3.3.1. Condensarea vaporilor

Prin condensarea vaporilor, pe suprafața de contact se formează lichid, denumit şi condens, care este, în cele mai multe cazuri, îndepărtat sub acțiunea gravitației sau a vaporilor în mişcare.

După modul de formare a condensului, se deosebesc două tipuri de condensare: **peliculară** şi **nucleică** (cu picături).

Condensarea peliculară este caracterizată de formarea unei pelicule de condens pe întreaga suprafață de contact. Grosimea peliculei depinde de debitul de vapori care condensează şi de viteza cu care condensul este îndepărtat de pe suprafață. În acest caz se spune că lichidul (condensul) udă suprafața.

Condensarea nucleică este caracterizată de formarea de picături de condens pe suprafața de schimb de căldură. O mare parte din suprafață rămâne neacoperită de lichid şi deci, schimbul de căldură direct dintre vapori şi suprafață este foarte intens, ajungând de circa 10 ori mai mare decât în cazul condensării peliculare. În acest caz se spune că lichidul (condensul) nu udă suprafața.

Atunci când anumite porțiuni ale suprafeței sunt acoperite cu picături iar altele cu pelicule de condens avem de-a face cu o **condensare mixtă**.

3.3.1.1. Condensarea peliculară pe suprafețe verticale

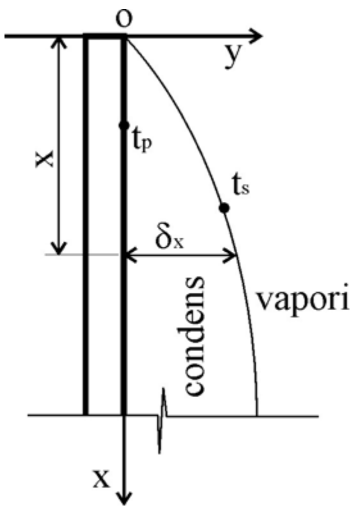

Fig. 3.30: Condensarea pe o suprafață verticală

Se consideră un fluid incompresibil în repaus, aflat în stare de vapori, care este pus instantaneu în contact cu o suprafață verticală netedă având temperatura mai mică decât cea de saturație a vaporilor. Pe suprafață se formează o peliculă de condens având proprietățile fizice constante şi care, sub acțiunea forțelor gravitaționale, curge şi îşi măreşte grosimea în lungul plăcii. Temperatura la interfața dintre condens şi vapori este egală cu temperatura de saturație. Forțele de inerție în pelicula de condens sunt neglijabile în raport cu cele de frecare şi cele de greutate.

Ipoteze: $t_p < t_s$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho}{\partial y} = \frac{\partial \rho}{\partial z} = 0$$

$$\rho,\ c_p,\ \lambda,\ \nu,\ a \neq f(t)$$

$$w_y = w_z = 0$$

<u>Ecuația de continuitate</u>:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial w_x}{\partial x} = 0$$

Soluția generală a vitezei în interiorul peliculei de condens se determină prin integrarea <u>ecuației de mişcare pe direcția *x*</u>:

$$w_x \cdot \frac{\partial w_x}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} \right) + g$$

Gradientul presiunii pe verticală este dat de forțele masice gravitaționale.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_v \cdot g$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \cdot \rho_v \cdot g + \nu \cdot \frac{d^2 w_x}{d y^2} + g \quad \rightarrow \quad g \cdot \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho} \right) + \nu \cdot \frac{d^2 w_x}{d y^2} = 0$$

<u>Observație</u>: Densitatea vaporilor este mult mai mică decât cea a fazei lichide (condensului).

$$\rho_v << \rho \quad \rightarrow \quad \frac{\rho_v}{\rho} \cong 0$$

$$g + \nu \cdot \frac{d^2 w_x}{d y^2} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{d^2 w_x}{d y^2} = -\frac{g}{\nu} \quad \rightarrow \quad \frac{d w_x}{d y} = -\frac{g}{\nu} \cdot y + C_1$$

$$w_x = -\frac{g}{2\nu} \cdot y^2 + C_1 \cdot y + C_2$$

Soluția particulară a vitezei, w_x, se determină prin impunerea condințiilor la limită:

