

TRANSFER DE CĂLDURĂ LA SCHIMBAREA STĂRII DE AGREGARE

Transfer termic la fierberea lichidelor
Transfer termic la condensarea vaporilor

FIERBEREA LICHIDELOR

FIERBEREA LICHIDELOR

- o Dp dv fizic, **fierberea** = procesul de transformare a unui lichid în vapori, procesul desfășurându-se în toată masa lichidului, cu formare de bule de vapori.
- o Fierberea = proces endoterm care decurge în condiții izobar - izoterme ($P, T = \text{ct.}$)
- o Cantitatea de căldură necesară pentru fierberea a 1 kg de lichid = **căldură latentă de vaporizare.**

FIERBEREA LICHIDELOR

- o Mecanismul transferului termic între o suprafață care cedează căldură și un lichid în fierbere este deosebit de complex.
- o În cazul lichidelor pure monocomponente, temperatura de fierbere este teoretic egală cu temperatura de saturație (T_s),
- o $T_s = f(\text{natura lichidului}, P)$
- o În realitate, temperatura de fierbere (T_f) este puțin mai mare decât T_s .

FIERBEREA LICHIDELOR

o Coeficientul individual de transfer termic de la perete la lichidul în fierbere este definit de ecuația:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_p - T_f) \quad (164)$$

$$\alpha = \frac{Q}{A \cdot (T_p - T_f)} = \frac{q}{T_p - T_f} = \frac{q}{\Delta T} \quad (165)$$

FIERBEREA LICHIDELOR

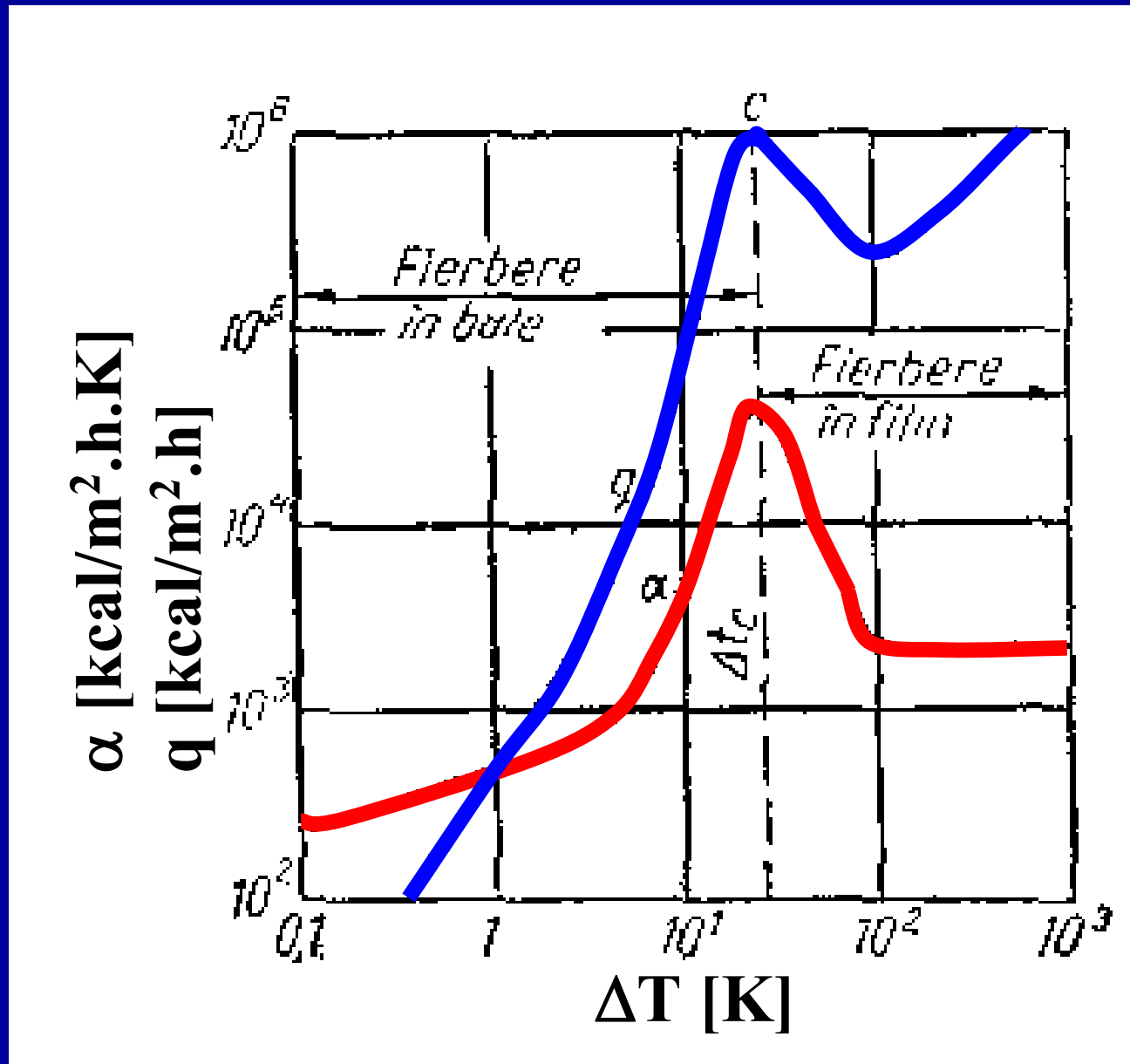
o La creșterea temperaturii suprafeței încălzitoare se pot observa următoarele fenomene:

- la $T_p < T_f$, lichidul se încălzește și se vaporizează fără să fiarbă;
- când $T_p > T_f$, lichidul începe să fiarbă; intensitatea fierberii crește cu creșterea diferenței $\Delta T = T_p - T_f$;

FIERBEREA LICHIDELOR

- o creșterea intensității fierberii atinge un maxim atunci când între suprafața de încălzire și lichid apare un film de vapori rezultat din unirea bulelor de vapori de pe suprafața de încălzire; acest film are o conductivitate termică relativ scăzută;
- o dacă T_p continuă să crească, grosimea filmului de vapori crește, conducând la scăderea intensității fierberii; fluxul termic scade mult datorită faptului că încălzirea lichidului se realizează acum prin intermediul stratului de vapori de grosime mare și conductivitate termică scăzută.

