

# Termodinamiko/Leciono 6

## Vaporoj

Multaj specoj da maŝinoj uzas la vaporojn, kiel labormaterion. La konoj pri iliaj ecoj estas necesaj por la konstruado de tiaj maŝinoj. Kiel la plej gravaj por la tutmonda ekonomio estas sendube vaporkaldronoj, vaporturbinoj kaj diversa ekipaĵo por la vaporkondensigo.

La realaj gasoj havas iomete aliajn ecojn ol la ideala gaso, sed tamen oni povas por ili uzi la statan ekvacion kun sufiĉa precizeco. Sufiĉas, kiam oni konsideras la influon de la temperaturo al la specifaj varmoj  $c_p$  kaj  $c_v$ .

La ecoj de la reala gaso ju pli malproksimiĝas de la ecoj de la ideala gaso, des pli la stato de la konsiderata gaso alproksimiĝas la kondenspunkton. La gazo estiĝas la vaporo, kies fizikaj ecoj estas multe pli malsimplaj.

## Faza regulo de Gibbs

La sistema ekvilibro estas la stato, dum kiu la sistemo ne ŝanĝiĝas de si mem. Tia sistemo povas konsisti de kelkaj komponentoj. La komponentoj estas kemie puraj materioj, kiuj ne devas esti elementoj. La sistemo povas ankaŭ konsisti nur el unusola komponento. Ĉiu komponento povas havi kelkajn fazojn. Por la unukomponenta sistemo oni konsideras kiel la fazojn:

- 1) La modifojn de la materio, kiuj estas kaŭzitaj per la agregaĵoj (solida, likva kaj gaza),
- 2) kaj por la solida agregaĵo oni plilarĝigas la nombron ankaŭ per la kristaliĝmodifoj.

Por kelkkomponenta sistemo oni konsideras, kiel fazojn ankaŭ la komunajn modifojn (ekzemple solvaĵojn aŭ miksaĵojn). Oni povas la fazon laŭ Gibbs difini jene:

La fazo estas materio fizike kaj kemie homogena, kiun oni povas mekanike separi de aliaj fazoj.

En la jaro 1874 Gibbs dedukis el siaj termodinamikaj konsideroj tre gravan rilaton inter la nombro da komponentoj  $n$ , la nombro da fazoj kaj la nombro da liberecgradoj de iu ajn sistemo en la ekvilibra stato:

(130)

$$f + v = n + 2$$

$f$  – la nombro da fazoj laŭ Gibbs

$n$  – la nombro da komponentoj

$v$  – la nombro da liberecgradoj de la sistemo en la ekvilibra stato

La ekvacio (130) diras, ke la sumo da fazoj kaj liberecgradoj estas pli granda je 2 ol la nombro da komponentoj de la sistemo.

La nombroj da liberecgradoj indikas la nombron da sendependaj stataj grandoj, kiuj difinas laŭ la fiziko la ekvilibrantan staton.

Do, por la nombro da liberecgradoj validas ĉi tiu ekvacio:

(130a)

$$v = n - f + 2$$

Laŭ ĉi tiu ekvacio oni povas deduki por la unukomponenta sistemo, ke

- 1) por unu fazo estas 2 liberecgradoj

( $p$  – premo,  $T$  - temperaturo)

- 2) por du fazoj estas 1 liberecgrado

(premo aŭ temperaturo; unu de ambaŭ estas jam per la alia difinita)

- 3) por tri fazoj ne estas iu liberecgrado, la ekvilibro estas nur dum unu certa premo kaj temperaturo

Oni devas ankaŭ nur mencii, ke el tri fundamentaj stataj grandoj ( $p$  – premo,  $V$  – volumeno,  $T$  – temperaturo) nur du estas sendepende aliigebla kaj la tria rezultas el ili. Por unukomponenta sistemo oni konsideras, kiel la liberecgradojn la premon kaj temperaturon. Por la kelkkomponenta sistemo oni kalkulas ankaŭ kun la koncentrecoj.

## La unukomponenta sistemo

Varmigante kemie puran materion en la unukomponenta sistemo, oni povas aliigi ĝin el la solida en la likvan aŭ finfine en la gasan agregajon.

Kiam oni varmigas la solidan materion sub la konstanta premo, ĝia temperaturo plialtiĝas al la certa grado, kiam la materio komencas aliĝi en la likvaĵon. Ĉi tiu temperaturo estas nomata la degelpunkto. La materio tenas tiel longe la konstantan temperaturon, ĝis kiam oni aldonas al ĝi tiom da varmo, ke ĝi tuta povu aliĝi en la likvaĵon. Nur tiam denove la temperaturo komencos plialtiĝi. Dum la mala procezo, kiam oni la likvaĵon malvarmigas, la temperaturo malaltiĝas ĝis al la rigidiĝpunkto. Ĉi tie ĝi konstantiĝas kaj denove ekmalaltiĝas, ĝis kiam la tuta materio estas rigidiĝinta.

La temperaturo de la degel- kaj rigidiĝpunktoj estas la sama. La varmo, kiun oni devas en ĉi tiu temperaturo aldoni aŭ forpreni por aliigi la agregajon de unu kilogramo da materio, estas nomata la agregaja degelvarmo.

La likva fazo povas ekzisti eĉ dum la temperaturo de kelkaj gradoj sub la degelpunkto, kiam la materio estas kemie pura kaj en mekanika kvieteco kaj kiam ĝi atingas ĉi tiun novan staton post al malvarmigo. Ĉi tiun aĵon oni nomas la submalvarmigo. La degelado kaj la rigidiĝado estas akompanata kun la volumenaliĝo. La volumeno plej parte plilarĝiĝas post la degelo. Sed la akvo kaj kelkaj aliaj materioj mallarĝiĝas sian volumenon post la sama procezo.

La ekvilibro inter la solida kaj likva fazoj de la pura materio ekestas laŭ la regulo de Gibbs dum diversaj premoj.

La regulo havas la sekvan ekvacion:

$$v = n - f + 2$$

Por du fazoj en unukomponenta sistemo estas:  $n = 1$  kaj  $f = 2$

$$v = 1 - 2 + 2$$

$$v = 1$$

En ĉi tiu kazo havas la sistemo nur unu liberecgradon.

Kiam la premo estas libervole elektebla, tiam jam estas la temperaturo difinita, aŭ male.

La temperaturaliĝo de la degelo estas depende de la premo nur tre malgranda, kaj oni ne devas ĝin respekti en la praktiko.

Kiam la likvaĵo estas varmigita dum la konstanta premo, ĝia temperaturo plialtiĝas. Samtempe plialtiĝas ĝia ena energio, entalpio kaj entropio. Ĝia specifa volumeno plilarĝiĝas laŭ la volumena dilateco de likvaĵoj. La volumenplilarĝiĝo estas tre malgranda. Tuj, kiam la likvaĵo atingas la temperaturon de la bolpunkto, ĝi konstantiĝas sur ĉi tiu temperaturo kaj ne aliigas ĝin ĝis la tuta likvaĵo elvaporigiĝas.

Kiam estas du fazoj, la likva kaj gasa, de unukomponenta sistemo en la ekvilibro, la sistemo havas nur unu liberecgradon. Tio signifas, ke al ĉiu premo apartenas unu boltemperaturo por la certa kemie pura materio. La boltemperaturo estas la funkcio de la premo:

(131)

$$T_{bol} = f(p)$$

aŭ la premo estas la funkcio de la temperaturo:

(131a)

$$p = f(T_{bol})$$

Ĉi tiu dependeco estas kutime logaritma. Laŭ Van der Waals ĝi havas ĉi tiun formon:

(132)

$$T_{bol} = \frac{B}{A - \log p}$$

aŭ

(132a)

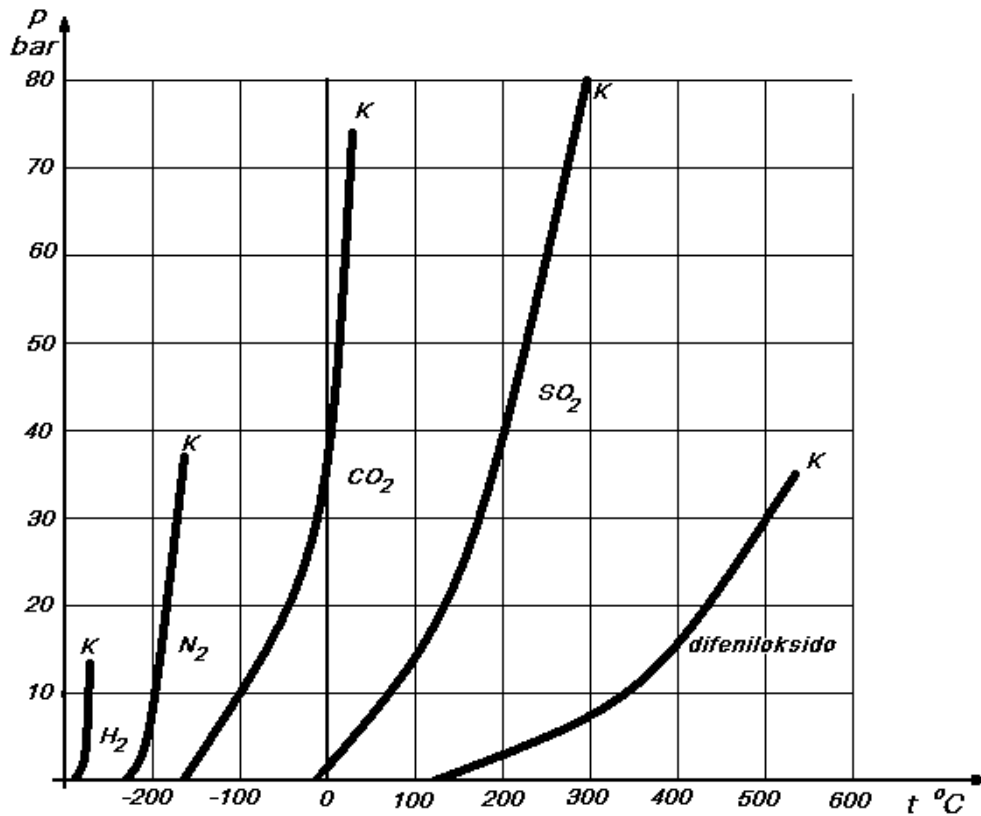
$$\log p = A - \frac{B}{T_{bol}}$$

A kaj B estas konstantoj, kiuj estas eksperimente difinitaj por ĉiu unuopa materio aparte.

