

Capitolul 10

GAZE REALE ȘI VAPORI

Ecuatiile de stare caracteristice gazelor reale țin cont de particularitățile acestora. Din punct de vedere molecular, gazele reale au un comportament diferit față de gazele ideale și deci nu respectă legile gazelor perfecte. Produsul dintre presiune și volumul specific, care la gazele ideale depinde numai de temperatură, în cazul gazelor reale variază și în funcție de presiune. Această variație poate fi exprimată prin utilizarea ecuației termice de stare corectată:

$$p v = z R T$$

unde z reprezintă **factorul de compresibilitate** și depinde de natura gazului, de temperatură și de presiune.

Van der Waals a realizat un model de gaz real având molecule sferice și perfect elastice care se ciocnesc secvențial (nu se pot ciocni mai mult de două molecule simultan. Se definește **covolumul moleculei** gazului ca fiind volumul unei sfere având diametrul egal cu de două ori diametrul moleculei. Presiunea este considerată ca având două componente: **presiunea termică**, p_t și **presiunea internă (presiunea de coeziune)**, p_i . Presiunea termică este datorată mișcării termice iar cea internă este datorată acțiunii forțelor de coeziune atât între molecule cât și dintre acestea și pereții vasului, fapt care duce la micșorarea valorii măsurabile a presiunii gazului real:

$$p = p_t - p_i \quad [\text{Pa}]$$

Presiunea termică poate fi exprimată prin ecuația de stare a gazului ideal:

$$p_t = \frac{m R T}{V_t} \quad [\text{Pa}]$$

unde V_t este volumul spaţiului corespunzător mişcării termice:

$$V_t = V - m b \quad [\text{m}^3]$$

b reprezentând covolumul tuturor moleculelor dintr-un kilogram de gaz.

Rezultă că:

$$p_t = \frac{m R T}{V - m b} = \frac{R T}{v - b} \quad [\text{Pa}]$$

Remarcă: Presiunea termică a gazului real este mai mare decât cea a gazului ideal.

Presiunea de coeziune este direct proporţională cu densitatea gazului şi invers proporţională cu volumul său:

$$p_i = a \rho \frac{1}{v} = \frac{a}{v^2} \quad [\text{Pa}]$$

unde a este un factor de proporţionalitate.

Rezultă expresia ecuaţiei lui Van der Waals:

$$p = p_t - p_i = \frac{R T}{v - b} - \frac{a}{v^2} \quad [\text{Pa}]$$

sau

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = R T$$

Ecuaţia de stare Van der Waals redă cu suficientă acurateţe comportarea gazelor reale, în schimb valorile prezintă abateri importante, si deci nu poate fi utilizată pentru calculul proprietăţilor termodinamice ale gazelor reale.

Au fost propuse şi alte forme ale ecuaţiei de stare pentru gazele reale prin îmbunătăţirea pe considerente empirice sau ştiinţifice a ecuaţiei lui Van der Waals.

Vaporii reprezintă substanțe aflate în starea de agregare gazoasă în apropierea stării de saturație (lichid-gaz sau solid-gaz). Vaporii de apă poartă numele de **abur**. Producerea vaporilor la presiune constantă se realizează prin primirea unei cantități suficiente de căldură. Stările termodinamice caracteristice producerii vaporilor sunt următoarele:

1. lichid subrăcit, la temperatură inferioară celei de saturație;
2. lichid saturat, la temperatura de saturație;
3. vapori umezi (amestec bifazic de lichid saturat și vapori saturați uscați), la temperatura de saturație;
4. vapori saturați uscați, la temperatura de saturație;
5. vapori supraîncălziți, la temperatură superioară celei de saturație.

