

Adijabatski proces – proces u kojem termodinamički sustav ne razmjenjuje energiju s okolišem. U adijabatskom procesu bilo koja promjena unutarnje energije **materijalne** česti posljedica je samo rada. Adijabatski proces je ujedino i izentropni.

Za idealni plin adijabatska kompresija rezultira zagrijavanjem, a ekspanzija ohlađivanjem plina. Isto vrijedi i za adijabatske procese u atmosferi, budući da se atmosferski plinovi pri postojećim atmosferskim tlakovima i temperaturama ponašaju poput idealnog plina. Pri adijabatskom dizanju čest dolaskom na niži tlak ekspandira te se stoga ohlađuje, dok pri adijabatskom spuštanju čest dolazi na viši tlak i stoga se komprimira, odnosno zagrijava.

Adijabatske procese u atmosferi (npr. dizanje ili spuštanje česti zraka) možemo dobro aproksimirati pomoću dva teorijska (idealizirana) procesa: suoadijabatskog i mokroadijabatskog.

Suoadijabatski procesi

Suoadijabatski proces dobro prikazuje dizanje ili spuštanje suhe ili vodenom parom nezasićene česti zraka. U takvoj česti nema ni tekuće vode. Ako je čest **potpuno suha** tada se pri dizanju hladi, a pri spuštanju grije po jedinici visine suoadijabatskom stopom $\delta_d = g / c_{pd}$, gdje je g akceleracija sile teže, a c_{pd} je specifična toplina suhog zraka pri konstantnom tlaku. U takvom procesu sačuvana je potencijalna temperatura suhog zraka \mathcal{G}_d

$$\mathcal{G}_d = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_d/c_{pd}},$$

gdje je R_d specifična plinska konstanta suhog zraka.

Ako je čest **vlažna ali nezasićena**, tada je adijabatska stopa ohlađivanja $\delta_m = g / c_{pm}$, gdje je c_{pm} je specifična toplina vlažnog (nezasićenog) zraka pri konstantnom tlaku. Kako je $c_{pm} \approx c_{pd} (1 + 0.8 r)$, gdje je r omjer miješanja, koji za atmosferske česti ima veoma malene vrijednosti ($\sim 10^{-2}$), to je $c_{pm} \approx c_{pd}$. Odatle je $\delta_m \approx \delta_d$, pa se vlažna nezasićena čest pri dizanju adijabatski ohlađuje gotovo jednako kao i da je potpuno suha. Za vlažnu nezasićenu čest je u adijabatskom procesu sačuvana potencijalna temperatura vlažnog (nezasićenog) zraka \mathcal{G}_m

$$\mathcal{G}_m = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_m/c_{pm}},$$

gdje je R_m specifična plinska konstanta vlažnog nezasićenog zraka. Kako je $R_m \approx R_d (1 + 0.605 r)$, a r je u atmosferi veoma malen, to je $R_m \approx R_d$. Odatle je i $R_m / c_{pm} \approx R_d / c_{pd}$, pa je $\mathcal{G}_m \approx \mathcal{G}_d$. Dakle, vlažna nezasićena čest ponaša se u

adijabatskom procesu gotovo jednako kao da je potpuno suha. Stoga u meteorološkim proračunima najčešće pretpostavljamo da se vlažna nezasićena čest ponaša potpuno jednako kao da je suha.

Mokroadijabatski procesi

Mokroadijabatski procesi dobro opisuju ponašanje **zasićene** česti zraka pri njenom dizanju ili spuštanju. Razlikujemo **reverzibilni** i **ireverzibilni (pseudoadijabatski)** proces.

Reverzibilni (povratni) mokroadijabatski proces

U reverzibilnom mokroadijabatskom procesu (slika 1) ukupni sadržaj vodene tvari u česti je sačuvan.

