

VI.2. Evaporarea

Evaporarea este operatia de concentrare a unor solutii care contin substante nevolatile dizolvate in solventi volatili, prin vaporizarea unei parti din solvent din solutia adusa la fierbere. Uneori evaporarea realizeaza indepartarea completa a solventului in vederea obtinerii componentelor nevolatile in stare solida, sau de topitura. Un astfel de exemplu este obtinerea hidroxidului de sodiu sub forma de topitura, prin concentrarea solutiilor obtinute prin electroliza. Caracteristic in evaporare este faptul ca vaporii rezultati la fierberea solutiei **sunt formatii numai din solventul (solventii) volatil.**

Intensitatea evaporarii se caracterizeaza printr-o marime denumita **capacitatea de evaporare**, **m**, care reprezinta cantitatea de dizolvant, **W**, evaporata in unitatea de timp, raportata la unitatea de suprafata de incalzire al evaporatorului:

$$m = \frac{W}{t \cdot A} \quad \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right] \quad (\text{VI.25})$$

Valoarea capacitatii de evaporare depinde de o serie de factori dintre care mai importanti sunt:

- a. **Concentratia solutiei.** Cu cat concentratia este mai mare, vascozitatea ei este mai ridicata si transferul de caldura se face mai greu, ceea ce determina scaderea capacitatii de evaporare;
- b. **Viteza de circulatie a solutiei,** influenteaza semnificativ intensitatea transferului de caldura si implicit valoarea capacitatii de evaporare;
- c. **Potentialul termic.** Cu cat potentialul este mai mare cu atat capacitatea de evaporare este mai mare. Potentialul termic poate fi marit fie prin cresterea temperaturii agentului termic fie prin scaderea presiunii in spatiul de vaporizare, ceea ce determina scaderea temperaturii de fierbere a solutiei;
- d. **Depunerile de cruste** pe suprafata de incalzire a evaporatorului influenteaza negativ transferul de caldura si, implicit, valoarea capacitatii de evaporare;
- e. **Presiunea** din spatiul de fierbere a solutiei determina temperatura de fierbere si, implicit, vascozitatea solutiei care la randul ei influenteaza transferul de caldura;
- f. **Raportul dintre suprafata de transfer de caldura si volumul solutiei din evaporator.** Cu cresterea acestui raport creste si capacitatea de evaporare;
- g. **Spumarea solutiei,** este un fenomen ce trebuie diminuat sau chiar evitat, deoarece spuma poate fi antrenata de vaporii in afara evaporatorului, ceea ce determina pierderea unei parti din solutie.

VI.2.1. Metode de evaporare

In majoritatea cazurilor solutia concentrata obtinuta prin evaporarea partiala a solventului formeaza produsul principal iar vaporii solventului formeaza produsul secundar. Daca solventul solutiei este apa (situatie frecvent intalnita), aburul format prin fierberea

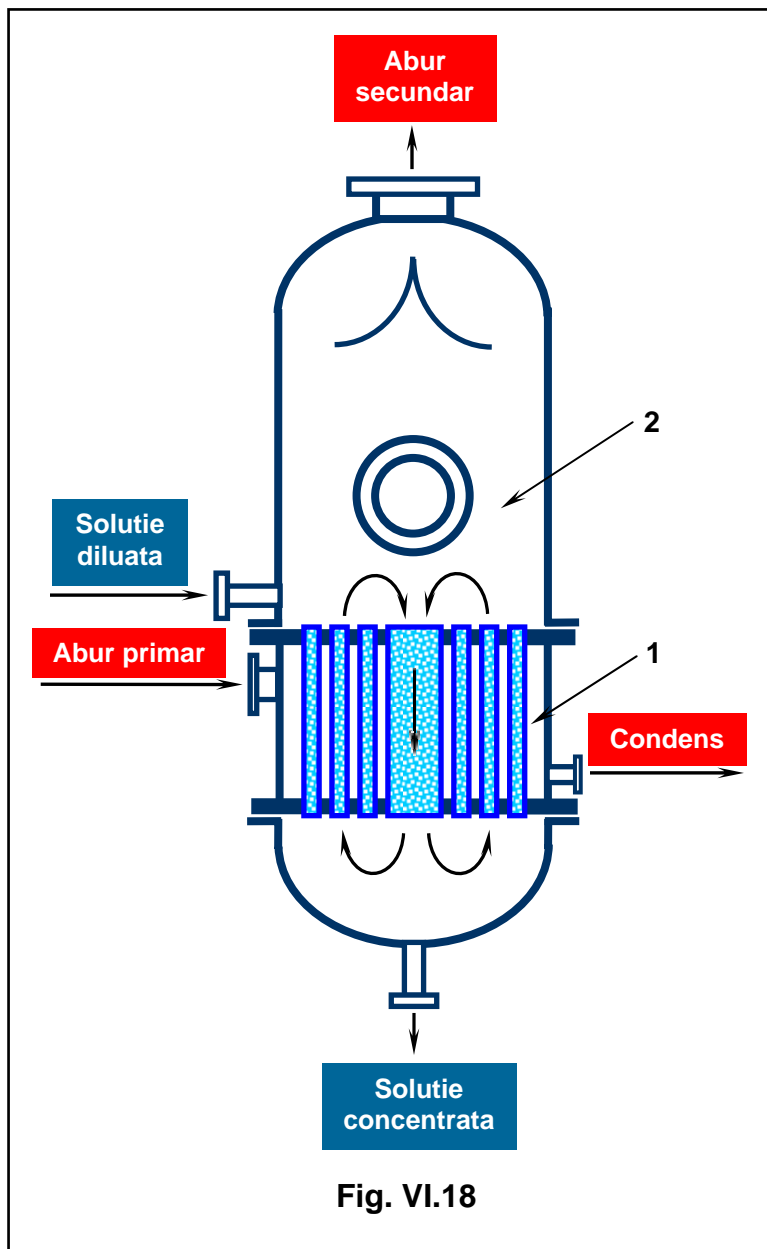
solutiei se poate utiliza ca agent termic in alte instalatii sau in instalatia de evaporare din care acestia rezulta. Pentru aducerea la fierbere a solutiei din evaporator se foloseste un agent termic care, de obicei, este aburul si care, in evaporare, este denumit **abur primar**, pentru al deosebi de aburul care rezulta prin evaporarea solutiei, denumit **abur secundar**. Dupa modul in care se utilizeaza aburul secundar pentru evaporare se deosebesc trei metode de evaporare:

- evaporarea simpla;
- evaporarea cu pompa de caldura;
- evaporarea cu efect multiplu.

VI.2.1.1. Evaporarea simpla

In aceasta metoda vaporii secundari rezultati la evaporator sunt trecuti la un condensator de amestec pentru a se crea vid in spatiul de fierbere ori sunt utilizati in alte instalatii de incalzire sau chiar evacuati in atmosfera. Principalul dezavantaj al acestei metode de evaporare este neutilizarea caldurii vaporilor secundari pentru operatia de evaporare. Din acest motiv metoda este recomandata pentru cantitati mici de solutie.