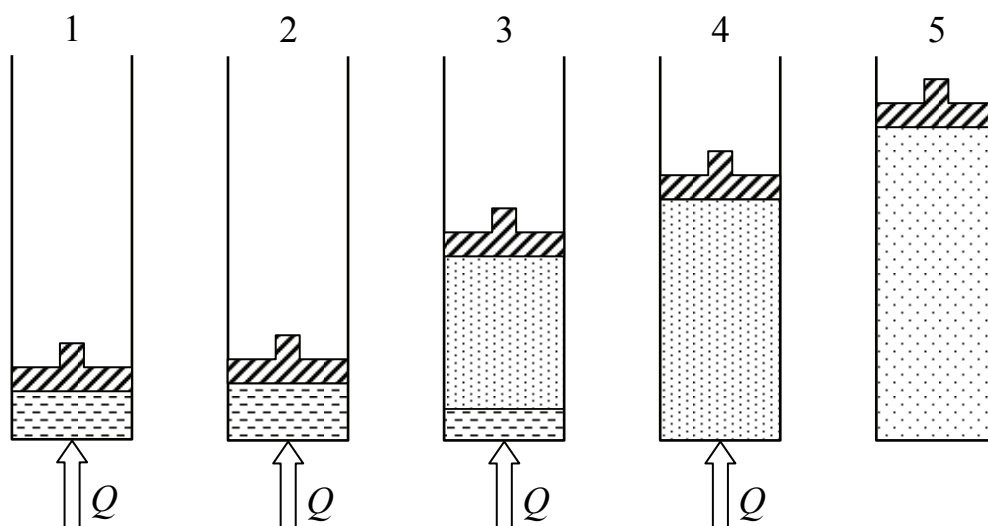


Fig. 10.1: *Producerea vaporilor*

Procese specifice producerii vaporilor sunt următoarele:

1-2: încălzirea apei aflate în stare de lichid subrăcit până la temperatura de saturație;

2-3-4: vaporizarea apei la temperatură constantă, din momentul formării primelor bule de vapori până la vaporizarea ultimei picături de apă;

4-5: supraîncălzirea vaporilor saturați uscați.

Căldura necesară vaporizării unui kilogram de substanță se numește **căldură latentă de vaporizare** și se notează cu r . Cu cât presiunea crește, cu atât căldura latentă de vaporizare scade, ajungând să se anuleze în punctul critic de stare notat cu K . Locul geometric al tuturor punctelor de stare de saturație reprezintă **curba de saturație**. Punctul critic împarte curba de saturație în două: la stânga punctului critic se află curba de saturație a lichidului iar la dreapta, curba de saturație a vaporilor. Toți parametrii de stare care se referă la puncte aflate pe curba de saturație a lichidului se notează cu prim (ex: p' , v' , t' , h' , s') în timp ce, dacă punctele se află pe curba de saturație a vaporilor, aceștia se notează cu secund (ex. p'' , v'' , t'' , h'' , s'').

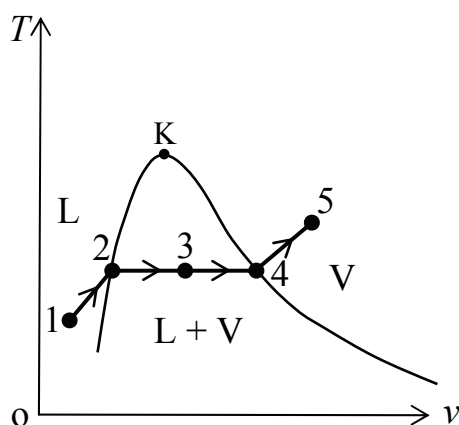


Fig. 10.2: Producerea vaporilor in diagrama T - v

În domeniul vaporilor umezi, se definește **titlul vaporilor** ca fiind un parametru de stare caracteristic sistemelor bifazice, egal cu raportul dintre masa vaporilor saturați uscați și masa totală a lichidului și vaporilor în stare de saturație:

$$x = \frac{m_v}{m_l + m_v} \quad [-]$$

În cazul în care avem numai lichid saturat, $m_v = 0$ și deci $x = 0$ iar pentru cazul în care avem numai vapor saturați uscați, $m_l = 0$ și deci $x = 1$. Toate curbele de x constant trec prin punctul critic.

