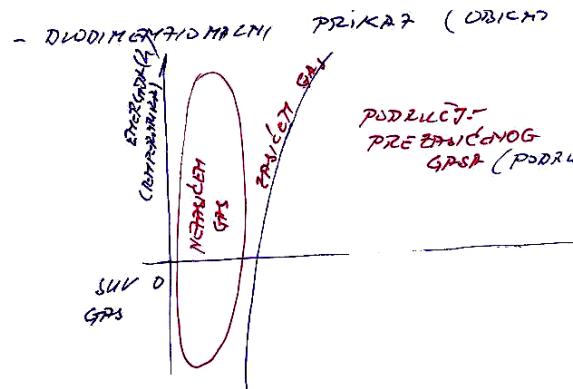
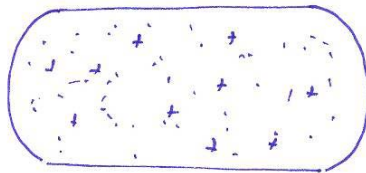


- Ako je kondenzujući gas vlaga (voda-vodena para), takav gas nazivamo **vlažnim**, npr. vlažan kiseonik, vlažan azot,...
- Dvokomponentna mešavina \Rightarrow 3 stepena slobode
 - potrebno je definisati 3 veličine stanja da bi stanje vlažnog gasa bilo određeno
 - trodimenzionalni prikaz
 - dvodimenzionalni prikaz (obično $p = \text{idem}$)



7.2 Veličine stanja vlažnih gasova

- Posmatra se neki vlažan gas koji se nalazi u rezervoaru



- Masa vlažnog gasa (m_{vg}) jednaka je zbiru mase suvog gasa (m_{sg}) i mase vlage (m_{vl})

$$m_{vg} = m_{sg} + m_{vl}$$

- Po Daltonovom zakonu, pritisak smeše gasova - vlažnog gasa (p_{vg}), jednak je zbiru parcijalnih pritisaka komponenti (p_{sg}) – suvog gasa i vlage (p_{vl}) – pare (p_p)

$$p_{vg} = p_{sg} + p_{vl} = p_{sg} + p_p$$

- Svaka od komponenti, a i sama smeša rasprostiru se po čitavoj zapremini rezervoara (V_r). Zato je zapremina vlažnog gasa (V_{vg}) ista je kao i zapremina suvog gasa (V_{sg}), odnosno zapremina pare (V_p).

$$V_r = V_{vg} = V_{sg} = V_p$$

- Gasna smeša se nalazi u termičkoj ravnoteži, pa sve komponente ($T_{sg} = T_p$), kao i sama smeša imaju istu temperaturu (T_{vg}). Takođe, ukoliko usled promene temperature dođe do izdvajanja kondenzata - tečne faze (T_l), ili pak pojave leda – čvrste faze (T_{ξ}), i dalje će sve komponente (faze) imati istu temperaturu.

$$T_{vg} = T_{sg} = T_p (= T_t = T_{\xi})$$

- Definisanje sastav vlažnog gasa

- Apsolutna vlažnost gasa

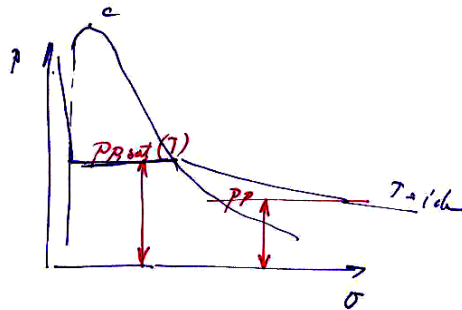
$$x = \frac{m_{vl}}{m_{sg}} = \frac{m_p + m_t + m_c}{m_{sr}} = x_p + x_t + x_c$$

$$m_{vg} = m_{sv} (1 + x)$$

- Relativna vlažnost (samo za nezasićeno područje) – udobnost, subjektivan osećaj vlažnosti

$$\varphi = \left(\frac{m_{vl}}{(m_{vl})_{\max}} \right)_T = \left(\frac{m_p}{(m_p)_{\max}} \right)_T = \frac{\frac{p_p V}{R_p T}}{\frac{p_{p,\text{sat}} V}{R_p T}} = \left(\frac{p_{p,\text{sat}}}{p_{p,\text{sat}}} \right)_T$$

$$p_{p,\text{sat}} = f(T) \quad \text{samo od } T!!!$$



LAŽNO!

$$\underline{p_{p,\text{sat}} = f(T)}$$

samo od T!!!