FIERBEREA LICHIDELOR



FIERBEREA LICHIDELOR

- o Valorile α_c , q_c și ΔT_c corespunzătoare punctului de maxim, poartă denumirea de valori critice de fierbere, acestea fiind funcție de natura lichidului și de presiunea de lucru:

Substanța	ΔT_c [K]	q_c [kW/m ²]	α_c [W.m ⁻² .K ⁻¹]
apă	23 - 27	1163	46520
benzen	47	407	8722,5

FIERBEREA LICHIDELOR

- o La valori $\Delta T < \Delta T_c$, fierberea este moderată, bulele de vapori formându-se în așa-numitele **centre de fierbere (vaporizare)** care corespund unor denivelări sau impurități ale suprafeței de încălzire = **fierbere cu bule**.
- o Când $\Delta T = \Delta T_c$, nr. centrelor de fierbere este atât de mare, încât bulele se unesc într-un strat de vapori continuu, lipsit de stabilitate, care se formează și se rupe la intervale de timp dese și neregulate = **fierbere în film**.

FIERBEREA LICHIDELOR

o Factorii care influențează fierberea:

- natura lichidului,
- natura, rugozitatea și starea de curățenie a suprafeței de transfer termic,
- adjuvanții folosiți,
- presiunea de lucru.

FIERBEREA LICHIDELOR

- o Pentru calculul coeficientului individual de transfer la fierbere, se folosesc mai puțin ecuațiile criteriale, și mai mult relații empirice de calcul.
- o Exemple de astfel de relații - vezi manualul FDT II

CONDENSAREA VAPORILOR

CONDENSAREA VAPORILOR

- o Dp dv fizic, **condensarea** = fenomenul de trecere a unei substanțe aflate sub formă de vapori în stare lichidă.
- o Procesul fiind exoterm, exista un transfer de căldură de la vaporii care condensează:
 - către suprafața solidă pe care are loc condensarea (în condensatoarele de suprafață),
 - către agentul termic (în condensatoarele de amestec).

CONDENSAREA VAPORILOR

o Căldura cedată de vaporii în condensare poartă denumirea de **căldură latentă de condensare** și este funcție de natura vaporilor, temperatură și presiune.

o **CONDENSARE**

- în picături - când condensatul udă doar anumite puncte ale suprafeței de transfer termic;
- în film (peliculară) - când condensatul udă perfect întreaga suprafață de transfer termic.

CONDENSAREA VAPORILOR

- o **Gazele necondensabile** din vaporii care condensează nu modifică felul condensării - peliculară sau în picături.
- o Dacă vaporii conțin anumite substanțe, sau dacă suprafața rece este impurificată cu substanțe care micșorează tensiunea superficială a condensatului împiedicând udarea suprafeței, condensarea decurge **în picături**.
- o La condensarea în picături, coeficienții individuali de transfer termic sunt de 4 - 8 ori mai mari decât în cazul condensării peliculare.

CONDENSAREA VAPORILOR

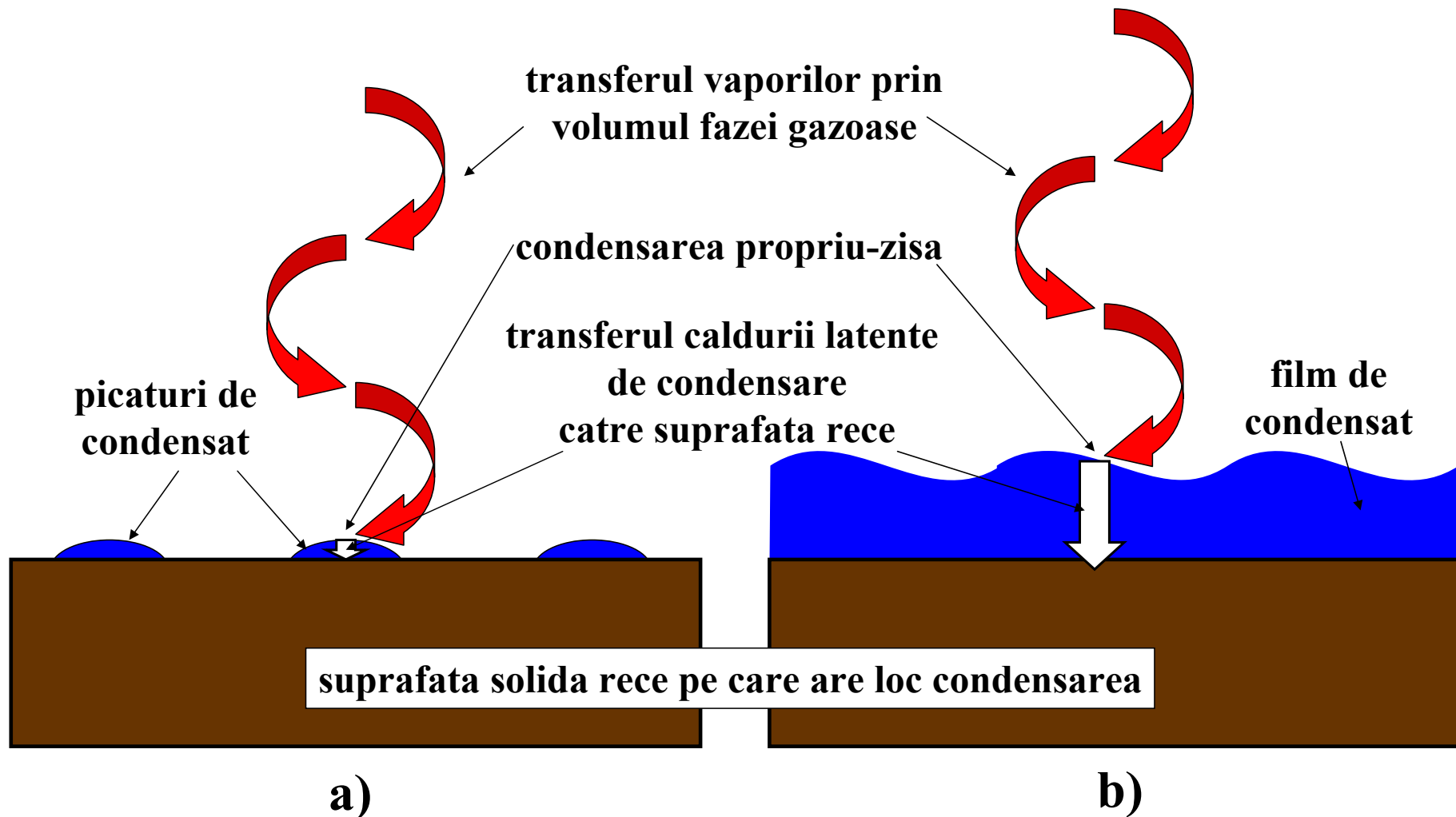
- o Etapele succesive ale procesului:
- o **transferul vaporilor de condensat** prin volumul fazei gazoase către suprafața de condensare, (poate deveni determinantă de viteză pt. proces dacă vaporii care sunt supuși condensării se găsesc în amestec cu gaze necondensabile);
- o **condensarea propriu-zisă** = transformarea vaporilor în lichid la interfață; doar o mică parte din vaporii ajunși la interfață condensează, marea majoritate revenind necondensați în volum fazei gazoase;
- o **transferul căldurii latente de condensare** către suprafața rece.