Parametrii de stare extensivi ai vaporilor umezi (volumul, energia internă, entalpia, entropia) sunt mărimi aditive și se calculează după cum urmează:

$$V = V' + V'' = m_l v' + m_v v'' \quad [\text{m}^3]$$

$$U = U' + U'' = m_l u' + m_v u'' \quad [\text{J}]$$

$$H = H' + H'' = m_l h' + m_v h'' \quad [\text{J}]$$

$$S = S' + S'' = m_l s' + m_v s'' \quad [\text{J/kg}]$$

Pentru mărimile specifice avem următoarele relații:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{m_l v' + m_v v''}{m_l + m_v} = \frac{m_l}{m_l + m_v} v' + \frac{m_v}{m_l + m_v} v'' \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

sau
$$v_x = (1 - x)v' + x v'' = v' + x(v'' - v') \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

$$u = \frac{U}{m} = \frac{m_l u' + m_v u''}{m_l + m_v} = \frac{m_l}{m_l + m_v} u' + \frac{m_v}{m_l + m_v} u'' \quad [\text{J/kg}]$$

sau
$$u_x = (1 - x)u' + x u'' = u' + x(u'' - u') \quad [\text{J/kg}]$$

$$h = \frac{H}{m} = \frac{m_l h' + m_v h''}{m_l + m_v} = \frac{m_l}{m_l + m_v} h' + \frac{m_v}{m_l + m_v} h'' \quad [\text{J/kg}]$$

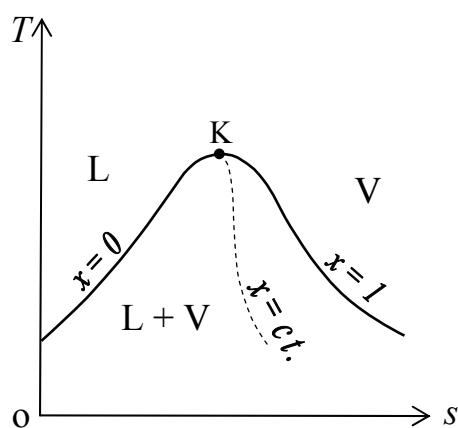
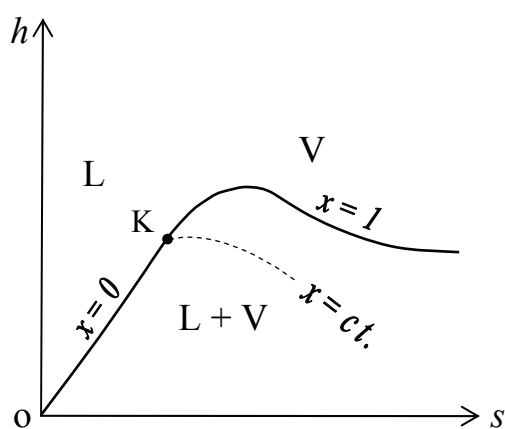
sau
$$h_x = (1 - x)h' + x h'' = h' + x(h'' - h') = h' + x r \quad [\text{J/kg}]$$

Remarcă: Într-un proces de vaporizare izobară, căldura latentă este egală cu diferența dintre entalpia vaporilor saturați uscați și entalpia lichidului saturat.

$$s = \frac{S}{m} = \frac{m_l s' + m_v s''}{m_l + m_v} = \frac{m_l}{m_l + m_v} s' + \frac{m_v}{m_l + m_v} s'' \quad [\text{J/kg K}]$$

sau
$$s_x = (1 - x)s' + x s'' = s' + x(s'' - s') \quad [\text{J/kg K}]$$

În aplicațiile tehnice, cele mai utilizate diagrame pentru reprezentarea proceselor cu gaze reale, sunt diagramele temperatură-entropie specifică $T - s$ și entalpie specifică-entropie specifică $h - s$:

Fig. 10.3: Diagrama T - s Fig. 10.4: Diagrama h - s

Procese fundamentale cu vapori

Producerea vaporilor sau generarea vaporilor se realizează în **generatoare de vapori** sau **cazane**, care au, în general, trei părți componente: economizor (preîncălzitor), vaporizator (fierbător) și supraîncălzitor.

Procesele termodinamice caracteristice sunt următoarele:

- 1-2: proces izobar de preîncălzire
- 2-3: proces izobar-izoterm de vaporizare (fierbere)
- 3-4: proces izobar de supraîncălzire a vaporilor.