- Između apsolutna i relativne vlažnosti vlažnog gasa u nezasićenom području postoji međusobna zavisnost.

- Predpostavka – ponašanje i kondenzujućeg i ne kondenzujućeg gas može se opisati jednačinom stanja idealnog gasa

$$p_p V = m_p R_p T \quad \text{i} \quad p_{sv} V = m_{sg} R_{sg} T$$

- Apsolutna vlažnost vlažnog gasa

$$x = \frac{m_p}{m_{sg}} = \frac{\frac{p_p V}{R_p T}}{\frac{p_{sg} V}{R_{sg} T}} = \frac{M_p}{M_{sg}} \frac{p_p}{p_{sg}} = \frac{M_{H_2O}}{M_{sg}} \frac{\varphi \cdot p_{p,\text{sat}}}{p - \varphi \cdot p_{p,\text{sat}}}$$

- Molarna masa vode i molarana masa najčešćeg suvog gasa – suvog vazduha

$$M_{H_2O} = 18,016 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol} \text{ i } M_{sv} = 28,964 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

pa je za vlažan vazduh

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{p,\text{sat}}(T)}{p - \varphi \cdot p_{p,\text{sat}}(T)}$$

- Gustina nezasićenog vlažnog gasa

$$\rho_{\text{vg}} = \frac{m_{\text{vg}}}{V_{\text{vg}}} = \frac{m_{\text{sg}} + m_{\text{p}}}{V_{\text{vg}}} = \rho_{\text{sv}} + \rho_{\text{p}} \quad \text{ili} \quad \rho_{\text{vg}} = \frac{m_{\text{sg}}}{V_{\text{sg}}} (1 + x_{\text{p}}) = \rho_{\text{sg}} (1 + x_{\text{p}})$$

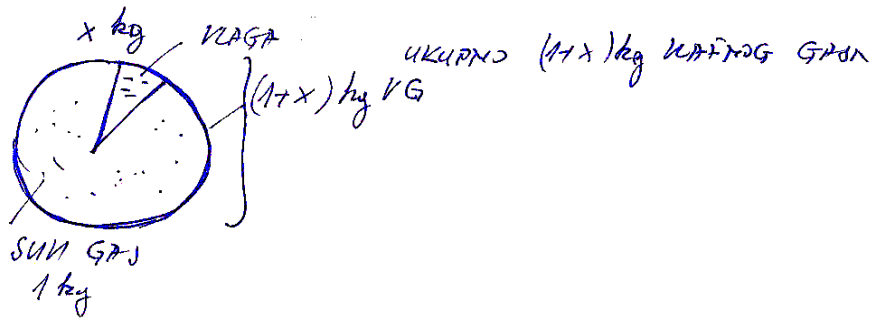
- Entalpija vlažnog gasa

$$H_{\text{vg}} = H_{\text{sg}} + H_{\text{vl}} \quad / : m_{\text{sg}}$$

$$\frac{H_{\text{vg}}}{m_{\text{sg}}} = \frac{m_{\text{sg}} \cdot h_{\text{sg}}}{m_{\text{sg}}} + \frac{m_{\text{vl}} \cdot h_{\text{vl}}}{m_{\text{sg}}} = h_{\text{sg}} + x h_{\text{vl}}$$

Specifična entalpija vlažnog gasa (svedena na 1 kg suvog gasa ili vlažnog gasa)

$$h_{1+x} = h_{\text{sg}} + x h_{\text{vl}} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg SG}} \right] \quad \text{ili} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{(1+x)\text{kg VG}} \right]$$



7.3 Vlažan vazduh

- Važe sve relacije kao i za svaki drugi vlažan gas
- Indeksi – suv gas (sg) prelazi u suv vazduh (sv), vlažan gas (vg) u vlažan vazduh (vv), npr.

