

## **Agenți energetici**

**Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României**

**MINCIUC, EDUARD**

**Agenți energetici** / Eduard Minciuc, Petre Blaga. –  
București : Editura Academiei Oamenilor de Știință din  
România, 2011

Bibliogr. –

Index

ISBN 978-606-8371-16-0

I. Blaga, Petre

621.3

**Editura Academiei Oamenilor de Știință din România**

**Adresa:** Splaiul Independenței, nr. 54, sectorul 5, cod 050094 București, România

**Redactor:** ing. Mihail CĂRUȚAȘU

**Documentarist:** ing. Ioan BALINT

**Coperta:** ing. sist. Adrian Nicolae STAN

**Copyright © Editura Academiei Oamenilor de Știință din România,  
București, 2011**

**Eduard Minciuc**

**Petre Blaga**

# **Agenți energetici**



**Editura Academiei Oamenilor de Știință din România**

**București**

**2011**



# Cuprins

<b>Cap. 1. Caracteristici generale ale agenților energetici</b>	<b>7</b>
Noțiuni generale privind fluidele energetice și de transport	7
Clasificarea agenților termici și energetici	8
Proprietățile fizice comune ale agenților energetici	9
Proprietățile fizice comune ale agenților energetici	12
<b>Cap. 2. Apa și aburul ca agent energetic</b>	<b>15</b>
<b>Cap. 3. Agenți frigorifici</b>	<b>23</b>
Clasificarea agenților frigorifici	23
Caracteristicile agenților de lucru utilizați în mod uzual la instalațiile frigorifice cu comprimare de vapori	24
Poluarea agenților frigorifici	28
Caracteristicile agenților de lucru ai instalațiilor frigorifice cu comprimare termochimică	30
Agenți purtători – transportori - de frig	31
<b>Cap. 4. Aerul atmosferic, hidrogenul și aerul comprimat</b>	<b>33</b>
Parametrii aerului umed	33
Diagrama aerului umed	34
Aerul comprimat	37
<b>Cap. 5. Noțiuni privind transportul agenților energetici</b>	<b>39</b>
Noțiuni generale	39
<b>Cap. 6. Calculul hidraulic și termic al rețelelor de conducte</b>	<b>43</b>
Noțiuni generale	43
Calculul pierderilor liniare de presiune $\Delta p_{lin}$	45
Calculul pierderilor locale de presiune $\Delta p_{loc}$	48
Pierderile totale de presiune $\Delta p_{tot}$ (lungimea echivalentă a conductei $l_{ech}$ )	53
Calculul termic al rețelelor de conducte. Noțiuni generale de bază.	53
<b>Cap. 7. Calculul mecanic al rețelelor de conducte</b>	<b>59</b>
Generalități	59
Principalele caracteristici ale oțelurilor de conducte	60
Determinarea grosimii peretelui unei conducte supuse la presiunea interioară, $p_i$	61
Bibliografie	63



## Capitolul 1

# Caracteristici generale ale agenților energetici

### Noțiuni generale privind fluidele energetice și de transport

**Fluidele**, în general, reprezintă medii continue, izotrope și omogene care au proprietatea de a lua forma volumului în care se găsesc, sub influența unui câmp de forțe exterioare. De asemenea, în stare de repaus, ele exercită numai tensiuni normale, respectiv presiuni.

Fluidele se împart în lichide și gaze, în care se includ și vaporii fluidelor condensabile.

**Lichidele** se caracterizează prin volum determinat, care în cantități mici capătă formă sferică (datorită forțelor de tensiune superficială), iar în cantități mari iau forma vasului și prezintă o suprafață liberă. Lichidele sunt practic fluide incompresibile.

**Gazele** opun o rezistență foarte mică la schimbarea formei, au o fluiditate mult mai mare ca a lichidelor și tind să ocupe integral volumul pe care îl au la dispoziție, fără a mai forma o suprafață liberă. Gazele și vaporii sunt fluide compresibile.

O gamă relativ separată o constituie amestecurile de gaze sau lichide (miscibile sau nu) ale căror proprietăți se tratează în mod separat, funcție de proprietățile specifice ale componentelor.

Fluidele termodinamice și de transport cele mai des întâlnite sunt:

- **apa**, rece, caldă sau fierbinte;
- **aburul**, saturat sau supraîncălzit, ca agent energetic sau transportor de căldură;
- **aerul**, ca agent transportor de căldură sau energie mecanică dacă este comprimat în prealabil;
- **gazele de ardere** utilizate pentru transportul și transferul de căldură;
- **uleiurile**, ca agenți de transport energie hidraulică sau de căldură (uleiurile diatermice);
- **fluidele frigorifice**, utilizate atât ca agenți termodinamici în ciclurile inversate cât și ca fluide criogenice în transportul căldurii de potențial coborât sau negativ;
- **combustibili**, atât lichizi cât și gazoși, utilizați pentru producerea de energie termică în diferitele procese termodinamice sau industriale;
- **hidrogenul**, ca element combustibil, agent de răcire la echipamente energetice și agent criogenic.

## Clasificarea agenților termici și energetici

Fluidele pentru transmisia și transferul de căldură, precum și cele utilizate pentru procese termodinamice de forță se pot clasifica după numeroase criterii dintre care cele mai importante sunt starea fizică, nivelul de temperatură acceptat în domeniul de utilizare, proprietățile fizico-chimice sau termodinamice, costul fluidului, condițiile de manipulare, concepția sistemului de conducte de transport, alte considerente economice, etc.

În funcție de starea fizică agenții energetici se pot clasifica conform celor prezentate în tabelul 1.1.