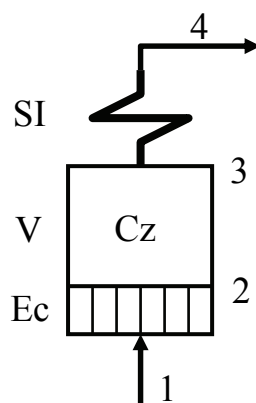


Fig. 10.5: Schema generatorului de vapori (cazanului)

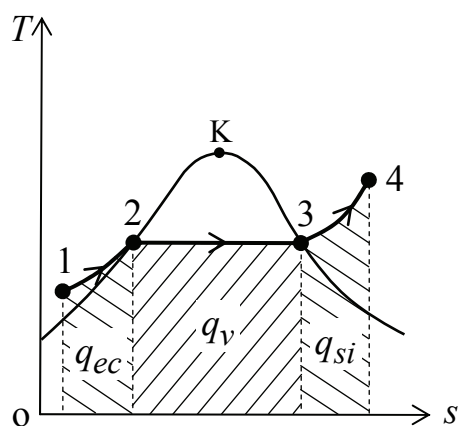


Fig. 10.6: Reprezentarea producerii vaporilor în diagrama $T-s$

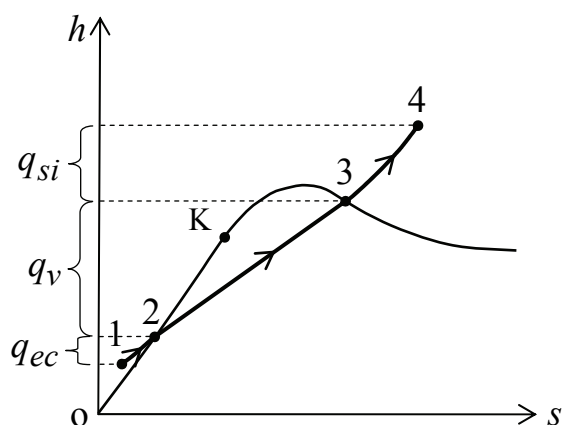


Fig. 10.7: Reprezentarea producerii vaporilor în diagrama $h-s$

Sarcina termică a cazanului este:

$$q_{cz} = q_{ec} + q_{vap} + q_{si} = c_{pl}(t_2 - t_1) + r + c_{pv}(t_4 - t_3) \quad [\text{J/kg}]$$

Deoarece procesele sunt izobare, se poate scrie:

$$q_{cz} = (h_2 - h_1) + (h_3 - h_2) + (h_4 - h_3) = h_4 - h_1 \quad [\text{J/kg}]$$

unde entalpia apei de alimentare h_1 se calculează cu relația:

$$h_1 = c_{pl} t_1 = 4187 \cdot t_1 \quad [\text{J/kg}]$$

Consumul de combustibil rezultă din bilanțul termic al cazanului scris sub formă de fluxuri:

$$\dot{Q}_{cz} = B H_i \eta_{cz} = D q_{cz} = D(h_4 - h_1) \quad [\text{W}]$$

unde B debitul de combustibil, H_i puterea calorifică inferioară a combustibilului, η_{cz} este randamentul cazanului și D debitul de vapori.

Rezultă că:

$$B = \frac{\dot{Q}_{cz}}{H_i \eta_{cz}} = \frac{D(h_4 - h_1)}{H_i \eta_{cz}} \quad [\text{kg/s}]$$

Destinderea vaporilor este un proces adiabatic care are loc în turbine cuplate direct cu generatoare electrice.

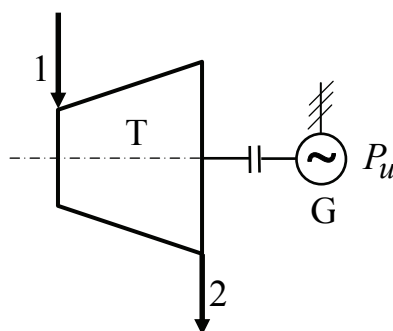


Fig. 10.8: Schema turbinei de vapori

Datorită scăderii abrupte a presiunii la ieșirea din turbină, se obține un lucru mecanic util (tehnic) care, prin antrenarea arborelui generatorului electric, servește la producerea puterii electrice utile P_u .

