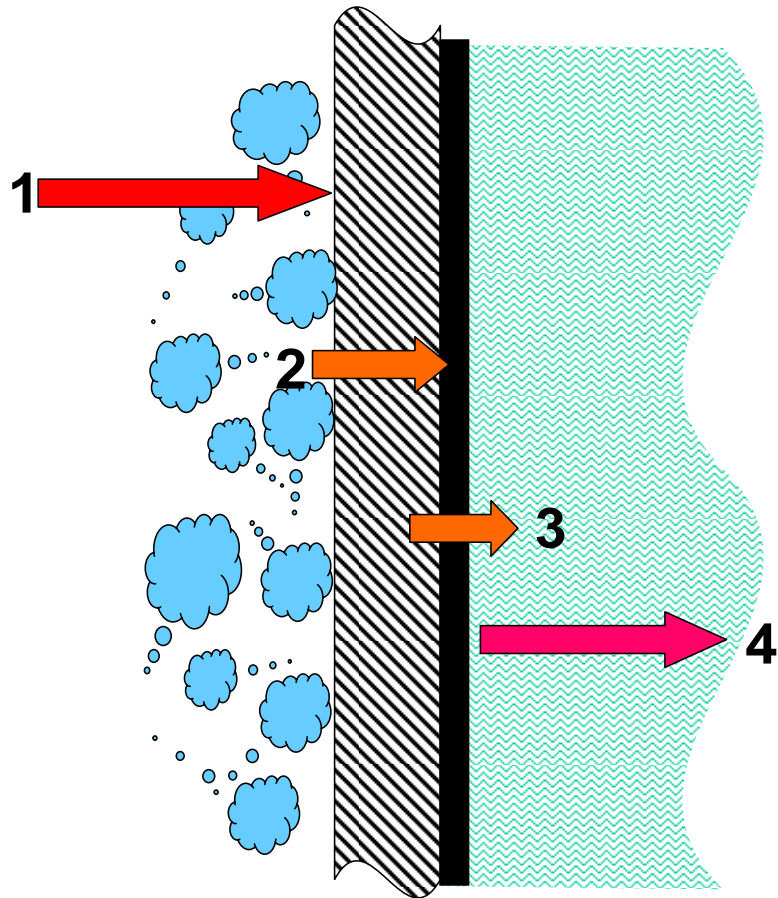


TRANSFERUL GLOBAL DE CĂLDURĂ

TRANSFER TERMIC GLOBAL

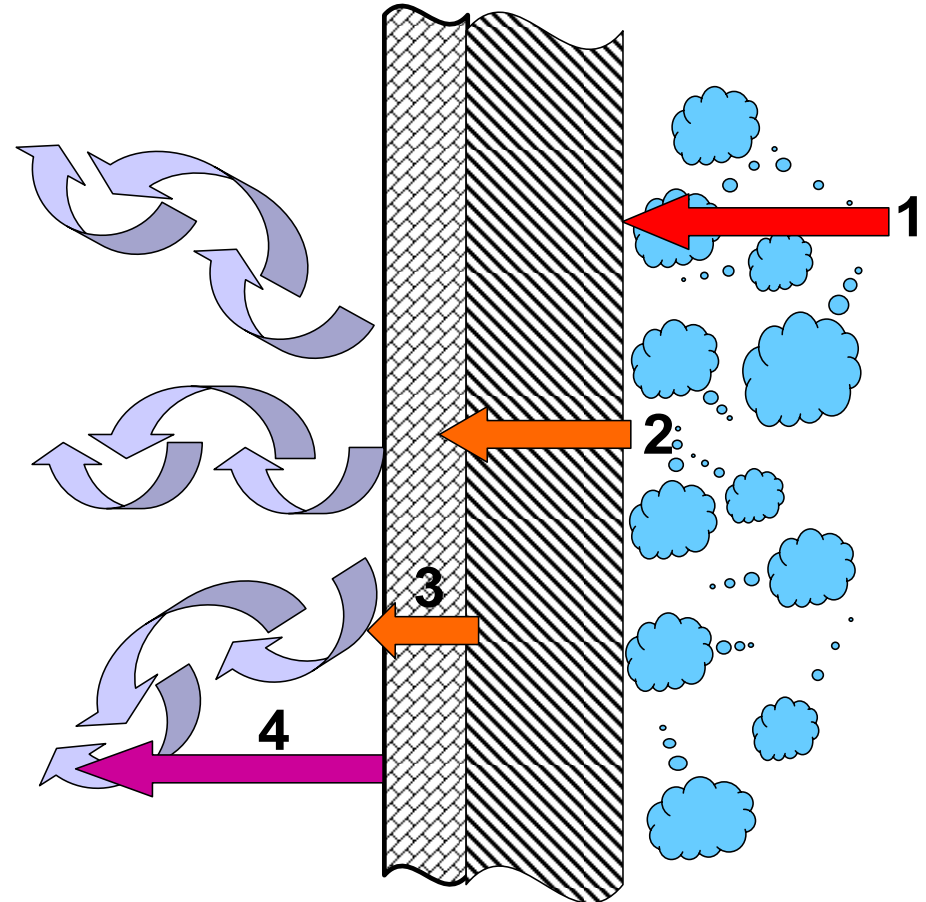
- o La realizarea schimbului global de căldură participă, în diverse proporții:
 - Conducția,
 - Convecția,
 - Radiația.
- o În majoritatea proceselor, există unul sau două mecanisme predominante de transfer.



- 1 - **transfer convectiv** prin filmul de vapori;
 2 - **transfer conductiv** prin peretele tevii;
 3 - **transfer conductiv** prin crusta;
 4 - **transfer conductiv + convectiv** prin filmul de lichid

a

transfer "util" de căldură



- 1 - **transfer convectiv** prin filmul de vapori;
 2 - **transfer conductiv** prin manta;
 3 - **transfer conductiv** prin izolatia termica;
 4 - **transfer convectiv + radiant** prin filmul de aer din jurul evaporatorului

b

"pierderi" de căldură

TRANSFER TERMIC GLOBAL

o În cea mai simplă formă, transferul global de căldură poate fi redat prin ecuația:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T \quad (210)$$

- Q = fluxul termic transferat (W),
- A = aria suprafeței prin care are loc transferul (m^2),
- ΔT = potențialul transferului termic (K) = diferența între temp. mediului care cedează căldura și temp. mediului care primește căldura
- K = coeficient global de transfer de căldură ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

TRANSFER TERMIC GLOBAL

- o Coeficientul global de transfer de căldură = cantitatea de căldură transferată între două medii pe unitatea de suprafață și în unitatea de timp, sub acțiunea unui potențial termic de 1 K.
- o **K** reprezintă fluxul termic specific transferat sub acțiunea unui potențial termic unitar:

$$K = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} = \frac{q}{\Delta T} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] \quad (211)$$

TRANSFER TERMIC GLOBAL

- o Dependența dintre Q și ΔT (la $A = \text{ct.}$) este liniară doar pentru valori reduse ale potențialului termic.
- o În practică, valorile coeficientului global de transfer K sunt funcție atât de valoarea potențialului termic, cât și de valorile absolute ale temperaturilor celor două medii între care decurge transferul termic.

TRANSFER TERMIC GLOBAL

- o La **proiectarea** aparatelor de transfer termic (încălzitoare, răcitoare, evaporatoare, condensatoare, concentratoare, boilere, refrigeratoare, fierbătoare, cuptoare, uscătoare etc.), uzual se cunosc:
 - **Q transferat**: pe baza bilanțurilor de materiale și termice ale aparatului
 - Potențialul transferului termic (ΔT) impus de diverse considerente (tehnologice, economice, de calitate etc.).
- o **Cerința primară a proiectării**: determinarea valorii **A** → dimensiunile constructive ale aparatului.

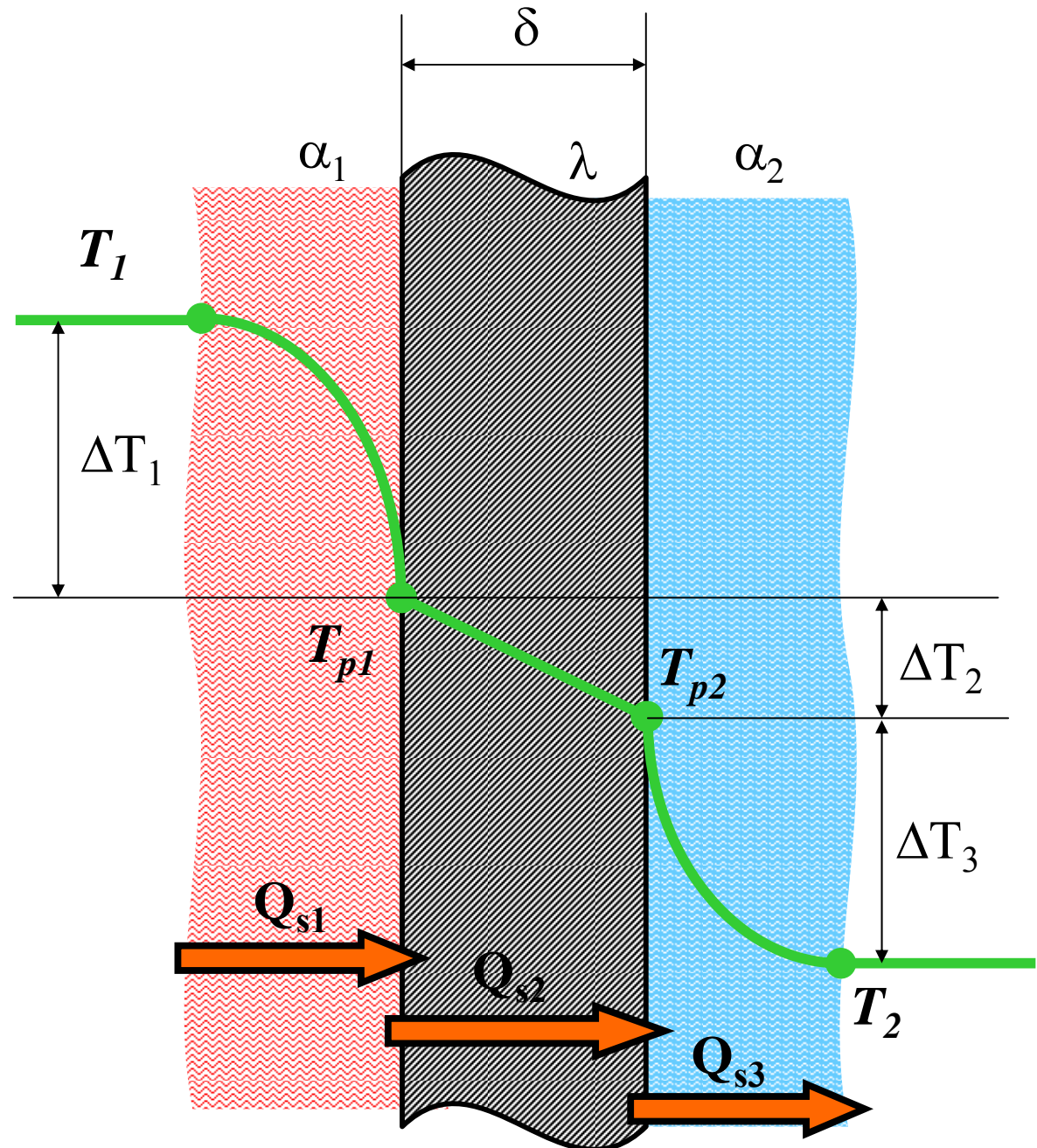
TRANSFER TERMIC GLOBAL

- o Fără cunoașterea coeficientului global de transfer K , proiectarea utilajelor în care determinant este transferul termic este practic imposibilă.
- o Coeficientul global de transfer depinde de:
 - natura și proprietățile mediilor prin care se transferă căldura,
 - condițiile geometrice și hidrodinamice în care decurge procesul,
 - temperatura mediilor,
 - valoarea potențialului termic la care decurge transferul

Transfer global de căldură indirect între două fluide

- o Acest mod de transmitere a căldurii este poate cel mai des întâlnit în practică: două fluide, separate de un perete (simplu, compus, plan, cilindric, etc.) schimbă căldură între ele, prin intermediul peretelui, fluidul cu temperatura mai ridicată cedând căldură fluidului cu temperatura mai coborâtă.