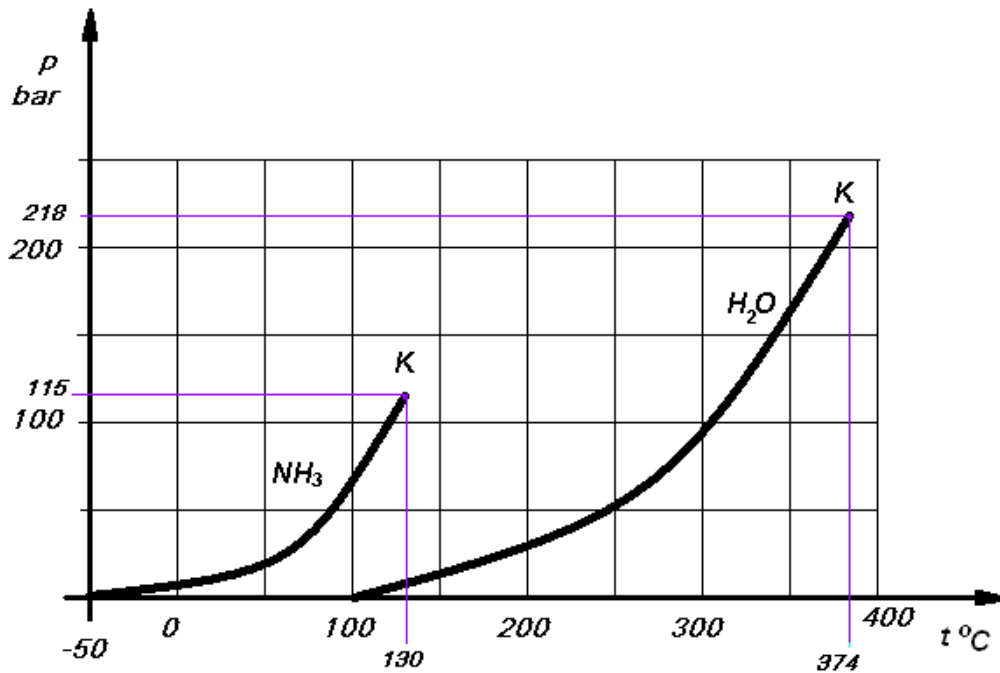
Diagramoj indikantaj la dependecon inter la temperaturo kaj premo dum la bolpunkto de unuopaj materioj estas nomataj diagramoj de la ekvilibra stato. Kurboj desegnatataj por diversaj materioj nomiĝas la bolkurboj.

La areoj kuŝantaj en la diagramo maldekstre de la bolkurboj  $p = f(t)$  apartenas al la materio en la likva stato kaj dekstre de ili al la vaporo.

La diagramo de la ekvilibra stato



La bolkurboj de  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  kaj difenil-oksido



La bolkurbo de  $\text{NH}_3$  kaj  $\text{H}_2\text{O}$

Por la konstruado de la energetikaj maŝinoj estas necesa la detala kono pri fizikaj ecoj de la akvo. La kritika punkto de la akvo kuŝas sur la temperaturo  $374^\circ\text{C}$  kaj la premo 218 bar.

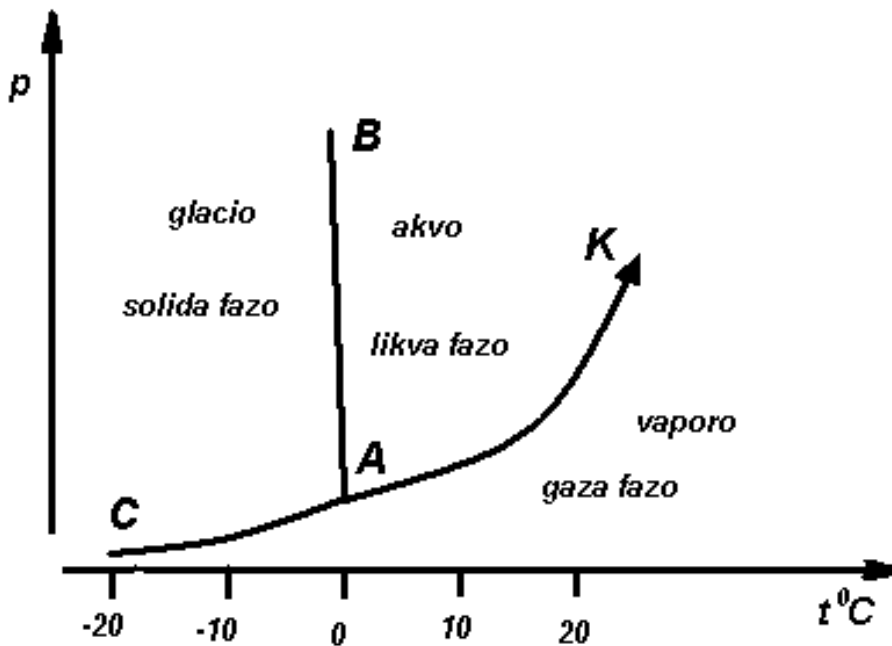
Ĉiu punkto sur la bolkurbo konkretigas unu bolpunkton apartenantan al unu certa premo kaj temperaturo. Kiel la normalan bolpunkton oni konsideras la punkton apartenantan al la temperaturo  $100^\circ\text{C}$  kaj la premo 1,01325 baroj (por la akvo –  $\text{H}_2\text{O}$ ).

La boltemperaturon por iu elektita premo aŭ la bolpremon por iu elektita temperaturo oni povas trovi aŭ en la diagramoj de la ekvilibra stato aŭ en tabletoj. Ĉiu bolkurbo finas en sia kritika punkto K. Dum la temperaturo pli alta ol tiu, kiu apartenas al la kritika punkto, estas ĉiu materio nur en la gasa fazo.

Dum certaj kondiĉoj povas ekesti la ŝanĝiĝo de la solida agregaĵo en la gasan. Ĉi tiu termodinamika procezo nomiĝas sublimo. Kaj la mala procezo estas malsublimo.

Kiam oni desegnas ĉiujn kurbojn – la bolkurbon, degelkurbon kaj sublimkurbon – de unu materio en la diagramo de la ekvilibra stato, ili renkontiĝas en unu punkto, en kiu laŭ la regulo de Gibbs la materio havas neniun liberecgradon kaj ĉiuj tri fazoj ekzistas kune. Ĉi tiu punkto nomiĝas la tripunkto.

La diagramo de la ekvilibra stato por  $\text{H}_2\text{O}$



AK – la bolkurbo

AB – la degelkurbo

AC – la sublimkurbo

La tripunkto de la akvo (H<sub>2</sub>O) kuŝas sur la temperaturo +0,0075 °C kaj la premo ....mbar (4,6 mmHg).

### La stataj grandoj dum la saturita likvaĵo

Kiam oni varmigas la likvaĵon ĝis al la boltemperaturo, oni devas alkonduki la varmon, kiun oni nomas la likvaĵvarmo:

(133)

$$q_t = \int_t^{t_{bol}} c_{p_i} dT$$

$c_{p_i}$  – la specifa varmo dum la konstanta premo por unuopaj likvaĵoj

Kiam oni ekzemple varmigas unu kilogramon da akvo ekde ĝia degelpunkto (0 °C) ĝis al ĝia bolpunkto (100 °C) dum la normala premo (1.01325 bar), la ekvacio (133) havas la sekvan formon:

$$q_t = \int_t^{t_{bol}} c_{p_i} dT$$

$$t_0 = 0$$

$$q_t = [c_{p_i}]_0^{t_{bol}} (t_{bol} - t_0)$$

$$q_t = [c_{p_i}]_0^{t_{bol}} t_{bol}$$

(134)

$$q_t = i'$$

$i'$  – la entalpio de la likvaĵo dum la bolpunkto, J/kg

Post la alkonduko de ĉi tiu varmo oni varmigis unu kilogramon da likvaĵo en ĉi tiu stato estas nomata la saturita likvaĵo.

La entalpio de la saturita likvaĵo egalas al la likvaĵvarmo, kiu estis alkondukita dum la konstanta premo.

La plialtigo de la ena energio dum la varmigado de la likvaĵo (ekzemple de la akvo) egalas:

(135)

$$\Delta u = q_t - p(v' - v_0)$$

$v'$  – la specifa volumeno de la likvaĵo en la bolpunkto, m<sup>3</sup>/kg

$v_0$  – la specifa volumeno de la likvaĵo en la degelpunkto, m<sup>3</sup>/kg

La volumena laboro  $p(v'-v_0)$  realigita dum la volumenaliigo de la likvaĵo estas ĝis al la premo 40 bar neglektebla.

Tial oni povas skribi la sekvajn ekvaciojn:

$$\Delta u = u' - u_0 = q_t$$

$$u_0 = 0$$

(135a)

$$u' = q_t$$

(136)

$$u' = i'$$

$u'$  – la ena energio de la likvaĵo en la bolpunkto, J/kg

$u_0$  – la ena energio de la likvaĵo en la degelpunkto (por la akvo 0 °C, 1 bar), J/kg

La ena energio de la suturita likvaĵo  $u'$  egalas proksimume al la likvaĵvarmo kaj al la entalpio.

La ŝanĝiĝo de la entropio de la akvo ekde 0 °C al la boltemperaturo oni povas difini el ĉi tiu ekvacio

$$ds = \frac{dq_t}{T}$$

Post la integrado estas:

(137)

$$\Delta s = s' - s_0 = \int_{T_0}^{T_{bol}} \frac{dq_t}{T} = [c_{pl}]_{273}^{T_{bol}} \ln \frac{T_{bol}}{273}$$

Por la akvo estas  $c_{pi} \approx 4186.8$  J/kg•deg. Post la anstataŭigo en la ekvacio (137), dum la normala premo, la ekvacio havas la sekvan formon:

$$s_0 = 0$$

$$s' = 4186,8 \ln \frac{273}{273}$$

$s'$  – la entropio de la likvaĵo en la bolpunkto, J/kg

$s_0$  – la entropio de la likvaĵo en la degelpunkto, J/kg

La plua alkonduko da varmo al la saturita likvaĵo kaŭzas la boladon de la likvaĵo kaj tio estas la ŝanĝiĝo de la agregaĵo.

La mala procezo al la bolado kaj elvaporigo estas la kondensado. Tio estas la ŝanĝiĝo de la vaporo – la gasa fazo de materio – en la likvan agregaĵon.

La bolado estas la procezo, en kiu formiĝas vaporo el likvaĵo dum la temperaturo, kiam la premo de la vaporo egalas al la ekstera premo.

Kompare al tio estas la elvaporigo izobara kaj samtempe izoterma procezo, dum kiu okazas la ŝanĝiĝo de la likva fazo en la vaporon laŭvice dum la temperaturo, kiam la premo de la vaporo estas pli malgranda ol la ekstera premo.

Dum la elvaporado aŭ la bolado la aldonita varmo el la likvaĵo estas konsumata por la volumena laboro kaj por la plialtigo de la ena potenciala energio. Ĉi tiu aliigo de la ena energio estas kaŭzata pro la energibezono de la plimalproksimiĝo de molekuloj influantaj unuj la aliajn per koheraj fortoj.

La multo da varmo, kiu estas necesa por la elvaporado de unu kilogramo da saturita vaporo dum la konstanta premo estas nomata la elvaporiga varmo kaj oni signas ĝin  $l_v$ . Ĝia valoro estas dependa de la premo, dum kiu la

elvaporigado okazas. Kun la plialtiĝanta premo (kaj memkompreneble ankaŭ la temperaturo) la valoro de la elvaporiga varmo plimalaltiĝas.