*Tabelul 1.1*

### Clasificarea agenților după starea fizică

Nr.	Starea fizică	Denumire agent energetic
1.	Gaze	Aer, gaze de ardere, bioxid de carbon, heliu, hidrogen, oxigen, azot, hexafluorură de sulf, clorură de aluminiu, etc.
2.	Vapori	Vapori de apă (abur), vapori de fluide frigorifice (amoniac, freoni etc), fluorocarburi, alchilnaftalină, anisol (etermetilfenilic), para-metilizopropilbenzen, oxid de difenil, etc.
3.	Lichide nemetalice	Apa ușoară, apa grea, alcoolii (metanol, etanol, propanol etc.), esteri (ai acidului fosforic, ai acidului silicic, triarilborat, uleiuri etc.), eteri polifenilici, glicoli (etilenpropilenglicol, polialchilenglicoli), hidrocarburi halogenate, compuși siliconici (silani, siliconi lichizi, silicat de <i>n</i> -octil, silicat de tetraalil, silicat de fenilresorcină etc)
4.	Lichide semimetalice și metalice	Bismut, plumb, mercur eutectic plumb-bismut, galiu, litiu, sodiu, aliaje sodiu-potasiu, amestec de săruri anorganice, saramuri și săruri pentru transport de căldură etc.

După nivelul temperaturilor de utilizare, agenții energetici se împart în cinci grupe - după cum este prezentat în tabelul 1.2.

*Tabelul 1.2*

### Clasificarea agenților în funcție de nivelul de temperatură

Nr.	Interval de temperatură	Denumire agent energetic
1.	Grupa I 535 - 1100°C	Aer, clorură de aluminiu, acid carbonic, gaze de ardere heliu, hidrogen, azot, galiu, etc.
2.	Grupa a II-a 400 - 540°C	Abur, bismut, săruri, plumb, eutectic plumb-bismut, sodiu, aliaje sodiu-bismut, sare N <sub>2</sub> S, etc
3.	Grupa a III-a 320 - 400°C	Difenili, abur, oxizi de difenili, hydroterm, silicat de fenilresorcină, eteri polifenilici, orto-terfenil, metaterfenil, paraterfenil, perfluor-2-butiltetrahidrofuran
4.	Grupa a IV-a 260 - 320°C	Difenili clorurați, huile de hidrocarburi, ulei animală, silicați de aril, mobiltherm, siliconi, borat de triaril, mercur, abur, apa sub presiune, etc.
5.	Grupa a V-a Sub 260°C	Apă, silicați ded alchil, para-cimen, ortodichlorbenzen, hexafluorură de sulf, abur, vapori de fluide frigorifice (freoni), amoniac, lichide Uron (derivați ai polialchilenglicol, etc.)



## Proprietățile fizice comune ale agenților energetici

Fluidele energetice lichide și gazoase au o serie de proprietăți fizice comune, dintre care cele mai importante sunt următoarele:

**Densitatea  $\rho$** , reprezintă masa unității de volum, adică:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}, \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (1.1)$$

în care:  $\Delta m$  și  $\Delta V$  sunt masa și volumul elementar.

În general, densitatea depinde de poziția punctului de măsură ( $r$  – vectorul de poziție), de presiunea,  $p$ , de temperatura,  $T$  și de timpul,  $\tau$ :

$$\rho = \rho(r, p, T, \tau) \quad (1.2)$$

Densitatea la temperatura  $t$  este dată de relația:  $\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \gamma \cdot t}$  (1.3)

în care:  $\rho_0$  este densitatea fluidului la  $0^\circ\text{C}$ , iar  $\gamma$  este coeficientul de dilatare termică volumică a fluidului. Inversul densității se numește *volum specific*:  $v = \frac{1}{\rho}$  [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]. În tabelul 1.3. sunt prezentate câteva valori ale densității unor lichide la temperatura mediului ambiant ( $20^\circ\text{C}$ )

Tabelul 1.3

### Densitatea unor lichide la temperatura de $20^\circ\text{C}$

Lichidul	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Lichidul	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]
Acetona	790	Benzina	710-740
Acid azotic	1513	Brom	3120
Acid sulfuric	1840	Cloroform	1489
Anilina	1022	Clorura e etil	919
Alcool etilic	792	Eter etilic	714
Apa de mare	1010-1050	Mercur	13546
Apa grea	1104	Toluen	867

În tabelul 1.4. sunt prezentate câteva valori ale densității unor gaze și vapori în condiții normale fizice ( $t = 0^\circ\text{C}$  și  $p = 101325 \text{ Pa}$ )

Tabelul 1.4

### Densitatea unor gaze și vapori la starea normală fizică

Gaze, vapori	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	Gaze, vapori	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]
Acetilenă	1,172	Heliu	0,1780
Aer uscat	1,293	Hidrogen	0,0898
Alcool etilic	2,043	Kripton	3,7330
Alcool metilic	1,426	Metan	0,7170
Argon	1,784	Neon	0,8990
Azot	1,250	Ozon	2,1440
Clor	3,214	Oxigen	1,4280
Etan	1,357	Propan	2,0200
Etilenă	1,261	Xenon	5,8900
Fluor	1,629		

**Greutatea specifică**  $\gamma$ , reprezintă greutatea unității de volum, adică  $\gamma = \rho \cdot g$ , cu  $g$  accelerația gravitațională,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

**Compresibilitatea** reprezintă proprietatea fluidelor de a-și modifica volumul odată cu variația presiunii. Se definește cantitativ prin **coeficientul de compresibilitate**  $\beta$  și a modului de elasticitate  $E$ :

$$\beta = \frac{1}{E} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}, \quad (1.4)$$

Pentru lichide se utilizează coeficientul de compresibilitate izotermă,  $\beta_T$ , iar pentru gaze coeficientul de compresibilitate izentropă,  $\beta_S$ , conform ecuațiilor:

$$\beta_T = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T; \quad \beta_S = -\frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_S, \quad (1.5)$$