Transfer global de căldură indirect între două fluide



Transfer global de căldură indirect între două fluide

La potențial termic constant

- o în vecinătatea peretelui solid curgerea este laminară, căldura se transmite conductiv și convectiv.
- o la perete, unde viteza fluidului este nulă, transferul este pur conductiv
- o se consideră că în stratul limită convecția poate fi neglijată
- o cazul celor două fluide separate de un perete plan omogen poate fi asimilat cazului transferului conductiv de căldură printr-un perete plan compus din trei straturi având conductivități termice diferite

Transfer global de căldură la potențial termic constant

o Fluxul termic transferat prin filmul de fluid (1) are expresia:

$$Q_{s1} = \alpha_1 \cdot A \cdot (T_1 - T_{p1}) \quad (212)$$

o Fluxul termic transferat prin peretele solid are expresia:

$$Q_{s2} = \frac{\lambda}{\delta} \cdot A \cdot (T_{p1} - T_{p2}) \quad (213)$$

Transfer global de căldură la potențial termic constant

- o Fluxul termic transferat prin filmul de fluid (2) are expresia:

$$Q_{s3} = \alpha_2 \cdot A \cdot (T_{p2} - T_2) \quad (214)$$

- o Dacă se consideră regimul staționar:

$$Q_{s1} = Q_{s2} = Q_{s3} = Q_s \quad (215)$$

- o Dacă procesul de transfer de căldură decurge la temperaturi nu prea ridicate, transferul radiant se poate neglija.

Transfer global de căldură la potențial termic constant

o căderile parțiale de temperatură prin filmul (1), prin peretele solid și prin filmul (2) se pot scrie:

$$\begin{aligned}\Delta T_1 &= (T_1 - T_{p1}) = Q_s \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot A} \\ \Delta T_2 &= (T_{p1} - T_{p2}) = Q_s \cdot \frac{\delta}{\lambda \cdot A} \\ \Delta T_3 &= (T_{p2} - T_2) = Q_s \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot A}\end{aligned}\tag{216}$$

Transfer global de căldură la potențial termic constant

o Căderea totală de temperatură între cele două fluide se obține însumând membru cu membru ecuațiile (216):

$$\begin{aligned}\Delta T = T_1 - T_2 &= \frac{Q_s}{A} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = \\ &= \frac{Q_s}{A} \cdot (R_1 + R_2 + R_3) = q \sum_{i=1}^n R_i\end{aligned}\tag{217}$$

Transfer global de căldură la potențial termic constant

o Din (217), fluxul termic unitar:

$$q = \frac{\Delta T}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{j=1}^m \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (218)$$

o Fluxul termic va fi dat de expresia: (219)

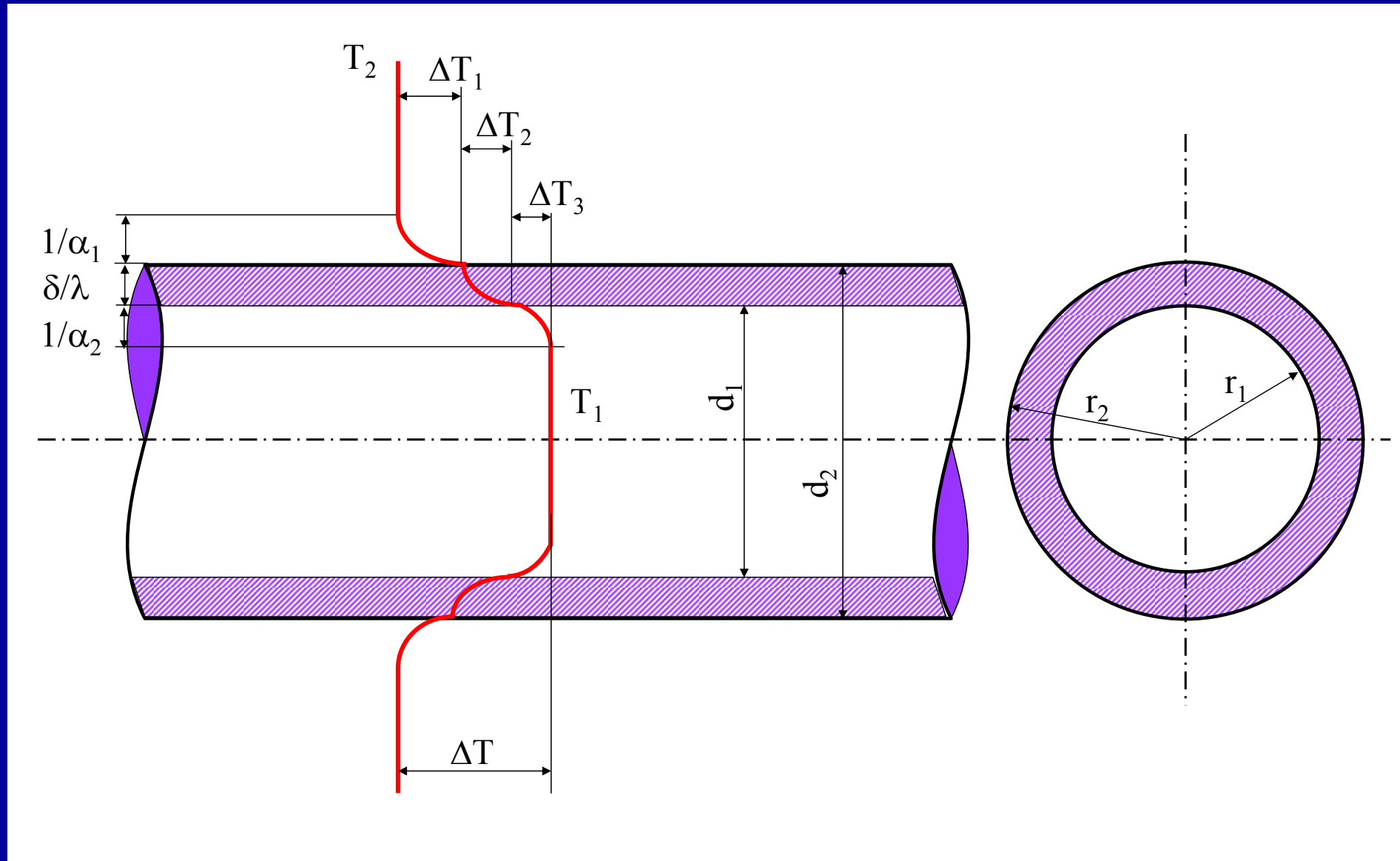
$$Q_s = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{j=1}^m \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_2}} \cdot A \cdot (T_1 - T_2) = K \cdot A \cdot \Delta T$$

Transfer global de căldură la potențial termic constant

- o În ecuațiile (218) - (219) s-a considerat că transferul termic între fluide decurge printr-un perete plan compus din m straturi având grosimi și conductivități termice distincte.
- o Pentru transferul termic între 2 fluide separate prin pereți plani, coeficientul global de transfer de căldură are expresia:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{j=1}^m \frac{\delta_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_2}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (220)$$

Transfer global de căldură la potențial termic constant



Transfer global de căldură la potențial termic constant

o Fluxul termic unitar (raportat la unitatea de lungime de perete circular, **W/m**) are expresia:

$$q = \frac{(T_1 - T_2) \cdot \pi}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{d_2 \cdot \alpha_2}} \quad (221)$$

Transfer global de căldură la potențial termic constant

o Dacă peretele cilindric este format din mai multe straturi de grosimi și conductivități diferite, atunci expresia fluxului unitar devine:

(222)

$$q = \frac{(T_1 - T_2) \cdot \pi}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_{i+1} \cdot \alpha_2}}$$

Transfer global de căldură la potențial termic constant

o Expresia fluxului termic se scrie:

$$Q = q \cdot l = \frac{(T_1 - T_2) \cdot \pi \cdot l}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_{i+1} \cdot \alpha_2}} \quad (223)$$

o în care l reprezintă lungimea peretelui cilindric.

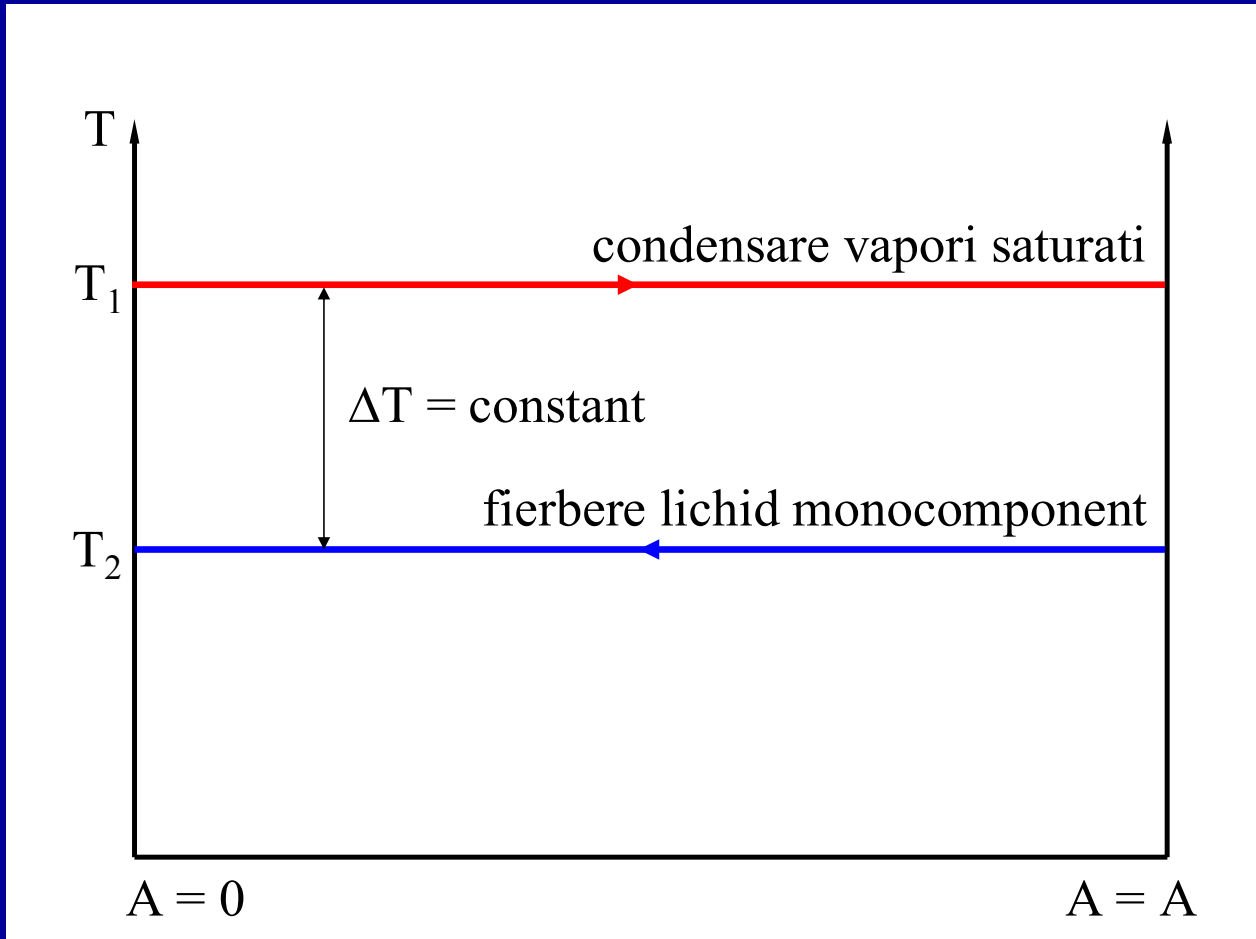
Transfer global de căldură la potențial termic constant