la $y = 0 \rightarrow w_x = 0$

la $y = \delta_x \rightarrow w_x = w_{max}$; $\quad \dfrac{d\,w_x}{d\,y} = 0$

$$w_x\big|_{y=0} = C_2 = 0 \quad \rightarrow \quad C_2 = 0$$

$$\left.\frac{d\,w_x}{d\,y}\right|_{y=\delta_x} = -\frac{g}{\nu}\cdot\delta_x + C_1 = 0 \quad \rightarrow \quad C_1 = \frac{g\cdot\delta_x}{\nu}$$

$$w_x = -\frac{g}{2\nu}\cdot y^2 + \frac{g\cdot\delta_x}{\nu}\cdot y \quad \rightarrow \quad w_x = \frac{g\cdot{\delta_x}^2}{2\nu}\cdot\left(\frac{2\cdot y}{\delta_x} - \frac{y^2}{{\delta_x}^2}\right)$$

Remarcă: Distribuția vitezei în interiorul peliculei de condens este de formă parabolică.

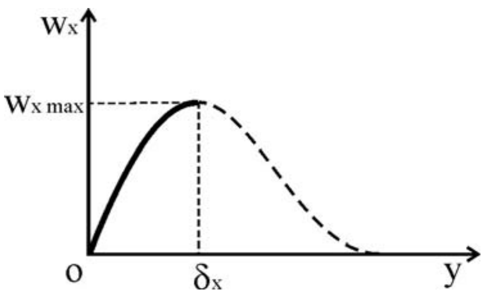

Fig. 3.31: Distribuția vitezei în pelicula de condens

Viteza maximă are loc la interfața dintre condens şi vapori:

$$w_{max} = w_x\big|_{y=\delta_x} = \frac{g\cdot{\delta_x}^2}{2\nu}$$

Viteza peliculei de condens se poate exprima în funcție de viteza sa maximă:

$$w_x = w_{max}\cdot\left(\frac{2y}{\delta_x} - \frac{y^2}{{\delta_x}^2}\right)$$

Viteza medie a peliculei de condens va fi:

$$w_{med} = \frac{1}{\delta_x}\cdot\int_0^{\delta_x} w_x\cdot dy = \frac{1}{\delta_x}\cdot\int_0^{\delta_x}\frac{g\cdot{\delta_x}^2}{2\nu}\left(\frac{2y}{\delta_x} - \frac{y^2}{{\delta_x}^2}\right)\cdot dy = \frac{g\cdot{\delta_x}^2}{3\nu}$$

$$w_{med} = \frac{2}{3} \cdot w_{max}$$

Coeficientul de convecție α se poate determina analitic pe baza teoriei peliculare a lui Nusselt, care consideră că transferul de căldură prin pelicula de condens se realizează exclusiv prin conducție.

$$\dot{q}_x = \alpha_x \cdot \left(t_s - t_p\right) = \frac{\lambda}{\delta_x} \cdot \left(t_s - t_p\right) \quad \rightarrow \quad \alpha_x = \frac{\lambda}{\delta_x}$$

Grosimea peliculei, δ_x, la o anumită distanță x se determină din bilanțul termic al volumului elementar de condens $dV = b \cdot \delta_x \cdot d\,x$: fluxul termic cedat prin condensarea vaporilor este egal cu fluxul termic conductiv ce străbate pelicula de condens.

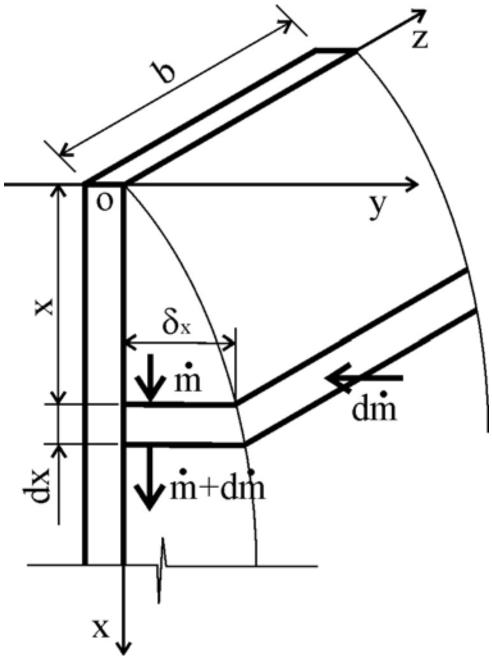

Fig. 3.32: Bilanțul termic al volumului elementar de condens *d V*

$$d\,\dot{Q}_{condensare} = d\,\dot{Q}_{conductie}$$

$$d\,\dot{m} \cdot r = \frac{\lambda}{\delta_x} \cdot \left(t_s - t_p\right) \cdot b \cdot d\,x$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = \rho \cdot w_{med} \cdot b \cdot \delta_x$$