Pentru lichide coeficientul de compresibilitate variază cu temperatura și nu depinde practic de presiune (se consideră incompresibile). Pentru fluidele gazoase, inclusiv vaporii fluidelor condensabile, compresibilitatea este dependentă considerabil de variația presiunii. Densitatea gazelor capătă forma:

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \beta(p - p_0)].$$

**Dilatarea termică** reprezintă proprietatea fluidelor de a-și modifica volumul la variația temperaturii, când presiunea rămâne constantă. Această proprietate este caracterizată de **coeficientul de dilatare termică volumică**,  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{1}{V} \left( \frac{\partial V}{\partial T} \right)_p, \quad (1.6)$$

În tabelele 1.5., 1.6. și 1.7. sunt prezentate câteva valori pentru coeficienții de dilatare ale unor lichide, apă și gaze lichefiate la temperatura ambiantă.

Tabelul 1.5

Coeficientul de dilatare volumică a unor lichide la temperatura de 20 °C

Lichidul	$\gamma \cdot 10^{-8} [\text{K}^{-1}]$	Lichidul	$\gamma \cdot 10^{-8} [\text{K}^{-1}]$
Acetonă	14,87	Eter etilic	16,50
Alcool etilic	11,00	Glicerină	5,05
Alcool metilic	12,20	Mercur	1,81
Anilină	8,58	Păcură	6,00
Benzină	11,00	Petrol	9,00
Benzol	12,37	Ulei mineral	6,00
Brom	11,13	Toluen	10,99
Cloroform	12,73		

Tabelul 1.6

Coeficientul de dilatare volumică a apei cu temperatura  $t$ 

Temperatura [°C]	$\gamma \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$	Temperatura [°C]	$\gamma \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$	Temperatura [°C]	$\gamma \cdot 10^{-6} [\text{K}^{-1}]$
0	-63	10	95	80	630
1	-49	20	210	90	700
2	-31	30	300	100	750
3	-15	40	390	150	1030
4	0	50	460	200	1350
5	17	60	530	300	2950

Tabelul 1.7

## Coeficientul mediu de dilatare volumică a unor gaze lichefiate

Gazul	Domeniul de temperatură	$\gamma \cdot 10^{-3}$ [K <sup>-1</sup> ]	Gazul	Domeniul de temperatură	$\gamma \cdot 10^{-3}$ [K <sup>-1</sup> ]
Amoniac	223-273	1,93	Clor	171-307	1,41
Argon	84-90	5,88	Hidrogen	14-20,4	12,6
Azot	68-89	5,88	Oxigen	68-89	3,85

**Vâscozitatea** reprezintă proprietatea fluidelor de a se opune mișcării relative a particulelor constituente. Se definește *vâscozitatea dinamică*  $\eta$  din expresia efortului tangențial de frânare,  $\tau$  dat de legea lui Newton:  $\tau = \eta \frac{dc}{dn}$  cu  $\frac{dc}{dn}$  gradientul vitezei în direcția normală a mișcării.

Se definește *vâscozitatea cinematică*  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$  [m<sup>2</sup>/s]

În tehnică se utilizează adesea, numai pentru lichide, *vâscozitatea relativă exprimată în grade Engler (°E)*, ca raport între timpii de curgere a aceluiași volum de lichid și apă pură, la aceeași temperatura și prin aceeași secțiune de trecere:

$${}^{\circ}E = \frac{\tau_{lichid}}{\tau_{apa}}, \quad (1.7)$$

Legătura vâscozității Engler cu vâscozitatea cinematică și cea dinamică este dată de relațiile:

$$\nu = \left[ 0,0731 \cdot {}^{\circ}E - \frac{0,0631}{{}^{\circ}E} \right] \cdot 10^{-4} \quad \left[ \frac{m^2}{s} \right], \quad (1.8)$$

$$\eta = \rho \left[ 7,31 \cdot {}^{\circ}E - \frac{6,31}{{}^{\circ}E} \right] \cdot 10^{-6} \quad [Pas], \quad (1.9)$$

La lichide, vâscozitatea crește odată cu creșterea presiunii și scăderea temperaturii, iar pentru gaze vâscozitatea este practic independentă de presiune, dar crește cu temperatura după o lege exponențială de forma:  $\eta = A \cdot T^n$ , cu  $A$  și  $n$  constante specifice fiecărui gaz în parte. În tabelele 1.8. și 1.9. sunt prezentate valorile vâscozității dinamice ale unor lichide și ale apei la diferite temperaturi.

Tabelul 1.8

## Vâscozitatea dinamică a unor lichide la temperatura de 20°C

Lichidul	$\eta \cdot 10^{-6}$ [Pas]	Lichidul	$\eta \cdot 10^{-6}$ [Pas]
Acetonă	322	Mercur	1554
Anilină	4400	Ulei mineral	240 10 <sup>5</sup>
Eter etilic	243	Ulei de transformator	19800
Benzină	530	Untdelemn	50000
Benzol	1004		

Tabelul 1.9

## Vâscozitatea dinamică a apei cu temperatura

Temperatura [°C]	$\eta \cdot 10^{-6}$ [Pas]	Temperatura [°C]	$\eta \cdot 10^{-6}$ [Pas]	Temperatura [°C]	$\eta \cdot 10^{-6}$ [Pas]
0	1787,8	60	469,7	200	136,3
10	1305,3	70	406	250	109,8
20	1004,2	80	355	300	91,2
30	801,2	90	314,8	350	72,6
40	653,1	100	282,5	370	57
50	549,2	150	186,3	374,15	4

*Difuzivitatea* reprezintă fenomenul de transport de masă care are loc într-un fluid aflat în repaus, dacă între diverse puncte există diferențe de densitate sau de concentrație.

