1053	1,011	13,98	2390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,7	320
325	0,1351	1,013	11,06	2378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,2	325
330	0,1719	1,016	8,82	2366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,0	330
335	0,2167	1,018	7,09	2354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,5	335
340	0,2713	1,021	5,74	2342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,0	340
345	0,3372	1,024	4,683	2329	4,191	1,941	389	10,89	668	22,6	2,45	0,933	64,1	595,4	345
350	0,4163	1,027	3,846	2317	4,195	1,954	365	11,09	668	23,0	2,29	0,942	63,2	624,2	350
355	0,5100	1,030	3,180	2304	4,199	1,968	343	11,29	671	23,3	2,14	0,951	62,3	652,3	355
360	0,6209	1,034	2,645	2291	4,203	1,983	324	11,49	674	23,7	2,02	0,960	61,4	697,9	360
365	0,7514	1,038	2,212	2278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,1	365
370	0,9040	1,041	1,861	2265	4,214	2,017	289	11,89	679	24,5	1,80	0,978	59,5	728,7	370
373,15	1,0133	1,044	1,679	2257	4,217	2,029	279	12,02	680	24,8	1,76	0,984	58,9	750,1	373,15
375	1,0815	1,045	1,574	2252	4,220	2,036	274	12,09	681	24,9	1,70	0,987	58,6	761	375
380	1,2869	1,049	1,337	2239	4,226	2,057	260	12,29	683	25,4	1,61	0,999	57,6	788	380
385	1,5233	1,053	1,142	2225	4,232	2,080	248	12,49	685	25,8	1,53	1,004	56,6	814	385
390	1,794	1,058	0,980	2212	4,239	2,104	237	12,69	686	26,3	1,47	1,013	55,6	841	390
400	2,455	1,067	0,731	2183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400

CONDENSAÇÃO

CONDENSAÇÃO EM FILME SOBRE ESFERAS E TUBOS

EXEMPLO



Um condensador de vapor d'água possui uma matriz quadrada composta por 400 tubos, cada um com 6 mm de diâmetro. Se os tubos estão expostos ao vapor saturado a uma pressão de **0,15 bar** e a temperatura superficial dos tubos é mantida a **25°C**, qual é a taxa de condensação do vapor por unidade de comprimento dos tubos?

Calculando o número de Jacob:

$$Ja = \frac{c_{p,l}(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} = \frac{4178(54 - 39,5)}{2373 \times 10^3} = 0,051 \quad \Rightarrow \quad h'_{fg} = h_{fg}(1 + 0,68Ja) = 2373 \times 10^3(1 + 0,68 \times 0,051) = 2455 \frac{kJ}{kg}$$

$$\bar{h}_{D,N} = 0,729 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)k_l^3 h'_{fg}}{N\mu_l(T_{sat} - T_s)D} \right]^{1/4} \quad \bar{h}_{D,N} = 0,729 \left[\frac{9,8 \times 992(992 - 0,098) \times 0,631^3 \times 2,455 \times 10^6}{20 \times 663 \times 10^{-6}(54 - 25) \times 0,006} \right]^{1/4} = 5194 \frac{W}{m^2 K}$$

$\bar{h}_{D,N}$ é a taxa média nos vinte tubos ($N = 20$) verticais. Desta forma, a taxa de condensação média em um único tubo é dada por:

$$\dot{m}'_1 = \frac{q'_1}{h'_{fg}} = \frac{\bar{h}_{D,N}(\pi D)(T_{sat} - T_s)}{h'_{fg}} = \frac{5194(\pi \times 0,006)(54 - 25)}{2,455 \times 10^6} = 1,16 \times 10^{-3} \frac{kg}{s \cdot m}$$

Para toda a matriz, a taxa de condensação por unidade de comprimento dos tubos é de:

$$\dot{m}' = 400 \times \dot{m}'_1 = 400 \times 1,16 \times 10^{-3} = 0,464 \frac{kg}{s \cdot m}$$

CONDENSAÇÃO

CONDENSAÇÃO EM FILME NO INTERIOR DE TUBOS HORIZONTAIS

Se a velocidade de escoamento do vapor no interior do tubo for pequena a condensação ocorre como mostrado na figura (a). O condensado escoa da parte superior do tubo para a parte inferior e, posteriormente, na direção longitudinal junto com o vapor. Para baixas velocidades do escoamento do vapor caracterizadas por:

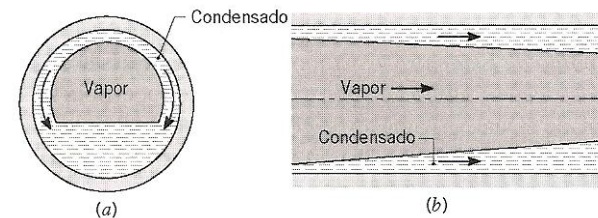
$$Re_{v,ent} = \left(\frac{\rho_v u_v D}{\mu_v} \right)_{ent} < 35000$$

(o termo *ent* se refere à entrada do tubo) Chato (1962) recomenda uma expressão na forma:

$$\bar{h}_D = 0,555 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) D} \right]^{1/4}$$

Onde, para esse caso, o calor latente modificado é:

$$h'_{fg} = h_{fg} + \frac{3}{8} c_{p,l} (T_{sat} - T_s)$$



Para altas velocidades, o regime se torna anular (b). O vapor ocupa a parte central, que diminui de diâmetro à medida em que a espessura da camada de condensado aumenta na direção do escoamento.