Cel mai simplu evaporator care se utilizeaza si in evaporarea simpla este evaporatorul cu tevi scurte cu circulatia naturala a solutiei, denumit si **evaporatorul Robert** (fig.VI.18). Acest evaporator este alcatuit dintr-o **camera de incalzire** (1), formata dintr-un fascicol de tevi prins intre doua placi tubulare, si o **camera de fierbere** (2) formata dintr-o virola cilindrica prevazuta cu racorduri pentru alimentarea cu solutie diluata si pentru evacuarea vaporilor secundari. Tevile au lungimea cuprinsa intre 0,7-2,5 m si diametrul intre 30-50 mm, cu exceptia **tubului central** al carui diametru este intre 200-800 mm. Solutia concentrata este evacuata printr-un racord din capacul inferior al evaporatorului.



Datorita volumului mai mic al solutiei din tevilor fascicului solutia se incalzeste mai repede in tevi decat in tubul central. In tevi solutia fierbe si formeaza un amestec solutie-vapori a carui densitate este mai mica decat densitatea solutiei din tubul central. Aceasta diferenta de densitate determina o circulatie naturala a solutiei in evaporator in sensul indicat de sagetile din fig.VI.18.

Bilantul de materiale in evaporarea simpla

Din bilantul de materiale se determina cantitatea de dizolvant care trebuie indepartata din solutie, prin evaporare, pentru a se obtine o solutie cu o concentratie dorita. Pentru intocmirea bilantului de materiale se iau in considerare fluxurile materiale, prezentate schematic in fig.VI.19. Pentru evaporatorul schematizat in fig.VI.19 se pot intocmi doua bilanturi de materiale:

a. Bilantul global:

$$M_d = M_c + W \quad (\text{VI.26})$$

b. Bilantul componentei nevolatile:

$$M_d \cdot c_d = M_c \cdot c_c \quad (\text{VI.27})$$

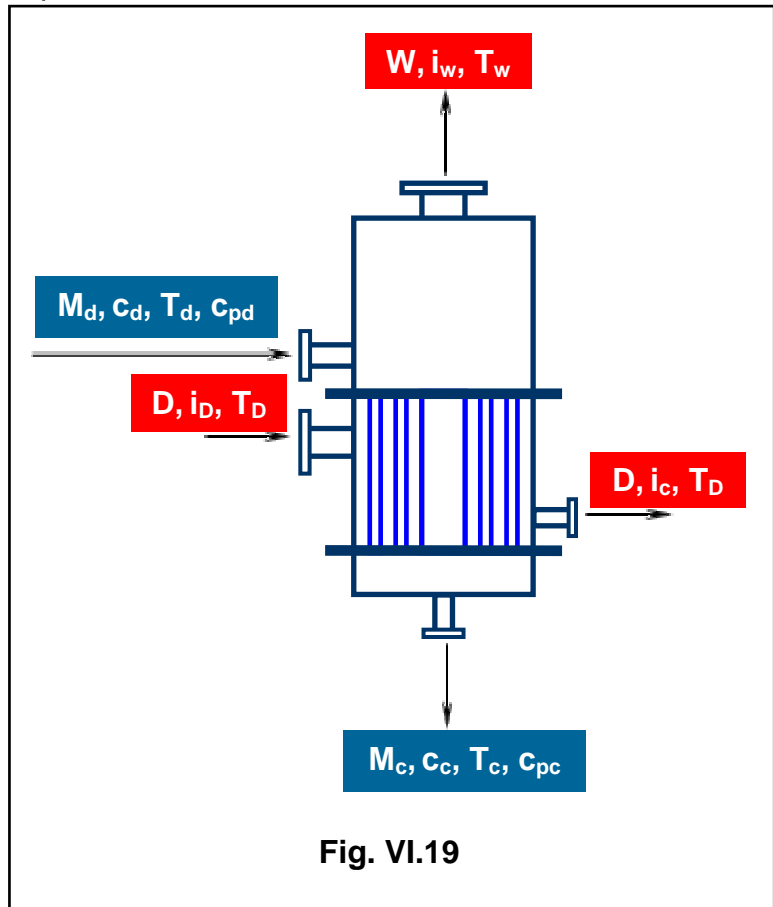
Din relatiile (VI.26) si (VI.27) se exprima debitul de vapori secundari, W;

$$W = M_d - M_c = M_d \left(1 - \frac{c_d}{c_c} \right) \quad (\text{VI.28})$$

In relatiile (VI.26)-(VI.28), notatiile au urmatoarele semnificatii:

- M_d , este debitul masic de solutie diluata;
- M_c , este debitul masic de solutie concentrata;
- W , este debitul masic de abur secundar;
- c_d , este concentratia solutiei diluate;
- c_c , este concentratia solutiei concentrate.

Concentratiile sunt exprimate in fractii masice.



Bilantul termic in evaporarea simpla

Din bilantul termic se stabileste caldura necesara evaporarii din care se determina debitul de agent de incalzire (abur primar) si suprafata de transfer de caldura a evaporatorului. Considerand o instalatie de evaporare cu functionare continua, regimul este stationar si deci ecuatiile bilantului de caldura, pentru evaporatorul prezentat schematic in fig.VI.19, este data de relatia generala: $\Sigma Q_i = \Sigma Q_e$, in care, ΣQ_i , este suma fluxurilor de caldura intrate in evaporator iar, ΣQ_e , este suma fluxurilor de caldura iesite din evaporator. Explicitarea celor doua sume se face tinand cont de notatiile din fig.VI.19.

Calduri intrate in evaporator:

- caldura intrata cu aburul primar: $D \cdot i_D$;
- caldura intrata cu solutia diluata: $M_d \cdot c_{pd} \cdot T_d$

Calduri iesite din evaporator:

- caldura iesita cu condensul: $D \cdot i_c$;
- caldura iesita cu aburul secundar: $W \cdot i_W$;
- caldura iesita cu solutia concentrata: $M_c \cdot c_{pc} \cdot T_c$;
- efectul termic de concentrare, Q_c , care poate fi pozitiv sau negativ si care este egal dar de semn contrar cu efectul termic de diluare;
- caldura pierduta in mediul ambiant, Q_p .

Prin urmare:

$$D \cdot i_D + M_d \cdot c_{pd} \cdot T_d = D \cdot i_c + W \cdot i_W + M_c \cdot c_{pc} \cdot T_c \pm Q_c + Q_p \quad \text{(VI.29)}$$

din care:

$$Q = D(i_D - i_c) = M_c \cdot c_{pc} \cdot T_c - M_d \cdot c_{pd} \cdot T_d + W \cdot i_W \pm Q_c + Q_p \quad \text{(VI.30)}$$

Relatia (VI.29) se simplifica daca pentru solutie este valabila legea aditivitatii capacitatilor calorice, data de relatia:

$$M_d \cdot c_{pd} = M_c \cdot c_{pc} + W \cdot c_{pW} \quad \text{(VI.31)}$$

de unde:

$$M_c \cdot c_{pc} = M_d \cdot c_{pd} - W \cdot c_{pW} \quad (\text{VI.32})$$

care daca se inlocuieste in relatia (VI.30), conduce la:

$$Q = D \cdot r_D = M_d \cdot c_{pd}(T_c - T_d) + W(i_W - c_{pW} \cdot T_c) \mp Q_c + Q_p \quad (\text{VI.33})$$

Marimile din relatiile (VI.29)-(VI.33) au urmatoarele semnificatii:

- c_{pd} , este caldura specifica a solutiei diluate;
- c_{pc} , este caldura specifica a solutiei concentrate;
- c_{pW} , este caldura specifica a dizolvantului considerat in stare lichida;
- T_d , este temperatura solutiei diluate la intrarea in evaporator;
- T_c , este temperatura solutiei concentrate la iesirea din evaporator, care este egala cu temperatura de fierbere a solutiei in evaporator;
- i_D , este entalpia aburului primar;
- i_W , este entalpia aburului secundar;
- i_c , este entalpia condensului;
- r_D , este caldura latentă de condensare a aburului primar.