### Proprietăți fizice specifice lichidelor

Față de gaze și vapori, lichidele prezintă unele proprietăți specifice datorate în special forțelor de coeziune moleculară și acelor de adeziune.

*Tensiunea superficială*  $\sigma_s$  este forța care se exercită pe unitatea de lungime, de pe suprafața liberă a lichidului, datorată interacțiunii dintre moleculele de lichid

din stratul superficial și moleculele din interior:  $\sigma_s = \frac{F}{l}$ .

Valoarea tensiunii superficiale scade odată cu creșterea temperaturii. În tabelele 1.10. și 1.11. sunt date valorile tensiunii superficiale pentru câteva lichide și respectiv pentru apă în contact cu aerul la diverse temperaturi.

Tabelul 1.10

## Tensiunea superficială a unor lichide în contact cu aerul

Lichidul	$\sigma$ [N/m]	Lichidul	$\sigma$ [N/m]
Alcool	0,0253	Mercur	0,47
Apă	0,077	Untdelemn	0,0327

Tabelul 1.11

## Tensiunea superficială a apei în contact cu aerul la diverse temperaturi

T [°C]	0	10	20	30	40	50
$\sigma$ [N/m]	0,0755	0,0741	0,0726	0,0711	0,0696	0,068

*Capilaritatea* este fenomenul de urcare sau coborâre a nivelului lichidului din tuburile capilare în raport cu nivelul normal, datorită proprietăților de adeziune și tensiune superficiale. Creșterea nivelului se constată la lichidele care udă pereții (forțele de adeziune sunt mai mari decât cele de coeziune), iar scăderea nivelului la cele care nu udă pereții.

Denivelarea  $\Delta h$  prezintă în cazul capilarelor circulare, se calculează cu relația lui Jurin:

$$\Delta h = \frac{4 \cdot \sigma \cdot \cos\alpha}{d \cdot g \cdot (\rho_1 - \rho_2)}, \quad (1.10)$$

unde:  $d$  este diametrul capilarului,  $\rho_1$  și  $\rho_2$  sunt densitățile fluidelor în contact (a lichidului și al gazului de deasupra).

**Absorbția de gaze** este fenomenul în care gazele pătrund prin difuzie în masa de lichid prin suprafața liberă de separație. Absorbția se produce când concentrația masei absorbită este mai mare decât concentrația de echilibru corespunzătoare fazei lichide la acea presiune. Masa absorbită crește odată cu scăderea temperaturii lichidului.

**Cavitația** reprezintă fenomenul de formare de bule sau vapori și gaze la scăderea bruscă a presiunii sub valoarea presiunii de saturație în zona respectivă. Este un fenomen periculos în special la dechiderea sau închiderea bruscă a ventilelor și vanelor sau la aspirația pompelor pentru fluide fierbinți.



## Capitolul 2

# Apa și aburul ca agent energetic

**Apa** este cel mai răspândit element de pe suprafața Pământului. Peste 2/3 din suprafața terestră este ocupată de mări și oceane, care formează Oceanul Planetar. Din suprafața totală a Pământului, evaluată la 510 mil. km<sup>2</sup>, apa Oceanului Planetar ocupa 361,07 mil.km<sup>2</sup>, adica cca. 70,8%.

Diferitele proprietăți fizice ale apei servesc pentru definirea unor mărimi fizice fundamentale și anume:

- temperaturile de topire și de fierbere ale apei la presiunea de 760 torr definesc unitatea de temperatură în scara Celsius;
- unitatea de măsură pentru căldură, **caloria**, este egală cu capacitatea calorică a unui gram de apă la temperatura de 15°C;
- unitatea de masă, kilogramul, este egală cu masa unui dm<sup>3</sup> de apă pură, la temperatura densității maxime (4°C).

Unele proprietăți fizice ale apei prezintă „anomalii” (alături de HF, NH<sub>3</sub> și mai puțin HCl), față de a hidrurilor vecine în sistemul periodic (CH<sub>4</sub>, PH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub>Se, HBr etc.), datorită asociației moleculelor H<sub>2</sub>O prin legături de hidrogen. Aceste anomalii sunt punctele de topire și de fierbere, densitatea, capacitatea calorică și căldurile de topire și vaporizare, care au valori mai ridicate.

**Punctele de topire și de fierbere** ale apei au valori anormal de ridicate în comparație cu hidrurile elementelor vecine din sistemul periodic, astfel, apa este un lichid la temperatura obișnuită, în timp ce hidrurile elementelor vecine sunt gazoase.

**Căldura latentă de vaporizare a apei** reprezintă cantitatea de căldură, exprimată în calorii (Joul), consumată la temperatură constantă (100°C) pentru o cantitate de apă (1 gram în cazul *căldurii latente de vaporizare, lv* și un mol în cazul *căldurii latente molare de vaporizare, Lv*).

Apa încălzită într-un vas deschis, la presiunea atmosferică, începe să fiarbă la 100°C, *temperatură care rămâne constantă pentru apă și vapori* până când vaporizează întreaga cantitate.

Dacă aportul de căldură continuă, vaporii se încălzesc peste această temperatură devenind vapori supraîncălziți.

Apa are căldurile de vaporizare  $lv = 540 \text{ cal/g}$  (2260 kJ/kg) și  $Lv = 9729 \text{ cal/mol}$  (40735 kJ/kmol), mult mai mari decât ale altor substanțe, datorită legăturilor de hidrogen care sunt mult mai tari decât legăturile van der Waals, care unesc moleculele lichidelor nepolare.

**Căldura specifică** (capacitatea calorică) de 4,18 kJ/kg, mare comparativ cu a altor hidruri covalente, contribuie la schimbarea lentă a temperaturii apei din mediul ambiant (lacuri, mări și oceane), deci are un rol regulator în natură.