$$m_{\text{sg}} \rightarrow m_{\text{sv}} \quad m_{\text{vg}} + m_{\text{vv}} \Rightarrow$$

- Masa vlažnog vazduha

$$m_{\text{vv}} = (1 + x) m_{\text{sv}}$$

- Pritisak vlažnog vlažnog

$$p_{\text{vv}} = p_{\text{sv}} + p_{\text{p}}$$

- Zapremima vlažnog vazduha, suvog vazduha i pare

$$V_{\text{vv}} = V_{\text{sv}} = V_{\text{p}}$$

- Temperatura vlažnog vazduha, suvog vazduha i pare

$$T_{\text{vv}} = T_{\text{sv}} = T_{\text{p}}$$

- Apsolutna vlažnost vlažnog vazduha

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{p,sat}(\vartheta)}{p - \varphi \cdot p_{p,sat}(\vartheta)}$$

- Relativna vlažnost vlažnog vazduha

$$\varphi = \left(\frac{p_p}{p_{p,sat}} \right)_\vartheta$$

7.3.1 Entalpija vlažnog vazduha

- po zonama u zavisnosti od stanja vlage

1. Nezasićen vlažan vazduh – I zona

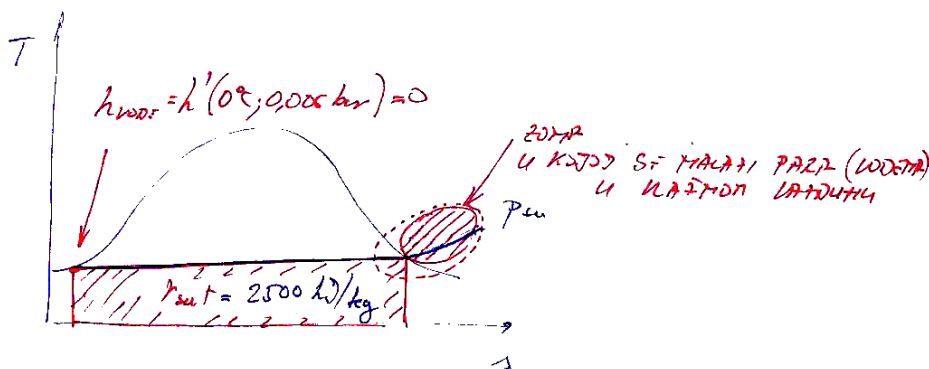
$$h_{l+x} = \underbrace{h_{sv}}_{\text{idealn gas}} + \underbrace{x \cdot h_{vl}}_{\text{realn gas - para}}$$

- Prema dogovoru entalpija vode pri $\vartheta_{tr} = 0,01^\circ\text{C} \approx 0$, $p_{tr} = 611,2 \text{ Pa}$ je jednaka nuli

$$h_{vode} = 0 \text{ kJ/kg}$$

- U zoni veoma niskih pritisaka svaki realni gas ponaša se kao idealan. To ujedno znači i linearnu vezu između entalpije i temperature gasa, pa se entalpija vodene pare pri tako niskim pritiscima može računati preko izraza

$$h_p = r_{sat} + c_{p,vp} \cdot \vartheta$$



Toplota promene faze na $p_{tr} \approx 611,2 \text{ Pa}$ ($\vartheta_{tr} = 0,01^\circ\text{C} \approx 0$) iznosi

$$r_{sat} = 2501,3 \text{ kJ/kg} \approx 2500 \text{ kJ/kg}$$

a pri malim pritiscima, specifični toplotni kapacitet vodene pare približno stalan, to jest ima približno nepromenjivu vrednost

$$c_{p,vp} \approx 1,86 \text{ kJ/(kg K)},$$

pa se entalpija vlažnog vazduha

$$h_{l+x,sat} = c_{p,sv} \cdot \vartheta + \underbrace{x \cdot (r_{sat} + c_{p,vp} \cdot \vartheta)}_{\text{entalpija vode-vodene pare}}$$

može izračunati iz

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x \cdot (2500 + 1,86 \cdot \vartheta)$$