Dum la elvaporigo formiĝas super la likvaĵo la saturita vaporo, kiu estas kun ĝi en la termodinamika ekvilibra stato.

La miksaĵo de la vaporo kaj la saturita likvaĵo de la sama temperaturo estas nomata malseka vaporo. Dum la elvaporigo la saturita likvaĵo malplimultiĝas kaj la saturita vaporo plimultiĝas, la temperaturo kaj la premo dum ĉi tiu procezo restas konstanta. Post la elvaporigo estas en la tuta volumeno de la ujo la saturita vaporo havanta la temperaturon de la bolpunkta. La specifa volumeno de la materio pligrandiĝas al la valoro  $v''$ . Tiamaniere oni signas la specifan volumenon de la saturita vaporo.

## La stataj grandoj de la saturita vaporo

### La entalpio de la saturita vaporo $i''$

La entalpio de la saturita vaporo egalas al la alkondukita varmo dum konstanta premo kiam oni varmigas la akvon ekde  $0\text{ }^\circ\text{C}$  ĝis la dezirata stato. Dum la elvaporigado la temperaturo de la malseka vaporo restas konstanta kaj tial oni ne povas difini la entalpion el la ekvacio  $di = c_p \cdot dT$ , sed nur kiel la sumon de la alkondukitaj varmoj. Por la produktado de unu kilogramo da saturita vaporo oni bezonas alkonduki dum la konstanta premo la likvaĵvarmon  $q_l$ , kaj la elvaporigvarmon  $l_v$ .

La entalpio de la saturita vaporo estas:

(138)

$$i'' = q_l + l_v$$

$$q_l = i'$$

(139)

$$i'' = i' + l_v$$

Do la entalpio de la saturita vaporo egalas al la sumo de la alkondukita likvaĵa varmo de saturita likvaĵo kaj de la elvaporiga varmo dum la sama kaj konstanta premo.

Por la elvaporiga varmo kompreneble ankaŭ validas:

(139a)

$$l_v = i'' - i'$$

La elvaporiga varmo egalas al la diferenco inter la entalpio de la saturita vaporo kaj la entalpio de la saturita likvaĵo.

### La ena energio de la saturita vaporo $u''$

Per la simila maniero, kiel la entalpion de la saturita vaporo, oni povas ankaŭ esprimi la enan energion el la entute alkondukita varmo kaj la volumena laboro:

Estas utile, se oni antaŭe mencias, ke la volumena laboro estas la sumo de la volumena laboro realigita dum la varmigado de la likvaĵo, kaj poste dum la elvaporigado:

[105]

Helpaj ekvacioj:

$$u_0 = 0$$

$$p(v'' - v_0) = p(v' - v_0) + p(v'' - v')$$

$$u' = q_l - p(v' - v_0)$$

$$u' = i'$$

Ekvacioj de la ena energio:

$$u'' - u_0 = q_l + l_v - p(v'' - v_0)$$

$$u'' = q_l + l_v - p(v' - v_0) - p(v'' - v')$$

(140)

$$u'' = u' + l_v - p(v'' - v')$$

$$u'' = i' + l_v - p(v'' - v')$$

(141)

$$u'' = i'' - pv''$$

El la ekvacio (140) rezultas por la elvaporiga varmo ĉi tio:

$$\rho = u'' + u'$$

$$\psi = p(v'' - v')$$

$$l_v = u'' - u' + p(v'' - v')$$

(142)

$$l_v = \rho + \psi$$

$\rho$  – estas la ena elvaporiga varmo necesa por plialtigi la enan energion dum la elvaporigado

$\psi$  – estas la ekstera elvaporiga varmo necesa por realigi la volumenan laboron dum la elvaporigado konsistanta el la ŝanĝiĝo de la likvaĵvolumeno  $v'$  kaj la vaporvolumeno  $v''$  dum la konstanta premo ( $p = \text{kons}$ ).

La sumo de la elvaporigvarmo kaj likvaĵvarmo formas la entutan varmon de la saturita vaporo.

### La entropio de la saturita vaporo $s''$

La entropion de la saturita vaporo  $s''$  oni povas facile esprimi per desegno en la diagramo T-s. Por la elvaporiga varmo validas ĉi tiu ekvacio:

$$l_v = T_{bol}(s'' - s') + \psi$$

(143)

kaj oni povas dedukti el ĝi:

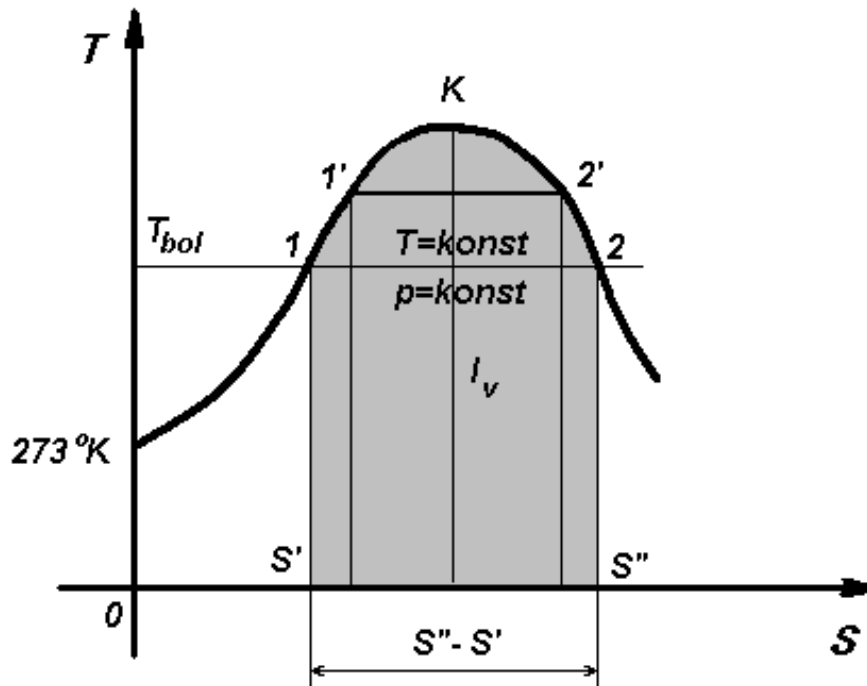
$$\Delta s = s'' - s'$$

$$s'' - s' = \frac{l_v}{T_{bol}}$$

(144)

$$s'' = \frac{l_v}{T_{bol}} + s'$$





Dum la plialtigado de la premo la diferenco  $s'' - s'$  malpligrandiĝas. Dum la kritika premo (kaj kompreneble ankaŭ dum la krita temperaturo kaj la krita specifa volumeno) ĝi egalas al nulo, same kiel la elvaporiga varmo en ĉi tiu punkto.

La valoroj  $s''$ ,  $u''$ ,  $i''$  kaj  $v''$  same kiel  $i_v$ ,  $\rho$ ,  $\psi$  estas konsistigitaj en tabeletoj laŭ la dependeco de la elvaporiga premo aŭ boltemperaturo.

### La stataj grandoj de la supervarmigita vaporo

#### La plua varmigo de la saturita vaporo

La plua varmigado de la saturita vaporo plialtigas la temperaturon de la vaporo. Ĉi tiu procezo estas nomata la supervarmigado de vaporo. La supervarmigan varmon oni esprimas per la simila ekvacio kiel por la ideala gaso:

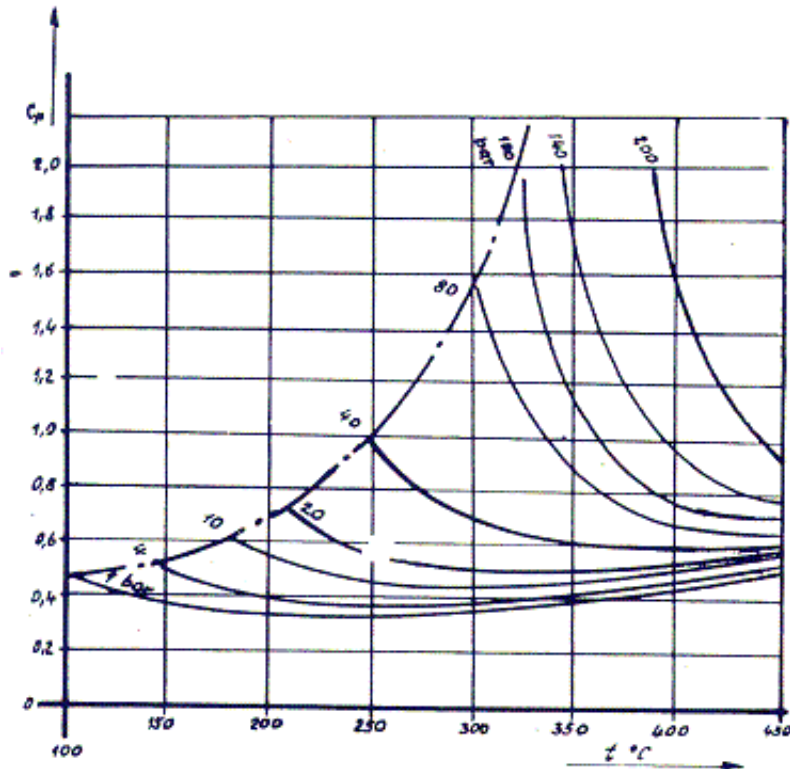
$$q_{sup} = \int_{T_{bol}}^{T_{sup}} c_p dT = \int_{T_{bol}}^{T_{sup}} di$$

$$q_{sup} = i_{sup} - i'' [c_p] T_{bol}^{T_{sup}} (T_{sup} - T_{bol})$$

(145)

$$q_{sup} = [c_p] T_{bol}^{T_{sup}} (T_{sup} - T_{bol})$$

La specifa varmo de la supervarmigita vaporo dependas de ĝia premo kaj de ĝia temperaturo. Ĉi tiu dependeco estas desegnita en la diagramo t-c<sub>p</sub> laŭ Stodola.



La specifa varmo ŝanĝiĝas precipe dum pli altaj premoj proksimaj al la saturo. Dum malaltaj premoj ĝi estas preskaŭ konstanta.