o Expresia coeficientului global de transfer de căldură prin pereți cilindrici neomogeni va fi de forma:

$$K = \frac{\pi}{\frac{1}{d_1 \cdot \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{d_{i+1} \cdot \alpha_2}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

(224)

Transfer global de căldură la potențial termic variabil



- o În foarte puține cazuri practice, potențialul transferului termic rămâne constant
- o (Ex: vaporizarea unui lichid pur la temp. de fierbere cu ajutorul căldurii cedate de vapori saturați care condensează)

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

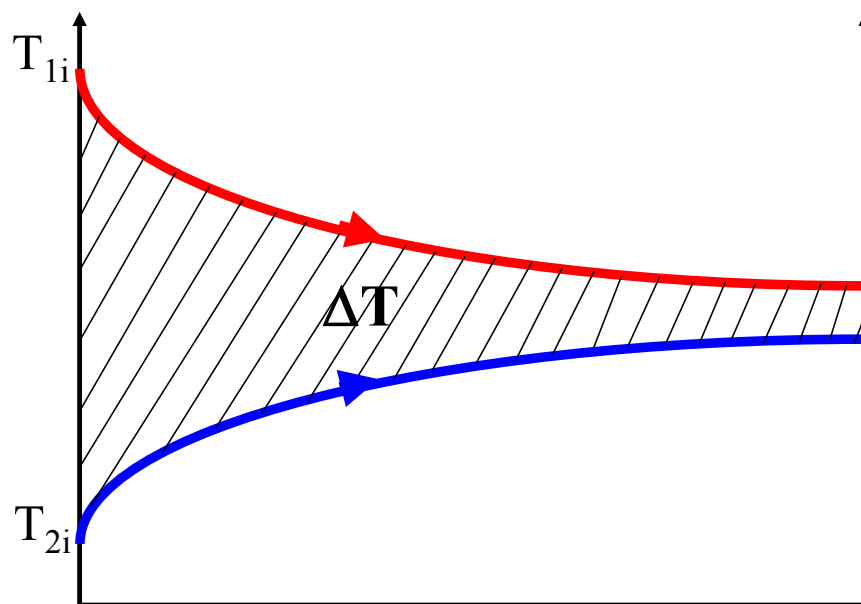
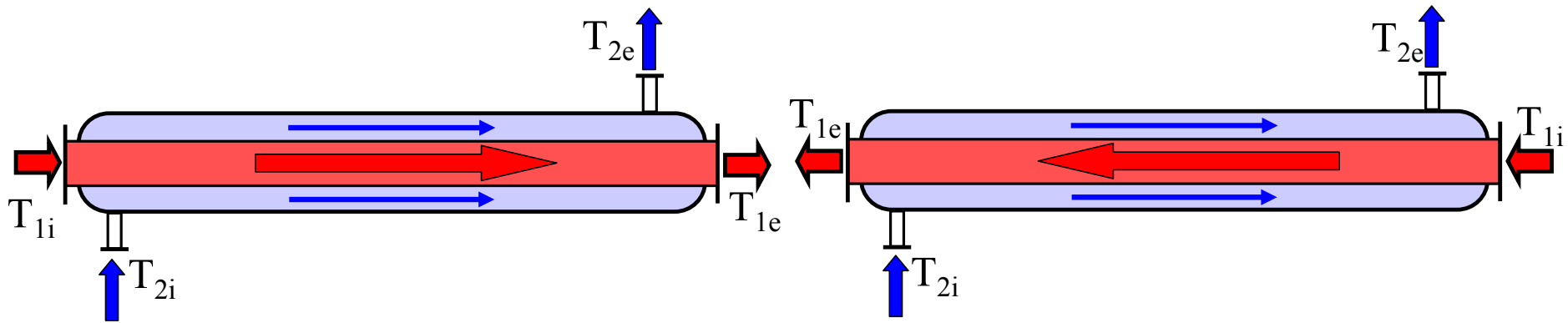
- o În majoritatea cazurilor, potențialul transferului termic se modifica,
- o principala cauză a modificării = însuși transferul de căldură → temperaturile mediilor care schimbă căldură variază.
- o Temperaturile mediilor care schimbă căldură, precum și potențialul transferului de căldură pot fi variabile:

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

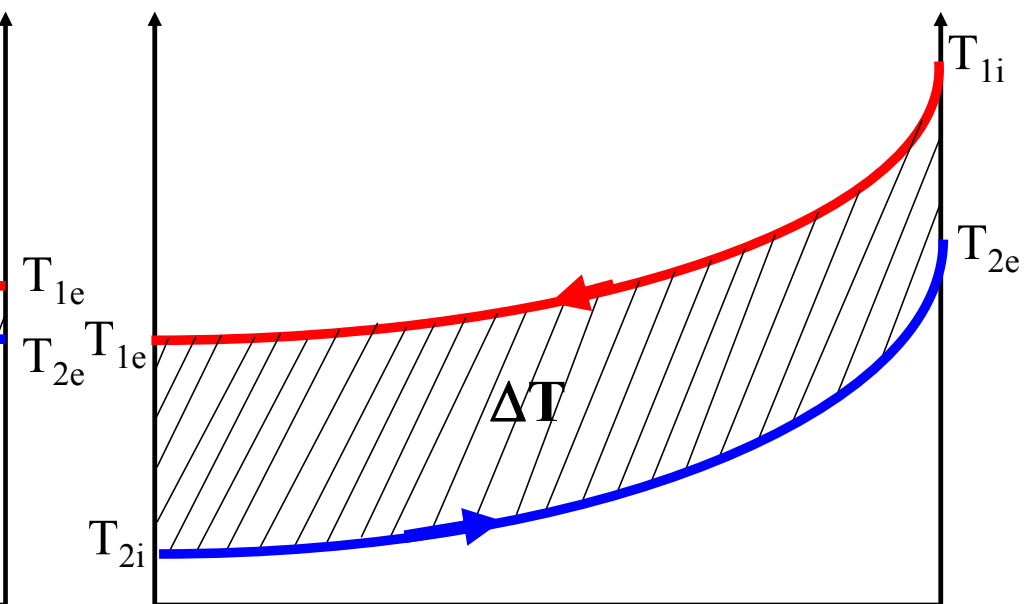
- o numai în spațiu: $\partial T / \partial t = 0; \partial T / \partial l \neq 0$
- o numai în timp: $\partial T / \partial t \neq 0; \partial T / \partial l = 0$
- o în spațiu și în timp: $\partial T / \partial t \neq 0; \partial T / \partial l \neq 0$
- o În primul caz **regimul este staționar** (în fiecare punct al sistemului considerat, toți parametrii se mențin constanți în timp, dar variază în spațiu).

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

- o Ex: schimbător de căldură de tip "țeavă în țeavă"
 - curg două fluide
 - în echicurent (fig. 4.30 a)
 - în contracurent (fig. 4.30 b),
 - este perfect izolat termic față de mediul ext.,
 - în fiecare punct de-a lungul schimbătorului fluidele au o anumită temperatură = ct.
 - pe lungimea schimbătorului de căldură, temp. celor două fluide se modifică drept urmare a transferului termic de la fluidul cald la fluidul rece: temp. variază în spațiu