Daca se imparte relatia (VI.33) prin $(i_W - c_{pW}T_c)$, dupa rearanjarea termenilor se obtine:

$$W = D \cdot \frac{i_D - i_c}{i_W - c_{pW} \cdot T_c} + M_d \cdot \frac{c_{pd}(T_d - T_c)}{i_W - c_{pW} \cdot T_c} \mp \frac{Q_c}{i_W - c_{pW} \cdot T_c} - \frac{Q_p}{i_W - c_{pW} \cdot T_c} \quad (\text{VI.34})$$

Raportul:

$$\alpha = \frac{i_D - i_c}{i_W - c_{pW} \cdot T_c} \quad (\text{VI.35})$$

defineste **coeficientul de evaporare**, care reprezinta cantitatea de vapori secundari rezultati din caldura cedata de unitatea de masa de abur primar.

Raportul:

$$\beta = \frac{c_{pd}(T_d - T_c)}{i_W - c_{pW} \cdot T_c} \quad (\text{VI.36})$$

defineste **coeficientul de autoevaporare** care reprezinta numarul de Kg de vapori secundari rezultati din caldura cedata in evaporator de unitatea de masa de solutie diluata. Coeficientul de autoevaporare are valoare pozitiva, cand $T_d > T_c$, este negativ atunci cand $T_d < T_c$ si are valoarea zero, daca $T_d = T_c$.

Dimensionarea evaporatoarelor

Dimensionarea tehnologica a unui evaporator presupune calculul suprafetei de schimb de caldura, **A**, din care se determina dimensiunile camerei de incalzire, care stabilesc dimensiunile finale ale evaporatorului.

In evaporatoarele incalzite cu abur potentialul global al transferului de caldura este constant si ecuatia transferului de caldura are expresia:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T_u \quad \text{(VI.37)}$$

In evaporarea simpla potentialul global al transferului de caldura este denumit **caderea de temperatura utila** si este dat de diferenta dintre temperatura de condensare a aburului primar, T_D , si temperatura de fierbere a solutiei concentrate, T_c , la presiunea din camera de fierbere a evaporatorului, care este egala cu temperatura solutiei concentrate la iesirea din evaporator:

$$\Delta T_u = T_D - T_c \quad \text{(VI.38)}$$

temperatura de fierbere a solutiei, T_c , este mai mare decat temperatura vaporilor secundari, T_w , datorita prezentei componentei nevolatile in solutie. Deoarece fierberea este o vaporizare in toata masa lichidului, presiunea in interiorul solutiei este mai mare decat la suprafata ei libera, ceea ce va determina o crestere a temperaturii de fierbere a solutiei in raport cu temperatura vaporilor secundari. Cresterea temperaturii de fierbere a solutiei in raport cu temperatura de fierbere a solventului pur se numeste **efect de depresiune**. Aceasta crestere este cauzata de prezenta in solutie a componentei nevolatile care are ca efect scaderea presiunii de vapori a solutiei. Efectul de depresiune se noteaza cu ΔT_{dep} . Considerand o valoare medie a adancimii coloanei de solutie, H_m , daca presiunea din spatiul de fierbere este, P , atunci solutia aflata la adancimea H_m , fierbe la presiunea: $P' = P + \rho \cdot g \cdot H_m$. Diferenta dintre temperatura de fierbere a solventului la presiunea, P' , si cea corespunzatoare presiunii, P , se numeste efect hidrostatic si se noteaza cu ΔT_{eh} . Relatiile dintre aceste caderi de temperatura sunt prezentate schematic in fig.VI.20, din care rezulta:

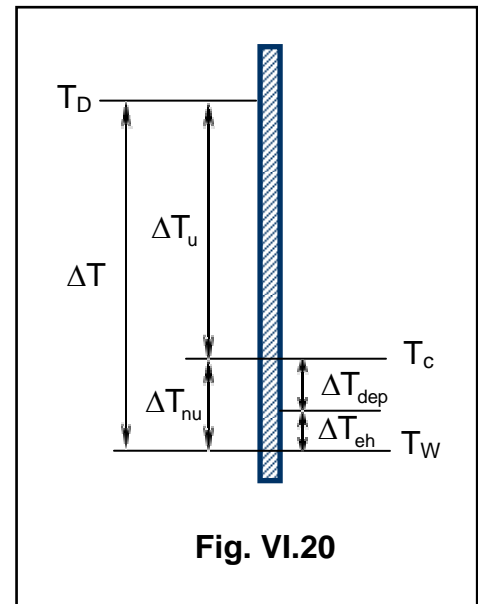


Fig. VI.20

$$\Delta T = \Delta T_u + \Delta T_{nu} \quad \text{(VI.39)}$$

Caderea de temperatura neutila este data de suma dintre efectul de depresiune si efectul hidrostatic:

$$\Delta T_{nu} = \Delta T_{dep} + \Delta T_{eh} \quad (VI.40)$$

Din fig.VI.20 rezulta si relatiile dintre temperaturi si caderea de temperatura neutila:

$$T_c = T_w + \Delta T_{nu} \quad (VI.41)$$

respectiv:

$$T_c = T_D - \Delta T_u \quad (VI.42)$$

Efectul de depresiune la presiune normala pentru o solutie data, $(\Delta T_{dep})_n$, se determina din tabele. Pentru presiunea, P, din evaporator acest efect se poate calcula cu formula lui Tiscenko:

$$\Delta T_{dep} = (\Delta T_{dep})_n \left(\frac{T}{T_n} \right)^2 \cdot \frac{r_n}{r} \quad (VI.43)$$

in care, T, este temperatura absoluta de fierbere a solventului la presiunea, P, din evaporator, T_n, este temperatura de fierbere a solventului la presiune normala, r, este caldura latentă de vaporizare a solventului la presiunea, P iar, r_n, este caldura de vaporizare a solventului la presiune normala.

VI.2.1.2. Evaporarea cu pompa de caldura

La evaporarea simpla caldura vaporilor secundari nu este utilizata la aceeasi instalatie de evaporare. Deoarece vaporii secundari au un continut caloric ridicat s-au cautat solutii pentru utilizarea lor ca agent termic in instalatia de evaporare. Intrucat temperatura vaporilor secundari, T_w, este mai mica decat temperatura de fierbere a solutiei, T_c, caldura vaporilor secundari nu poate fi transferata solutiei si de aceea s-au cautat solutii pentru a inversa relatia dintre cele doua temperaturi. Acest lucru se poate realiza in doua moduri:

- prin comprimarea vaporilor secundari pana la o presiune la care temperatura lor devine cu 8-10 °C mai mare decat temperatura de fierbere a solutiei, cand se realizeaza **evaporarea cu pompa de caldura**;
- prin micșorarea presiunii in spatiul de fierbere astfel incat temperatura de fierbere sa scada sub temperatura vaporilor secundari asa cum este cazul in **evaporarii cu efect multiplu**.