Kaj tial oni preferas determini la supervarmigan varmon el la diagramo laŭ la diferenco de entalpioj:

$$q_{sup} = i_{sup} - i''$$

### La entalpio de la supervarmigita vaporo – $i_{sup}$

La entalpio de la supervarmigita vaporo estas:

$$i_{sup} = i'' + q_{sup} = i'' + \int_{T_{bol}}^{T_{sup}} c_p dT$$

(146)

$$i_{sup} = i'' + [c_p]_{T_{bol}}^{T_{sup}} (t_{sup} - t_{bol})$$

### La ena energio de la supervarmigita vaporo – $u_{sup}$

Por la ena energio de la supervarmigita vaporo validas la sekvaj ekvacioj:

$$\Delta u = u_{sup} - u'' = \int_{T_{bol}}^{T_{sup}} c_v dT = [c_v]_{T_{bol}}^{T_{sup}} (t_{sup} - t_{bol})$$

$$u_{sup} = u'' = \int_{T_{bol}}^{T_{sup}} c_v dT$$

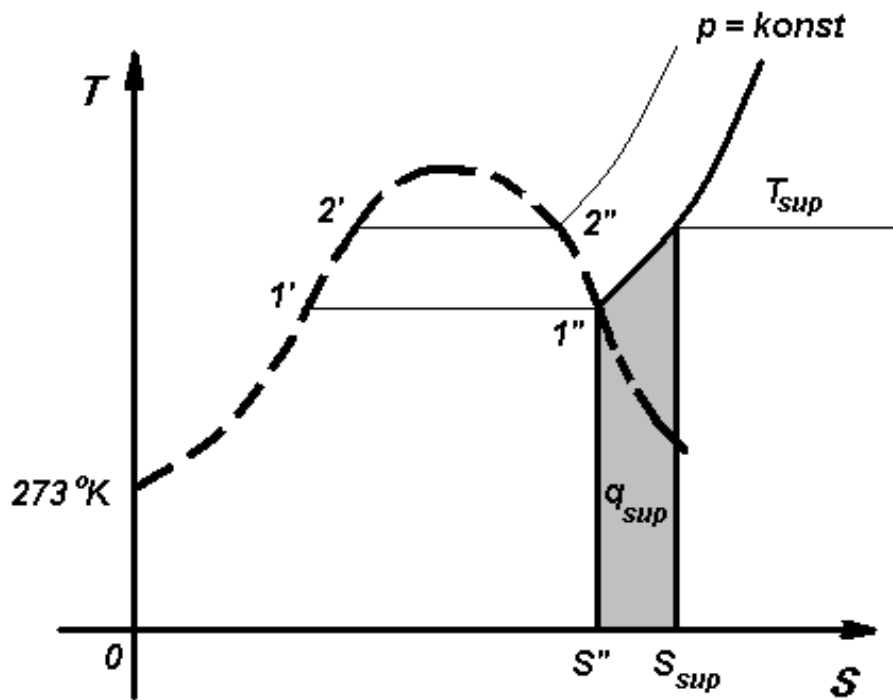
(147)

$$u_{sup} = u'' + [c_v]_{T_{bol}}^{T_{sup}} (t_{sup} - t_{bol})$$

**La entropio de la supervarmigita vaporo –  $s_{sup}$**

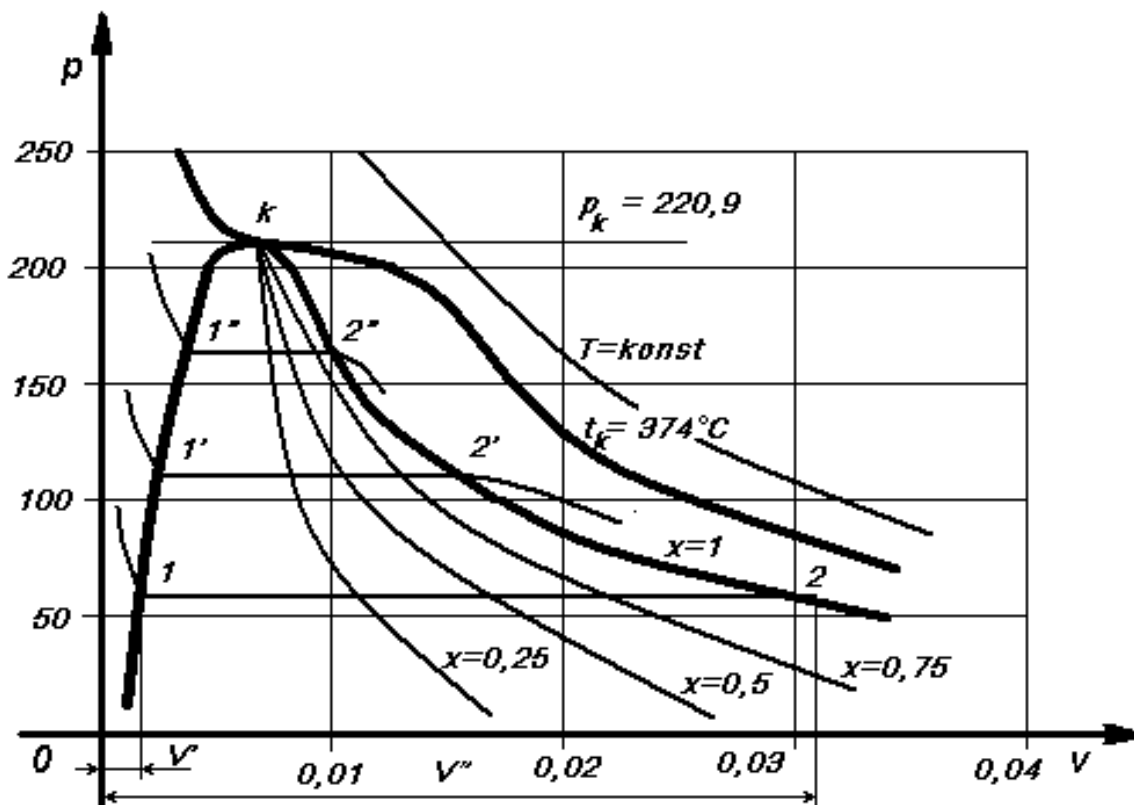
La celdirakto de la izobaro dum la aldonado de la supervarmiga varmo al la vaporo estas difinita en la T–s diagramo per la sekvaj ekvacioj:

$$\begin{aligned}
 ds &= \frac{dq_{sup}}{T} \\
 ds &= \frac{c_p dT}{T} \\
 \Delta s &= s_{sup} - s'' = \int_{T_{bol}}^{T_{sup}} c_p \frac{dT}{T} = [c_p]_{T_{bol}}^{T_{sup}} \ln \frac{T_{sup}}{T_{bol}} \\
 s_{sup} &= s'' + \int_{T_{bol}}^{T_{sup}} c_p \frac{dT}{T} \\
 (148) \quad s_{sup} &= s'' + [c_p]_{T_{bol}}^{T_{sup}} \ln \frac{T_{sup}}{T_{bol}}
 \end{aligned}$$



La izobaro en la regiono de la supervarmigita vaporo estas proksimume logaritma kurbo. La specifan volumenon de la supervarmigita vaporo oni difinas el ĝia stata ekvacio

La diagramo p–v por la akva vaporo



La p–v diagramo de la akva vaporo grafike resumas ĉiujn dependecojn de la fundamentaj stataj grandoj kaj de la grandoj dedukitaj laŭ ili. La areo de la diagramo estas dividita per la limkurbo en tri partojn:

- 1) la regiono de la likvaĵo
- 2) la regiono de la supervarmigita vapor
- 3) la regiono de la malseka vaporo

La limkurbo konsistas el du branĉoj:

- a) la suba limkurbo, kiu prezentas la geometrian lokon de punktoj korelativaj al la unuopaj statoj de la saturita likvaĵo.
- b) la supra limkurbo, kiu prezentas la geometrian lokon de punktoj korelativaj al la unuopaj statoj de la saturita vaporo.

Ambaŭ branĉoj unuiĝas en la kritika punkto. Maldekstre de la suba limkurbo estas la regiono de la likvaĵo. Dekstre de la supra limkurbo situas la regiono de la supervarmigita vapor, kaj inter ambaŭ branĉoj de la limkurbo estas la malseka vaporo. El al diagramo estas bone videbla, ke dum la pli alta premo estas la elvaporiga temperaturo ankaŭ pli alta. Dum la elvaporigado kreskas rapidege la specifa volumeno de la specifaj volumenoj estas dum la premoj, kiuj alproksimiĝas al la kritika premo (por la akva vaporo ĝi havas la valoron 221,29 bar). Dum la kritika premo egalas la diferenco inter la specifa volumeno de la saturita likvaĵo  $v'$  kaj la specifa volumeno de la saturita vaporo  $v''$  al la nulo. La likvaĵo de ĉi tiu punkto transformiĝas en la saturitan vaporon kaj tuj en la supervarmigitan senpere – sen laŭvica elvaporigado. Similaj diagramoj, kiel havas la akva vaporo, memkompreneble estas ankaŭ por aliaj materioj. Sed tamen oni devas mencii, ke por la teknika praktiko precipe en la energetika fako havas la plej grandan signifon la akvo kaj ĝia vaporo, ĉar ĝi estas la plej ofte uzata labormaterio.

## La malseka vaporo

La malseka vaporo konsistas el du fazoj de unu materio – el la likva kaj el la gasa. Ambaŭ fazoj formas miksaĵon. La stataj grandoj de ĉi tiu miksaĵo estas prezentitaj per la sumo de ĉi tiuj grandoj apartenantaj al ambaŭ fazoj. Dum la elvaporigado de la likvaĵo okazanta inter la suba kaj supera limkurboj povas ekesti senfine multe da diversaj miksaĵoj de la likvaĵo – vaporo laŭ la progreso de la elvaporigado aŭ kondensado. Por precize difini la staton de la malseka vaporo necesas enkonduki la pluan grandon, kiu estas la relativa sekeco de la vaporo  $x$ . La relativa sekeco de la vaporo estas la proporcio de la maso de saturita vaporo al la tuta maso de malseka vaporo:

(149)

$$x = \frac{m''}{m'' + m'}$$

$m''$  – la maso de la saturita vaporo, kg

$m'$  – la maso de la saturita likvaĵo, kg

$m'' + m'$  – la maso de la malseka vaporo, kg

En la diagramoj oni elektas por la sumo  $m'' + m'$  la valoron de unu kilogramo.

Sur la suba limkurbo estas  $m'' = 0$  kaj tial estas  $x = 0$ .

Sur la supera limkurbo estas  $m' = 0$  kaj tial estas  $x = 1$ .

La relativa sekeco de la vaporo povas havi la valoron ekde 0 ĝis 1. Kiam oni multobligas la valoron  $x$  per 100, tiam oni ricevas la procentan parton de la elvaporiginta materio. Kiam oni prenas la relativan sekecon de la vaporo en rilato al unu kilogramo da malseka vaporo, tiam  $x$  prezentas la mason de la saturita vaporo en la miksaĵo indikitan en kg ( $x \leq 1$ ).

La malsekeco de la vaporo estas esprimita per ĉi tiu ekvacio:

(150)

$$y = 1 - x$$

Dividinte la izobarajn abscisojn (kiuj estas identaj kun izotermaj abscisoj) en la regiono de la malseka vaporo je 10 partoj kaj kuniginte la punkto de korelativaj partoj oni ricevas kurbojn de konstanta proporcio de la vaporo –  $x = \text{konst}$ .

Helpe de relativa sekeco de la malseka vaporo oni povas difini unuopajn statajn grandojn de la malseka vaporo kiel la sumajn valorojn de ambaŭ fazojn.