**Densitatea apei** nu prezintă o variație monotonă cu temperatura, ca la celelalte lichide, ci mai întâi crește de la 0°C ( $d = 0,99987 \text{ g/cm}^3$ ) la 4°C ( $d = 1$

$\text{g/cm}^3$ ), apoi scade (ajungând la  $25^\circ\text{C}$  la  $d = 0,99701 \text{ g/cm}^3$ ). Datorită acestei variații a densității, apa prezintă proprietăți mecanice unice față de alte substanțe.

Această anomalie este explicată prin ipoteza că apa pură este un amestec de apă solidă (care este polimerizată prin gruparea moleculelor) și solvenul cu formula  $\text{H}_2\text{O}$ .

**Tensiunea superficială** a apei reprezintă forța de contracție ce acționează perpendicular pe o lungime de 1 cm pe suprafața de separație a lichidului cu aerul.

La toate lichidele tensiunea superficială descrește odată cu creșterea temperaturii.

Tensiunea de la interfața dintre apă și alt lichid care nu este miscibil cu apa este aproximativ egală cu diferența dintre tensiunile superficiale proprii. Tensiunea de la interfața dintre cele două lichide descrește o dată cu creșterea temperaturii.

Alte proprietăți fizice ale apei care îi conferă proprietăți termodinamice benefice sunt:

**Presiunea de vapori** a apei la o anumită temperatură reprezintă presiunea la care coexistă cele două stări de agregare ale apei: gazoasă și lichidă. Vaporii în echilibru cu lichidul se numesc saturați.

Presiunea exercitată de aranjarea tetraedrică a moleculelor în momentul înghețării apei este de circa 16 atm, fapt explică spargerea recipientilor sau chiar a unor echipamente tehnologice (vane, ventile, schimbatoare de căldură etc.) care nu rezistă la aceste presiuni.

**Compresibilitatea apei** – lichidele sunt foarte puțin compresibile în raport cu gazele, dar foarte compresibile față de solide. Astfel, apa este foarte puțin compresibilă în raport cu aerul și este de cca. 100 de ori mai compresibilă decât oțelul moale obișnuit.

Dacă forța care comprimă un lichid este înlăturată, acesta revine exact la volumul inițial, fără a se manifesta deformații remanente, lichidele fiind astfel perfect elastice.

Valoarea experimentală a coeficientului de compresibilitate cubică al apei este  $x = 50,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{kgf}$  și modulul de elasticitate cubică  $\varepsilon = 1,99 \cdot 10^8 \text{ kgf/m}^2$  ( $\varepsilon = 1/x$ ). Valorile mici ale coeficientului de compresibilitate conduc la neglijarea acestui efect, apa fiind considerată, în general, incompresibilă.

**Constantele critice** sunt temperatura, presiunea și volumul molar și sunt proprietăți fizice constante proprii ale apei.

*Temperatura critică ( $T_c$ )* reprezintă temperatura deasupra căreia vaporii de apă (aburul) nu mai pot fi lichefiați ( $647 \text{ K}$ ;  $374^\circ\text{C}$ ).

*Presiunea critică ( $P_c$ )* a apei este presiunea minimă necesară pentru a lichefia vaporii la temperatura critică (221 bar).

*Volumul molar critic ( $V_c$ )* reprezintă volumul ocupat de un mol sau kmol de apă la temperatura critică ( $57 \text{ cm}^3$ ).

**Punctul triplu** al apei reprezintă punctul în care se realizează echilibrul de faze gheață-apă-vapori și care corespunde temperaturii de  $0,01^\circ\text{C}$  și presiunii de 4,6 torr.



**Constanta ebullioscopică** a apei  $K_e = 0,53$  (determinată experimental la 760 torr) reprezintă ridicarea punctului de fierbere la dizolvarea unui mol de substanță în 1000 g apă (solvent).

**Constanta crioscopică** a apei,  $K_f = 1,86$  reprezintă scăderea punctului de topire produsă de un mol de substanță în 1000 g apă (solvent).

**Vîscozitatea apei** este caracterizată, ca și la celelalte fluide, de coeficientul de vîscozitate dinamică ( $\mu$ ) și coeficientul de vîscozitate cinematică ( $\nu$ ), între aceștia existînd relația  $\nu = \mu/\rho$ . Coeficienții de vîscozitate variază cu temperatura conform cu valorile prezentate în tab.1.9.

Vîscozitatea apei are un minimum la presiuni înalte, fapt care se interpretează în sensul că apa are o organizare voluminoasă cu legături interne mobile care cedează eforturilor mecanice, dînd un lichid mai mobil. De asemenea, legăturile interne se rup cînd temperatura crește.

**Adeziunea apei** reprezintă forța de atracție dezvoltată la suprafața de contact cu un solid. S-a dovedit, experimental, că pînă la distanța de ordinul unei sutimi de milimetru de la perete există un strat de lichid aderent, în repaus, chiar dacă lichidul este în mișcare.

**Absorbția apei** – apa absoarbe gazele cu care vine în contact. Greutatea gazului dizolvat crește proporțional cu presiunea, volumul gazului menținîndu-se constant. La temperatura obișnuită apa conține un volum de aer egal cu circa 2% din volumul său. Apa în contact cu aerul absoarbe mai mult oxigen și mai puțin azot, față de raportul în care aceste gaze se găsesc în aer. Astfel, la 0°C în aer participațiile volumetriche sunt de circa 21% O<sub>2</sub> și 79% N<sub>2</sub>, pe cînd în apă aceste participații sunt de cca. 34% O<sub>2</sub> și 66% N<sub>2</sub>.