2. Linija zasićenja– II –zasićen vlažan vazduh

- Za vazduh zasićen vlagom $\varphi = 1$ ($x \rightarrow x_{\text{sat}}$), entalpija se određuje kao

$$h_{1+x,\text{sat}} = c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta + x \cdot (r_{\text{sat}} + c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta)$$

$$h_{1+x,\text{sat}} = 1 \cdot \vartheta + x_{\text{sat}} \cdot (2500 + 1,86 \cdot \vartheta)$$

3. Područje obične magle – prezasićen vlažan vazduh –III zona

- Vlažan vazduh, temperature veće od $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, prezasićen vlagom. Ona se u njemu nalazi u vidu molekula vode (u maksimalno mogućoj koncentraciji ($x_p = x_{\text{sat}}$)) i u molarnom obliku (sitne lebdeće kapljice vode – magla)

$$h_{1+x} = c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta + \underbrace{x_{\text{sat}} \cdot (r_{\text{sat}} + c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta)}_{\text{molekule vode - para}} + \underbrace{x_t \cdot c_{p,t} \cdot \vartheta}_{\text{kapljice vode - magla}}$$

$$x_t = x - x_{\text{sat}}$$

$$c_{p,t} = 4,186 \text{ kJ/(kg K)}$$

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x_{\text{sat}} (2500 + 1,86 \cdot \vartheta) + x_t 4,186 \cdot \vartheta$$

4. Područje susnežne magle – prezasićen vlažan vazduh – IV zona

- Vlažan vazduh, temperature jednake $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, prezasićen vlagom. Ona se u njemu nalazi u vidu molekula vode (u maksimalno mogućoj koncentraciji ($x_p = x_{\text{sat}}$)) i u molarnom obliku (i sitne lebdeće kapljice vode – x_t , i sitni lebdeći kristali leda – ledena magla – x_{e})

$$h_{1+x} = c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta + \underbrace{x_{\text{sat}} \cdot (r_{\text{sat}} + c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta)}_{\text{molekule vode - para}} + \underbrace{x_t \cdot c_{p,t} \cdot \vartheta}_{\text{kapljice vode - magla}} + \underbrace{x_{\text{e}} \cdot (-r_{\text{liq}} + c_{p,\text{sol}} \cdot \vartheta)}_{\text{kristali leda - ledena magla}}$$

susnežna magla

Kako je $\vartheta = 0^\circ\text{C}$

$$h_{1+x} = \cancel{c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta} + x_{\text{sat}} \cdot (\cancel{r_{\text{sat}}} + \cancel{c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta}) + \cancel{x_t \cdot c_{p,t} \cdot \vartheta} + x_{\text{e}} \cdot (\cancel{-r_{\text{liq}}} + \cancel{c_{p,\text{sol}} \cdot \vartheta})$$

$$h_{1+x} = r_{\text{sat}} \cdot x_{\text{sat}} - r_{\text{liq}} \cdot x_{\text{e}}$$

Specifični toplotni kapacitet leda

$$c_{p,\text{sol}} = c_{p,\text{leda}} = 2,04 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$$

Toplota očvršćavanja (toploenja) leda

$$r_{\text{liq}} = r_{\text{e}} = 332,4 \text{ kJ/kg}$$

Specifična entalpija vlažnog vazduha u području susnežne magle

$$h_{1+x} = 2500 \cdot x_{\text{sat}} - 332,4 \cdot x_{\text{c}}$$

$$x = x_{\text{sat}} + x_t + x_{\text{c}}$$

5. Područje ledene magle – prezasićen vlažan vazduh – V zona

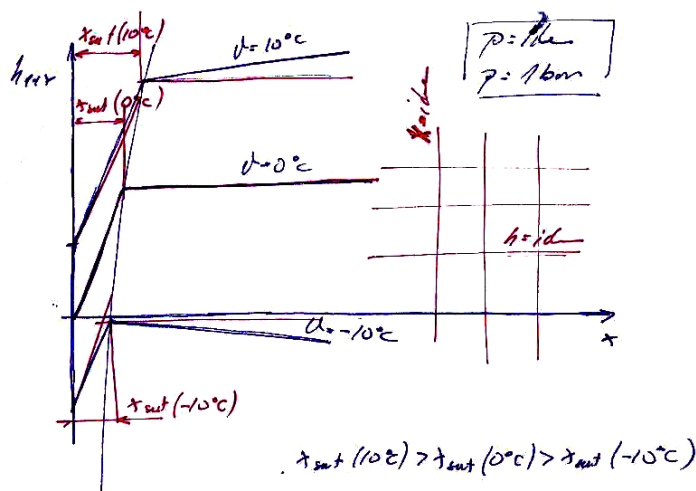
- Vlažan vazduh, temperature manje od $\vartheta < 0^\circ\text{C}$, prezasićen vlagom. Ona se u njemu nalazi u vidu molekula vode (u maksimalno mogućoj koncentraciji ($x_p = x_{\text{sat}}$)) i u molarnom obliku (sitni lebdeći kristali leda – ledena magla – x_{c})