## La specifa volumeno de la malseka vaporo

La specifa volumeno de la malseka vaporo egalas la la volumensumo de la saturita likvaĵo havanta la mason rilatantan al  $(1-x)$  kaj de la saturita vaporo kun la maso rilatanta al  $x$ .

$$v = (1 - x)v' + xv''$$

(151)

$$v = v' + x(v'' - v')$$

**La ena energio de la malseka vaporo**

La ena energio de la malseka vaporo egalas al la sumo de enaj energioj de ambaŭ fazoj

$$u = (1 - x)u' + xu''$$

(152)

$$u = u' + x(u'' - u')$$

$$u = u' + x\rho$$

$\rho = u'' - u'$  la ena elvaporiga varmo

**La entalpio de la malseka vaporo**

La entalpio de la malseka vaporo egalas al la varmo de entalpioj de ambaŭ fazoj.

$$i = (1 - x)i' + xi''$$

$$i = i' + x(i'' - i')$$

$lv = i'' - i'$  la elvaporiga varmo

**La entropio de la malseka vaporo**

La entropio de la malseka vaporo estas ankaŭ la sumo de entropioj de ambaŭ fazoj.

$$s = (1 - x)s' + xs''$$

$$s = s' + x(s'' - s')$$

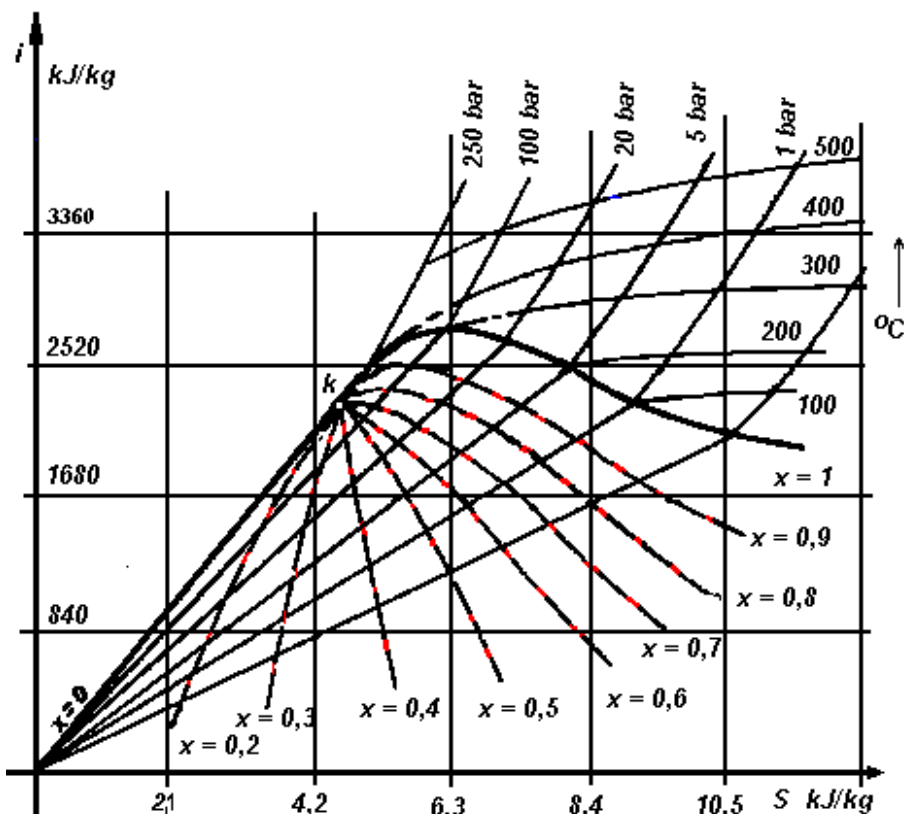
(154)

$$s = s' + x\frac{l_v}{T}$$

**i-s diagramo de la akva vaporo**

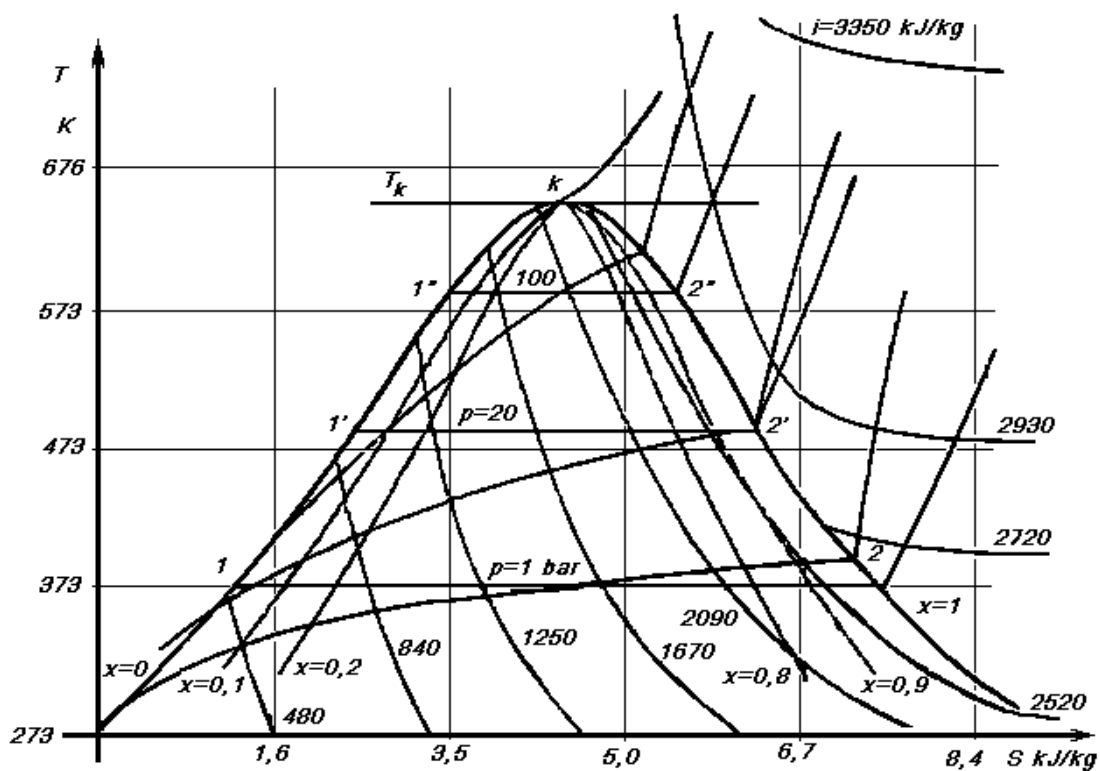
La i-s diagramo de la akva vaporo estas same kiel p-v diagramo dividita per du branĉoj de la limkurbo en la regionojn de la likvaĵo, supervarmigita vaporo kaj malseka vaporo. Sur la suba limkurbo  $x = 0$  estas la saturita likvaĵo – en ĉi tiu kazo la akvo. Sur la supera limkurbo estas saturita likvaĵo – en ĉi tiu kazo la akvo. Sur la supera limkurbo estas saturita vaporo.

Ĉi tiu diagramo havas sendubajn avantaĝojn por teknikaj kalkuloj, ĉar oni povas difini la valorojn de la likvaĵa, elvaporiga, supervarmiga kaj kondensa varmoj el la diferenco de entalpioj.



La izobaraj en la regiono de la malseka vaporo estas rektaj abscisoj. Oni uzas  $i - s$  diagramojn de la akva vaporo detale prilaboritajn por teknikaj kalkuloj de vaporturbinoj.

**T s diagramo de la akva vaporo**



T-s diagramo de la akva vaporo estas same kiel la p-v diagramo kaj i-s diagramo dividita per du branĉoj de la limkurbo en la regionojn de la likvaĵo, supervarmigita vaporo kaj malseka vaporo. Sur la suba limkurbo  $x = 0$  estas la saturita likvaĵo. Sur la supra limkurbo  $x = 1$  estas la saturita vaporo. La izobaroj en la regiono de la malseka vaporo estas identaj kun la izotermoj.

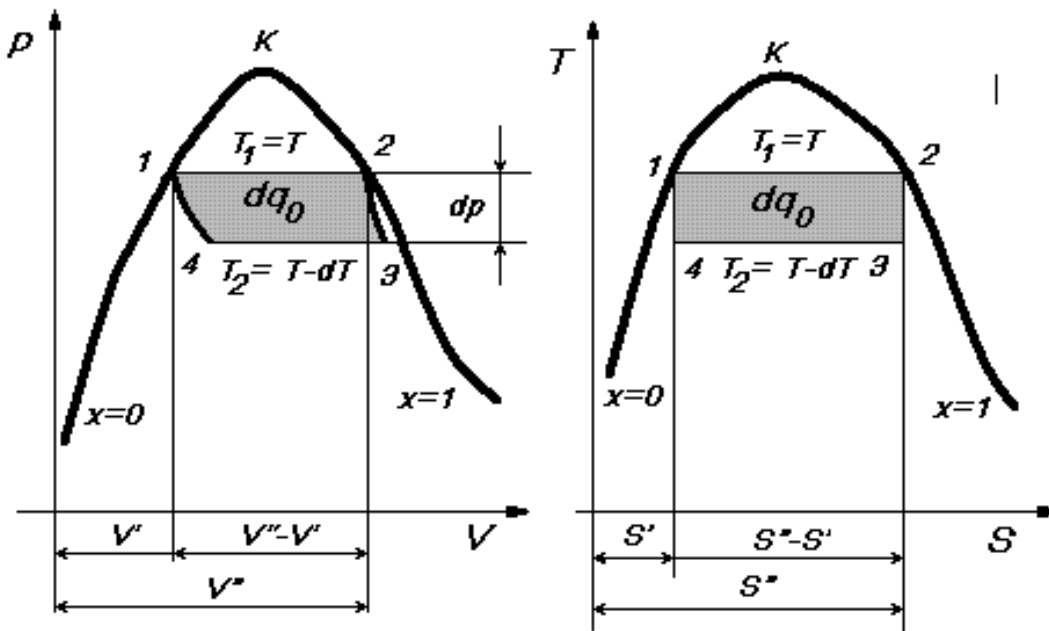
T-s diagramo donas tre bonan supervidon pri la eluzo de la varmo por la laboro, ĝi ankaŭ montras la diferencon inter iu reala ciklo kaj la ciklo de Carnot laŭ servas al vaporigo de la tuta varmbilanco. La areoj de ĉi tiu diagramo grafike prezentas unuopajn varmmultojn uzitajn en la varmcikloj.

Por la teknikaj kalkuloj oni uzas detale prilaboratajn diagramojn kun sufiĉe grandaj dimensiojn, por ke oni povu konservi la necesan pecizecon.