**Indicele de refracție** la 20°C este de 1,333 și scade de la violet spre roșu. Apa posedă o capacitate mare de absorbție a căldurii prin radiație în domeniul infraroșu fapt ce explică încălzirea relativ rapidă la soare. În domeniul vizibil, în UV apropiat, între 180 și 780 nm este transparentă, din care cauză are o prezență incoloră. O ușoară absorbție în UV ca și prezența unor substanțe dizolvate fac ca apa naturală în strat gros să fie de culoare verde-albăstruie.

**Transparența apei** depinde de lungimea de undă a radiației ce o traversează. După cum reiese și din cele menționate anterior, radiațiile ultraviolete penetrează cu ușurință straturile groase de apă, în timp ce radiațiile infraroșii, care sunt mai utile din punct de vedere fizic și termodinamic, penetrează mult mai greu asemenea straturi.

**Constanta dielectrică** a apei este  $\epsilon = 80,08$ , ceea ce înseamnă că introduse într-un câmp electric, moleculele de apă se orientează față de liniile de forță ale acestuia. Această orientare neutralizează parțial câmpul aplicat, intensitatea lui scade și explică de ce apa ca solvent are excelente proprietăți disociante și o mare putere ionizantă.

**Conductivitatea electrică** a apei este, la 20°C, de  $4,2 \cdot 10^{-6}$  Siemens ( $4,2 \mu\text{S}$ ) corespunzătoare unei **rezistivități** de 23,8 Mohm·cm. Conductibilitatea apelor naturale este în funcție de concentrația sărurilor dizolvate și variază direct proporțional cu temperatura.

**Disocierea apei** în elemente sale componente, oxigen și hidrogen, începe să se realizeze termic la circa 1000°C, deci foarte greu, ceea ce este demonstrat și de entalpia de disociere  $\Delta h = 286,4$  kJ/mol (aproximativ 68,5 kcal/mol), apa fiind deci, un electrolit slab care disociază foarte puțini ioni.

**Aburul** este un *agent termic și termodinamic* larg utilizat în tehnică la producerea *lucrului mecanic* (destindere în *turbine cu abur* sau *motoarele cu abur*), în scopuri *tehnologice* (*industria chimică, alimentară* etc.), pentru *sistemele de încălzire* etc., fiind ușor de produs și putând acumula cantități mari de *căldură*. Spre deosebire de vaporii de apă din atmosferă, care sunt în amestec cu aer, aburul tehnic nu este amestecat cu alte substanțe, eventualele urme de *săruri* sau *ulei* conținute fiind considerate impurități.

Aburul se clasifică în funcție de diferite criterii.

- a) *după tip la o presiune dată*, aburul poate fi:
  - abur saturat umed, când mai conține picături de lichid;
  - abur saturat uscat, când nu mai conține umiditate, dar o cât de mică cedare de căldură îl aduce în stare de abur saturat umed;
  - abur supraîncălzit, când temperatura lui e superioară celei de saturație la presiunea respectivă.
- b) *după presiune* se deosebește:
  - abur pentru termoficare urbană, cu presiunea de 1,2 - 2,0 bar;
  - abur de presiune joasă (până la 15 bar), utilizat în scopuri tehnologice și uneori în instalații de încălzire;
  - abur de presiune medie (15-80 bar), folosit în turbine de parametri medii;
  - abur de presiune înaltă (80-221 bar), folosit în turbine de putere mare;
  - abur de presiune supracritică (peste 221 bar), folosit în turbine de foarte mare putere (cicluri supracritice).
- c) *după proveniență* aburul poate fi:
  - abur viu adus direct de la generator (cazan) la utilizator, fără să fi fost utilizat în alt agregat și fără să fi suferit vreo reducere de parametri (presiune și temperatură);
  - abur derivat (sau prelevat), abur care a fost utilizat parțial într-o mașină și apoi derivat pentru alte scopuri;
  - abur uzat, abur evacuat din turbină după utilizarea totală;
  - abur laminat, abur căruia i s-a redus presiunea fără producere de lucru mecanic.

Aburul derivat și cel uzat mai este utilizat în scopuri tehnologice sau pentru termoficare. Dacă se pune problema ca o turbină să alimenteze cu abur un proces tehnologic sau termoficarea, aburul este prelevat (la turbinele cu condensatie) respectiv evacuat (la turbinele cu contrapresiune) la parametrii necesari procesului, respectiv termoficării.

În *energetică*, proprietățile *fizice* care prezintă interes sunt:

- masa molară, de care este legat volumul masic și care este un parametru termodinamic;
- capacitatea termică masică, de care sunt legate valorile entalpiei și entropiei, și care definesc starea energetică;
- conductivitatea termică și vâscozitate dinamică, de care depind fenomenele de transfer termic.

Capacitatea termică masică (implicit entalpia și entropia), conductivitatea termică și vâscozitatea dinamică depind de presiune și temperatură, după legi neliniare. Actualmente aceste proprietăți sunt obiectul activității Asociației Internaționale pentru Proprietățile Apei și Aburului (*The International Association for the Properties of Water and Steam - IAPWS*), care organizează conferințe anuale pentru urmărirea progreselor privind aceste proprietăți și sub egida căreia se redactează formalizări internaționale.

Astfel în decursul timpului s-au dezvoltat relații analitice de legatură între parametrii de stare și relații empirice determinate prin regresii după experimetări:

- în anul 1904 Richard Mollier a trasat primele diagrame entropice de stare având entalpia pe una din axe, bazate pe ecuația de stare a lui Koch:

$$v = \frac{RT}{p} - \frac{A}{\left(\frac{T}{100}\right)^{2,82}} - p^2 \cdot \left[ \frac{B}{\left(\frac{T}{100}\right)^{14}} + \frac{C}{\left(\frac{T}{100}\right)^{31,6}} \right] \quad (2.1)$$

- în anii 1950 Mihail Vukalovich a propus o ecuație de stare cu coeficienți viriali, pe baza cărora s-au calculat valorile proprietăților aburului utilizate pe plan mondial în deceniile 5 și 6 ale secolului al XX-lea.
- mai târziu Ernst Schmidt a propus succesiv mai multe ecuații de stare empirice, ultima fiind acceptată la Conferința IAPWS din 1966 (IAPWS-66) și care a fost valabilă până în 1968, când IAPWS-68 a adoptat prima formalizare modernă.

