

3.3.2. Fierberea lichidelor

În procesul de fierbere, pe suprafața de încălzire se formează vapori care pot fi îndepărtați sub acțiunea forțelor arhimedice sau a lichidului în mișcare. Atunci când suprafața de încălzire se află imersată într-un lichid în repaus, are loc **fierberea în volum mare**, iar când lichidul se deplasează, sub acțiunea unor forțe exterioare, în interiorul unei conducte încălzite, are loc **fierberea la curgere forțată**.

3.3.2.1. Fierberea în volum mare

Se consideră un bazin umplut cu apă având pereții izolați termic, pe fundul căruia este prevăzută o placă de încălzire (ex. o plită electrică care cedează căldură prin efect Joule – Lentz).

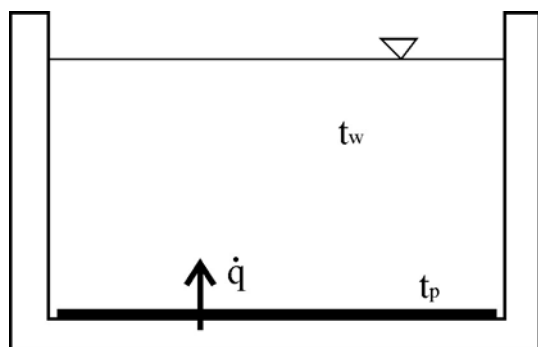


Fig. 3.36: Schița bazinului

Ipoteze: $w_w = 0$

$$t_p > t_w$$

$$\dot{q} > 0$$

În funcție de valorile temperaturii plăcii calde și a apei din bazin, precum și de diferența dintre acestea, denumită **exces de temperatură** ($\theta = t_p - t_w$), se disting următoarele moduri de transfer de căldură între placa caldă și fluid (apă).

I - Convecție liberă: atât temperatura plăcii calde cât și cea a apei sunt mai mici decât temperatura de saturație.

$$\left. \begin{array}{l} t_p < t_s \\ t_w < t_s \end{array} \right\} \Rightarrow t_w < t_p < t_s$$

II - Fierbere globulară la subrăcire (locală): temperatura plăcii calde devine mai mare decât temperatura de saturație în timp ce apa rămâne în stare subrăcită (temperatura ei este mai mică decât cea de saturație).

$$\left. \begin{array}{l} t_p > t_s \\ t_w < t_s \end{array} \right\} \Rightarrow t_w < t_s < t_p$$

La suprafața plăcii calde se formează bule de vaporii care, după desprindere, condensează înainte de a ajunge la suprafața liberă a apei din bazin. Transferul de căldură este intens datorită efectului de pompaj exercitat de bulele de vaporii asupra lichidului adiacent plăcii.

III - Fierbere globulară la saturație: temperatura apei ajunge la valoarea de saturație.

$$\left. \begin{array}{l} t_p > t_s \\ t_w = t_s \end{array} \right\} \Rightarrow t_w = t_s < t_p$$

Bulele de vaporii formate la suprafața plăcii calde se desprind și ajung până la suprafața liberă a apei. Pentru valori mici ale excesului de temperatură θ , bulele urcă individual către suprafața liberă. Cu cât excesul de temperatură crește, cu atât frecvența de formare a bulelor se mărește, ajungând ca acestea să se unească și să formeze coloane de vaporii între placă și suprafața liberă. Creșterea în continuare a excesului de temperatură conduce la formarea pe suprafața plăcii calde a unui strat de vaporii aproape continuu care are ca efect înrăutățirea transferului de căldură. Atunci când stratul de vaporii ajunge să acopere în întregime suprafața plăcii calde, fluxul termic transferat atinge un maxim, numit **flux critic**, corespunzător unui **exces de temperatură critic** θ_{cr} . Creșterea fluxului termic peste valoarea critică poate duce la distrugerea suprafeței de încălzire prin creștere rapidă a temperaturii acesteia până la punctul de topire al materialului plăcii. Acest fenomen poartă denumirea de **criză a fierberii**.