### La ekvacio de Clausius kaj Clapeyron

La ekvacio de Clausius kaj Clapeyron difinas la dependecajn rilatojn inter la elvaporiga varmo  $l_v$  la boltemperaturo  $T$ , la aliiĝo de la specifa volumeno  $v$  dum la elvaporigado kaj de la ono  $dp/dT$ . Oni povas ĝin uzi analoge ankaŭ por ĉiu ŝanĝiĝo de la agregaĵa fazo tio signifas, ke ne nur por la elvaporigo, sed ankaŭ por degelado kaj sublimado.

Oni povas deduki ĝin el la ciklo de Carnot realigita en la regiono de la malseka vaporo.



La ciklo de Carnot estas designita en p - v diagramo kaj en T - s diagramo. La procezoj de la ciklo estas:

- 1-2 la izoterma ekspansio  $q_1 = l_v$  la alkondukita varmo
- 2-3 la adiabata ekspansio  $d_q = 0$
- 3-4 la izoterma kunpremo
- 4-1 la adiabata kuntermo  $d_q = 0$

La efikeco de la ciklo estas:

$$T_1 = T$$

$$T_2 = T - dT$$

$$q_1 = l_v$$



$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{T - (T - dT)}{T} = \frac{dT}{T}$$

(156)

$$\eta_t = \frac{da_0}{q_1} = \frac{da_0}{l_v}$$

Post la unuigo de ambaŭ ekvacioj (155, 156) estas:

$$da_0 = (v'' - v')dp$$

$$\frac{da_0}{l_v} = \frac{dT}{T}$$

$$\frac{(v'' - v')dp}{l_v} = \frac{dT}{T}$$

(157)

$$l_v = T(v'' - v') \frac{dp}{dT}$$

La ekvacion de Clausius kaj Clapeyron oni povas uzi ankaŭ por la degelado de la solida fazo:

(158)

$$l_v = T(v' - v'') \frac{dp}{dT}$$

Analogie validas ĉi tiu ekvacio por la sublimado:

(159)

$$l_{sup} = T(v'' - v') \frac{dp}{dT}$$

Inter la agregaĵaj varmoj validas la sekva rilato:

(160)

$$l_{sup} = l_d + l_v$$

 $l_v$  – la elvaporiga varmo, J/kg $l_d$  – la degelvarmo, kJ/kg $l_{sub}$  – la sublima varmo, kJ/kg $l_v, l_d, l_{sub}$  – la agregaĵaj varmoj $da_0$  – la elementa laboro de la ciklo, J/kg $T$  – la elvaporiga temperaturo, °K $p$  – la elvaporiga premo, N/m<sup>2</sup> $v'$  – la specifa volumeno de la saturita likvaĵo, m<sup>3</sup>/kg $v''$  – la specifa volumeno de la saturita vaporo, m<sup>3</sup>/kg $v'''$  – la specifa volumeno de la solida fazo de materio, m<sup>3</sup>/kg

## La tria termodinamika teoremo

### La ekvacio de Gibbs kaj Helmholtz

La ekvacio de Gibbs kaj Helmholtz estas pli ĝeneraliga ol la ekvacio de Clapeyron. Ĝi havas signifon por termokemio kaj elektrokemio. Por ĝia dedukto oni uzas la ekvacion de la liberigebla energio:

(161)

$$F = U - TS$$

U – la ena energio

T – la absoluta temperaturo

S – la entropio

F – la liberigebla energio

La liberigebla energio F estas tiu parto de la energio kiun oni povas ŝanĝi dum la konstanta temperaturo en laboron.

La malpliigo de la liberigebla energio dum la izoterma inversa procezo estas:

(162)

$$\begin{aligned} -(\Delta F)_T &= \Delta A \\ -(\Delta F)_T &= T\Delta S - \Delta U = p\Delta V \end{aligned}$$

Ĝi prezentas la maksimumon de la gajnita laboro. Dum la neinversa procezo oni devas kontentiĝi nur kun malpli da gajnita laboro. Kiam oni elektas kiel sendepende ŝanĝigeblajn statajn grandojn la volumenon V kaj la temperaturon T, tiam oni ricevas la totalan diferencialon de la liberigebla energio. Oni devas konscii, ke sendepende ŝanĝigeblaj povas esti nur du el tri stataj grandaj. Por la totoala diferencialo validas la sekvaj ekvacioj:

$$TdS - dV = pdV$$

$$\begin{aligned} dF &= \left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T dV + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V dT \\ dF &= dV - TdS - SdT \\ dF &= -pdV - SdT \end{aligned}$$

(163)

$$\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T dV + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V dT = -pdV - SdT$$

Ĉi tiu rilato (163) validas, kiam estas:

(164)

$$p = -\left(\frac{\partial F}{\partial V}\right)_T$$

(165)

$$S = -\left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V$$

Kiam oni anstataŭas la esprimon (161) de la liberigebla energio oni ricevas la ekvacion de Gibbs kaj Helmholtz:

(166)

$$F = U + \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_V$$

Ĉar la liberigebla energio  $F$  estas tiu parto de la energio, kiun oni povas dum la konstanta temperaturo ŝanĝi en la laboron, oni povas esprimi la ekvacion de Gibbs kaj Helmholtz ankaŭ jene:

(167)

$$A - U' = T \left( \frac{\partial F}{\partial T} \right)_v$$

$U' = U_1 - U_2$  la diferenco de la enaj energioj

$A = F_1 - F_2$  la laboro, kiu ekestas el la diferenco de du statoj apartenantaj al la liberigebla energio

La laboro  $A$ , kiu estas eldonita eksteren estas kompensita parte per la malpliigo  $U'$  de la ena energio kaj parte per la malpliigo  $U'$  de la ena energio kaj parte per la varmo de la ĉirkaŭjo  $Q$ .

Por tio validas:

(168)

$$Q = A - U'$$

$Q$  – la varmo aldonita el la ĉirkaŭajo

La formon (167) de la ekvacio de Gibbs kaj Helmholtz oni uzas en la termokemio. La kemiaj reakcioj dum la konstanta temperaturo procesas de si mem nur tiam, kiam la liberigebla energio  $F$  malaltiĝas. Samtempe dum ĉi tiu reakcio estas la laboro eldonita. Sed kiam la liberigebla energio plialtiĝas, tiam oni devas la laboron aldoni.

La diferenco  $F_1 - F_2 = A$  apartenanta al unu grammolekulo estas konsideranta kiel la mezurilo de la kemia afineco. La kemia ekvilibro ekestas, kiam validas  $A = 0$ .

La diferenco de la enaj energioj  $U' = U_1 - U_2$  estas la reakcia varmo kaj estas alskribita al la kemiaj ekvacioj. Por ni estas tre interesa kaj grava, ke la kemia afineco ne dependas de la reakcia varmo, nek de ĝia absoluta temperaturo, nek de ĝia pozitiveco aŭ negativeco, sed nur de la liberigebla energio. La valoro  $A$  kaj  $U'$  ne diferencas tro unu de la alia. La diferenco inter ili ankoraŭ malpligrandiĝas kun la malaltiĝanta temperaturo. **Nernst** konsistis, ke ili egalas jam en la proksimeco de la absolute nula temperaturo. Laŭ la ekvacio de Gibbs kaj Helmholtz estus ĉi tiu stato okazenda ĝis dum la temperaturo  $T = 0$  °C. Laŭ ĉi tio rezultas, ke laŭ la ekvacio de Gibbs kaj Helmholtz por la temperaturo  $T$  tre proksima al la absolute nula temperaturo sed ankoraŭ limigite de ĝi diferencanta, devas validi:

(169)

$$\left( \frac{\partial A}{\partial T} \right)_v = 0$$

kaj ankaŭ

(170)

$$\left( \frac{\partial U'}{\partial T} \right)_v = 0$$

La rezulto de ĉi tiuj ambaŭ ekvacioj estas nomata la teoremo de Nernst. Ĝi eksplikas, ke en la grafika bildigo de la maksimuma laboro  $A$  kaj de la reakcia varmo  $U'$  kiel la funkcio de la absoluta temperaturo  $T$  havas la komunan tangenton. La tangento estas horizontala, kiam la absoluta temperaturo estas horizontala, kiam la absoluta temperaturo estas registrata sur la akso  $y$ . Nernst ĝeneraligis sian ekkonon ankaŭ por la liberigeblan energion  $F$  kaj por la ena energio  $U$ . Oni devas mencii, ke  $A$  kaj  $U'$  estas nur malpliigoj de ĉi tiuj grandoj. Pro tio por la temperaturoj proksimaj al la absolute nula temperaturo validas ankaŭ:

(171)

$$\left( \frac{\partial F}{\partial T} \right)_v = 0$$

(172)

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v = 0$$

kaj pro tio eĉ la entropio laŭ la ekvacio (165) estas en ĉi tiu regiono:

(173)

$$S = \left(\frac{\partial F}{\partial T}\right)_v = 0$$

Ĉi tiu ekvacio havas la sekvan signifon:

Laŭ la dua termodinamika teoremo oni povas difini nur la diferencon de la entropio, sed ĝia absoluta valoro restas laŭ ĝi ne determinebla. Laŭ la teoremo de Nernst havas la entropio de solidaj kaj likvaj materioj dum la absolute nulan valoron. Tiel estas por la entropio fiksita la valoro de unu stato kaj oni povas laŭ ĝi elkalkuli. Ĉiujn aliajn entropiajn valorojn apartenataj al ceteraj statoj.

Laŭ ĉi tiuj ekvacioj ankaŭ rezultas, ke la specifa varmo de ĉiuj solidaj kaj likvaj materioj en la ĉirkaŭaĵo de la nulan valoron kaj Nernst tion per siaj mazuradoj atestis. Oni pruvis, ke ankaŭ aliaj ecoj de la materioj en la ĉirkaŭaĵo de la absolute nula temperaturo ekhavas valorojn tute nedependentaj de la temperaturo. La temperatura dilateco malaperas kaj pro tio la volumeno de solidaj kaj likvaj materioj ne dependas de la temperaturo. La elektra rezistanco de metaloj ekhavas la nulan valoron, kaj ekestas ilia kondukega stato.

Se la ecoj de materioj en la ĉirkaŭaĵo de la absolute nula temperaturo ne dependas de la temperaturo, tiel oni ne havas ankaŭ la eblecon per la ekstera influado, plue plimalaltigi ilian temperaturon. Kaj tiel oni alvenas al ekkono pri la neatingebleco de la absolute nula temperaturo. Kun ĉi tio akordiĝas la realeco, ke dum la alproksimiĝado al la temperatura absoluta nulo senmezure kreskas eksperimentaj malfacilaĵoj por la plua temperatura malaltigado. Laŭ Planck oni konsideras ĉi tiun ekkonon kiel la trian termodinamikan teoremon, kiu estas difinita jene:

Oni povas per neniu limigita procezo malvarmigi puran solidan materion ĝis kiel la ĝeneraligon de la teoremo de *Nernst*.