$$\dot{m} = \rho \cdot \frac{g \cdot \delta_x^{\,2}}{3\nu} \cdot b \cdot \delta_x = \frac{\rho \cdot g \cdot b}{3\nu} \cdot \delta_x^{\,3}$$

$$d\,\dot{m} = \frac{\rho \cdot g \cdot b}{\nu} \cdot \delta_x^{\,2} \cdot d\,\delta_x$$

$$\frac{\rho \cdot g \cdot b}{\nu} \cdot \delta_x^{\,2} \cdot d\,\delta_x \cdot r = \frac{\lambda}{\delta_x} \cdot \left(t_s - t_p\right) \cdot b \cdot d\,x$$

$$\delta_x^{\,3}\cdot d\,\delta_x=\frac{\lambda\cdot\nu\cdot\left(t_s-t_p\right)}{\rho\cdot g\cdot r}\cdot d\,x \quad\rightarrow\quad \frac{\delta_x^{\,4}}{4}=\frac{\lambda\cdot\nu\cdot\left(t_s-t_p\right)}{\rho\cdot g\cdot r}\cdot x+C_1$$

$$\delta_x^{\,4}=\frac{4\lambda\cdot\nu\cdot\left(t_s-t_p\right)}{\rho\cdot g\cdot r}\cdot x+C_1 \quad\rightarrow\quad \delta_x=\left(\frac{4\lambda\cdot\nu\cdot\left(t_s-t_p\right)}{\rho\cdot g\cdot r}\cdot x+C_1\right)^{0,25}$$

Constanta C_1 se determină din impunerea condiției la limită:

la $x=0\rightarrow\delta_x=0$

$$\left.\delta_x\right|_{x=0}=C_1^{\,0,25}=0 \quad\rightarrow\quad C_1=0$$

$$\delta_x=\left(\frac{4\lambda\cdot\nu\cdot\left(t_s-t_p\right)}{\rho\cdot g\cdot r}\cdot x\right)^{0,25}$$

$$\alpha_x=\frac{\lambda}{\delta_x}=\lambda\cdot\left(\frac{\rho\cdot g\cdot r}{4\lambda\cdot\nu\cdot\left(t_s-t_p\right)\cdot x}\right)^{0,25}=\left(\frac{\rho\cdot g\cdot r\cdot\lambda^3}{4\nu\cdot\left(t_s-t_p\right)\cdot x}\right)^{0,25}=C\cdot x^{-0,25}$$

unde C este o constantă:

$$C=\left(\frac{\rho\cdot g\cdot r\cdot\lambda^3}{4\nu\cdot\left(t_s-t_p\right)}\right)^{0,25}$$

Coeficientul de convecție global, α, pe întreaga înălțime a plăcii se determină prin medierea coeficientului de convecție local pe întreaga înălțime a plăcii:

$$\alpha=\frac{1}{h}\cdot\int_0^h\alpha_x\cdot d\,x=\frac{C}{h}\cdot\int_0^h x^{-0,25}\cdot d\,x=\frac{C}{h}\cdot\frac{4}{3}\cdot h^{0,75}=\frac{4C}{3}\cdot h^{-0,25}$$

$$\alpha=0,943\cdot\left(\frac{\rho\cdot g\cdot r\cdot\lambda^3}{\nu\cdot h\cdot\left(t_s-t_p\right)}\right)^{0,25}$$

3.3.1.2. Condensarea peliculară pe suprafețe cilindrice orizontale

Se consideră un fascicul de conducte aşezate orizontal pe care are loc condensarea peliculară a vaporilor unei substanțe.

În funcție de modul de aşezare a conductelor, coeficientul de convecție se calculează pentru fiecare rând în parte cu ajutorul relațiilor criteriale determinate pe cale experimentală, abordarea analitică fiind deosebit de dificilă.