Konzervativna veličina mokroadijabatskog reverzibilnog procesa je **potencijalna temperatura mokrog termometra** $\vartheta_{w,a}$. To je temperatura koju bi postigla čest zraka kada bi se adijabatski dovela do kondenzacijske razine i zatim mokroadijabatski spustila do referentnog tlaka $p_0 = 1000$ hPa (vidi sliku 1, dolje)

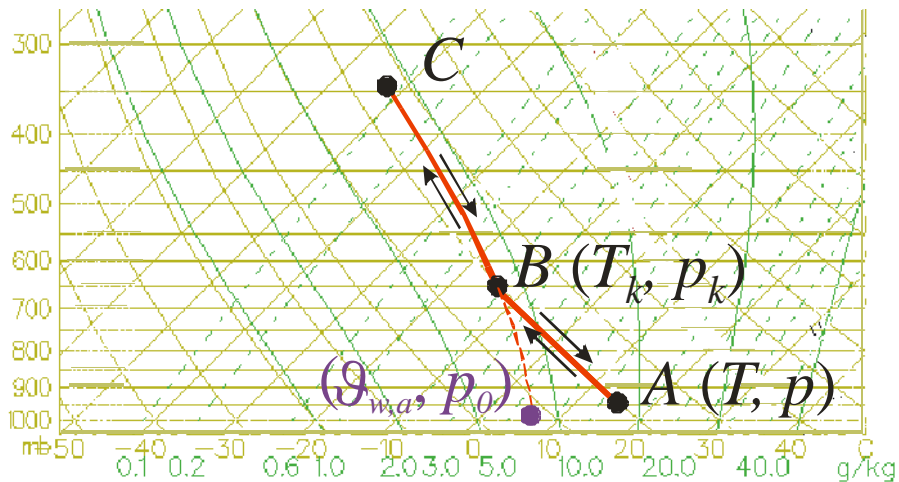
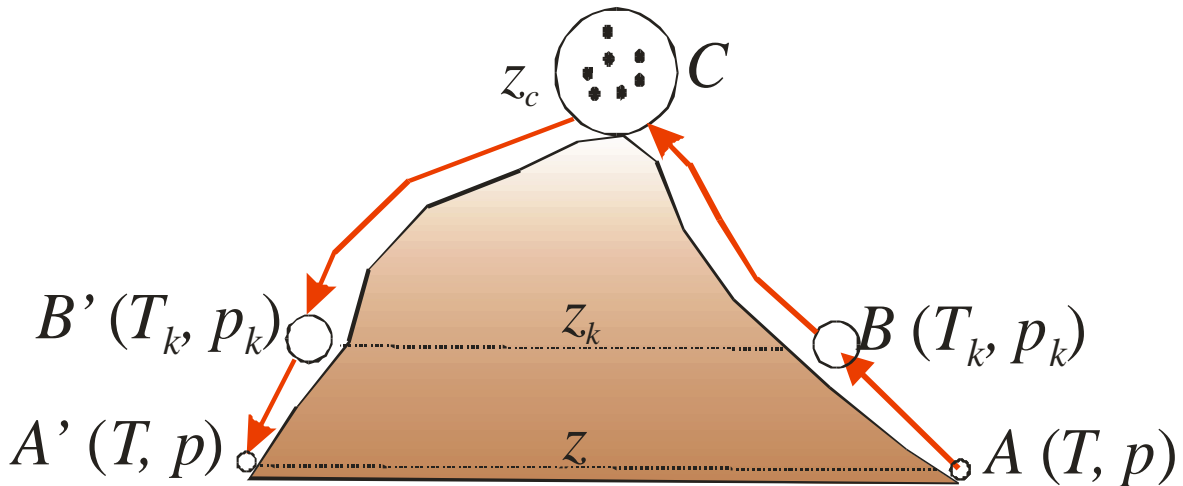
$$\vartheta_{w,a} = T_{w,a} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R_m/c_{pm}},$$

gdje je $T_{w,a}$ temperature mokrog termometra, R_m specifična plinska konstanta vlažnog zasićenog zraka ($R_m \approx R_d (1 + 0.605 r_s)$), gdje je r_s omjer miješanja zasićenog zraka, a c_{pm} je specifična toplina vlažnog zasićenog zraka pri konstantnom tlaku ($c_{pm} \approx c_{pd} (1 + 0.8 r_s)$).