CONDENSAREA VAPORILOR

- o În cazul condensării în picături, transferul căldurii latente de condensare se face direct între picătura de condensat și suprafața de transfer termic,
- o La condensarea peliculară, transferul de căldură de la condensat la suprafața rece decurge prin intermediul filmului de condensat preexistent, film care induce o rezistență termică suplimentară.

CONDENSAREA VAPORILOR

VAPORI + GAZE NECONDENSABILE



CONDENSAREA VAPORILOR

- o Majoritatea condensărilor industriale decurg în film. Chiar dacă inițial procesul decurge în picături, ulterior, după ce suprafața este spălată chiar de către condensat, procesul decurge în film.
- o Tot pe pelicular se desfășoară condensarea și pe suprafețele ruginite.
- o Pt. a realiza condensarea permanentă în picături, se pot introduce în vapori mici cant. de subst. care împiedică udarea suprafeței: mercaptani pt. suprafețe din Cu sau aliaje de Cu, acid oleic pt. cupru, alamă, nichel, crom, etc.
- o O altă soluție = acoperirea suprafeței de condensare cu lacuri speciale.

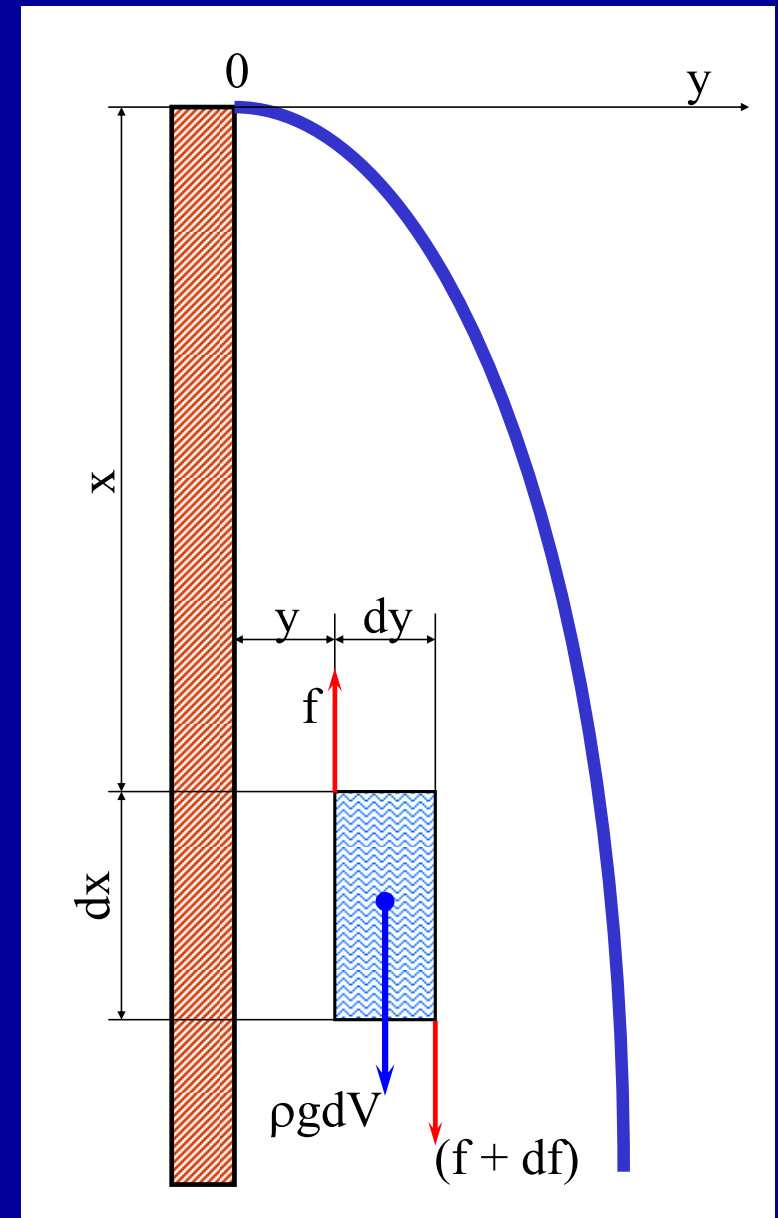
CONDENSAREA VAPORILOR

Condensarea peliculară pe suprafețe verticale

- o Fie un perete răcit, vertical, în lungul căruia se formează un strat de condensat.
- o Curgerea descendentă a stratului face ca grosimea δ a acestuia să fie crescătoare pe lungimea peretelui.
- o La o distanță oarecare x de marginea superioară a peretelui și y de perete, se izolează un paralelipiped elementar de condensat, având dimensiunile dx , dy , 1 și volumul $dV = dx dy$.

CONDENSAREA VAPORILOR

- o Asupra volumului elementar acționează următoarele forțe:
 - greutatea $\rho g dV$ orientată în jos;
 - forța de frecare f orientată în sus;
 - forța de frecare $(f + df)$ orientată în jos.



CONDENSAREA VAPORILOR

o La curgerea cu viteză constantă, cele trei forțe sunt în echilibru:

$$\rho g dV + (f + df) = f \quad (176)$$

o Notând cu F forța de frecare pe unitatea de suprafață și ținând cont de faptul că aria pe care acționează forțele de frecare este $A = dx \cdot 1$, ecuația (176) devine:

$$\rho g dV + (F + dF) dx = F dx \quad (177)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

o Sau: $\rho g dy + dF = 0$ (178)

o care se poate scrie sub forma:

$$\frac{dF}{dy} = -\rho g \quad (179)$$

o În cazul fluidelor newtoniene, forța de frecare pe unitatea de suprafață are expresia:

$$F = \mu \frac{dv_x}{dy} \quad (180)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

- o dv_x = creșterea vitezei condensatului când distanța de la peretele rece crește de la y la $(y + dy)$.
- o Derivând (180) în raport cu y :

$$\frac{dF}{dy} = \mu \frac{d^2 v_x}{dy^2} \quad (181)$$

- o și înlocuind în (179) se obține:

$$\frac{d^2 v_x}{dy^2} = - \frac{\rho g}{\mu} \quad (182)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