IV - Fierbere peliculară instabilă (de tranziție): temperatura plăcii calde depășește valoarea critică corespunzătoare excesului de temperatură critic.

$$\left. \begin{array}{l} t_p > t_{p cr} \\ t_w = t_s \end{array} \right\} \Rightarrow t_w = t_s < t_{p cr} < t_p$$

Stratul de vaporii care acoperă suprafața plăcii se distruge și se reface periodic dând procesului un caracter de instabilitate termică și dinamică. Fluxul de căldură transferat se reduce în intensitate.

V - Fierbere peliculară stabilă: valoarea excesului de temperatură se mărește iar la suprafața plăcii calde stratul de vapori nu se mai distruge.

$$\left. \begin{array}{l} t_p \gg t_{p\,cr} \\ t_w = t_s \end{array} \right\} \Rightarrow t_w = t_s < t_{p\,cr} \ll t_p$$

Fluxul de căldură scade odată cu îngroșarea stratului de vapori.

VI - Fierbere peliculară cu schimb radiant: temperatura plăcii atinge valori foarte ridicate iar transferul de căldură prin radiație devine important.

$$\left. \begin{array}{l} t_p \gg \gg t_{p\,cr} \\ t_w = t_s \end{array} \right\} \Rightarrow t_w = t_s < t_{p\,cr} \ll \ll t_p$$

Fluxul de căldură începe din nou să crească odată cu creșterea excesului de temperatură.

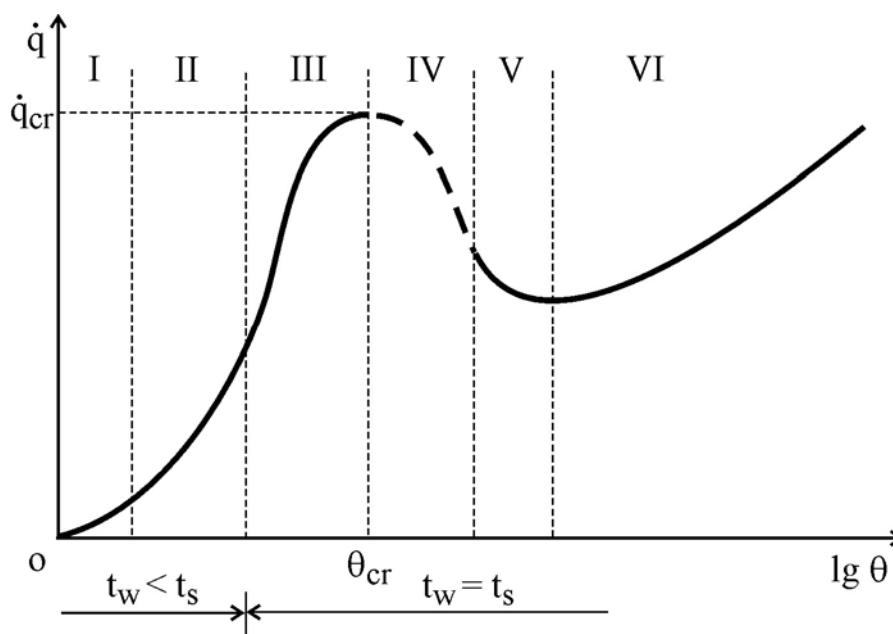


Fig. 3.37: Diagrama lui Nukiyama

3.3.2.2. Fierberea la curgerea forțată

Se consideră o conductă verticală prin pereții căreia se transmite un flux termic constant către un fluid care circulă forțat în interiorul conductei de jos în sus și care are temperatura la intrarea în conductă mai mică decât cea de saturație. Datorită căldurii primite, lichidul în curgere începe să fiarbă iar pe o anumită porțiune a conductei curgerea devine bifazică (lichid + vapori) după care redevine una monofazică, de această dată sub formă de vapori.