Jednadžbu reverzibilnog mokroadijabatskog procesa izveo je Rossby polazeći od pretpostavke da su u takvom procesu entropija česti i masa vodene tvari konstantne. Pogledajmo materijalnu čest čija je masa $m_m = m_v + m_d + m_l$, gdje je m_v masa vodene pare u česti, m_d je masa suhog zraka (koja za materijalnu čest mora biti konstantna), a m_l je masa tekuće vode u česti. Entropija česti S jednaka je zbroju entropija suhog zraka, vodene pare i tekuće vode:

$$S = s_d m_d + s_v m_v + s_l m_l = \text{konst.}, \quad (1)$$

gdje su s_d , s_v i s_l specifične entropije suhog zraka, vodene pare i tekuće vode.



Slika 1. Mokroadijabatski reverzibilni proces. Gore: Vlažna nezasićena čest nalazi se u početku u točki A na temperaturi T i tlaku p . Zbog strujanja preko planine čest se suhoadijabatski hladi sve dok ne dođe na kondenzacijsku razinu (točka B), na kojoj ima temperaturu T_k i tlak p_k . Nastavi li se čest dalje dizati, ohlađivati će se mokroadijabatski, a vodena para u njoj će se kondenzirati, ali će vodene kapljice ostati u česti. Pri kondenzaciji se oslobađa latentna toplina koja se utroši na zagrijavanje česti. Kad čest dođe do vrha (točka C) počinje se spuštati niz planinu. Zbog adijabatske kompresije, temperatura česti raste. Stoga kapljice u česti isparavaju trošeći pri tom (u navjetrini oslobođenu) latentnu toplinu. - Čest od točke C do točke B' se zagrijava mokroadijabatski. U točki B' u česti će postojati samo vodena para, a temperatura i tlak biti će jednaki kao i u točki B u navjetrini na jednakoj nadmorskoj visini z_k . Daljnim spuštanjem čest se suhoadijabatski grije te konačno dolaskom na početnu nadmorsku visinu z (točka A') opet ima početni tlak p i temperaturu T . Dolje: Isti reverzibilni proces prikazan prikazan na kosom emagramu. Krivulja od točke A do točke B je suha adiabat, a krivulja od točke B do točke C je mokra adiabat.

Specifična entropija vodene pare jednaka je zbroju specifične entropije tekuće vode s_l i specifične entropije prijelaza tekuće vode u paru s_{lv} , pa jednadžbu (1) nakon dijeljenja s masom suhog zraka m_d možemo pisati ovako:

$$s_d + (s_l + s_{lv}) r_s + s_l r_l = \text{konst.}, \quad (2)$$

gdje je r_s omjer miješanja vodene pare, koji je ovdje jednak maksimalnom omjeru miješanja (promatramo zasićenu čest), a r_l je omjer miješanja tekuće vode, $r_l = m_l / m_d$.

Nakon diferenciranja jednadžbe (2) dobivamo

$$ds_d + (r_s + r_l) ds_l + s_l (dr_s + dr_l) + r_s ds_{lv} + s_{lv} dr_s = 0. \quad (3)$$

Kako za materijalnu čest uvijek mora biti $m_d = \text{konst.}$, a za reverzibilan proces masa vodene tvari mora biti sačuvana, $m_v + m_l = \text{konst.}$, to je

$$dr_s + dr_l = d(r_s + r_l) = d(m_v / m_d + m_l / m_d) = (1 / m_d) d(m_v + m_l) = 0,$$

pa jednadžba (3) prelazi u

$$ds_d + (r_s + r_l) ds_l + d(r_s s_{lv}) = 0. \quad (4)$$

Uvrstimo u jednadžbu (4) $ds_l = c_l d(\ln T)$ i $s_{lv} = L_{lv} / T$, gdje je c_l je specifična toplina tekuće vode, T je temperatura, a L_{lv} je latentna toplina isparavanja/kondenzacije. Tako dobivamo **diferencijalnu jednadžbu za reverzibilni mokroadijabatski proces**

$$ds_d + c_l (r_s + r_l) d(\ln T) + d(r_s L_{lv} / T) = 0 \quad (5)$$

u kojoj je $c_l (r_s + r_l) = \text{konst.}$ jer je u reverzibilnom procesu masa vodene tvari sačuvana. Jednadžbu (5) možemo pisati i u **integralnom obliku**