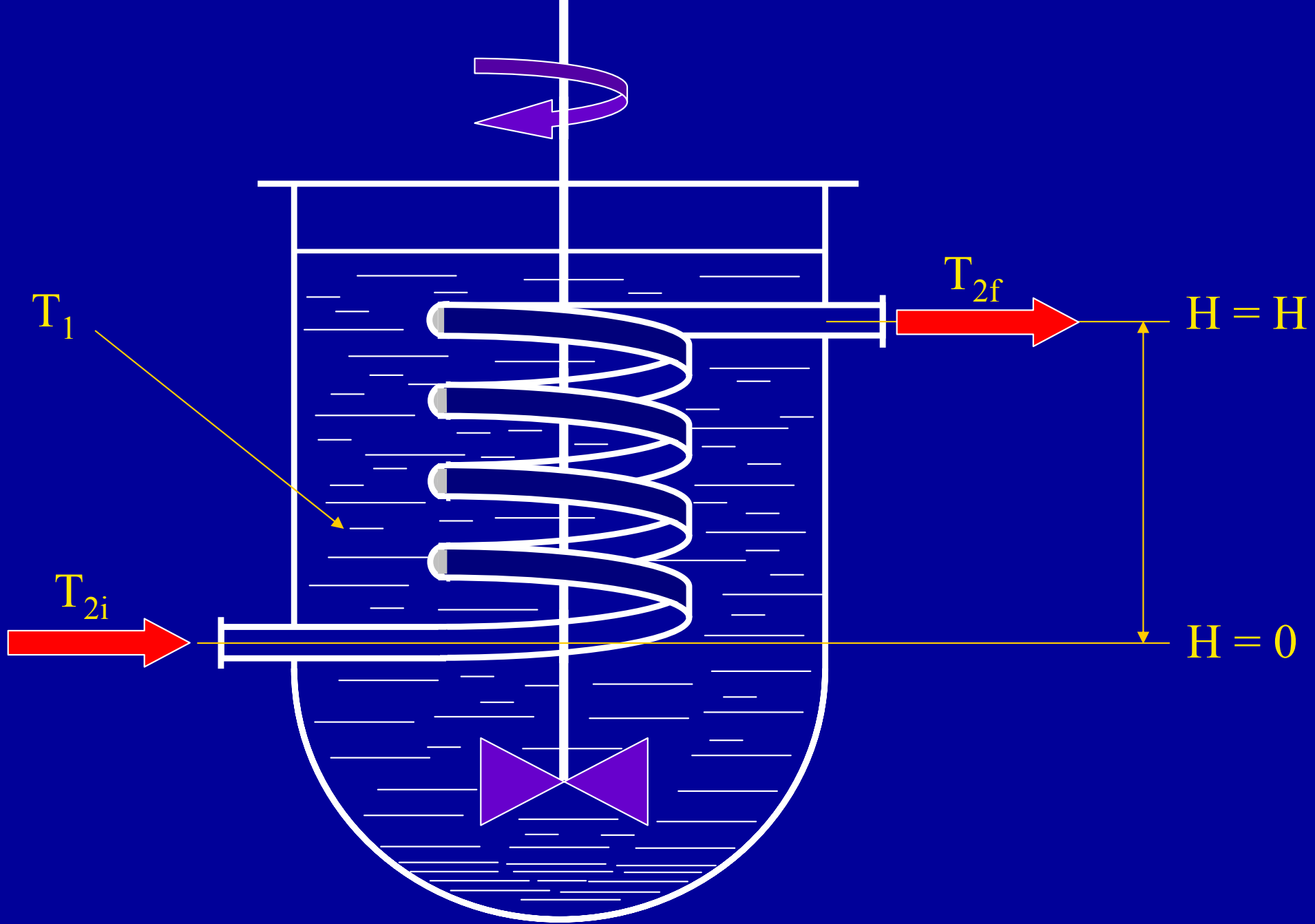
a



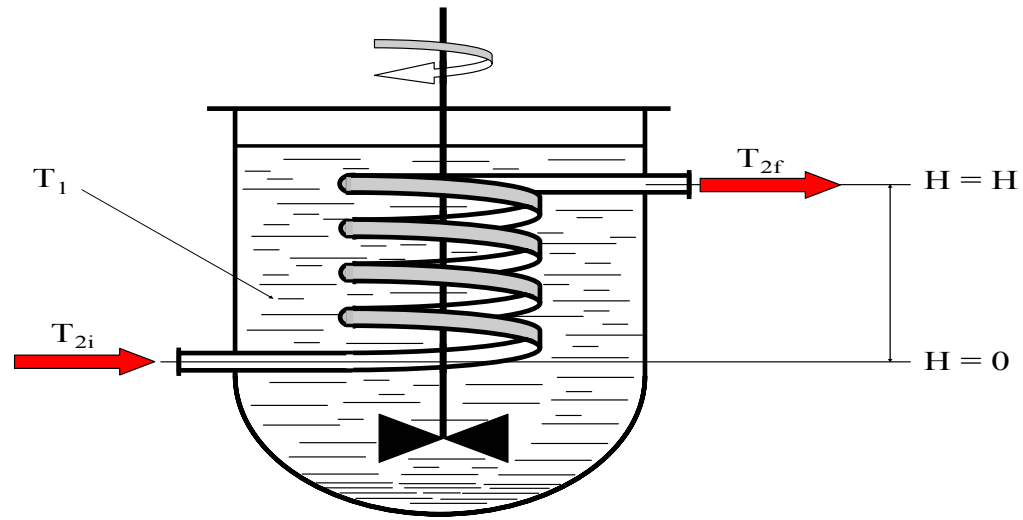
b

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

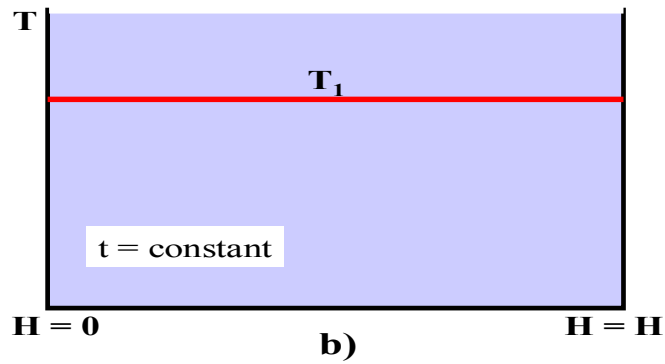
- o În următoarele două cazuri, regimul este nestaționar, temperatura fluidelor suferind variații în timp.
- o Este cazul recipientelor cu funcționare discontinuă (în șarje) prevăzute cu agitator și serpentină de încălzire sau de răcire (fig. 4.31 a).
- o Dacă lichidul din recipient este puternic agitat (cazul ideal al "rec. discontinuu cu amestecare perfectă" - RDAP), în orice moment temperatura lichidului este identică în toate punctele din recipient (fig. 4.31 b).
- o În timp însă, temperatura lichidului din recipient se modifică, ca urmare a schimbului de căldură cu agentul termic din serpentină (fig. 4.31 c).



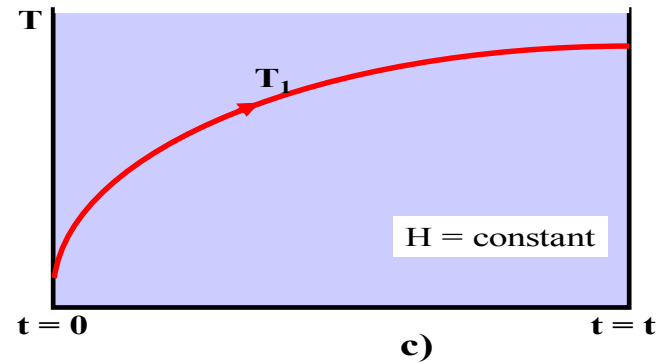
a)



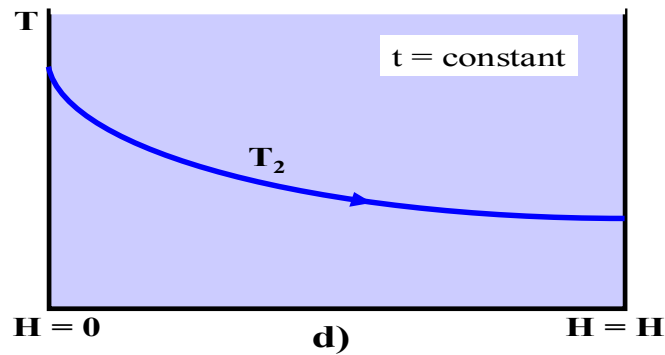
a)



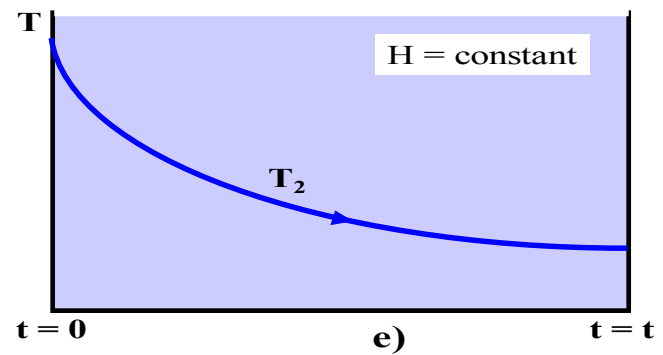
b)



c)



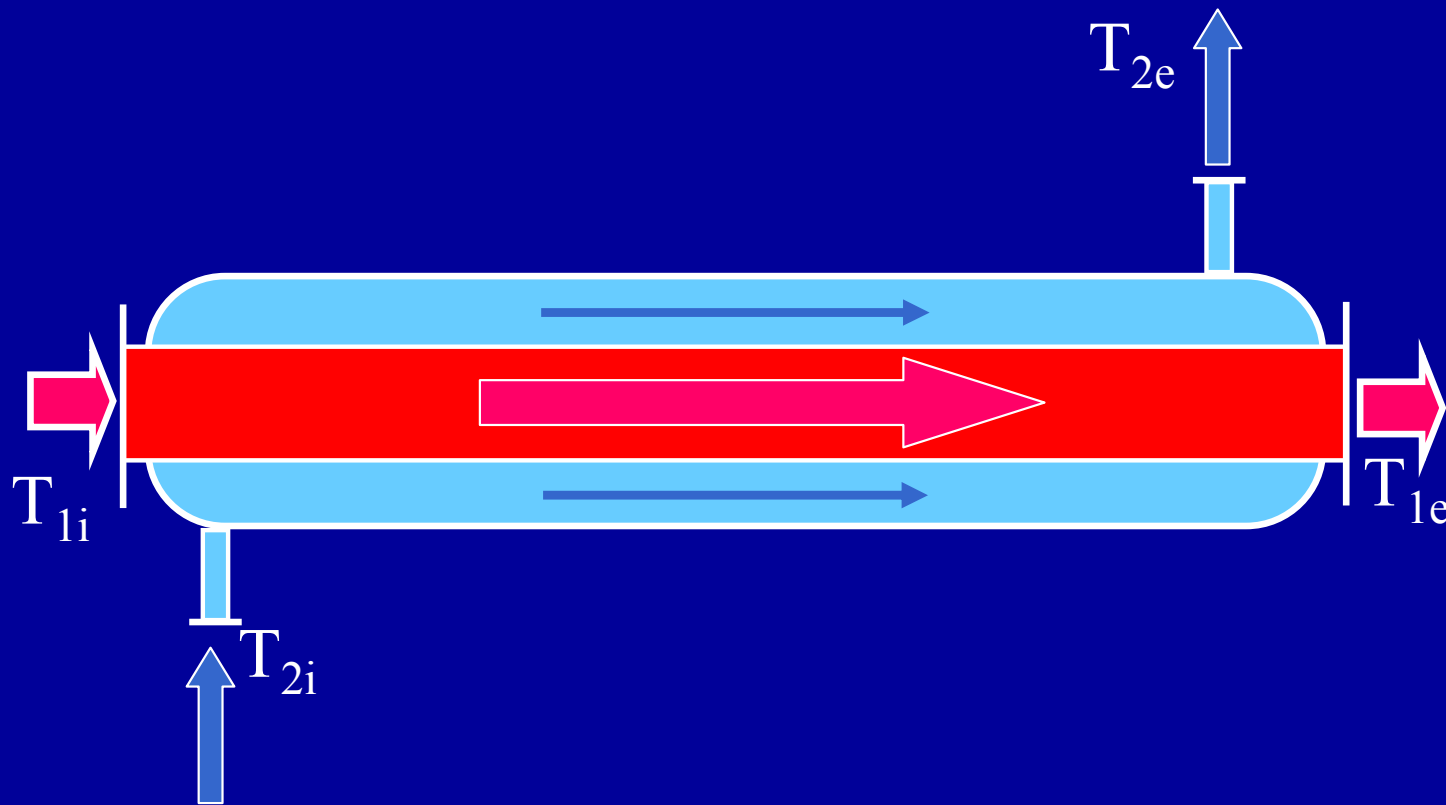
d)



e)

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o În cazul curgerii fluidelor în echicurent