Astăzi se folosesc următoarele formalizări:

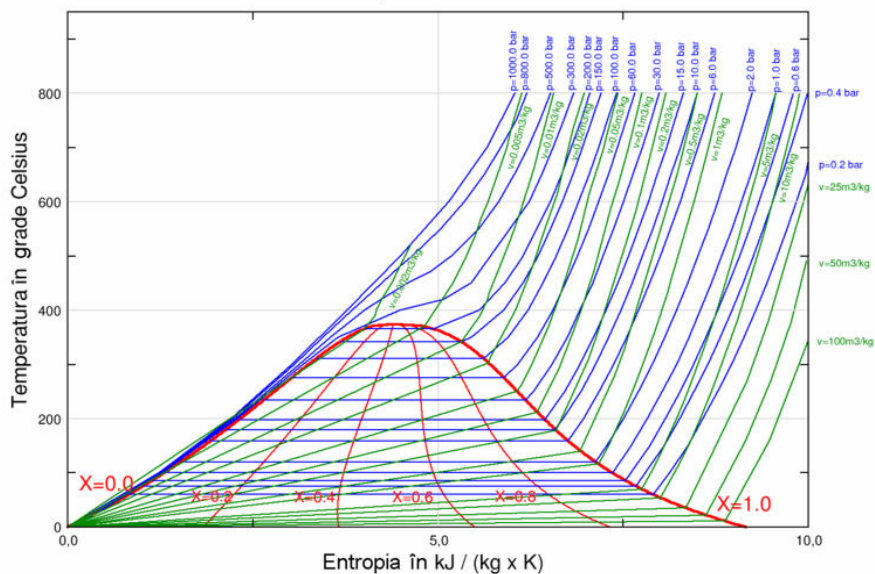
- IAPWS-95 pentru aplicații științifice (program relativ simplu, foarte precis, dar cu viteză mică de lucru), formalizare bazată pe potențialul termodinamic Helmholtz. Valorile calculate sunt verificate până la 1000°C și 10000 bar și se consideră că pot fi extrapolate până la 5000°C și 100000 bar.
- IAPWS-IF97 pentru aplicații industriale (program cu viteză mare, dar cu o precizie mai redusă), bazat pe relații empirice. Valorile calculate sunt validate până la 800°C și 1000 bar.

De asemenea valorile se găsesc calculate în tabele termodinamice de stare, însă în practică este mult mai intuitivă folosirea unor diagrame termodinamice.

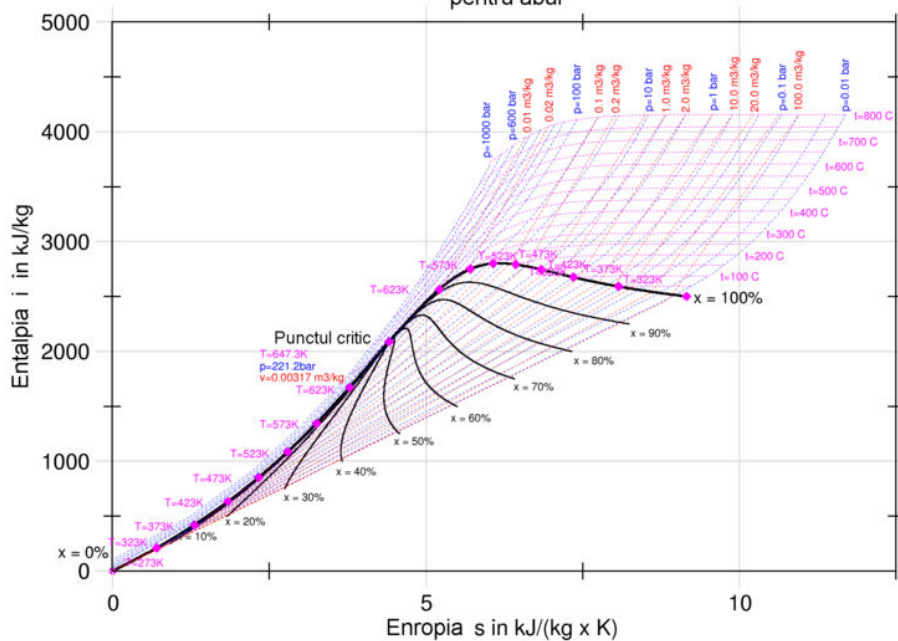
Astfel se folosesc foarte des diagrama temperatura - entropie ( $T-s$ ), și diagrama entalpie - entropie ( $i-s$ ) (Mollier), care sunt larg folosite în explicarea și

trasarea unor transformări, procese sau randamente termodinamice ale ciclului Clausius-Rankine și a randamentului intern al turbinelor cu abur.