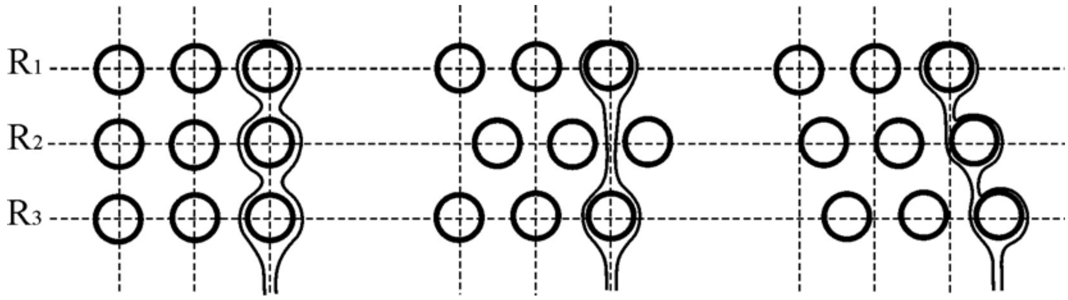

Fig. 3.33: Variante de aşezare a conductelor

3.3.1.3. Relații empirice de calcul

Pentru **condensarea peliculară pe suprafețe verticale**, în practica inginerească, coeficientul de convecție α se determină cu ajutorul criteriului Nusselt:

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{l_c} \quad [\mathrm{W/m^2 \cdot K}]$$

$$Nu = 1{,}13 \cdot (Ga \cdot Pr \cdot Ku)^{0{,}25} \cdot \varepsilon_\varphi$$

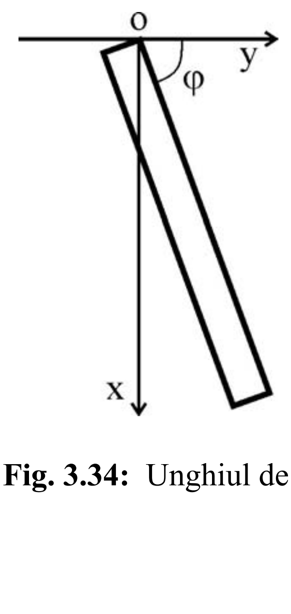

Fig. 3.34: Unghiul de înclinare

unde $Ga = \frac{g \cdot l_c^3}{\nu^2}$, $Pr = \frac{\nu}{a}$ şi $Ku = \frac{r}{c_p \cdot \Delta t}$, iar ε_φ este coeficientul de corecție care ține seama de unghiul de înclinare a suprafeței.

$$\varepsilon_\varphi = (\sin\varphi)^{0{,}25}$$

- Lungimea caracteristică este înălțimea plăcii.

$$l_c = h$$

- Temperatura de referință la care se determină proprietățile fluidului în stare lichidă (condensului) este temperatura medie a peliculei de condens.

$$t_{ref} = \frac{t_p + t_s}{2}$$

Pentru **condensarea peliculară pe un fascicul de conducte orizontale**, în practica inginerească, coeficientul de convecție α se determină cu ajutorul criteriului Nusselt:

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{l_c} = \frac{\sum_{1}^{n} Nu_i}{n} \cdot \frac{\lambda}{l_c} \qquad [\mathrm{W/m^2 \cdot K}]$$

unde n reprezintă numărul rândurilor de conducte pe direcția verticală iar Nu_i este criteriul Nusselt pentru rândul "*i*".

$$Nu_i = 0{,}725 \cdot (Ga \cdot Pr \cdot Ku)^{0,25} \cdot \varepsilon_i$$

unde ε_i este coeficientul de corecție care ține seama de poziția rândului.

- Lungimea caracteristică este diametrul exterior al conductelor.

$$l_c = d_e$$

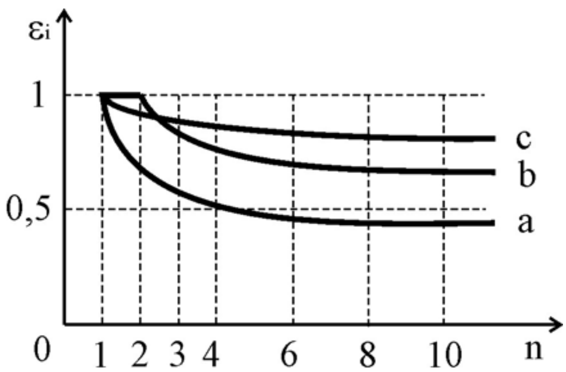

Fig. 3.35: Coeficientul ε_i pentru așezarea în linie (a), decalat (b) și Ginabat (c)

- Temperatura de referință la care se determină proprietățile fluidului în stare lichidă (condensului) este temperatura medie a peliculei de condens.

$$t_{ref} = \frac{t_p + t_s}{2}$$