Transfer global de căldură la potențial termic variabil

- o Potențialul termic inițial $\Delta T_1 = T_{1i} - T_{2i}$ este maxim;
- o De-a lungul schimbătorului el scade continuu, ajungând ca la ieșire să aibă valoarea minimă $\Delta T_2 = T_{1e} - T_{2e}$.
- o Fluxul termic transferat printr-o porțiune infinitezimală dA din suprafața țevii interioare va fi:

$$dQ_s = K \cdot (T_1 - T_2) \cdot dA \quad (225)$$

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

- o Fluxul termic este cedat de către fluidul cald (1), a cărui temperatură se micșorează cu dT_1 , fluidului rece (2), a cărui temperatură crește cu dT_2 .
- o ec. partiale de bilanț termic:

$$dQ_s = -m_{m1} \cdot c_{p1} \cdot dT_1 \quad (226)$$

$$dQ_s = +m_{m2} \cdot c_{p2} \cdot dT_2 \quad (227)$$

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o Explicitând dT_1 și dT_2 din (226) și (227):

$$dT_1 - dT_2 = - \left(\frac{1}{m_{m1} \cdot c_{p1}} + \frac{1}{m_{m2} \cdot c_{p2}} \right) \cdot dQ_s \quad (228)$$

o Notând expresia din paranteză cu f , (228) se mai poate scrie:

$$dT_1 - dT_2 = d(T_1 - T_2) = -f \cdot dQ_s \quad (229)$$

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o sau:

$$dQ_s = -\frac{d(T_1 - T_2)}{f} \quad (230)$$

o Egalând (225) cu (230) rezultă:

$$K \cdot (T_1 - T_2) \cdot dA = -\frac{d(T_1 - T_2)}{f} \quad (231)$$

o Separând variabilele și integrând (231) pe întreaga suprafață de transfer termic, **A**:

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

$$\int_{T_{1i}-T_{2i}}^{T_{1e}-T_{2e}} \frac{d(T_1 - T_2)}{T_1 - T_2} = -f \cdot K \cdot \int_0^A dA \quad (232)$$

o rezultă:

$$\ln \frac{(T_{1e} - T_{2e})}{(T_{1i} - T_{2i})} = \ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = -fKA \quad (233)$$

o care se mai poate scrie:

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \cdot \exp(-f \cdot K \cdot A) \quad (234)$$

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \cdot \exp(-f \cdot K \cdot A) \quad (234)$$

o Din forma ecuației (234):

- potențialul termic la intrare (ΔT_1) este egal cu potențialul termic la ieșire (ΔT_2) doar dacă $A = 0$,
- potențialul termic la ieșire se anulează ($\Delta T_2 = 0$) pentru o arie infinită a suprafeței de transfer termic.

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

- o Integrând (230) pe întreaga suprafață de transfer termic, → expresia fluxului termic transmis de la fluidul (1) la (2):

$$Q = -\frac{1}{f} \int_{T_{1i}-T_{2i}}^{T_{1e}-T_{2e}} d(T_1 - T_2) = -\frac{1}{f} (\Delta T_2 - \Delta T_1) \quad (235)$$

- o Eliminând parametrul f între ecuațiile (233) și (235), se obține:

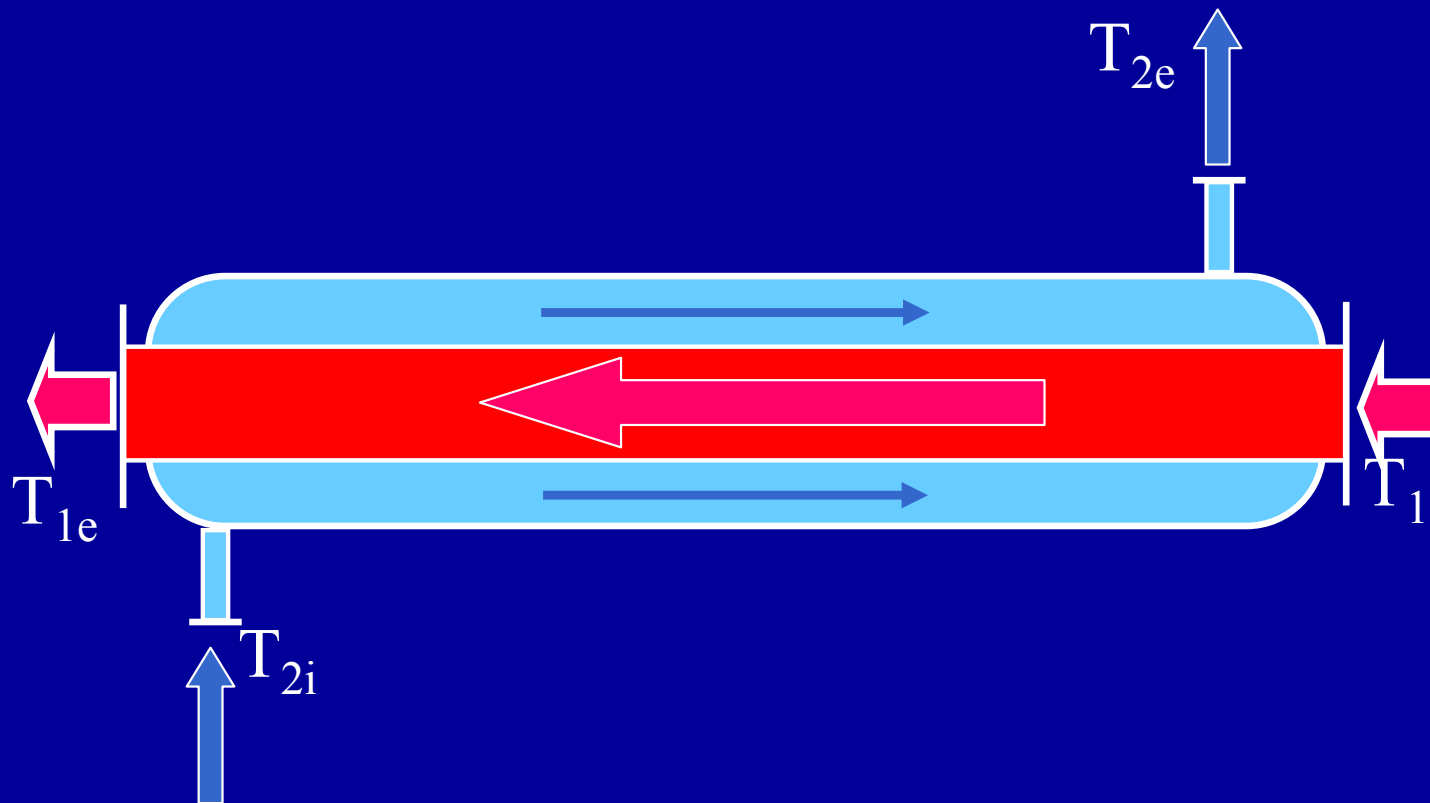
Transfer global de căldură la potențial termic variabil

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = K \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (236)$$

- o Comparând ecuația (236) cu ecuația (210):
 - la transferul termic staționar, între 2 fluide în echicurent despărțite printr-un perete solid, este valabilă ec. gen. a transferului termic la potențial constant, cu condiția înlocuirii ΔT cu **media logaritmică a diferențelor de temperatură de la extremitățile schimbătorului de căldură, ΔT_m .**

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o În cazul curgerii fluidelor în contracurent



Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o Rămâne valabil raționamentul efectuat la transferul termic în echicurent, cu observația că diferențele de temperatură care intervin în calculul valorii ΔT_m au expresiile:

$$\Delta T_1 = T_{1e} - T_{2i}$$

$$\Delta T_2 = T_{1i} - T_{2e}$$

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad (237)$$

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o Observația 1.

Dacă diferențele de temperatură ΔT_1 și ΔT_2 nu diferă prea mult între ele, media logaritmică ΔT_m se poate înlocui cu media aritmetică, $\frac{1}{2}(\Delta T_1 + \Delta T_2)$.

Dacă $\Delta T_1/\Delta T_2 < 2$, înlocuirea mediei logaritmice cu media aritmetică introduce erori de sub 4%.

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o Observația 2.

În cazul suprafețelor de transfer de căldură constituite din pereți cilindrici, în locul suprafeței de transfer A se va considera suprafața medie de transfer (A_m), iar coeficientul global de transfer de căldură se va calcula cu relația (224).

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o Observația 3.

Dacă unul dintre fluide primește (cedează) **căldură latentă** (la transferul termic cu schimbarea stării fizice: vaporizare, condensare, topire, cristalizare etc.), variația temperaturii fluidului respectiv este nulă.

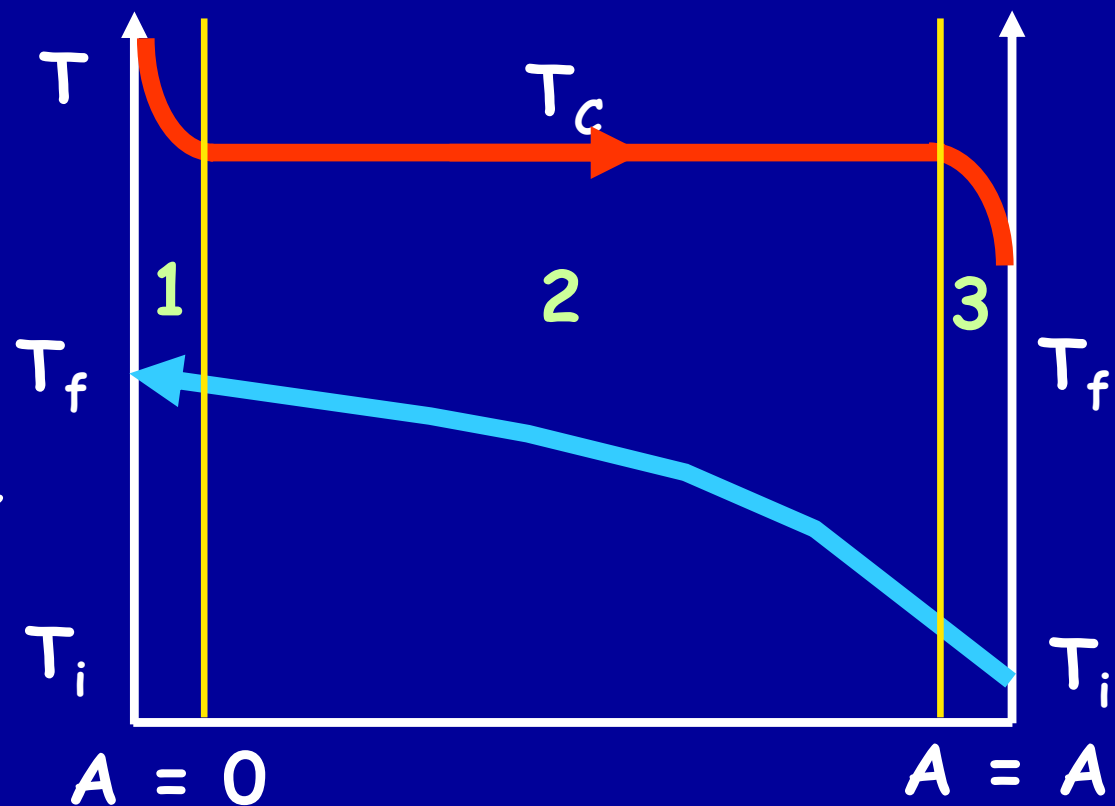
În aceste condiții, în expresia parametrului **f** din (228) termenul corespunzător fluidului care-și schimbă starea fizică se anulează.

Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o Observația 4.

Se poate întâmpla ca numai pe o porțiune din schimbător să apară schimbul de căldură latentă.

În acest caz se împarte schimbătorul în trei porțiuni distincte care se tratează separat.



Transfer global de căldură la potențial termic variabil

o Observația 5.

Dacă variațiile de temperatură ale celor două fluide sunt mari, iar precizia cerută calculelor este ridicată, trebuie luate în considerare atât variația cu temperatura a căldurilor specifice masice (c_p) cât și variația cu temperatura a coeficientului global de transfer de căldură, K .

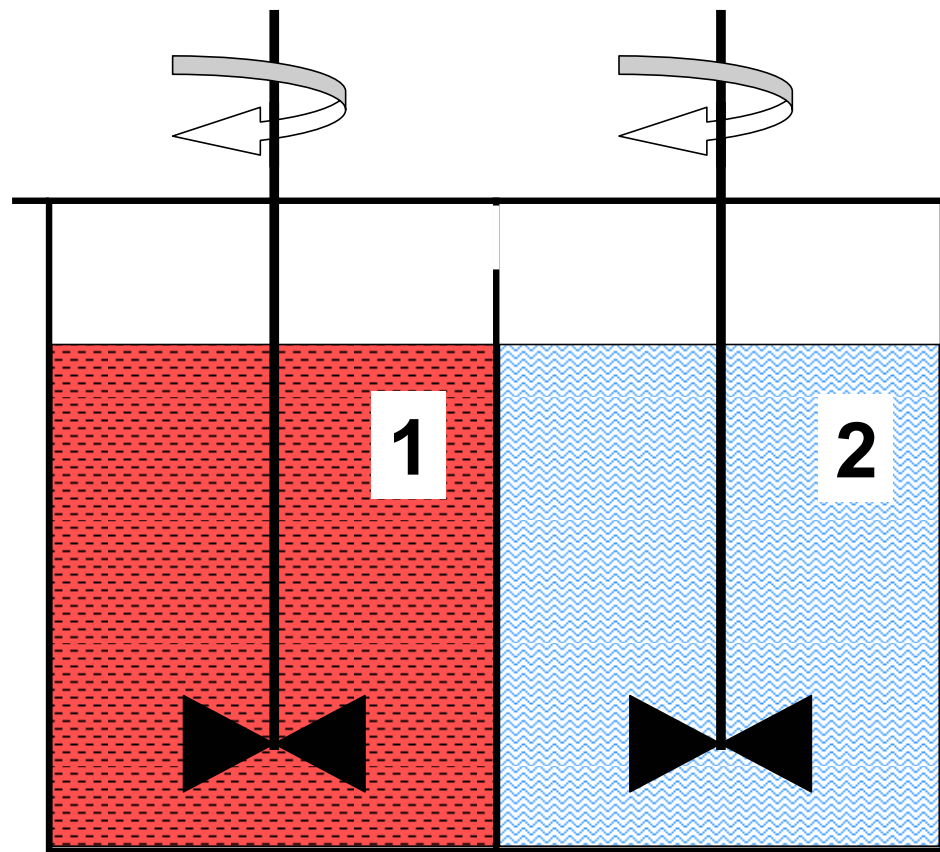
În aceste condiții se "împarte" schimbătorul de căldură în porțiuni pe care variația de temperatură este mică, sau se aplică integrarea grafică sau numerică.

Transfer termic la potențial variabil în regim nestaționar

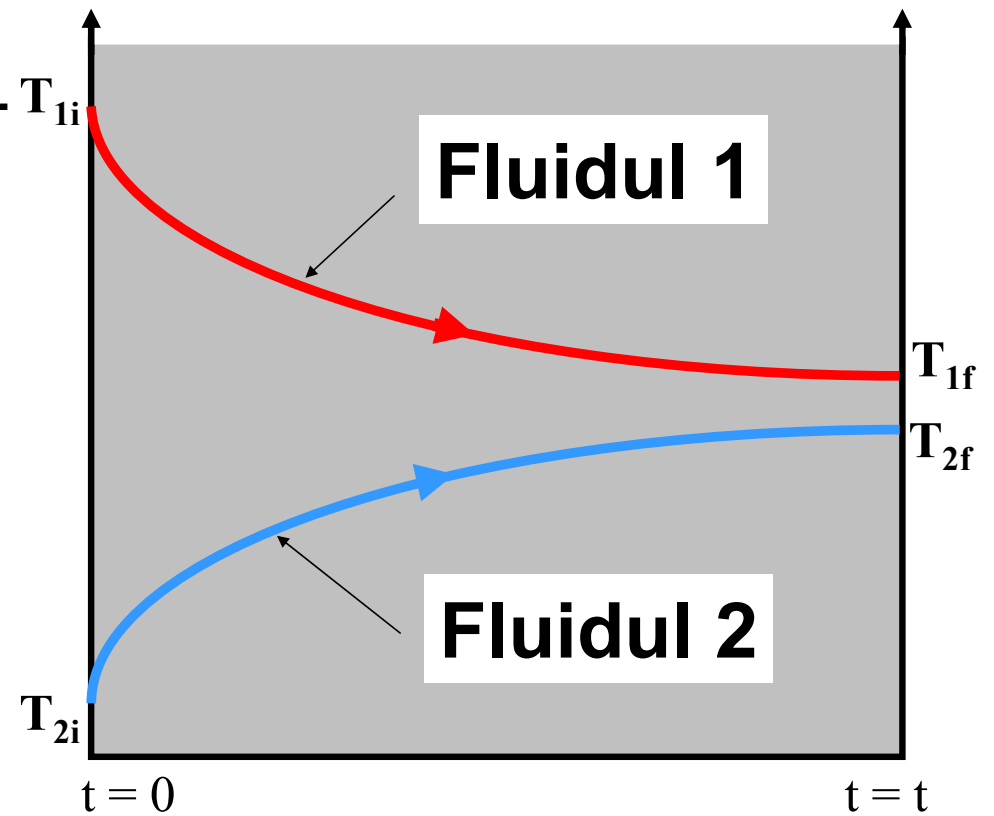
- o Dacă transferul termic decurge în regim nestaționar, câmpul de temperatură variază în timp.
- o Se prezintă două exemple simple, ale unor situații frecvent întâlnite în procesele de transfer de căldură industriale:
 - Variația temperaturilor numai în timp
 - Variația temperaturilor în timp și în spațiu

Variația temperaturilor numai în timp

o Se consideră (fig. 4.32 a) un recipient perfect izolat termic față de mediul exterior, împărțit printr-un perete în două compartimente în care se găsesc două fluide, având inițial temperaturi diferite, suficient de bine agitate pentru a putea considera că în interiorul fiecărui fluid temperatura este uniformă.



a)



b)

Variația temperaturilor numai în timp

- o La momentul t când fluidele au temperaturile T_1 și T_2 , cantitatea de căldură transferată într-un interval infinitezimal de timp dt este:

$$dQ = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \cdot dt \quad (238)$$

- o Cantitatea de căldură dQ :
 - este cedată de fluidul cald (1), a cărui temperatură scade cu dT_1 ,
 - este primită de către fluidul rece (2), a cărui temperatură crește cu dT_2 :

Variația temperaturilor numai în timp

$$dQ = -m_1 \cdot c_{p1} \cdot dT_1 \quad (239)$$

$$dQ = +m_2 \cdot c_{p2} \cdot dT_2$$

o Explicitând dT_1 și dT_2 și scăzând ecuațiile (239) membru cu membru, rezultă:

$$\begin{aligned} dT_1 - dT_2 &= d(T_1 - T_2) = \\ &= - \left(\frac{1}{m_1 \cdot c_{p1}} + \frac{1}{m_2 \cdot c_{p2}} \right) \cdot dQ = -f \cdot dQ \end{aligned} \quad (240)$$

Variația temperaturilor numai în timp

o Eliminând pe dQ între ec. (238) și (240):

$$\frac{d(T_1 - T_2)}{T_1 - T_2} = -f \cdot K \cdot A \cdot dt \quad (241)$$

o Integrând ecuația (241) între momentul inițial ($t = 0$) și un moment oarecare t , se obține:

Variația temperaturilor numai în timp

$$\int_{T_{1i}-T_{2i}}^{T_1-T_2} \frac{d(T_1 - T_2)}{T_1 - T_2} = -f \cdot K \cdot A \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{T_1 - T_2}{T_{1i} - T_{2i}} = -f \cdot K \cdot A \cdot t$$

(242)

$$\ln \frac{\Delta T}{\Delta T_i} = -f \cdot K \cdot A \cdot t$$

$$\Delta T = \Delta T_i \cdot \exp(-f \cdot K \cdot A \cdot t)$$

Variația temperaturilor numai în timp

o Se verifică faptul că:

- pentru momentul inițial ($t = 0$) $\Delta T = \Delta T_i$;

- după un timp foarte lung ($t \rightarrow \infty$),

$$\Delta T \rightarrow 0$$

, adică cele două temperaturi tind să devină egale.

o Dacă în (240) se separă variabilele și se integrează între ΔT_i și ΔT :

$$\int_0^Q dQ = -\frac{1}{f} \int_{\Delta T_i}^{\Delta T} d(T_1 - T_2) \quad (243)$$

Variația temperaturilor numai în timp

o se obține:

$$Q = -\frac{1}{f}(\Delta T - \Delta T_i) \quad (244)$$

o Eliminând pe f între (242 c) și (244):

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta T - \Delta T_i}{\ln \frac{\Delta T}{\Delta T_i}} \cdot t \quad (245)$$

o Sau:

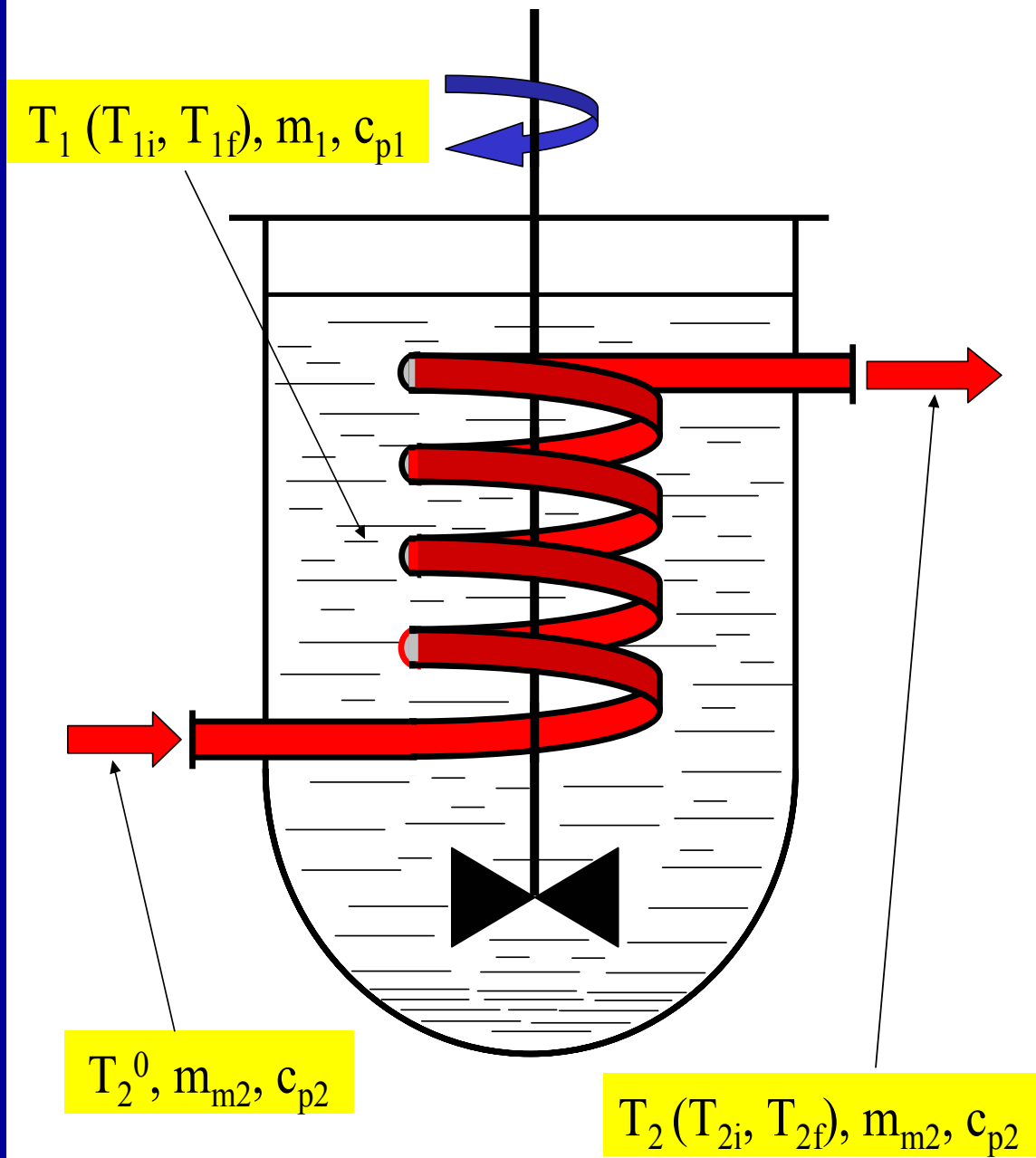
Variația temperaturilor numai în timp

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T_m \cdot t \quad (246)$$

- o Se aplică ecuația generală a transferului termic, cu obs. că potențialul termic al transferului este dat de media logaritmică a diferențelor de temperatură la momentul inițial ($t = 0$) și la un moment oarecare, t .

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

- o Este cazul des întâlnit al lichidului dintr-un recipient prevăzut cu agitator pentru uniformizarea temperaturii, răcit prin intermediul unei serpentine imersate prin care circulă un fluid rece.
- o Se poate considera și cazul unui lichid rece în recipient, care trebuie încălzit prin intermediul fluidului cald care circulă prin serpentină (fig. 4.33).



Variația temperaturilor în timp și în spațiu

o Se cunosc:

- ❖ temperatura inițială a lichidului cald (1) din recipient (T_{1i}),
- ❖ temperatura fluidului rece (2) la intrarea în serpentină (T_{2i}),
- ❖ caracteristicile geometrice și termice ale sistemului,
- ❖ schimbul de căldură cu mediul exterior se neglijează.

o Se cere:

- ✓ temperatura lichidului din recipient (T_1)
- ✓ temperatura fluidului rece la ieșirea din serpentină (T_2) la un moment oarecare,
- ✓ cantitatea de fluid de răcire necesară pentru răcirea lichidului din recipient până la temperatura dată.

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

- o Pentru un interval de timp suficient de mic, dt , transferul termic decurge în regim staționar.
- o În intervalul dt , între fluide se transferă cantitatea de căldură dQ .
- o Cantitatea de căldură cedată de fluidul cald (1) este:

$$dQ = -m_1 \cdot c_{p1} \cdot dT_1 \cdot dt \quad (247)$$

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

o Cantitatea de căldură primită de fluidul rece (2) este:

$$dQ = +m_{m2} \cdot c_{p2} \cdot (T_2 - T_2^0) \cdot dt \quad (248)$$

o Cant. de căldură schimbată între fluide:

$$dQ = K \cdot A \cdot \Delta T_m \cdot dt \quad (249)$$

- A = supraf. de transfer termic a serpentinei,
- K = coeficientul global de transfer termic
- ΔT_m = potențialul termic mediu

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

o Explicitând pe ΔT_m din (249) se obține:

$$\Delta T_m = \frac{(T_1 - T_2^0) - (T_1 - dT_1 - T_2)}{\ln \frac{(T_1 - T_2^0)}{(T_1 - dT_1 - T_2)}} = \frac{(T_2 - T_2^0)}{\ln \frac{(T_1 - T_2^0)}{(T_1 - T_2)}} \quad (250)$$

o Eliminând pe $(T_2 - T_2^0)$ între (248) - (250) rezultă:

$$\ln \frac{(T_1 - T_2^0)}{(T_1 - T_2)} = \frac{K \cdot A}{m_{m2} \cdot c_{p2}} \quad (251)$$

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

- o Întrucât membrul drept al expresiei (251) este funcție doar de constantele aparatului și de condițiile de lucru, valoarea sa rămâne constantă în timpul transferului de căldură. În aceste condiții, se poate introduce constanta B , definită de ecuația:

$$B = \frac{(T_1 - T_2^0)}{(T_1 - T_2)} \quad (252)$$

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

o Înlocuind (252) în (249), rezultă:

$$dQ = K \cdot A \cdot \frac{(T_2 - T_2^0)}{\ln B} \cdot dt \quad (253)$$

o Eliminând T_2 între (252) și (253):

$$dQ = K \cdot A \cdot (T_1 - T_2^0) \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} \cdot dt \quad (254)$$

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

o care integrată între limitele:

- T_{1i} (temperatura inițială a fluidului (1))
- T_{1f} (temperatura finală a fluidului (1))

o devine:

$$\ln \frac{T_{1i} - T_2}{T_{1f} - T_2} = \frac{K \cdot A}{m_1 \cdot c_{p1}} \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} \cdot t \quad (255)$$

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

- o Căldura transferată din momentul începerii răcirii fluidului (1) până la momentul t se obține integrând (247) între lim. T_{1i} și T_{1f} :

$$Q = m_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1i} - T_{1f}) \quad (256)$$

- o Eliminând produsul $m_1 \cdot c_{p1}$ între ultimele două ecuații, rezultă:

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{T_{1i} - T_{1f}}{\ln \frac{T_{1i} - T_2}{T_{1f} - T_2}} \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} \cdot t \quad (257)$$

o Ecuația (257) se mai poate scrie:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T_m^* \cdot t \quad (258)$$

o unde prin ΔT_m^* s-a notat expresia:

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

$$\Delta T_m^* = \frac{T_{1i} - T_{1f}}{\ln \frac{T_{1i} - T_2}{T_{1f} - T_2}} \cdot \frac{B - 1}{B \cdot \ln B} \quad (259)$$

- media logaritmică dintre $(T_{1i} - T_2)$ și $(T_{1f} - T_2)$
- media logaritmică dintre 1 și $1/B$:

$$\frac{B - 1}{B \cdot \ln B} = \frac{1 - 1/B}{\ln \frac{1}{1/B}} \quad (260)$$

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

- o Integrând (248) între $t = 0$ și $t = t$ rezulta debitul necesar de fluid de răcire (2):

$$Q = m_{m2} \cdot c_{p2} \cdot (T_2^m - T_2^0)$$

$$m_{m2} = \frac{Q}{c_{p2} \cdot (T_2^m - T_2^0)}$$

(261)

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

- o Valoarea temperaturii medii a fluidului (2) la ieșirea din serpentină, T_{2m} rezultă din ecuația:

$$Q = m_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_2^m - T_2^0) \cdot t = K \cdot A \cdot \Delta T_m^* \cdot t \quad (262)$$

- o de unde:

$$T_2^m = \frac{K \cdot A}{m_2 \cdot c_{p2}} \cdot \Delta T_m^* + T_2^0 \quad (263)$$

Variația temperaturilor în timp și în spațiu

- o Temperatura agentului termic la ieșirea din serpentină variază între T_{2i} (la începutul procesului) și T_{2f} (la sfârșitul procesului).
- o Aceste valori ale temperaturii se pot calcula din (252) în care T_1 se înlocuiește cu T_{1i} , respectiv cu

T_{1f} :

$$T_{2i} = \frac{(B - 1) \cdot T_{1i} + T_2^0}{B}$$

$$T_{2f} = \frac{(B - 1) \cdot T_{1f} + T_2^0}{B}$$

(264)

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Se întâlnește frecvent în practica industrială:
 - încălzirea unor fluide prin barbotare de abur,
 - condensarea vaporilor în condensatoarele de amestec,
 - uscarea solidelor particulare în curent de aer sau gaze de ardere,
 - răcirea apei în turnuri de răcire,
 - răcirea gazelor în scrubere goale sau cu umplutură,
- o În multe astfel de procese, concomitent cu transferul termic au loc și procese de transfer de masă.

Transfer termic direct fără schimbarea stării de agregare

Transfer termic direct fără schimbarea stării de agregare

- o În schimbătoarele de căldură de amestec fără schimbarea stării de agregare, agenții termici pot fi:
 - două lichide,
 - două gaze,
 - un solid (dispersat în particule foarte fine) și un fluid (lichid sau gaz).
- o În cazul transferului termic **gaz - gaz** sau **lichid - lichid** în aparate cu sau fără agitare, transferul de căldură are loc foarte rapid, datorită suprafeței foarte mari de contact.

Transfer termic direct fără schimbarea stării de agregare

Calculul temperaturii finale a amestecului:

o pe baza ecuației generale de bilanț termic:

$$\sum_i m_i \cdot c_{pi} \cdot T_i = T_m \sum_i m_i \cdot c_{pi} \quad (265)$$

o din care rezultă temperatura finală a amestecului, T_m :

$$T_m = \frac{\sum_i m_i \cdot c_{pi} \cdot T_i}{\sum_i m_i \cdot c_{pi}} \quad (266)$$

Transfer termic direct fără schimbarea stării de agregare

- o În cazul unui amestec fluid - solid (fin dispersat), ambele în mișcare continuă, coeficientul global de transfer termic se calculează cu relația:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d_p}{2\lambda}} \quad (267)$$

Transfer termic direct fără schimbarea stării de agregare

- o α = coeficientul individual de transfer termic fluid - solid [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$], - se calculează din ecuații criteriale specifice
- o λ = coeficientul de conductivitate termică al particulelor solide [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
- o d_p = diametrul particulelor solide [m] (sferice)
- o Temperaturile de calcul ale mărimilor fizice sunt:
 - Temp. medie a fluidului (T_{mf}),
 - Temp. medie a part. solide (T_{ms}),
 - Temp. medie a stratului limită (T_{ml}):

$$T_{ml} = \frac{1}{2} (T_{mf} + T_{ms})$$

Transfer termic direct fără schimbarea stării de agregare

- o Suprafața de transfer termic solid - fluid este dată de suprafața totală a particulelor solide:

$$A = \frac{2 V_s}{3 d_p} = \frac{2 m_s}{3 \rho_s \cdot d_p} \quad (269)$$

- o V_s = volumul particulelor solide,
- o m_s = masa particulelor solide,
- o ρ_s = densitatea particulelor solide.