Diagramă T - s  
pentru abur



Diagramă i - s (Mollier)  
pentru abur

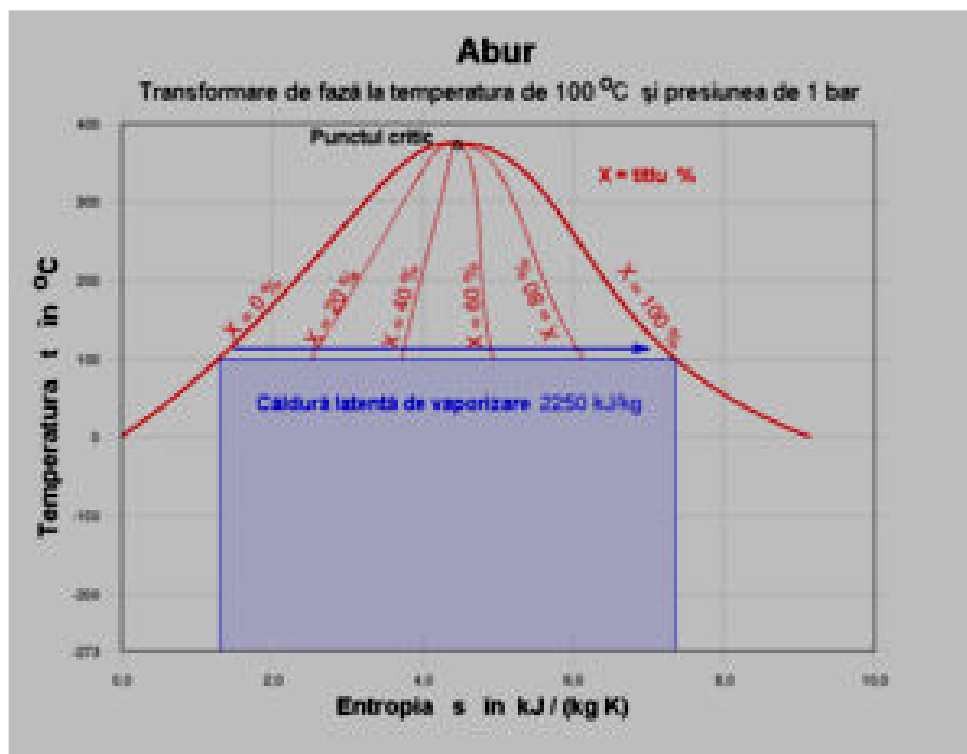


**Aburul saturat**

La fiecare presiune ( $p_s$ ), apa fierbe la *temperatura de saturație* ( $t_s$ ) corespunzătoare. Temperatura de saturație a apei în funcție de presiune se poate calcula cu aproximație cu relația:

$$t_s = 100 \cdot \sqrt[4]{p_s} \text{ [}^\circ\text{C]}, \quad (2.2)$$

În tehnică se consideră că procesul de fierbere la presiune constantă decurge astfel: apa se preîncălzește (prin absorbție de căldură) până la temperatura de saturație fără degajarea de vapori (aproximație suficient de exactă pentru nevoile practicii), obținându-se *apă la saturație*. Primind căldură în continuare, apa își schimbă starea de agregare prin transformarea treptată în abur, fără ca temperatura să se modifice. În momentul în care toată apa s-a vaporizat, se spune că ea s-a transformat în *abur saturat (uscat)*. Absorbția de căldură în continuare, la presiune constantă, conduce la creșterea temperaturii aburului, el devenind *abur supraîncălzit*.

**Domeniul aburului umed.**

În perioada trecerii de la apă la saturație la abur saturat, *amestecul de abur saturat și apă la saturație* se numește *abur umed*. Se definește *titlul aburului* ( $x$ ) prin cantitatea de vapori conținută într-un kg. de amestec:

$$x = \frac{m_{\text{vapori}}}{m_{\text{apa}} + m_{\text{vapori}}}, \quad (2.3)$$

unde  $m_{\text{apa}}$  este masa apei la saturație, iar  $m_{\text{abur}}$  este masa aburului saturat.

Titlul aburului ia valori între 0 (apă la saturație) și 1 (abur saturat). Pentru diferite presiuni, în diagrama  $T-s$ , starea de apă la saturație este pe curba de  $x = 0$ , iar starea de abur saturat este pe curba de  $x = 1$ . La presiunea *normală* (de 101325 Pa = 1,013 bar) căldura latentă de vaporizare (căldura schimbării de fază) este de 2257 kJ/kg. La presiuni mai mari, această căldură scade, deoarece curbele  $x = 0$  și  $x = 1$  se apropie și se întâlnesc la *presiunea critică* de 221,2 bar, în *punctul critic*, a cărui temperatură este de 374°C. Peste această presiune, este *domeniul supracritic*, în care vaporizarea apei se face fără o transformare de fază vizibilă, deoarece datorită parametrilor ridicați, nu mai există o diferență sesizabilă între densitatea apei și cea a aburului.

Domeniul din diagrama T-s de sub curbele  $x = 0$  și  $x = 1$  (clopotul de vaporizare) este *domeniul aburului umed*.

### **Domenii de utilizare a aburului.**

#### **a) în tehnică**

Aburul industrial este produs în generatoare de abur și este folosit:

- ca agent termodinamic, în turbine cu abur și motoare cu abur (locomotive cu abur) - de remarcat că marile termocentrale pot avea producții de abur de mii de tone pe oră;
- ca agent termic la extracția țițeiului și la rafinarea lui, precum și în reacțiile de cracare pentru obținerea benzinei;
- ca agent termic în industria ușoară, la fierberi și pasteurizare în industria alimentară, vopsitorie și ucatorie în industria textilă, la curbarea și uscarea lemnului în industria mobilei;
- la desalinizarea apei de mare;
- ca materie primă la producerea gazului de apă;
- ca agent termic la încălzirea cu abur, respectiv în termoficare;
- ca fluid de antrenare în ejectoarele de abur;
- ca materie primă pentru obținerea apei distilate;
- ca agent de lucru la obținerea vidului prin condensare în condensatoare;

#### **b) în medicină**

- la aparate de sterilizat;
- la inhalații.

#### **c) pentru uz casnic:**

- la prepararea alimentelor;
- la călcat în instalații cu cilindri rotativi încălzii cu abur;
- la instalațiile de curățare cu abur;
- în saune etc.