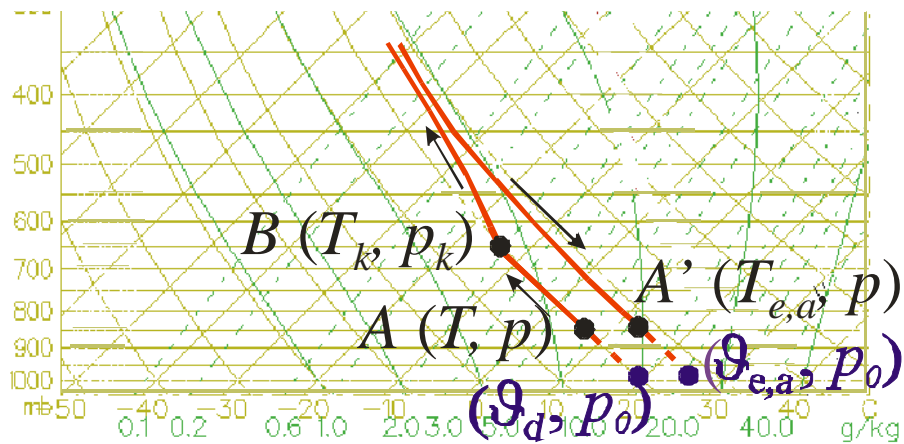
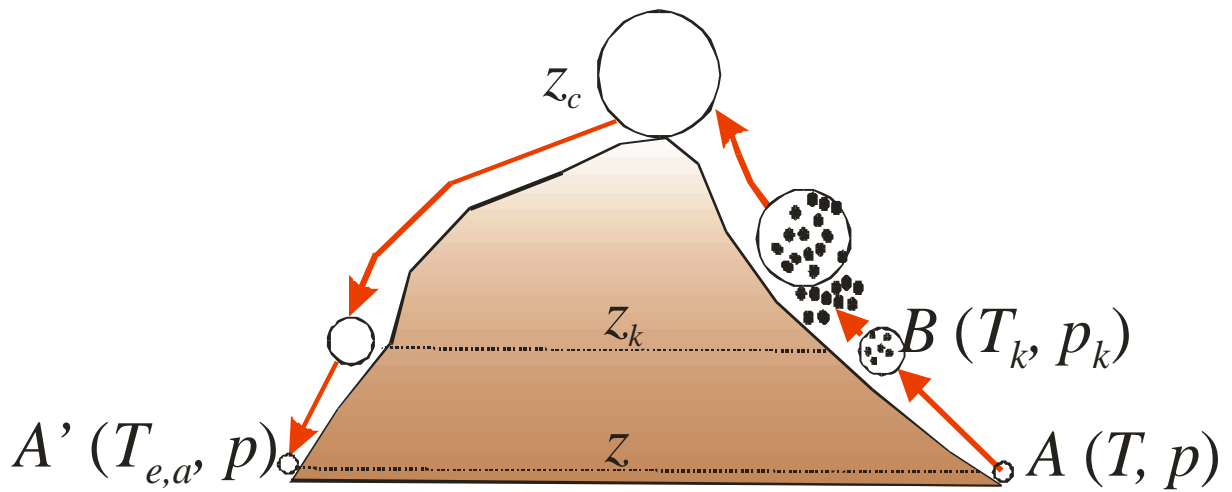
$$s_d + c_l (r_s + r_l) \ln T + r_s L_{lv} / T = \text{konst.} \quad (6)$$

Ireverzibilni mokroadijabatski (pseudoadijabatski) proces

U ireverzibilnom (nepovratnom) mokroadijabatskom procesu (slika 2) kondenzirana voda napušta čest te sa sobom odnosi mali dio energije – takav proces nije pravi adijabatski proces. Stoga se još zove i pseudoadijabatski proces.

Konzervativna veličina u ireverzibilnom mokroadijabatskom procesu je ekvivalentna potencijalna temperatura $\vartheta_{e,a}$, gdje indeks 'a' ukazuje da se radi o temperaturi za adijabatski proces.

Ireverzibilni mokroadijabatski proces događa se npr. pri puhanju **fena** u Alpama. Tada zrak u zavjetrini planina ima temperaturu $T_{e,a}$ koja može biti puno veća od temperature T u navjetrini.