o La același rezultat se ajunge pornind de la ec. Navier-Stokes:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} = \\ = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (183)$$

o se ține cont de particularitățile curgerii condensatului:

CONDENSAREA VAPORILOR

o regim staționar: $\partial v_x / \partial t = 0$;

o curgere unidimensională pe direcția x :

$$v_y = v_z = 0;$$

o viteză constantă a filmului de condensat pe direcția x , variabilă numai pe direcția y :

$$\partial v_x / \partial x = 0; \partial^2 v_x / \partial x^2 = 0; \partial^2 v_x / \partial z^2 = 0$$

o presiunea constantă la suprafața filmului:

$$\partial P / \partial x = 0$$

CONDENSAREA VAPORILOR

o Introducând aceste condiții în (183):

$$\frac{d^2 v_x}{dy^2} = -\frac{\rho g}{\mu} \quad (184)$$

o Prin integrare succesivă, din (184) rezulta:

$$\frac{dv_x}{dy} = -\frac{\rho g}{\mu} y + C_1 \quad (185)$$

$$v_x = -\frac{\rho g}{2\mu} y^2 + C_1 y + C_2 \quad (186)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

- o Constantele de integrare se obțin din condițiile la limită (187):
 - la $y = 0$ $v_x = 0$ (la suprafața peretelui solid viteza este nulă)
 - la $y = \delta_x$ $dv_x/dy = 0$ (la suprafața filmului viteza este maximă)
- o Înlocuind (187) în (185) și (186) rezultă valorile constantelor de integrare:

$$C_2 = 0 \quad ; \quad C_1 = \frac{\delta_x \rho g}{\mu} \quad (188)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

o Ecuația (186) devine:

$$v_x = -\frac{\rho g}{2\mu} y^2 + \frac{\rho g}{\mu} \delta_x y \quad (189)$$

o ecuația redă distribuția (profilul) vitezelor în filmul de condensat.

CONDENSAREA VAPORILOR

o Viteza medie a condensatului la distanța x față de capătul peretelui rezultă din medierea vitezei instantanee, v_x , pe grosimea δ_x a filmului:

$$\tilde{v}_x = \frac{1}{\delta_x} \int_0^{\delta_x} v_x dx = \frac{1}{\delta_x} \int_0^{\delta_x} \left(-\frac{\rho g}{2\mu} y^2 + \frac{\rho g}{\mu} \delta_x y \right) dy = \frac{\rho g}{3\mu} \delta_x^2$$

(190)

CONDENSAREA VAPORILOR

o Debitul de vapori condensat pe întreaga lățime a peretelui la nivelul x este:

$$m_x = \tilde{v}_x \rho \delta_x = \frac{\rho^2 g}{3\mu} \delta_x^3 \quad (191)$$

o Debitul de vapori condensat pe întreaga lățime a peretelui, pe înălțimea dx va fi dm_x .

o Diferențind ecuația (4.191), se obține:

$$dm_x = \frac{\rho^2 g}{\mu} \delta_x^2 d\delta_x \quad (192)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

- o Din considerente de conservare a energiei, fluxul termic transmis convectiv de către pelicula de condensat spre perete = fluxul termic generat de căldura latentă de condensare, adică:

$$\frac{\lambda}{\delta_x} \cdot (T_v - T_p) \cdot dx = r \cdot m_x \quad (193)$$

- o r = căldura latentă de condensare,
- o T_v = temperatura vaporilor,
- o T_p = temperatura peretelui,
- o λ = conductivitatea termică a condensatului.