In metoda de evaporare cu pompa de caldura vaporii secundari sunt preluati de un compresor sau de un injector si li se ridica presiunea astfel incat temperatura lor sa creasca cu 8-10 °C peste temperatura de fierbere a solutiei. Dupa comprimare vaporii secundari sunt introdusi in camera de incalzire a evaporatorului iar alimentarea cu abur primar se reduce sau chiar se opreste, in functie de necesarul de caldura care rezulta din bilantul termic. Deoarece potentialul global al transferului de caldura este relativ mic este necesara o suprafata de incalzire mare si de aceea aceasta metoda este avantajoasa din punct de vedere economic in urmatoarele situatii:

- cand pentru incalzirea evaporatorului avem la dispozitie abur de inalta presiune care ar trebui trecut printr-un reductor de presiune inainte de utilizare. In acest caz este preferabil ca acest abur sa fie utilizat ca fluid motor intr-un injector care preia aburul secundar si il comprima;
- cand se face evaporarea unor solutii ce contin substante care nu suporta temperaturi ridicate, cum ar fi: concentrarea laptelui a unor sucuri din fructe a extractelor tanante, etc.

Variatia parametrilor de stare ai vaporilor secundari in instalatia de evaporare cu pompa de caldura este prezentata in fig.VI.22. Izoentropa AB reprezinta comprimarea adiabatica a vaporilor secundari (care au in evaporator presiunea, P_1) pana la

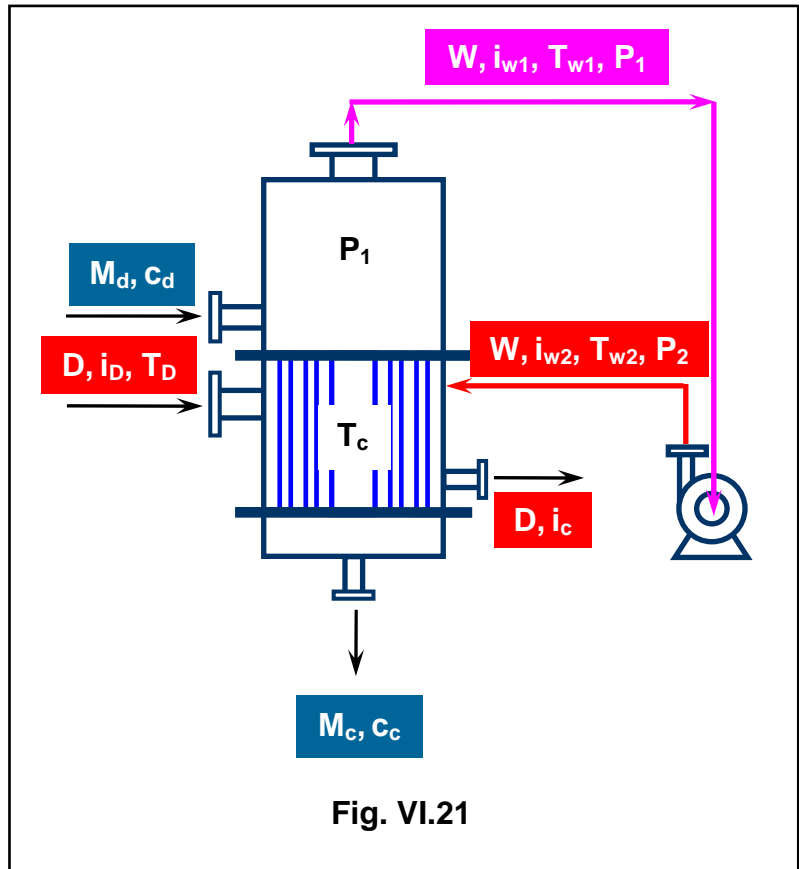


Fig. VI.21

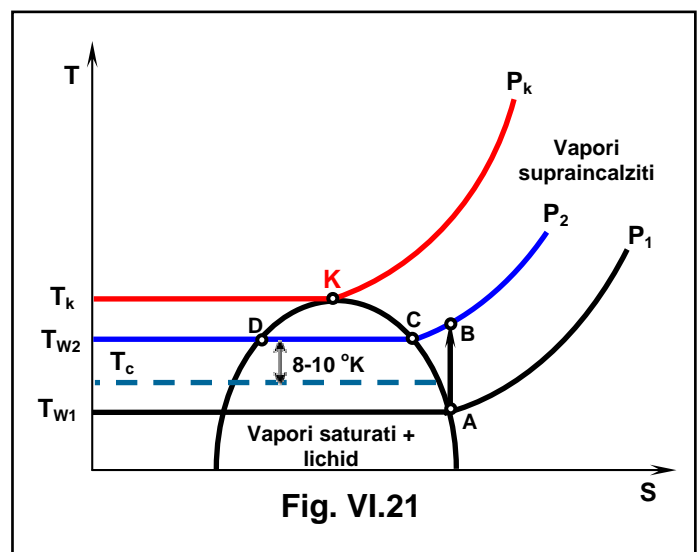


Fig. VI.22

presiunea, P_2 , cu care acestia intra in camera de incalzire al evaporatorului. Curba BC reprezinta racirea izobara a vaporilor supraincalziti in urma comprimarii iar segmentul CD reprezinta condensarea izoterma a vaporilor saturati cu presiunea P_2 . Se observa ca temperatura de condensare, T_2 , este mai mare decat temperatura de fierbere a solutiei, T_c .

Dimensionarea evaporatorului se face in acelasi mod ca si cel al unui evaporator in care se realizeaza o evaporare simpla.

VI.2.1.3. Evaporarea cu efect multiplu

Pentru recuperarea caldurii vaporilor secundari, in aceasta metoda se foloseste o instalatie formata din mai multe evaporatoare legate in serie. La fiecare evaporator agentul de incalzire este aburul secundar rezultat la evaporatorul precedent, cu exceptia primului evaporator care este incalzit cu abur primar. Pentru ca aburul secundar rezultat la un evaporator (corp de evaporare) sa poata fi utilizat ca agent de incalzire la evaporatorul urmator trebuie ca temperatura acestuia sa fie mai mare decat temperatura de fierbere a solutiei in corpul respectiv. Acest lucru se poate realiza prin scaderea presiunii in spatiul de vaporizare, ceea ce duce la scaderea temperaturii de fierbere a solutiei. Prin urmare, in aceasta metoda presiunea in corpurile instalatiei de evaporare scade de la un corp la urmatorul. Pentru a asigura diferenta de presiune necesara, de obicei in ultimul corp se realizeaza vid prin trecerea vaporilor secundari la un condensator de amestec.