## La fundamentaj procezoj en la regiono de la malseka akvo vaporo

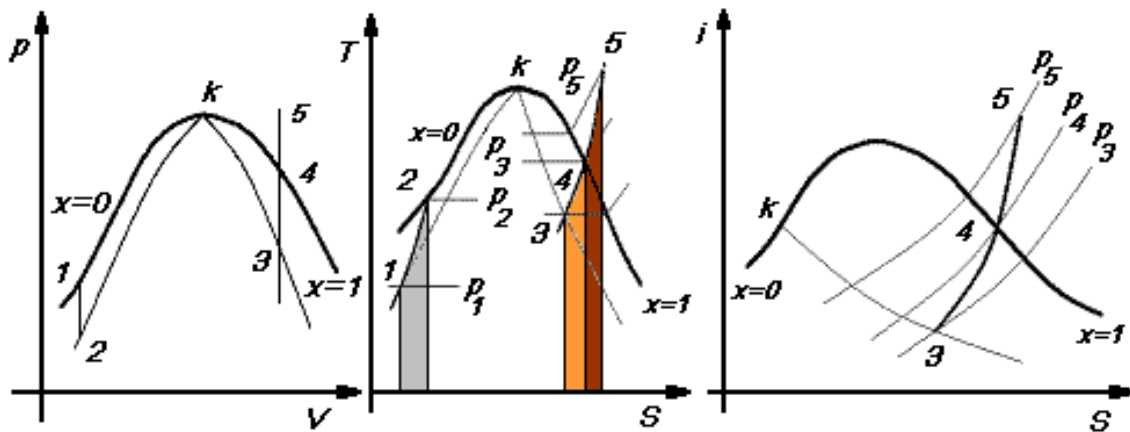
Por la teknika kalkulado de la varmmaŝinoj uzantaj la vaporon kiel labormaterion necesas koni la statajn grandojn, proporciajn sekecon kaj specifan mason. Ĉi tiujn valorojn oni povas trovi en tabuletoj aŭ el fundamentaj tabuligitaj valoroj elkalkuli. Ĉiu labormaterio havas memkompreneble siajn proprajn tabuletojn. Por energertikaj maŝinoj kaj ekipaĵoj estas la plej ofta labormaterio la akvo kaj ĝia vaporo.

Pli supervida kaj demonstra ol la tabuletaj kaj matematikaj analitikaj elkalkuloj estas diagramoj kaj en ili designitaj grafikaĵoj. Oni uzas precipe la diagramojn  $i - s$  (entalpio - entropio) kaj  $p - v$  (premo - specifa volumeno). Ĉiu el ambaŭ metodoj de la elkalkuloj havas siajn avantaĝojn. Pro tio oni plej ofte preferas uzi ambaŭ samtempe kiu estas la plej favora. La numeraj kalkuloj estas pli precizaj kaj oni povas ilin meĥanizi per komputiloj.

Pro tio estas tre grava konsciiĝi la diferencon inter la grafika bildigo de fundamentaj procezoj en unuopaj diagramoj ( $i-s$ ,  $T-s$ ,  $p-v$ ) kaj la matematike analitika esprimo.

La fundamentaj procezoj donas la entutan supervidon pri procezoj en la regiono de la malseka vaporo. La realaj procezoj politropaj nur alproksimiĝas al iu de ili. Oni designu kaj pritraktu la izoĥoran, izobaran, adiabatan kaj izoentalpian procezojn.

**La izohora procezo**



$v = \text{konst}$

En la diagramoj estas bildigitaj:

- 1) la forkonduko de la varmo 1 - 2
- 2) la alkonduko de la varmo 3 - 4
- kaj plue 4 - 5

Dum ĉi tiu du procezoj ŝanĝiĝo aliiĝas la proporcia vaporsekeco  $x$ . Kiam la diagramoj estas sufiĉe precizaj kaj area grandoj estas ankaŭ la traiegitaj valoroj kontentigaj.

Oni povas la proporcian vaporsekecon elkalkuli el fundamentaj valoroj de tabuletoj. Por la izohora procezo validas:

$$v_1 = v_2 \text{ kaj } v_3 = v_4$$

La ŝanĝiĝo 1 - 2 :

La proporcian vaporsekecon oni povas elkalkuli el specifaj volumenoj de la saturita likvaĵo kaj saturita vaporo jene:

$$v_1 = v_2$$

$$v_1 = v'_1$$

$$v_1 = v_2 = v'_1$$

$$v_2 = v'_2 + x_2(v''_2 - v'_2)$$

$$v'_1 = v'_2 + x_2(v''_2 - v'_2)$$

(174)

$$x_2 = \frac{v'_1 - v'_2}{v''_2 - v'_2}$$

La ŝanĝiĝo 3 - 4 :

Analogie estas:

$$v_3 = v_4$$

$$v_4 = v''_4$$

$$v_3 = v_4 = v''_4$$

$$v_3 = v'_3 + x_3(v''_3 - v'_3)$$

$$v''_4 = v'_3 + x_3(v''_3 - v'_3)$$

(175)

$$x_3 = \frac{v_4'' - v_3'}{v_3'' - v_3'}$$

La izotermoj kaj izobaroj estas en la regiono de la malseka vaporo identaj.

$v_1', v_2', v_3'$  – la specifaj volumenoj de la saturita likvaĵo apatrenantaj al la izotermoj kaj izobaroj de la statoj 1, 2, 3.

$v_2'', v_3'', v_4''$  – la specifaj volumenoj de la saturita vaporo apatrenantaj al la izotermoj kaj izobaroj de la statoj 2, 3, 4.

**La volumena laboro**

La volumena laboro dum izoĥora procezo egalas al la nulo:

$$a_{1,2} = 0$$

$$a_{3,4} = 0$$

$$a_{4,5} = 0$$

**La alkondukita kaj forkondukita varmo**

La alkondukitan kaj forkondukitan varmon oni povas elkalkuli el la enaj energioj de la saturita likvaĵo kaj saturita vaporo apatrenantaj al la izotermoj kaj izobaroj de la statoj 1, 2, 3, 4.

$$u_1 = u_1'$$

$$u_2 = u_2' + x_2(u_2'' - u_2')$$

$$u_2 = u_2' + x_2\rho_2$$

$$\rho_2 = u_2'' - u_2'$$

$$q_{1,2} = u_2 - u_1$$

(176)

$$q_{1,2} = u_2' + x_2\rho_2 - u_1'$$

$$u_4 = u_4''$$

$$u_3 = u_3' + x_3(u_3'' - u_3')$$

$$\psi = p(v'' - v')$$

$$u_3 = u_3' + x_3\rho_3$$

$$\rho_3 = u_3'' - u_3'$$

$$q_{3,4} = u_4 - u_3$$

(177)

$$q_{3,4} = u_4' - u_3' - x_3\rho_3$$

$u_1', u_2', u_3'$  – la enaj energioj de la saturita likvaĵo apatrenantaj al la izotermoj kaj izobaroj de la statoj 1, 2, 3.

$u_2'', u_3'', u_4''$  – la enaj energioj de la saturita vaporo apatrenantaj al la izotermoj kaj izobaroj de la statoj 2, 3, 4.

La varmon, bezonan por la procezo oni povas konduki el la entalpioj de la saturita likvaĵo kaj saturita vaporo kaj el la elvaporiga varmo

$$i_4 = i_4''$$

$$i_3 = i_3' + x_3l_\tau$$

$$v = v_3 = v_4$$

$$q_{3,4} = i_4 - i_3 - v(p_4 - p_3)$$

(178)

$$q_{3,4} = i_4'' - i_3'' - x_3l_v - v(p_4 - p_3)$$

$i_4''$  – la entalpio de la saturita vaporo

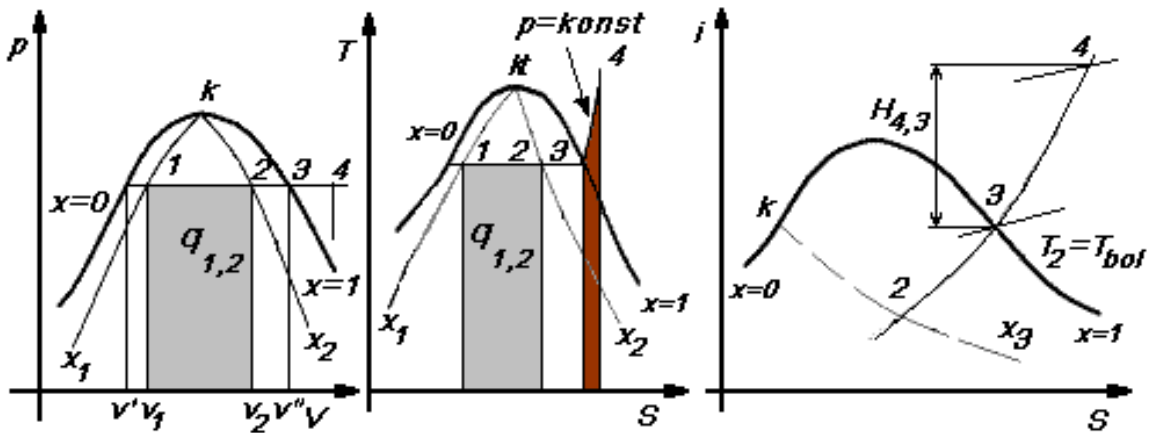
$i_3'$  – la entalpio de la saturita likvaĵo

$l_v$  – la elvaporiga varmo

La vaporoj de la saturita likvaĵo, de la saturita vaporo kaj de la elvaporiga varmo estas en tabuletoj. Sed oni povas ilin ankaŭ legi el la diagramoj.

**b) La izobara procezo**

$p = \text{konst}$



$$H_{4,3} = i_4 - i_3$$

En la regiono de la malseka vaporo estas la izobara procezo ankaŭ la procezo izoterma.

La boltemperato estas konstanta,  $T_{bol} = \text{konst}$ . Dum la varmigado de la malseka vaporo la proporcia sekeco de la malseka vaporo la proporcia sekeco  $x$  kreskas. Sed ĝis kiam estas atingita la supera limkurbo, komencas la supermovigo.

La specifa volumeno kreskas el la valoro:

$$v_1 = v' + x_1(v'' - v')$$

al la valoro:

$$v_2 = v' + bx_1(v'' - v')$$

kaj la limkurbo validas:

$$v_3 = v''$$

La bezona varmo estas:

$$q_{1,2} = (x_2 - x_1)l_v$$

(179)

$$q_{1,2} = i_2 - i_1$$

sed dum la supervarmigado

$$q_{3,4} = q_{sup}$$

$$q_{3,4} = i_4 - i_3$$

(180)

$$q_{3,4} = [c_p]_{t_{bol}}^{t_{sup}}$$

$l_v$  – la elvaporiga varmo

$q_{sup}$  – la supervarmiga varmo

$t_{bol}$  – la boltemperato

$t_{sup}$  – la temperato en la regiono de la supervarmigita vaporo

Oni povas plej bone difini la alkondukitan aŭ forkondukitan varmojn dum la izobara procezo laŭ la diferenco de entalpioj. Por ĉi tiu celo tre bone taŭgas la i-s diagramo.