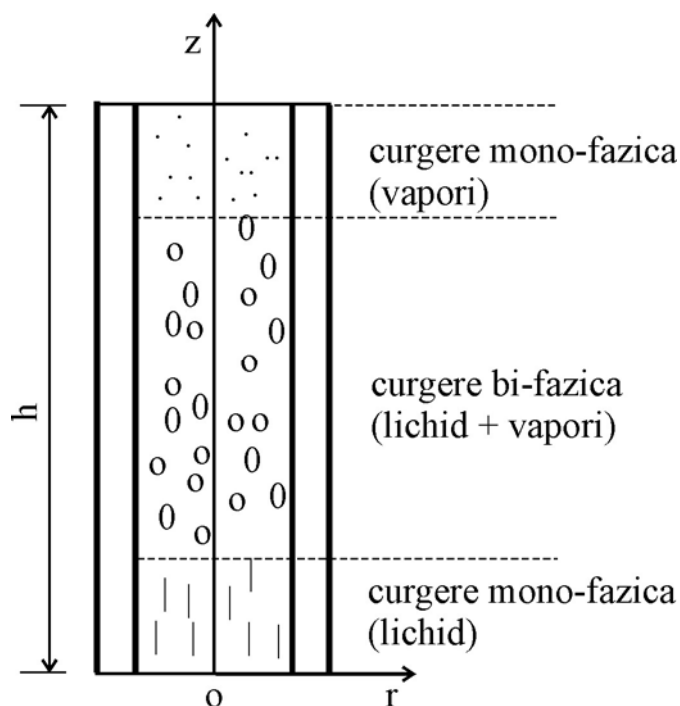


Fig. 3.38: Fierberea la curgerea forțată

În funcție de aspectul curgerii și de modul de transfer de căldură, se disting următoarele zone:

Zona I - Atât fluidul cât și suprafața interioară a peretelui conductei au temperaturi sub cea de saturație.

$$t_f < t_p < t_s$$

Fluidul este în stare lichidă iar curgerea este monofazică. Transferul de căldură se face prin convecție forțată.

Zona II - Temperatura peretelui depășește temperatura de saturație, dar lichidul rămâne subrăcit.

$$t_f < t_s < t_p$$

Lângă perete se formează bule de vapori care se desprind și condensează în masa de lichid. Transferul de căldură se face prin fierbere globulară subrăcită (locală).

Zona III - Lichidul ajunge la starea de saturație.

$$t_f = t_s < t_p$$

Bulele de vaporii formate pe suprafața peretelui conductei ajung în toată masa de lichid. Transferul de căldură se face prin fierbere globulară la saturație.

Zona IV - Frecvența de producere a bulelor de vaporii se mărește și acestea au tendința să se aglomereze și să formeze dopuri în partea centrală a conductei. Transferul de căldură se face prin fierbere globulară intensă.

Zona V - Dopurile de vaporii se unesc în partea centrală a conductei iar la perete se formează un strat inelar de lichid. Transferul de căldură se realizează conductiv în filmul de lichid și prin vaporizare la interfața lichid-vaporii.

Zona VI - Stratul inelar de lichid se distruge iar în masa de vaporii apar picături de lichid. Transferul de căldură se realizează prin convecție forțată de la suprafața conductei la vaporii și prin vaporizarea picăturilor de lichid. Temperatura peretelui are o creștere accelerată.

Zona VII - Picăturile de lichid vaporizează complet. Faza lichidă dispăre iar vaporii devin uscați. Curgerea este din nou monofazică. Transferul de căldură se realizează numai prin convecție forțată.