CONDENSAREA VAPORILOR

o Combinând (193) cu (192) se obține:

$$dx = \frac{r \cdot \rho^2 \cdot g}{\mu \cdot \lambda \cdot (T_v - T_p)} \cdot \delta_x^2 \cdot d\delta_x \quad (194)$$

o prin integrare cu condițiile la limită $x = 0$;
 $\delta_x = 0$ devine:

$$x = \frac{r \cdot \rho^2 \cdot g}{4\mu \cdot \lambda \cdot (T_v - T_p)} \cdot \delta_x^4 \quad (195)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

- o Din (195) rezultă expresia grosimii filmului de condensat la nivelul x :

$$\delta_x = \sqrt[4]{\frac{4\mu \cdot \lambda \cdot x \cdot (T_v - T_p)}{r \cdot \rho^2 \cdot g}} \quad (196)$$

- o Coeficientul local de transfer termic va fi:

$$\alpha_x = \frac{\lambda}{\delta_x} = \sqrt[4]{\frac{r \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \lambda^3}{4\mu \cdot x \cdot (T_v - T_p)}} \quad (197)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

o Valoarea medie a coeficientului individual de transfer termic pentru un perete vertical de înălțime H va fi:

$$\alpha = \frac{1}{H} \int_0^H \alpha_x dx = \frac{4}{3} \cdot \sqrt[4]{\frac{r \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \lambda^3}{4\mu \cdot H \cdot (T_v - T_p)}} =$$
$$= 0,943 \cdot \sqrt[4]{\frac{r \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \lambda^3}{\mu \cdot H \cdot (T_v - T_p)}} \quad (198)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

o Ecuația (198) = **ecuația lui Nusselt** pentru vapori în condensare pe suprafața unei țevi verticale, ecuație care se mai poate scrie:

$$\alpha = \alpha_1 \frac{1}{\sqrt[4]{H(T_v - T_p)}} \quad (199)$$

o în care α_1 are expresia:

$$\alpha_1 = 0,943 \cdot \sqrt[4]{\frac{r\rho^2 g \lambda^3}{\mu}} \quad (200)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

- o α_1 este coeficientul individual de transfer termic pentru un perete vertical având înălțimea egală cu unitatea de lungime și diferența dintre temperatura vaporilor și temperatura peretelui egală cu unitatea de diferență de temperatură.
- o α_1 fiind funcție de proprietățile fizice ale vaporilor care condensează va fi, implicit, funcție de temperatură.

CONDENSAREA VAPORILOR

- o Ecuația lui Nusselt este valabilă doar în cazul curgerii peliculare laminare.
- o În practică, condensarea are loc pe țevi suficient de lungi astfel încât după o anumită distanță de curgere, la o grosime δ curgerea devine turbulentă.
- o La curgerea peliculară criteriul Reynolds are expresia:

$$\text{Re} = \frac{4\rho \cdot v \cdot \delta}{\mu} \quad (201)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

- o Ondularea peliculei de condensat (curgerea cu valuri) are ca efect mărirea suprafeței de contact film - vapori, ducând implicit la creșterea coeficientului individual de transfer termic.
- o Kutadzeladze majorează coeficientul obținut din ecuația lui Nusselt cu 20% pentru a ține cont de influența valurilor, astfel încât (198) devine:

CONDENSAREA VAPORILOR

$$\begin{aligned}\alpha &= 1,13 \cdot \sqrt[4]{\frac{r \cdot \rho^2 \cdot g \cdot \lambda^3}{\mu \cdot H \cdot (T_v - T_p)}} = \\ &= 2,04 \cdot \sqrt[4]{\frac{r \cdot \rho^2 \cdot \lambda^3}{\mu \cdot H \cdot (T_v - T_p)}}\end{aligned}\quad (202)$$

o O relație aproximativă de calcul a lui α la condensare este:

$$\alpha = 7,2 \frac{\lambda}{\mu} \quad (203)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

Condensarea peliculară pe suprafețe înclinate

o Calculul efectuat în cazul condensării peliculare pe suprafețe verticale este valabil și pentru suprafețe înclinate, cu condiția să se țină seama de direcția forței de greutate în raport cu suprafața înclinată de condensare.

CONDENSAREA VAPORILOR

o Cu această observație, ecuația (176) devine:

$$\rho \cdot g \cdot \sin \varphi \cdot dV + (f + df) = f \quad (204)$$

o φ = unghiul pe care peretele înclinat îl face cu un plan orizontal

o Din (204), printr-un raționament analog cu cel aplicat la condensarea pe pereți verticali se ajunge la expresia coeficientului individual de transfer termic la condensarea pe suprafețe înclinate:

CONDENSAREA VAPORILOR

$$\alpha_{\varphi} = \alpha_{90} \cdot \sqrt[4]{\sin \varphi} \quad (205)$$

o α_{90} = coeficientul de transfer pentru peretele vertical ($\varphi = 90^\circ$), identic cu α din ecuațiile (198), (199), (202).

CONDENSAREA VAPORILOR

Condensarea peliculară pe o țeavă orizontală

- o Dacă se consideră peretele țevii ca un perete format din porțiuni infinitezimale având înclinări variabile între 0° și 180° , se obține expresia:

$$\alpha_0 = 0,725 \cdot \frac{\alpha_1}{\sqrt[4]{d(T_v - T_p)}} \quad (206)$$

- o în care α_1 este dat de relația (200), iar d este diametrul exterior al țevii.