Transfer termic direct cu schimbarea stării de agregare

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Apare în aparatele în care interacționează o fază lichidă cu una gazoasă sau de vapori:
 - scrubere (coloane cu stropire),
 - condensatoare de amestec,
 - turnuri de răcire,
 - preîncălzitoare prin amestec cu abur.
- o În coloanele goale (fără umplutură sau amenajări interioare), contactul dintre lichid și gaz (vapori) se produce pe suprafața picăturilor de lichid pulverizat.
- o În coloanele cu umplutură, contactul lichidului cu gazul (vaporii) are loc pe suprafața udată a corpurilor de umplere.

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Suprafața de contact lichid - gaz (lichid - vapori) = factorul determinant în transferul de căldură:
 - este cu atât mai mare cu cât picăturile pulverizate sunt mai mici
 - cu cât diametrul picăturilor este mai redus, se micșorează viteza de variație a temperaturii

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Suprafața de transfer de căldură a lichidului pulverizat:

$$A = 6 \frac{V_l}{d} \quad [\text{m}^2] \quad (270)$$

- o V_l = volumul de lichid pulverizat
- o d = diametrul picăturilor (sferice) de lichid

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Diametrul picăturilor, la pulverizarea cu un injector mecanic, este dat de relația:

$$d = \chi \frac{8\sigma}{\rho \cdot v^2} \quad [\text{m}] \quad (271)$$

- o σ = tensiunea superficială a lichidului [N/m],
- o v = viteza de ieșire a jetului din injector [m/s],
- o χ = coeficient adimensional = f(prop. lichidului):
 - $\chi = 0,25$ pentru apă,
 - $\chi = 0,35$ pentru etanol,
 - $\chi = 0,50$ pentru glicerină.

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o O relație aproximativă pentru calculul diametrului picăturilor este:

$$d \approx \frac{3 \cdot 10^{-4}}{P} \quad [\text{m}] \quad (272)$$

- o P = presiunea lichidului la intrare în injector, [MPa].

Transfer global de căldură direct între două fluide

o coloane cu umplutură

$$A = A_s \cdot V \quad [\text{m}^2] \quad (273)$$

- A_s = suprafața specifică a umpluturii
- V = volumul total al umpluturii

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} + \frac{d}{2\lambda}} \quad (274)$$

- α = coeficientul de transfer termic superficial
în procesele de vaporizare

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Pentru valori Re cuprinse între 1 și 200, α se poate calcula din ecuația criterială:

$$Nu = 2 + 1,05 Re^{0,5} Pr^{0,33} Gu^{0,175} \quad (275)$$

- o Gu este criteriul Guchmann:

$$Gu = \frac{T_{uscat} - T_{umed}}{T_{uscat}} \quad (276)$$

- o T_{uscat} = temperatura aerului înconjurător, citita pe termometrul uscat
- o T_{umed} = temperatura aerului înconjurător, citita pe termometrul umed.

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Criteriile Re și Nu din (275) se calculează cu dimensiunea caracteristică egală cu diametrul picăturii.
- o Viteza picăturii în cădere este:

$$v = 162 \sqrt{\frac{d}{\rho g}} \quad [\text{m/s}] \quad (277)$$

Transfer global de căldură direct între două fluide

o Răcirea aerului cu apă în scrubere cu umplutură

- o coeficientul global de transfer termic se determină cu relația lui Javoronkov:

$$Ki = 0,17 Re_g^{0,7} \cdot Re_l^{0,7} \cdot Pr_g^{0,33} \cdot \varphi^{1,15} \quad (278)$$

$$Ki = \frac{K \cdot d_{ech}}{\lambda_g} \quad (279)$$

- o Ki = criteriul lui Kirpicev

Transfer global de căldură direct între două fluide

$$\text{Re}_g = \frac{4v_g \cdot \rho_g}{\mu_g \cdot A_s} \quad (280)$$

$$\text{Re}_l = \frac{L \cdot d_{ech}}{\mu_l \cdot A_s} \quad (281)$$

- o φ - umiditatea relativă a aerului (adimensional);
- o d_{ech} - diametrul hidraulic al umpluturii (m): $d_{ech} = 4V'/A_s$;
- o V' - volumul liber al umpluturii (m^3/m^3);
- o A_s - suprafața specifică a umpluturii (m^2/m^3);
- o K - coeficientul global de transfer termic ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$);
- o λ_g - coeficientul de conductivitate termică a gazului ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$);
- o v_g - viteza fictivă a gazului la intrarea în umplură (m/s);
- o η_g - viscozitatea dinamică a gazului (Pa.s);
- o ρ_g - densitatea gazului (kg/m^3);
- o η_l - viscozitatea dinamică a lichidului (Pa.s);
- o L - intensitatea de stropire ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

Transfer global de căldură direct între două fluide

o Răcirea apei cu aer în turnuri de răcire

o În cazul turnurilor peliculare

ecuația criterială Nesterenko - Guchmann:

$$\text{Nu} = \frac{K \cdot l}{\lambda} = 2 + 1,05 \text{Re}^{0,50} \text{Pr}^{0,33} \text{Gu}^{0,175} \quad (282)$$

o valabilă pentru $0 < \text{Re} < 200$

o Prop. fizice care intervin în ecuație se iau pt. apă,

o lungimea caracteristică l = grosimea peliculei de apă.

Transfer global de căldură direct între două fluide

o În cazul turnurilor cu picurare
ecuația Ranz - Marshall:

$$\text{Nu} = \frac{K \cdot l}{\lambda} = 2 + 0,6 \text{Re}^{0,50} \text{Pr}^{0,33} \quad (283)$$

- o valabilă pentru intervalul $0 < \text{Re} < 200$,
- o lungimea caracteristică l = diametrul mediu al picăturilor de apă,
- o v (din criteriul Re) = viteza relativă a picăturilor de apă.

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Evaporarea la suprafața unui lichid în
curent turbulent de gaz în curgere
forțată

$$\text{Nu}_g^* = 0,027 \text{Re}_g^{0,8} \left(\text{Pr}_g^* \right)^{0,33} \quad (284)$$

$$\text{Nu}_g^* = \frac{\beta \cdot d}{D_g} \quad - \text{criteriul Nusselt la difuziune pentru gaz} \quad (285)$$

$$\text{Pr}_g^* = \frac{\nu_g}{D_g} \quad - \text{criteriul Prandtl la difuziune pentru gaz} \quad (286)$$

Transfer global de căldură direct între două fluide

- β - coeficientul de evaporare (m/s);
- D_g - coeficientul de difuziune (m^2/s);
- ν_g - viscozitatea cinematică a gazului (m^2/s).

o În cazul răcirii apei, prin curgere peliculară printre canale prin care trece aer ($Pr_g^* = 0,63$), se poate utiliza relația simplificată:

$$Nu_g^* = 0,019 Re_g^{0,83} \quad (287)$$

Transfer global de căldură direct între două fluide

- o Pentru apa aflată în contact cu aerul în repaus, viteza de evaporare se poate determina din relația:

$$\beta^* = 170 + 0,09(t_1 - t_2)(P_s - P) \quad (287)$$

- o β^* - viteza de evaporare ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$);
- o t_1 - temperatura inițială (de intrare) a apei ($^{\circ}\text{C}$);
- o t_2 - temperatura finală (de ieșire) a apei ($^{\circ}\text{C}$);
- o P_s - presiunea de vapori a apei la temp. medie t_m (mm Hg);
- o P - presiunea parțială a vaporilor de apă în aer (mm Hg);
- o $t_m = \frac{1}{2}(t_1 + t_2)$ temperatura medie a apei ($^{\circ}\text{C}$).

VALORI ORIENTATIVE ALE COEFICIENTULUI GLOBAL DE TRANSFER TERMIC

Fluidele între care decurge transferul de căldură:	Valoarea coeficientului global de transfer K [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$] în curgere:	
	forțată	liberă
Gaz - gaz (la presiuni obișnuite)	10 - 40	4 - 12
Gaz - lichid (răcitoare de gaz)	10 - 60	6 - 20
Vapori în condensare - gaz (încălzitoare de aer)	10 - 60	6 - 12
Lichid - lichid (apă)	800 - 1700	140 - 340
Lichid - lichid (hidrocarburi, uleiuri)	120 - 270	30 - 60
Vapori în condensare - apă (condensatoare, încălzitoare)	800 - 3500	300 - 1200
Vapori în condensare - lichide organice (încălzitoare)	120 - 340	60 - 170
Vapori de substanțe organice în condensare - apă (condensatoare)	300 - 800	230 - 460
Vapori în condensare - lichide în fierbere (evaporatoare)	-	300 - 2500

Analiza coeficientului global de transfer termic

- o În cazul transferului termic între două fluide separate printr-un perete plan simplu, fără depuneri, expresia coeficientului global de transfer termic este:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (289)$$

Analiza coeficientului global de transfer termic

o Rezistența termică la transfer (R) este dată de expresia (290), ea fiind egală cu suma rezistențelor termice parțiale de-a lungul întregului proces de transfer:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} = R_1 + R_p + R_2 \quad (290)$$

Analiza coeficientului global de transfer termic

- o Datorită acestui fapt, rezistența totală R este mai mare decât oricare dintre rezistențele parțiale, coeficientul global K fiind mai mic decât oricare dintre coeficienții individuali:

$$K < \alpha_1 ; \quad K < \lambda / \delta ; \quad K < \alpha_2 ;$$

$$\text{deci : } K < \alpha_{\min}$$

(291)

Analiza coeficientului global de transfer termic

- o Valoarea coeficientului global fiind limitată de valoarea celui mai mic coeficient individual, rezultă că pentru intensificarea unui proces de transfer termic este necesară mărirea valorii lui α_{\min} (prin modificarea condițiilor și a factorilor hidrodinamici).
- o Rezistența termică parțială este maximă pentru partea în care procesul de transfer de căldură este influențat de coeficientul α_{\min} , adică:

$$R_{\max} = \frac{1}{\alpha_{\min}} \quad (292)$$

Analiza coeficientului global de transfer termic

- o În cazul în care coeficienții individuali de transfer au valori mult diferite, coeficientul global K este foarte apropiat ca valoare de coeficientul individual cel mai mic, caz în care rezistența termică totală este practic egală cu rezistența termică parțială maximă ($R \sim R_{\max}$).