La realigita laboro estas:

$$p_1 = p_2 = p$$

$$\psi = p(v'' - v')$$

$$a_{1,2} = p(v_2 - v_1)$$

$$a_{1,2} = p(x_2 - x_1)(v'' - v')$$

(181)

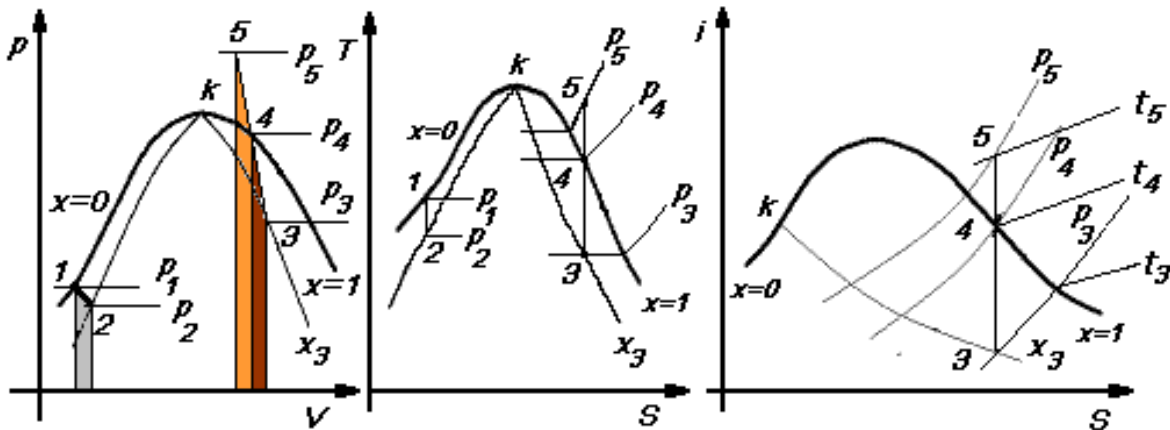
$$a_{1,2} = \psi(x_2 - x_1)$$

Oni povas elkalkuli la aliiĝon de la malseka vaporo el la multo de la interŝanĝita varmo aŭ el la realigita laboro.

En praktiko al la izobara procezo alproksimiĝas la realaj procezoj de la varmigado en kaldronoj kaj en supervarmigiloj, de la elvaporigado en malvarmigaj instalaĵoj kaj de la kondensado en kondensatoroj.

**c) La adiabata procezo**

$$dq = 0$$



La ŝanĝiĝo de la proporcia sekeco de malseka vaporo x ekestas dum la adiabata kunpremo kaj same kiel dum la adiabata ekspansio. Oni povas ĝin elkalkuli el la kondiĉoj por la senvarminterŝanĝa procezo.

La procezo 1 - 2 :

$$s_1 = s_2$$

$$s_1 = s'_1$$

$$s_1 = s_2 = s'_1$$

$$s_2 = s'_2 + x_2(s''_2 - s'_2)$$

$$s'_1 = s'_2 + x_2(s''_2 - s'_2)$$

(182)

$$x_2 = \frac{s'_1 - s'_2}{s''_2 - s'_2}$$

La procezo 3 - 4 :

$$s_3 = s_4 = s_5$$

$$s_4 = s''_4$$

$$s_3 = s'_3 + x_3(s''_3 - s'_3)$$



$$s_4'' = s_3' + x_3(s_3'' - s_3')$$

(183)

$$x_3 = \frac{s_4'' - s_3'}{s_3'' - s_3'} = \frac{T_1(s_4'' - s_3')}{l_{v3}}$$

$I_{v3}$  – la elvaporiga varmo apartenanta al la boltemperaturo  $T_3$

$S'_1, S'_2, S'_3$ , – la entalpio de la saturita likvaĵo apartenantaj al izotermoj de la malseka vaporo por la statoj 1, 2, 3.

$S''_1, S''_2, S''_3$  – la entropioj de la saturita vaporo apartenantaj al izotermoj de la malseka vaporo por la statoj 2, 3, 4.

Dum la ekspansio de la saturita likvaĵo kreskas la proporcia sekeco  $x$ .

Dum la ekspansio de la saturita vaporo malkreskas la proporcia sekeco  $x$ .

La laboro de la adiabata ŝanĝiĝo sen la varminterŝanĝo realiĝas nur malprofite de la ena energio:

La procezo 1 - 2 :

$$u_1 = u_1'$$

$$u_2 = u_2' + x_2(u_2'' - u_2')$$

$$u_2 = u_2' + x_2\rho_2$$

$$a_{1,2} = u_1 - u_2$$

(184)

$$a_{1,2} = u_1 - u_2' - x_2\rho_2$$

La procezo 3 - 4 :

$$u_4 = u_4''$$

$$u_3 = u_3' + x_3(u_3'' - u_3')$$

$$u_3 = u_3' + x_3\rho_3$$

$$a_{3,4} = u_3 - u_4$$

(185)

$$a_{3,4} = u_3 + x_3\rho_6$$

Proksime de la supera limkurbo ( $x = 0,75$  ĝis 1) dum la premo  $p = 20$  bar oni povas laŭ Zeuner esprimi la adiabatton per la sekva ekvacio

(186)

$$pv^\kappa = p_1v_1^\kappa$$

La eksponento  $\kappa$  ne signifas ĉi tie  $cp/cv$  sed la empirian valoron. Por ĝi valoro validas la rilato:

$$\kappa = 1,035 + 0,1x$$

Por maloftaj premoj (ĝis 20 bar) kaj malgranda supervarmigo de la vaporo estas

La eksternan laboron oni kalkulas laŭ la kutima rilato:

$$a_{4,5} = \frac{p_4v_4}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_5}{p_4} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

La adiabata teknika laboro estas la diferenco de entalpioj:

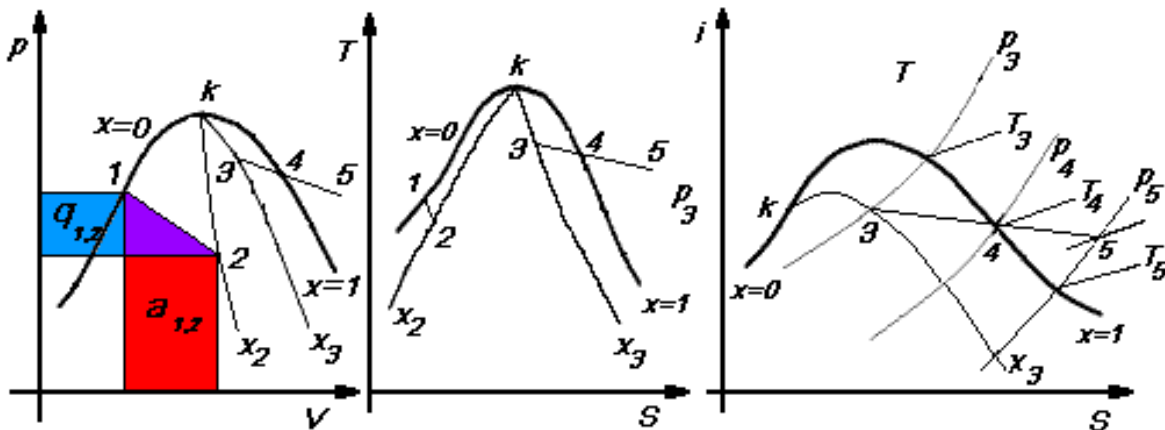
$$a_{t4,5} = i_5 - i_4$$

La valoron oni povas tralegi en la diagramo  $i$ - $s$ .

La adiabatataj procezoj en la regiono de la malseka vaporo havas tre grandan signifon por la ekspansio en vapormaŝinoj kaj en vaporturbinoj.

**d) La izoentropia procezo**

$i = \text{konst}$



La izoentropia procezo (samentropia) estas la procezo, kiam la entropio restas konstanta.

Por la aliigo de la proporcia sekeco validas ĉi tiuj rilatoj

$$i_1 = i_2$$

$$i_1 = i'_1$$

$$i_1 = i_2 - i'_1$$

$$i_2 = i'_2 + x_2 l_{2v}$$

$$i'_1 = i'_2 + x_2$$

(187)

$$x_2 = \frac{i'_1 - i'_2}{l_{2v}}$$

$l_{2v}$  – la elvaporiga varmo por la stato 2

$i'_1, i'_2$  – la entalpioj de la saturita likvaĵo apartenantaj al statoj 1, 2.

Ĉi tiu procezo okazas dum la premsufokado de la vaporo, kiu eniras tra reguligaj organoj en vaporturbinon.



Daurigo: Termodinamiko7 Kategorio

# Artikolaj fontoj kaj kontribuantoj

**Termodinamiko/Leciono 6** *Fonto:* <http://eo.wikibooks.org/w/index.php?oldid=12089> *Kontribuantoj:* Aleksandro, Kajaeo, 3 Anonimaj redaktaj

## Bildaj fontoj, licencoj kaj kontribuantoj

**Dosiero:P-t\_ekvilibro\_gazoj.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-t\\_ekvilibro\\_gazoj.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-t_ekvilibro_gazoj.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:P-t\_bolkurboj.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-t\\_bolkurboj.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-t_bolkurboj.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:P-t\_ekvilibro\_akvo.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-t\\_ekvilibro\\_akvo.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-t_ekvilibro_akvo.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:T-s\_saturita\_vaporo.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:T-s\\_saturita\\_vaporo.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:T-s_saturita_vaporo.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:Cp-t\_supervarmigita\_vaporo.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:Cp-t\\_supervarmigita\\_vaporo.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:Cp-t_supervarmigita_vaporo.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:T-s\_izobaro\_supervarmigita.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:T-s\\_izobaro\\_supervarmigita.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:T-s_izobaro_supervarmigita.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:P-v\_akva\_vaporo.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v\\_akva\\_vaporo.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v_akva_vaporo.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:i-s\_akva\_vaporo.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:I-s\\_akva\\_vaporo.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:I-s_akva_vaporo.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:T-s\_akva\_vaporo.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:T-s\\_akva\\_vaporo.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:T-s_akva_vaporo.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:P-v\_kaj\_T-s\_Carnot.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v\\_kaj\\_T-s\\_Carnot.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v_kaj_T-s_Carnot.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:P-v\_t-s\_i-s\_izohoro.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v\\_t-s\\_i-s\\_izohoro.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v_t-s_i-s_izohoro.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:P-v\_t-s\_i-s\_izobaro.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v\\_t-s\\_i-s\\_izobaro.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v_t-s_i-s_izobaro.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:P-v\_t-s\_i-s\_adiabato.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v\\_t-s\\_i-s\\_adiabato.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v_t-s_i-s_adiabato.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro  
**Dosiero:P-v\_t-s\_i-s\_izoentalpio.GIF** *Fonto:* [http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v\\_t-s\\_i-s\\_izoentalpio.GIF](http://eo.wikibooks.org/w/index.php?title=Dosiero:P-v_t-s_i-s_izoentalpio.GIF) *Permesilo:* nekonata *Kontribuantoj:* Aleksandro

## Permesilo

---

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported  
[//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)