CONDENSAREA VAPORILOR

Condensarea peliculară

pe un fascicul de țevi orizontale

- o În cazul condensării vaporilor pe un fascicul de țevi orizontale, coeficientul individual de transfer va fi mai redus la țevile de la partea inferioară a fasciculului, datorită stratului izolant de condensat care curge de pe țevile de la partea superioară a fasciculului pe țevile de la partea inferioară.

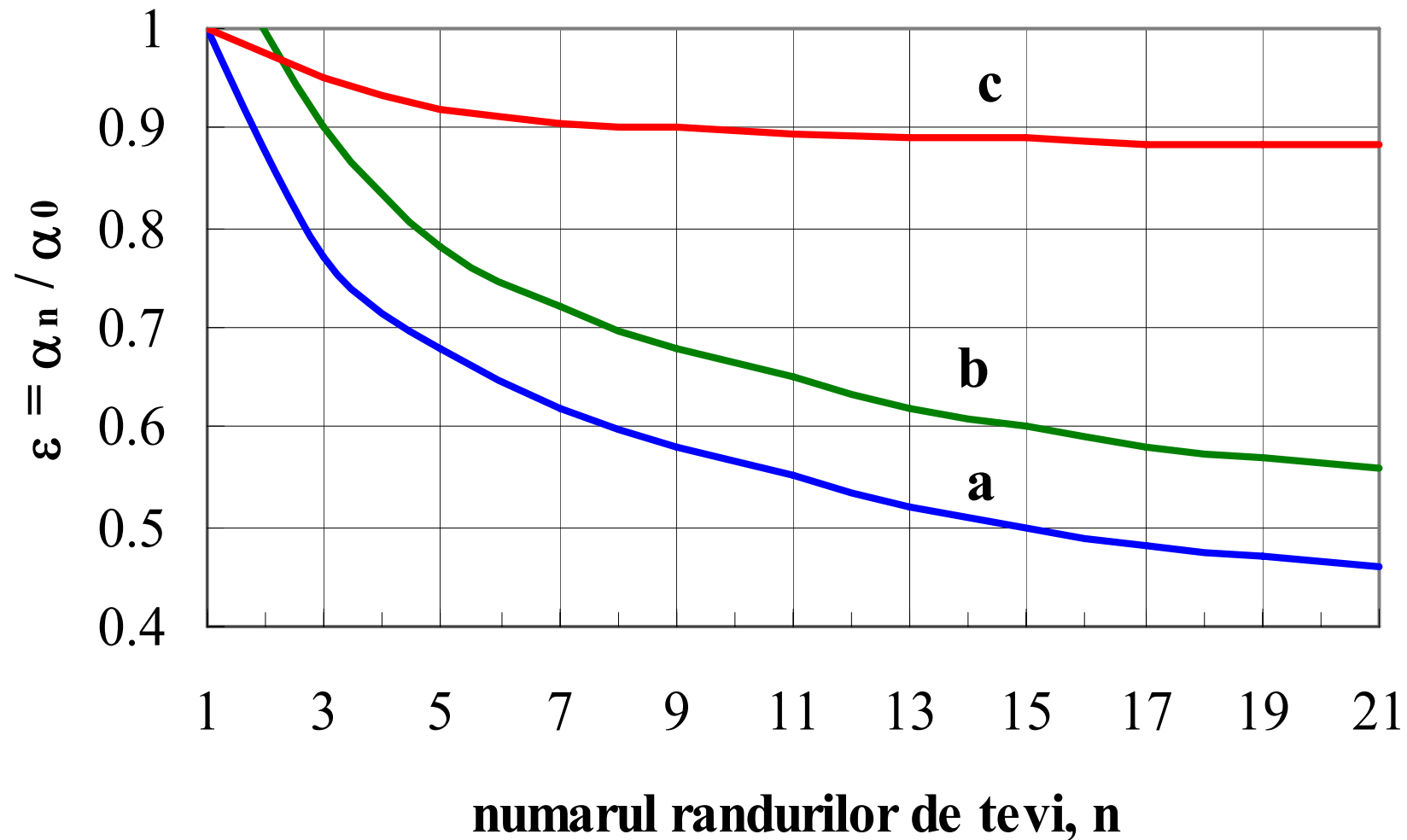
CONDENSAREA VAPORILOR

- o O valoare medie a coeficientului de transfer se poate calcula cu ajutorul ecuației:

$$\alpha_n = \frac{\alpha_0}{\sqrt[4]{n}} \quad (207)$$

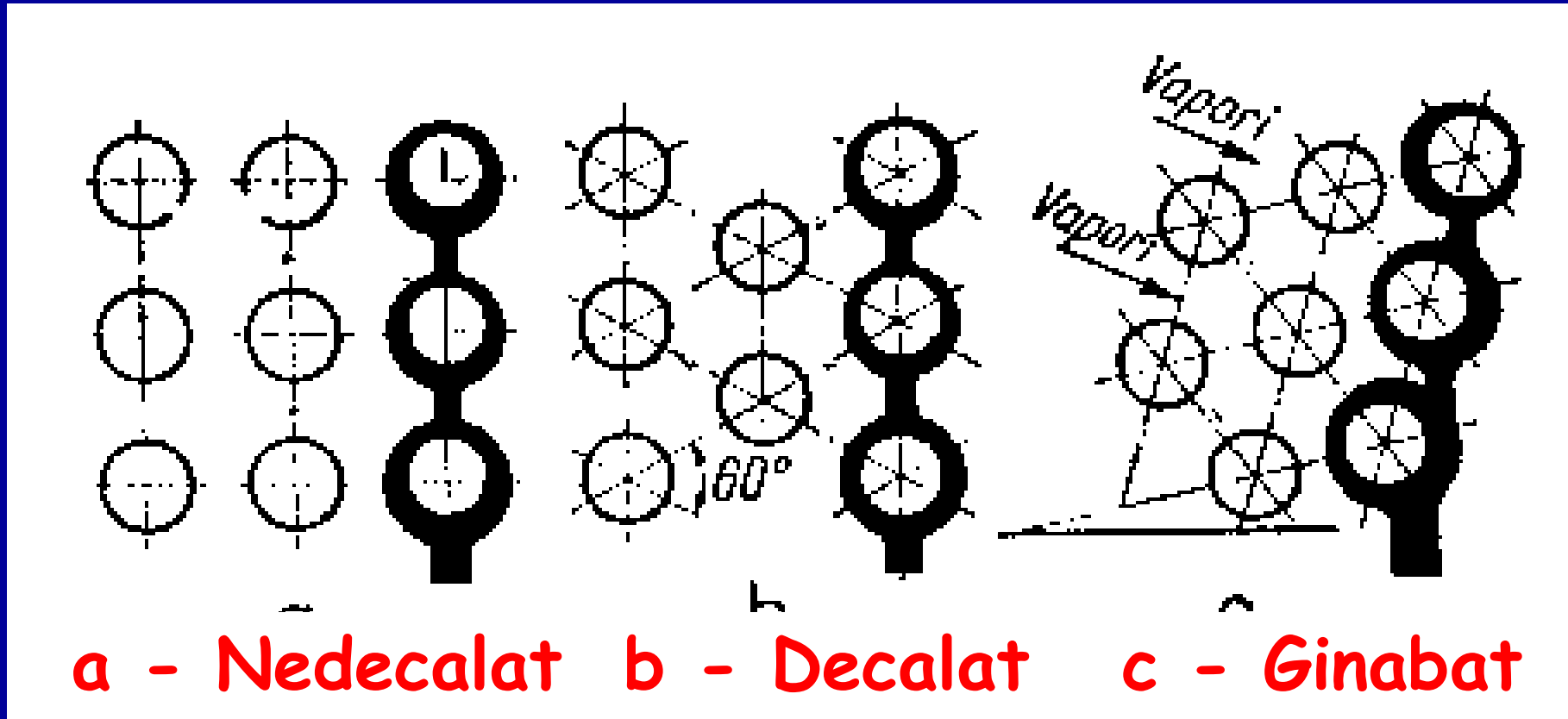
- o în care α_0 este coeficientul de transfer calculat pentru o singură țeavă orizontală, iar n reprezintă numărul de țevi situate pe aceeași verticală.

CONDENSAREA VAPORILOR



CONDENSAREA VAPORILOR

- o Diagrama redă dependența coeficientului $\varepsilon = \alpha_n / \alpha_0$ de numărul rândurilor de țevi n și de modul de dispunere a acestora în fascicul.



CONDENSAREA VAPORILOR

Condensarea în interiorul țevelor orizontale și serpentinelor

o Coeficientul individual de transfer termic se calculează cu relația:

$$\alpha = 1,36 \cdot A \cdot q^{0,5} \cdot L^{0,35} \cdot d^{-0,25} \quad (208)$$

- A = coeficient care înglobează constantele fizico-chimice ale substanței care condensează;
- q - fluxul termic unitar [W/m^2];
- L - lungimea țevii [m];
- d - diametrul interior al țevii [m].

CONDENSAREA VAPORILOR

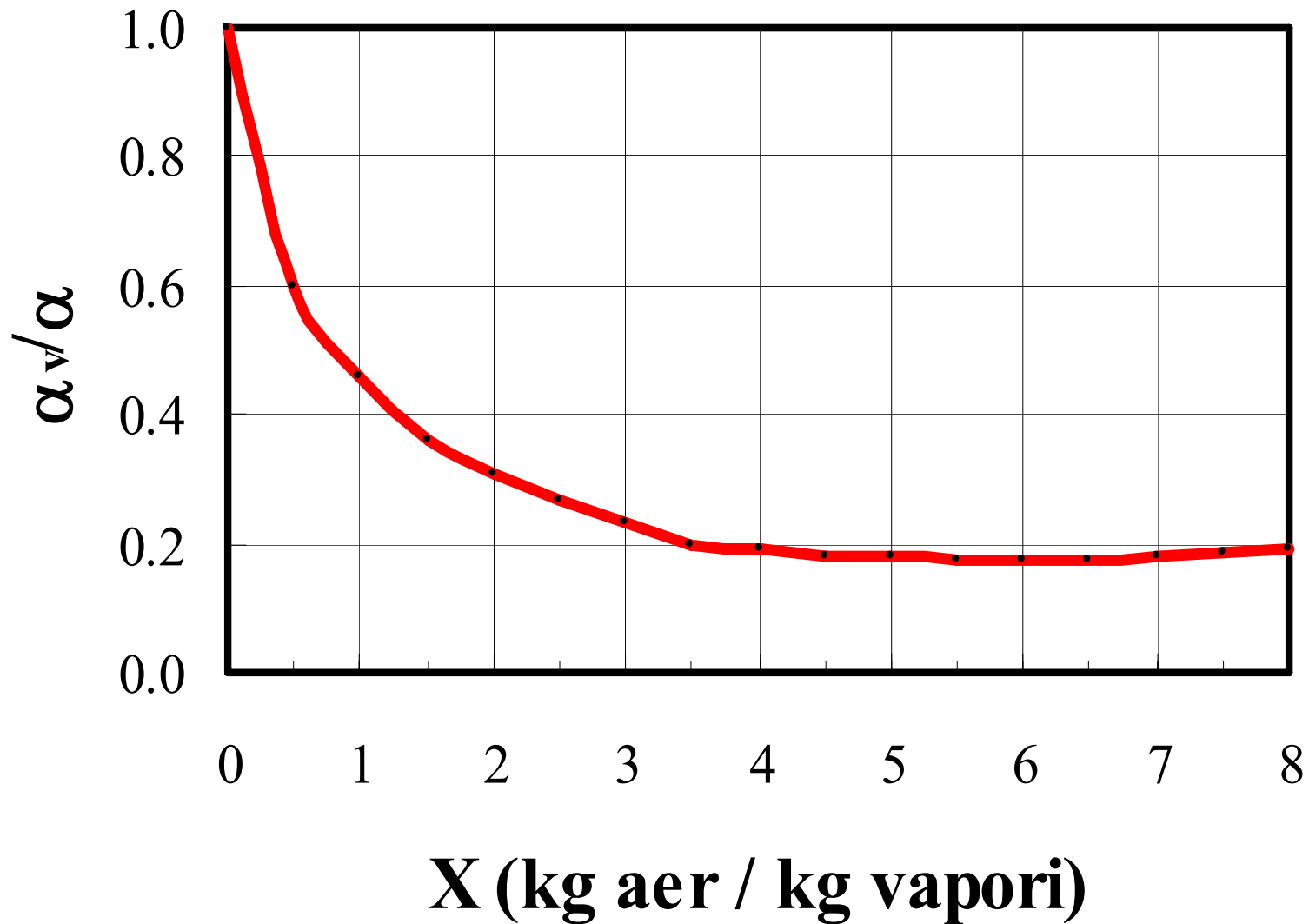
- o La condensarea vaporilor în serpentine, lungimea serpentinei nu trebuie să fie foarte mare, deoarece la capătul inferior al serpentinei lungi se acumulează condensat care înrăutățește transferul termic.
- o În serpentinele lungi crește căderea de presiune, deci scade presiunea aburului, deci scade diferența utilă de temperatură.
- o Din date practice, în serpentinele cu abur viteza inițială a vaporilor nu trebuie să depășească 30 m/s.