Din ecuația Principiului I al termodinamicii pentru un proces adiabatic reversibil (fără frecare), rezultă:

$$\delta q = dh - v dp$$

$$\delta q = 0$$

$$-dh = -v dp$$

$$h_1 - h_2 = -\int_1^2 v dp = l_{t12}$$

Dacă procesul este ireversibil (cu frecare și creștere de entropie), se definește **randamentul izentropic** ca raportul dintre lucrul mecanic tehnic real (produs în procesul ireversibil) și lucrul mecanic ideal (produs în procesul reversibil):

$$\eta_s = \frac{l_{t12i}}{l_{t12}} = \frac{h_1 - h_{2i}}{h_1 - h_2} \quad [-]$$

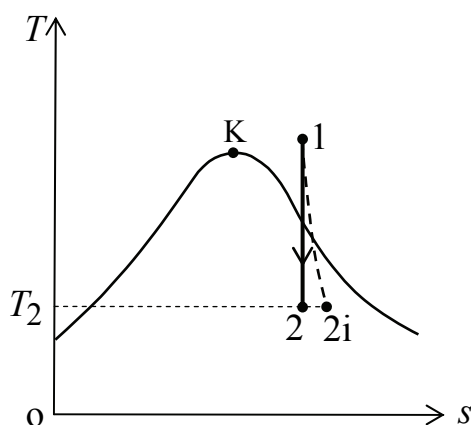


Fig. 10.9: Reprezentarea destinderii în diagrama T-s

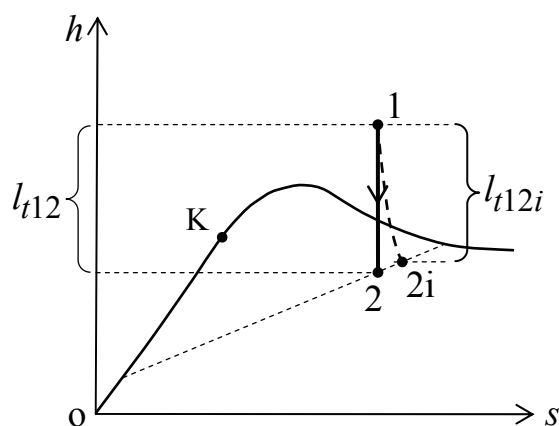


Fig. 10.10: *Reprezentarea destinderii în diagrama h-s*

Puterea utilă a generatorului electric ține seama de randamentul mecanic și de cel al generatorului electric:

$$P_u = D l_{t12} \eta_m \eta_g = D(h_1 - h_2) \eta_m \eta_g \quad [\text{W}]$$

Dacă procesul este ireversibil, puterea utilă a generatorului electric va fi:

$$P_u = D l_{t12i} \eta_m \eta_g = D(h_1 - h_2) \eta_s \eta_m \eta_g \quad [\text{W}]$$

Condensarea vaporilor este un proces izobar și izoterm în care vaporii saturați uscați se transformă în lichid saturat.