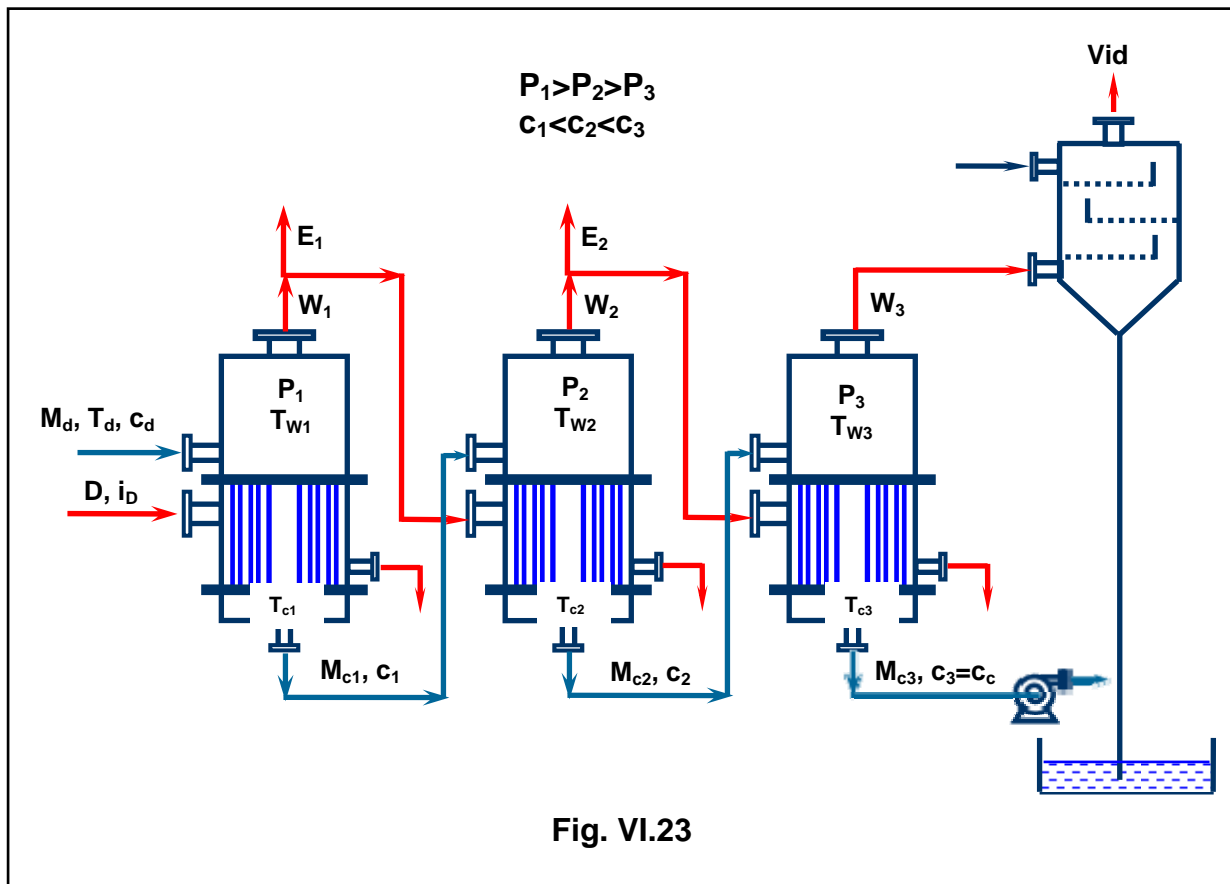
In aceasta metoda economia de abur primar este cu atat mai mare cu cat numarul de corpuri al instalatiei este mai mare. Astfel, in cazul evaporarii unei solutii apoase, teoretic, pentru un kilogram de abur secundar se consuma: 0,5 Kg abur primar intr-o instalatie cu doua corpuri, 0,33 Kg abur primar intr-o instalatie cu trei corpuri, 0,25 Kg abur primar intr-o instalatie cu 4 corpuri, respectiv $1/n$ Kg abur primar intr-o instalatie cu n corpuri. Totusi numarul de corpuri al unei instalatii de evaporare cu efect multiplu este limitat la 10-12. Numerotarea corpurilor se face de la 1 la n in sensul de circulatie a vaporilor, evaporatorul alimentat cu abur primar fiind notat cu 1.

Dupa sensul de circulatie in instalatie a vaporilor secundari si a solutiei, instalatiile de evaporare cu efect multiplu se clasifica in:

- instalatii de evaporare in echicurent (fig.VI.23);
- instalatii de evaporare in contracurent (fig.VI.24);
- instalatii de evaporare in curent mixt (fig.VI.25);
- instalatii cu alimentarea individuala a evaporatoarelor cu solutie diluata (fig.VI.26).

In fig.VI.23 se prezinta o instalatie de evaporare in echicurent cu trei corpuri in care vaporii secundari de la ultimul corp sunt introdusi intr-un condensator barometric ceea ce face ca presiunea, P_3 , din acest corp sa fie mai mica decat presiunea atmosferica. La circulatia in echicurent solutia trece de la un corp la altul fara utilizarea unor pompe, curgerea fiind determinata de diferenta de presiune dintre corpuri. In cazul in care instalatia este prevazuta cu prize de extraabur (abur folosit in afara instalatiei de evaporare) acestea se practica numai la corpurile in care presiunea este mai mare decat presiunea atmosferica.

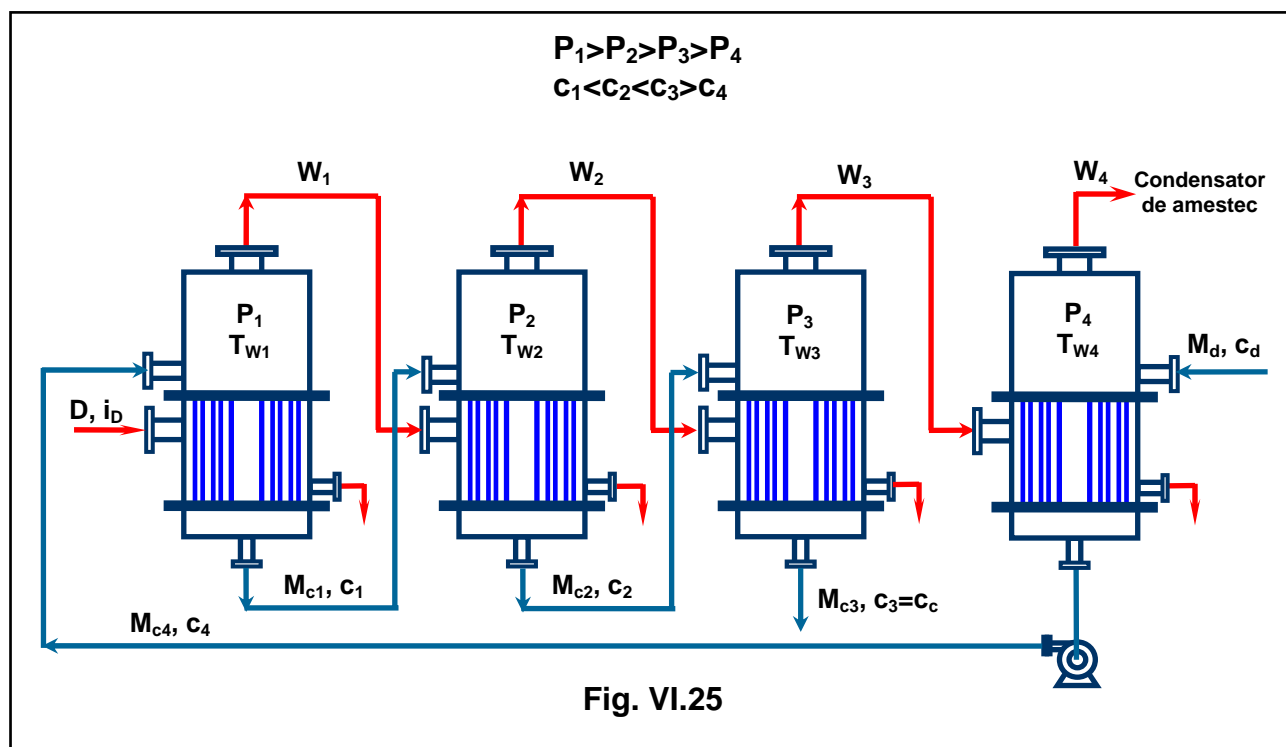
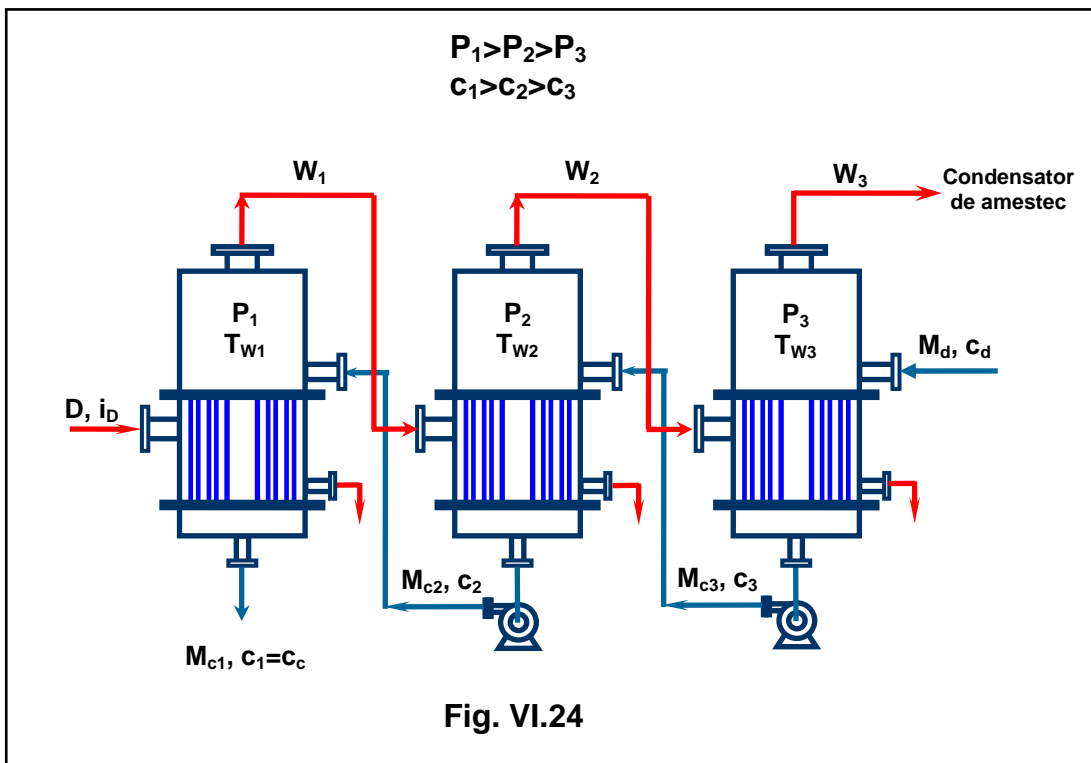
Dezavantajul circulatiei in echicurent este determinat de faptul vascozitatea solutiei creste de la un corp la altul atat datorita concentrarii acesteia cat si datorita scaderii temperaturii de fierbere, iar prin cresterea vascozitatii se inrautatesc transferul termic.