Slika 2. Mokroadijabatski ireverzibilni proces. Gore: Vlažna nezasićena čest nalazi se u početku u točki A na temperaturi T i tlaku p . Pri prelasku preko planine čest se suhoadijabatski hladi sve dok ne dođe na kondenzacijsku razinu (točka B), na kojoj ima temperaturu T_k i tlak p_k . Nastavi li se čest dalje dizati, ohlađivati će se mokroadijabatski, a vodena para u njoj će se kondenzirati i pri tom će se oslobađati latentna toplina koja će zagrijavati čest. Vodene kapljice će ispadati iz česti. Ako je prepreka dovoljno visoka, kad čest dođe do vrha, biti će potpuno suha. Stoga se pri spuštanju niz planinu zagrijava suhoadijabatski. Kada dođe na početnu nadmorsku visinu z , odnosno početni tlak p (točka A') biti će toplija no što je bila u početnoj točki A te će imati ekvivalentnu adijabatsku temperaturu $T_{e,a}$. Dolje: Isti proces prikazan na kosom emagramu. Od početne točke A do razine kondenzacije B čest 'putuje' po suhoj adijabati. Iznad točke B promjene stanja česti događaju se po mokroj adijabati. Pri tom se količina vodene pare u česti zbog kondenzacije stalno smanjuje sve dok čest ne postane potpuno suha, tj. dok maksimalni omjer miješanja u česti ne postane jednak nuli, $r_s = 0$. U zavjetrini planine čest će se spuštati po onoj suhoj adijabati koja se na malim tlakovima asimptotski približava mokroj adijabati kroz točku B. Konačno, u točki A' čest ima temperaturu $T_{e,a} > T$. ϑ_d je potencijalna temperatura suhog zraka, a $\vartheta_{e,a}$ je ekvivalentna potencijalna temperatura, koja je u ovom procesu sačuvana.

Jednadžbu ireverzibilnog mokroadijabatskog procesa također je izveo Rossby. Analizom skala jednadžbe za reverzibilni proces (6) ustanovio je da je član $c_l (r_s + r_l) \ln T$ za red veličine manji od preostala dva člana te ga je izbacio iz jednadžbe (6). Kako taj član upravo opisuje doprinos kondenziranih vodenih kapljica (dobiven je integracijom člana $(r_s + r_l) ds_l$, gdje ds_l prikazuje promjenu specifične entropije tekuće vode, $ds_l = c_l d(\ln T)$), njegovim izbacivanjem Rossby je iz česti izbacio kondenziranu vodu. Time je ustvari integralnom jednadžbom prikazao ireverzibilni mokroadijabatski proces zasićene česti:

$$s_d + r_s L_{lv} / T = \text{konst.} \quad (7)$$

Jednadžbu (7) možemo preurediti primjenom prvog i drugog stavka termodinamike te jednadžbe stanja idealnog plina

$$ds_d = \delta q / T = (c_{pd} dT - \alpha dp_d) / T = c_{pd} d(\ln T) - R_d d(\ln(p - e_s)),$$

gdje je α specifični volumen, p tlak vlažnog zasićenog zraka, $p = p_d + e_s$, p_d je tlak suhog zraka, a e_s je maksimalni (ravnotežni) tlak vodene pare. Integriramo gornju jednadžbu te je zatim uvrstimo u jednadžbu (7). Tako dobivamo drugi oblik integralne jednadžbe pseudoadijabatskog procesa:

$$c_{pd} \ln T - R_d \ln(p - e_s) + r_s L_{lv} / T = \text{konst.} \quad (8)$$

Ovaj oblik jednadžbe pogodniji je za praktičnu primjenu i može poslužiti npr. za konstrukciju mokre adijabate.

Vidi adijabata (link http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_a.html#adijabata), adijabatska stopa ohlađivanja (link http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_a.html#adijabatska), termodinamika (link [termodinamika](#)), termodinamički dijagram (link http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_t.html#termo_dijagram), potencijalna temperatura (link http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_p.html#potencijalna_t), ekvivalentna potencijalna temperatura (link http://jadran.gfz.hr/pojmovnik_e.html#ekvivalentna_pot).