CONDENSAREA VAPORILOR

Condensarea vaporilor care conțin gaze necondensabile

- o Gaze necondensabile (aer în special) se întâlnesc aproape întotdeauna în vapori.
- o Dacă nu sunt evacuate ele se acumulează în spațiul de condensare, micșorând mult valoarea coeficientului de transfer.
- o α = coeficientul individual de transfer termic la condensarea vaporilor de apă puri,
- o α_v = coeficientul individual de transfer termic la condensarea vaporilor de apă care conțin aer.
- o X = concentrația relativă a aerului în vapori, exprimată în kg aer / kg vapori.

CONDENSAREA VAPORILOR



CONDENSAREA VAPORILOR

Factori care influențează condensarea vaporilor în film

- o Viteza, presiunea, direcția și turbulența curentului de vaporii.
 - La viteze ale vaporilor mai mari de 10 m/s, frecările dintre condensat și vaporii devin importante, curgerea condensatului fiind:
 - accelerată (în cazul vaporilor descendenți)
 - frânată (în cazul vaporilor ascendenți).
 - Rezultatul = mărirea, respectiv micșorarea valorii coeficienților de transfer termic.
 - Efectul este amplificat de creșterea presiunii vaporilor.

CONDENSAREA VAPORILOR

o Starea suprafeței de condensare.

- Rugozitatea mare a suprafețelor, straturile de rugină sau de depuneri măresc grosimea filmului de condensat, coeficientul individual de transfer termic reducându-se - în unele cazuri cu până la 30%.

CONDENSAREA VAPORILOR

o Supraîncălzirea vaporilor.

- Nu are o influență esențială asupra valorii coeficientului α , întrucât căldura sensibilă pe care o cedează vaporii supraîncălziți până la atingerea temperaturii de saturație este mult mai mică în comparație cu căldura latentă de condensare.

CONDENSAREA VAPORILOR

o Poziția verticală sau orizontală a țevelor pe care decurge condensarea.

- Conform ecuațiilor (199) și (206), raportul dintre coeficientul de transfer α pentru o țeavă verticală de înălțime H și coeficientul de transfer α_0 pentru o țeavă verticală de diametru exterior d este:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{1}{0,725} \cdot \sqrt[4]{\frac{d}{H}} \quad (209)$$

CONDENSAREA VAPORILOR

- o Deoarece în aparatele industriale de transfer termic $d/H \ll 1$, rezultă că întotdeauna $\alpha < \alpha_0$.
- o Din punct de vedere al eficienței transferului termic, este mai avantajoasă utilizarea aparatelor de condensare cu țevi orizontale.
- o Dificultatea evacuării condensatului din aceste aparate, precum și lipsa în unele cazuri a spațiului necesar pentru amplasarea orizontală a aparatului, fac ca aparatele condensatoare cu țevi verticale să fie utilizate în multe aplicații.

Valori orientative ale coeficienților individuali de transfer termic

Modul de transmitere a căldurii	Valoare α [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]		Observații
	apă	aer	
Convecție forțată (curgere turbulentă)			$T_m = 303 \text{ K}; d = 0,03 \text{ m}$ $Re_{apă} = 7\,500 - 560\,000$ $Re_{aer} = 15\,000 - 280\,000$
- în țevi și canale	1200 - 5800	35 - 60	
- perpendicular pe țevi	3100 - 10000	70 - 100	
Convecție forțată (curgere laminară)			$T_m = 303 \text{ K}; d = 0,03 \text{ m}$ $Re_{apă} = 750 - 1\,900;$ $Re_{aer} = 750 - 1\,900$
	310 - 430	4 - 6	
Convecție liberă	350 - 930	4 - 9	$T_m = 303 \text{ K}$
Fierberea apei	2000 - 24000	-	Presiune atmosferică
Condensarea vap. saturați pe suprafața exterioară a țevelor orizontale	9300 - 15000	-	Presiunea absolută a vaporilor saturați = 4 kPa $d = 0,03 \text{ m}$