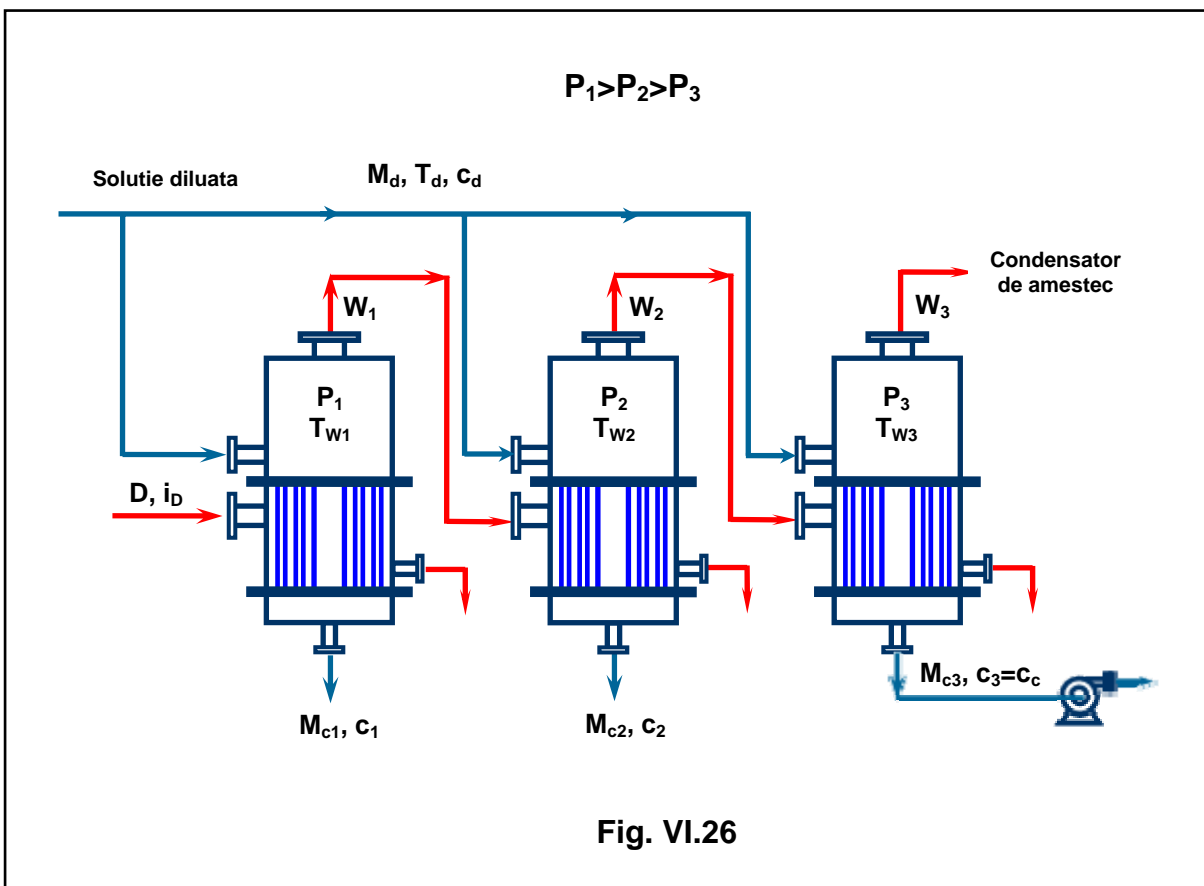


Acest neajuns este eliminat in instalatiile de evaporare in contracurent (fig.VI.25) la care solutia diluata este alimentata in ultimul corp iar solutia concentrata rezulta la primul corp in care temperatura de fierbere este maxima si deci cresterea de vascozitate datorata cresterii concentratiei este diminuată prin cresterea temperaturii. Dezavantajul acestei scheme de circulatiei deriva din faptul ca solutia trece de la un corp cu presiunea mai mica la unul cu presiunea mai mare si in acest caz este necesara utilizarea unor pompe.

Circulatia in curent mixt combina avantajele circulatiei in echicurent cu cele ale circulatiei in contracurent. Schema celei mai rationale circulatii intr-o instalatie cu patru corpuri este prezentata in fig.VI.26.

In instalatiile de evaporare cu alimentare individuala, fiecare corp este alimentat cu solutie diluata, dar vaporii secundari trec de la un corp la altul (fig.VI.27). Aceasta schema de circulatie este recomandata atunci cand nu se urmareste o concentrare avansata a solutiei.