$$h_{1+x} = c_{p,\text{sv}} \cdot \vartheta + \underbrace{x_{\text{sat}} \cdot (r_{\text{sat}} + c_{p,\text{vp}} \cdot \vartheta)}_{\text{molekule vode - para}} + \underbrace{x_{\text{c}} \cdot (-r_{\text{liq}} + c_{p,\text{sol}} \cdot \vartheta)}_{\text{kristali leda - ledena magla}}$$

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x_{\text{sat}} \cdot (2500 + 1,86 \cdot \vartheta) + x_{\text{c}} \cdot (-332,4 + 2,04 \cdot \vartheta)$$

7.3.2 Molierov (Mollier) kosougli $h_{1+x} - x$ dijagram za vlažan vazduh

- ucrtavanje izoterma – definisanje zona)



1. Nezasićen vlažan vazduh

Entalpija

$$h_{1+x} = 1 \cdot \vartheta + x(2500 + 1,86 \cdot \vartheta)$$

- Izoterma $\vartheta = 0^\circ\text{C}$

$$(h_{1+x})_{\vartheta=0} = 2500 \cdot x$$

$$(\text{tg } \alpha)_{\vartheta=0} = \left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x} \right)_{\vartheta=0} = 2500$$

- Izoterma $\vartheta = 10^\circ\text{C}$

$$(h_{1+x})_{\vartheta=10^\circ\text{C}} = 10 + x \cdot 2518$$

$$(\text{tg } \alpha)_{\vartheta=10^\circ\text{C}} = 2518$$

- Izoterma $\vartheta = -10^\circ\text{C}$

$$(h_{1+x})_{g=-10^{\circ}\text{C}} = -10 + 2481 \cdot x \quad (\text{tg} \alpha)_{g=-10^{\circ}\text{C}} = 2481$$

- Absolutna vlažnost

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_{p,\text{sat}}(\vartheta)}{p - \varphi \cdot p_{p,\text{sat}}(\vartheta)} \Rightarrow$$

$$\text{za } g_1 > g_2 \quad \Rightarrow \quad p_{\text{sat}_1} > p_{\text{sat}_2} \quad \Rightarrow \quad x_{\text{sat}_1} > x_{\text{sat}_2}$$

2. Linija zasićenja

3. Područje obične magle – III zona

Entalpija

$$h_{1+x} = 1 \cdot g + x_{\text{sat}} \cdot (2500 + 1,86 \cdot g) + x_t \cdot 4,186 \cdot g$$

- Izoterma $\vartheta = 0^{\circ}\text{C}$

$$\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x_t}\right)_{g=0^\circ\text{C}} = 0$$

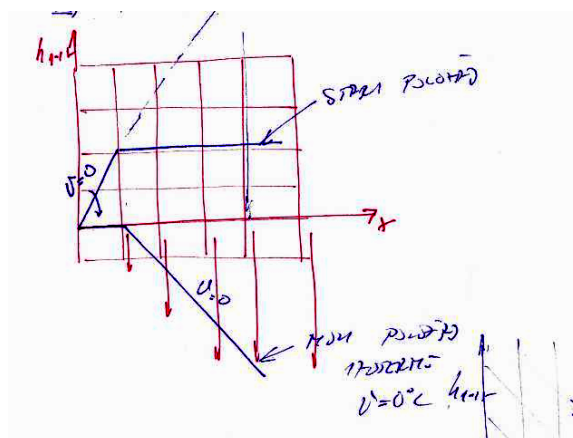
- Izoterma $\vartheta = 10^{\circ}\text{C}$