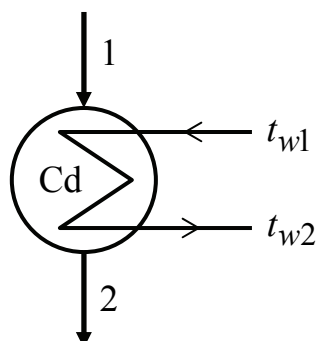


Fig. 10.11: *Schema condensatorului*

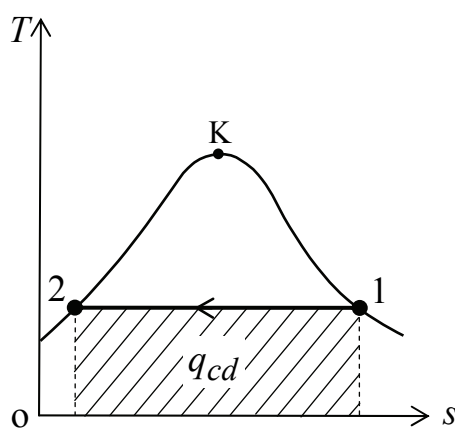


Fig. 10.12: Reprezentarea condensării în diagrama $T-s$

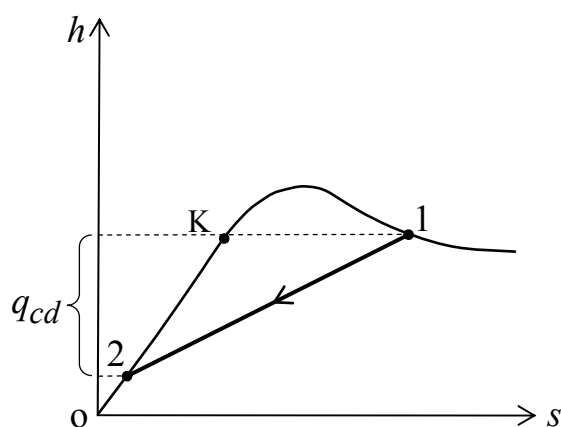


Fig. 10.13: Reprezentarea condensării în diagrama $h-s$

Sarcina termică a condensatorului se determină din ecuația de bilanț termic:

$$\dot{Q}_{cd} = D(h_1 - h_2) \eta_{cd} = D(h'' - h') = Dr = \dot{m}_w c_{pw} \Delta t_w \quad [\text{W}]$$

unde η_{cd} este randamentul condensatorului iar $\dot{m}_w$ este debitul agentului secundar și poate fi calculat cu următoarea relație:

$$\dot{m}_w = \frac{D(h_1 - h_2) \eta_{cd}}{c_{pw} \Delta t_w} \quad [\text{kg/s}]$$

Subrăcirea lichidului este un proces izobar care se realizează în schimbătoare de căldură în care lichidul saturat este răcit la o temperatură inferioară celei de saturație, denumită **temperatură de subrăcire**.

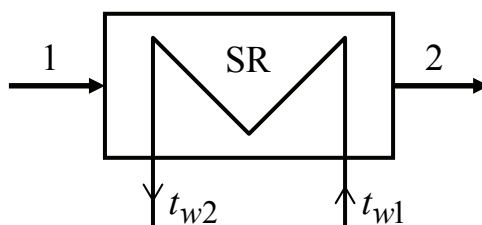


Fig. 10.14: Schema subrăcitorului

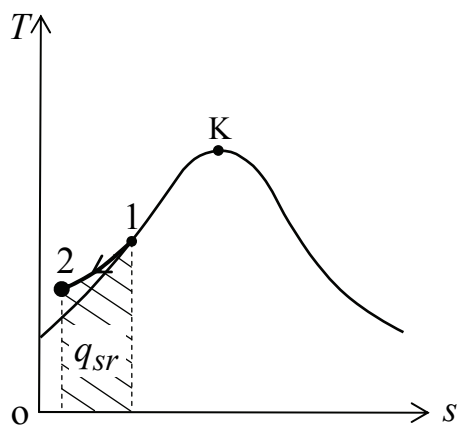


Fig. 10.15: Reprezentarea subrăcirii în diagrama $T-s$

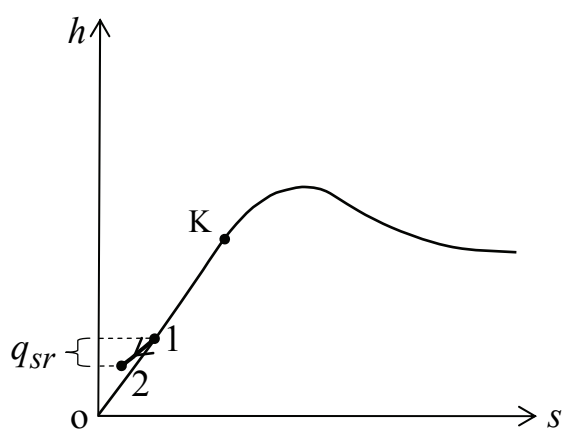


Fig. 10.16: Reprezentarea subrăcirii în diagrama $h-s$

Sarcina termică a subrăcitorului se determină din ecuația de bilanț termic:

$$\dot{Q}_{sr} = D(h_1 - h_2) \eta_{sr} = \dot{m}_w c_{pw} (t_{w2} - t_{w1}) \quad [\text{W}]$$

unde η_{sr} este randamentul subrăcitorului iar $\dot{m}_w$ este debitul agentului secundar și poate fi calculat cu următoarea relație:

$$\dot{m}_w = \frac{D(h_1 - h_2) \eta_{sr}}{c_{pw} (t_{w2} - t_{w1})} \quad [\text{kg/s}]$$