Calculul tehnologic al instalatiilor cu evaporare multipla

La o instalatie de evaporare cu efect multiplu calculul tehnologic presupune determinarea necesarului de abur primar, a suprafetei de incalzire a fiecarui evaporator si a debitului de agent de racire de la condensatorul de amestec. Calculul este destul de laborios deoarece este unul prin incercari succesive. Totusi, in prezent acest neajuns este usor de depasit prin utilizarea unor programe care se pot rula pe calculatoare electronice.

Pentru prezentarea metodei de calcul se considera, ca exemplu, o instalatie de evaporare in echicurent cu trei corpuri pentru care fluxurile materiale si proprietatile lor sunt cele prezentate in fig.VI.23.

Daca debitele de extraabur prelevate de la primele doua corpuri, E_1 si E_2 sunt cunoscute (se impun in functie de necesitati), in prima iteratie a calculelor se adopta debitele de vapori secundari: W_1 , W_2 si W_3 . La prima incercare se poate admite ca dintr-un kilogram de abur primar rezulta tot un kilogram de abur secundar.

Debitul total de solvent indepartat in instalatie, W , se calculeaza din bilantul de materiale pentru intreaga instalatie:

$$W = M_d \left(1 - \frac{c_d}{c_c} \right) \quad (\text{VI.44})$$

Dar:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (\text{VI.45})$$

In care W_1 , W_2 si W_3 reprezinta debitele de abur secundar rezultate la corpurile instalatiei. Bilantul de materiale pentru fiecare evaporator in parte se exprima prin relatiile:

$$W_1 = M_d \left(1 - \frac{c_d}{c_1} \right) \quad (\text{VI.46})$$

$$W_2 = M_{c1} \left(1 - \frac{c_1}{c_2} \right) = (M_d - W_1) \left(1 - \frac{c_1}{c_2} \right) \quad (\text{VI.47})$$

$$W_3 = M_{c2} \left(1 - \frac{c_2}{c_c} \right) = (M_d - W_1 - W_2) \left(1 - \frac{c_2}{c_c} \right) \quad (\text{VI.48})$$

Bilantul termic al fiecarui evaporator se exprima prin relatii de tipul celor stabilite la evaporarea simpla, tinand in sa cont de notatiile din fig.VI.23:

- pentru primul evaporator:

$$Q_1 = D \cdot r_D = M_d \cdot c_{pd} (T_{c1} - T_d) + W_1 (i_{w1} - c_{pw} \cdot T_{c1}) \pm Q_{c1} + Q_{p1} \quad (\text{VI.49})$$

- pentru al doilea evaporator:

$$Q_2 = (W_1 - E_1) \cdot r_1 = M_{c1} \cdot c_{pc1} (T_{c2} - T_{c1}) + W_2 (i_{w2} - c_{pw} \cdot T_{c2}) \pm Q_{c2} + Q_{p2} \quad (\text{VI.50})$$

- pentru al treilea evaporator:

$$Q_3 = (W_2 - E_2) \cdot r_2 = M_{c2} \cdot c_{pc2} (T_{c3} - T_{c2}) + W_3 (i_{w3} - c_{pw} \cdot T_{c3}) \pm Q_{c3} + Q_{p3} \quad (\text{VI.51})$$

Ecuatiile (VI.45) si (VI.49-VI.51) formeaza un sistem de patru ecuatii cu patru necunoscute: D , W_1 , W_2 si W_3 . Pentru rezolvarea acestui sistem trebuiesc cunoscute temperaturile de fierbere in fiecare evaporator: T_{c1} , T_{c2} si T_{c3} , entalpiile vaporilor secundari: i_{w1} , i_{w2} si i_{w3} si caldurile specifice ale solutiilor: c_{pd} , c_{pc1} , si c_{pc2} . Dar valorile acestor marimi depind de debitele de vapori secundari si de presiunile din evaporatoare. Din acest motiv se procedeaza astfel:

- se adopta valori pentru debitele de vapori secundari: W_1 , W_2 si W_3 . Cu aceste valori adoptate, din relatiile (VI.46)-(VI.48) se calculeaza concentratiile solutiilor in corpurile instalatiei;
- se determina temperaturile de fierbere in fiecare evaporator. Deoarece temperatura de fierbere depinde de presiunea din evaporator, se adopta presiunile, intr-o prima etapa considerand ca intre corpuri diferenta de presiune este aceeaasi. Caderea totala de presiune in instalatie, ΔP , este data de diferenta dintre presiunea aburului primar, P_D si presiunea din ultimul corp, P_3 , care practic este egala cu presiunea din condensatorul de amestec, P_C .

$$\Delta P = P_D - P_3 \quad \text{(VI.52)}$$

Diferenta de presiune dintre doua corpuri este data de raportul:

$$\Delta P_n = \frac{\Delta P}{n} = \frac{\Delta P}{3} \quad \text{(VI.53)}$$

dupa care se aduna caderea de presiune dintre doua corpuri succesive la presiunea din corpul anterior, pentru a calcula presiunea din corpuri:

$$P_3 = P_3 \quad \text{(VI.54)}$$

$$P_2 = P_3 + \frac{\Delta P}{3} \quad \text{(VI.55)}$$

$$P_1 = P_2 + \frac{\Delta P}{3} = P_3 + \frac{2}{3}\Delta P \quad \text{(VI.56)}$$

$$P_D = P_1 + \frac{\Delta P}{3} = P_3 + \Delta P = P_3 + P_D - P_3 = P_D \quad \text{(VI.57)}$$

Dupa stabilirea presiunilor se determina temperaturile de fierbere in fiecare evaporator, tinand cont de efectele de depresiune si de cele hidrostatice (vezi fig.VI.22):

$$T_{c1} = T_{W1} + \Delta T_{dep1} + \Delta T_{eh1} \quad \text{(VI.58)}$$

$$T_{c2} = T_{W2} + \Delta T_{dep2} + \Delta T_{eh2} \quad \text{(VI.59)}$$

$$T_{c3} = T_{W3} + \Delta T_{dep3} + \Delta T_{eh3} \quad \text{(VI.60)}$$

- din tabele se determina entalpiile si caldurile latente ale vaporilor.;
- se rezolva sistemul format din ecuatiile (VI.45) si (VI.49-VI.51) pentru a determina W_1 , W_2 si W_3 , care se compara apoi cu valorile adoptate initial. Daca diferentele dintre valorile calculate si cele adoptate sunt acceptabile se considera valabile valorile calculate. In caz contrar se reiau calculele adoptand valorile debitelor de vapori secundari pe cele care au rezultat din calcule la prima iteratie. Calculele se repeta succesiv pana cand diferenta dintre valorile adoptate si cele calculate nu depaseste limita de eroare acceptabila in calculele tehnice.
- Dupa determinarea fluxurilor de caldura cu relatiile (VI.49-VI.51) se calculeaza suprafata de schimb de caldura a evaporatoarelor din ecuatia transferului de caldura:

$$Q_1 = K_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_{u1} \quad \text{(VI.61)}$$

$$Q_2 = K_2 \cdot A_2 \cdot \Delta T_{u2} \quad \text{(VI.62)}$$

$$Q_3 = K_3 \cdot A_3 \cdot \Delta T_{u3} \quad \text{(VI.63)}$$

Potentialul transferului de caldura este dat de caderea de temperatura utila la fiecare evaporator, ΔT_{ui} , care este o fractiune din caderea de temperatura utila pe intreaga instalatie, ΔT_u , calculata ca diferenta dintre caderea totala de temperatura, ΔT , si caderea de temperatura neutila totala, ΔT_{nu} :

$$\Delta T_u = \Delta T - \Delta T_{nu} \quad \text{(VI.64)}$$

in care:

$$\Delta T = T_a - T_{w3} \quad \text{(VI.65)}$$

iar:

$$\Delta T_{nu} = \Delta T_{nu1} + \Delta T_{nu2} + \Delta T_{nu3} \quad \text{(VI.66)}$$