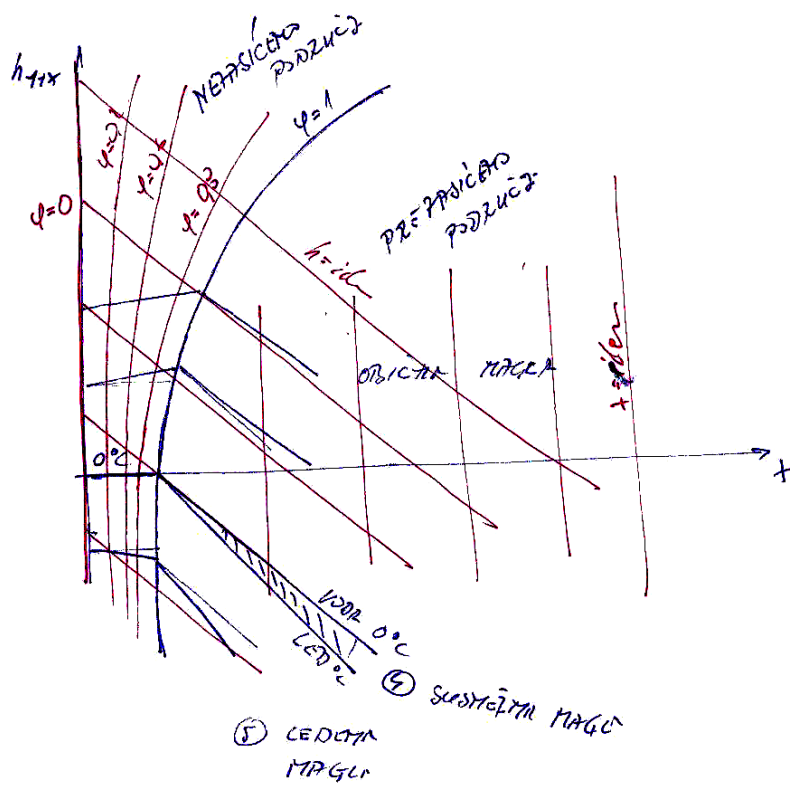
$$\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x_t}\right)_{g=10^{\circ}\text{C}} = 41,86$$

- Izoterma $\vartheta = -10^{\circ}\text{C}$

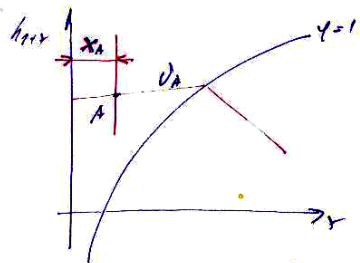
$$\left(\frac{\partial h_{1+x}}{\partial x_t}\right)_{g=-10^{\circ}\text{C}} = -41,86$$

- uska zona nezasićenog područja u dijagramu
- prelazi sa pravouglog na kosougli dijagram

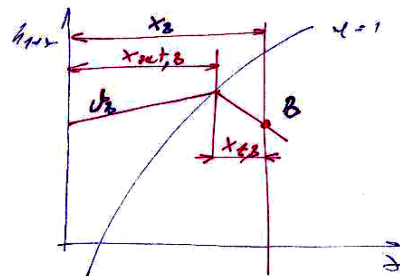




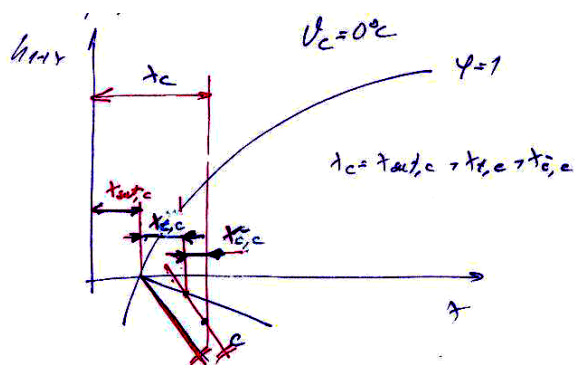
Nezasićeno područje



Područje obične magle



Područje susnežne magle



Područje ledene magle