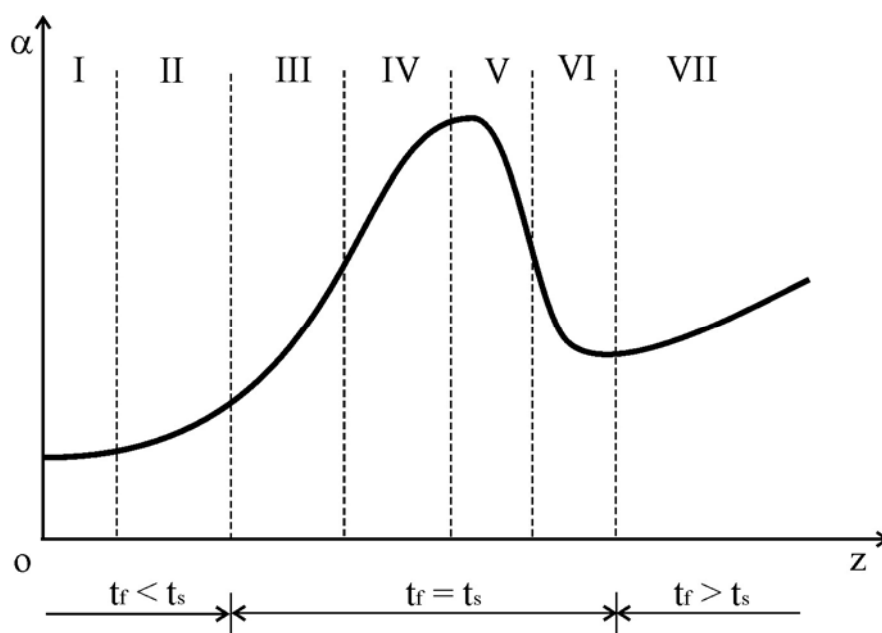


Fig. 3.39: Variația coeficientului de convecție în lungul conductei

3.3.2.3. Relații empirice de calcul

Pentru **fierberea globulară în volum mare**, în practica inginerască, coeficientul de convecție α se determină cu ajutorul criteriului Nusselt:

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

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33}$$

unde coeficientul C și exponentul n depind de regimul de curgere dat de criteriul Reynolds la fierbere:

$$C, n = f(Re); \quad Re = \frac{\dot{q} \cdot l_c}{r \cdot v \cdot \rho''}$$

Tab. 3.9: C și n pentru fierberea globulară

Re	$10^{-5} \dots 10^{-2}$	$10^{-2} \dots 10^4$
C	0,0625	0,125
n	0,5	0,65

- Lungimea caracteristică se calculează cu relația:

$$l_c = \frac{c_p \cdot \rho' \cdot \sigma \cdot T_s}{(r \cdot \rho'')^2}$$

unde σ este tensiunea superficială a lichidului în N/m, T_s este temperatura absolută de saturație în K, iar ρ' și ρ'' sunt densitățile la starea de saturație a lichidului respectiv a vaporilor în kg/m³.

- Temperatura de referință la care se determină proprietățile fluidului în stare lichidă este temperatura de saturație.

$$t_{ref} = t_s$$

Fluxul termic unitar critic se calculează cu următoarea relație:

$$\dot{q}_{cr} = \frac{r \cdot v \cdot \rho''}{l_c} \cdot Re_{cr}$$

unde:

$$Re_{cr} = 68 \cdot Ar^{0,44} \cdot Pr^{-0,33} \quad \text{și} \quad Ar = \frac{g \cdot l_c^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho' - \rho''}{\rho'}$$

Pentru **fierberea la curgerea forțată**, coeficientul de convecție α se calculează pe baza principiului suprapunerii efectelor dintre fierberea globulară în volum mare și convecția forțată monofazică.

$$\alpha = f(\alpha_{fg}, \alpha_{cf})$$

$$\text{dacă} \quad \frac{\alpha_{fg}}{\alpha_{cf}} \leq 0,5 \quad \rightarrow \quad \alpha = \alpha_{cf}$$

$$\text{dacă} \quad 0,5 < \frac{\alpha_{fg}}{\alpha_{cf}} < 2 \quad \rightarrow \quad \alpha = \alpha_{cf} \cdot \frac{4\alpha_{cf} + \alpha_{fg}}{5\alpha_{cf} - \alpha_{fg}}$$

$$\text{dacă} \quad \frac{\alpha_{fg}}{\alpha_{cf}} \geq 2 \quad \rightarrow \quad \alpha = \alpha_{fg}$$

- Lungimea caracteristică este diametrul interior al conductei.

$$l_c = d_i$$

- Temperatura de referință la care se determină proprietățile fluidului în stare lichidă este temperatura de saturație.

$$t_{ref} = t_s$$