In cazul instalatiilor de evaporare cu efect multiplu caderea de temperatura neutila este data de suma caderilor de temperatura determinate de efectele de concentrare si de efectele hidrostactice la care se adauga un efect care se manifesta numai la evaporarea multipla si care este determinat de scaderea presiunii vaporilor secundari la curgerea prin conductele de legatura dintre corpuri, ca urmare a frecarilor si a rezistentelor locale. Aceste caderi de temperatura sunt notate cu ΔT_{rh} (rezistente hidraulice) si au valori cuprinse intre 1-1,5 K. Pentru instalatia de evaporare in echicurent cu trei corpuri,

temperaturile si efectele termice din fiecare evaporator sunt prezentate in fig.VI.27.

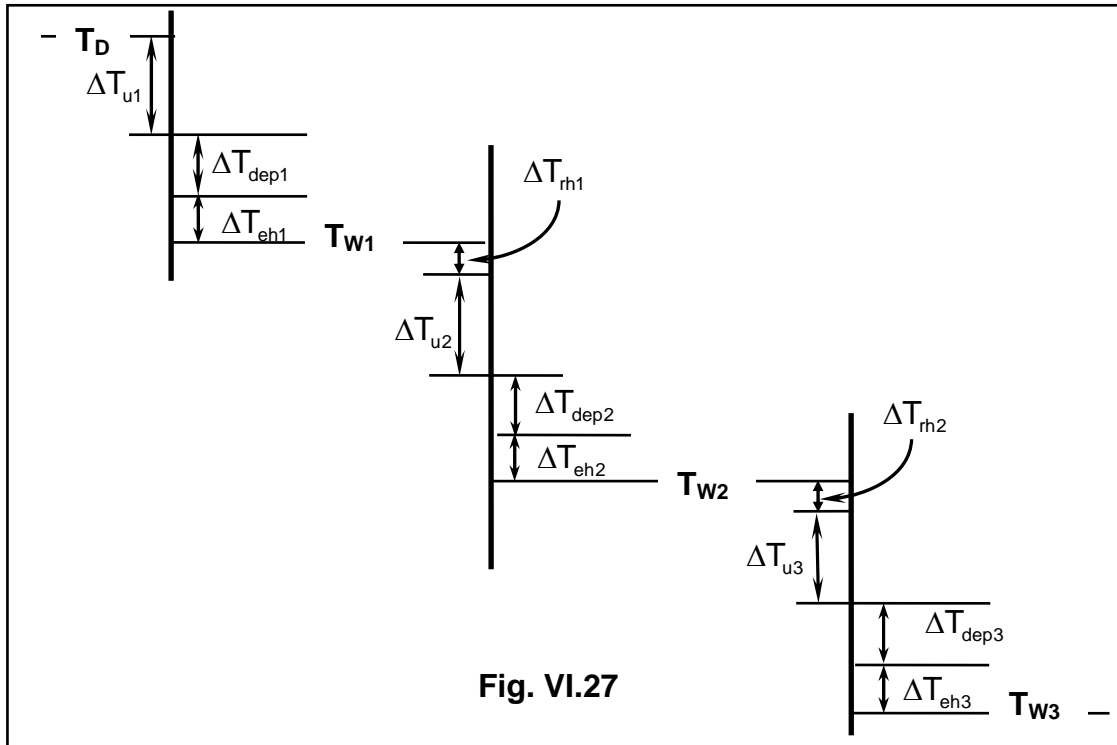


Fig. VI.27

Repartizarea lui ΔT_u pe corpurile instalatiei se poate realiza in mai multe moduri:

a. Evaporatoarele au suprafete egale

Instalatiile de evaporare cu efect multiplu in care corpurile sunt identice prezinta avantajul unor costuri de investitie mai mici. In cazul suprafetelor de schimb de caldura egale:

$$A_1=A_2=A_3= \dots=A_n=A \tag{VI.67}$$

si din ecuatiile transferului de caldura (VI.61-VI.63), rezulta:

$$A = \frac{Q_1}{K_1 \cdot \Delta T_{u1}} = \frac{Q_2}{K_2 \cdot \Delta T_{u2}} = \frac{Q_3}{K_3 \cdot \Delta T_{u3}} = \dots = \frac{Q_n}{K_n \cdot \Delta T_{un}} \tag{VI.68}$$

Aplicand proprietatile proportiilor pentru relatia (VI.68), se poate scrie;

$$\frac{Q_1}{K_1 \cdot \Delta T_{u1}} = \frac{\frac{Q_1}{K_1} + \frac{Q_2}{K_2} + \frac{Q_3}{K_3} \dots + \frac{Q_n}{K_n}}{\Delta T_{u1} + \Delta T_{u2} \Delta T_{u3} + \dots + \Delta T_{un}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{K_i}}{\Delta T_u} \quad (\text{VI.69})$$

Prin urmare daca se cunoaste caderea de temperatura utila pe intreaga instalatie, ΔT_u , se poate determina caderea de temperatura utila pentru fiecare corp cu relatiile:

$$\Delta T_{u1} = \Delta T_u \frac{\frac{Q_1}{K_1}}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{K_i}} \quad (\text{VI.70})$$

sau, in general:

$$\Delta T_{ui} = \Delta T_u \frac{\frac{Q_i}{K_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{K_i}} \quad (\text{VI.71})$$

Dupa determinarea caderilor de temperatura utile se calculeaza suprafata de transfer de caldura a evaporatoarelor, A , din relatia (VI.68). Pentru a verifica daca presiunile au fost corect adoptate, cunoscand caderile de temperatura utile calculate cu relatia (VI.71) se determina temperaturile de fierbere si temperaturile vaporilor secundari din fiecare corp folosind relatiile (VI.58-VI.60). Temperatura vaporilor secundari permite determinarea presiunii acestora, utilizand tabelele care prezinta proprietatile aburului. Daca presiunile determinate astfel sunt egale sau apropiate de cele adoptate initial calculul este incheiat. In cazul unor diferente inacceptabile se reiau calculele considerand presiunile din evaporatoare egale cu cele stabilite in modul prezentat mai sus.

b. Suprafata totala de schimb de caldura a evaporatoarelor este minima

In acest caz evaporatoarele instalatiei vor avea dimensiuni diferite, ceea ce constituie un dezavantaj, si de aceea aceasta repartizare a caderii utile de temperatura se recomanda pentru debite mari de solutie cand economia de suprafata si implicit economia de material este semnificativa. Se demonstreaza ca in acest caz caderea utila de temperatura la fiecare corp se calculeaza cu relatia:

$$\Delta T_{ui} = \Delta T_u \frac{\sqrt{\frac{Q_i}{K_i}}}{\sum_i^n \sqrt{\frac{Q_i}{K_i}}} \quad (\text{VI.72})$$

Dupa determinarea caderii de temperatura utila la fiecare corp, cu relatia (VI.72) se calculeaza suprafata de transfer de caldura pentru fiecare evaporator din relatiile (VI.61-VI.63).