

22 Toplota

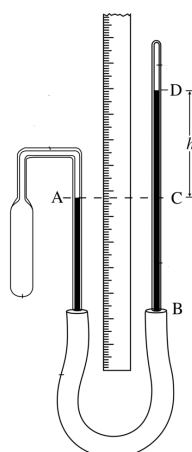
Toplotno raztezanje – Plinski termometer – Tekočinski termometri – Plinska enačba stanja – Raztezni koeficienti – Notranja energija, delo in toplota – Specifična toplota – Stiskanje in raztezanje plina – Utekočinjanje plina – Talilna, izparilna in sežigna toplota – Parni tlak tekočin – Vlažni zrak – Parni stroj – Eksplozijski motor – Hladilni stroj – Konvekcija – Toplotni vetrovi – Toplotni tok

22.1 Toplotno raztezanje

Žoga na pripeki Gumijasta žoga se na sončni svetlobi segreva, napenja in veča: zrak v njej se očitno razteza. Domnevamo, da se pri segrevanju raztezajo tudi druge snovi – plini, tekočine in trdnine. Takšno raztezanje lahko služi kot pokazatelj temperature. Izdelati hočemo pripravo, ki bo to delala.

22.2 Plinski termometer

Plinski termoskop Dobro možnost za določanje temperature obeta zrak v togi, neraztezni posodi. Tak zrak se ne razteza, marveč se mu pri segrevanju zgolj veča tlak, kar lepo vidimo s priključenim manometrom. To je *plinski termoskop*. Temperaturo kaže s svojim tlakom.



Slika 22.1 Plinski termoskop. Merilni plin je v stekleni bučki. Tlak plina narašča s temperaturo. Z dviganjem in spuščanjem desnega kraka manometra skrbimo za to, da ostaja prostornina plina nespremenjena. (Brock University)

Vrelišče in ledišče vode Ko bučko termoskopa segrevamo v vodni kopeli nad gorilnikom, se tlak v njem počasi dviga. V vreli vodi doseže najvišjo vrednost – pokaže temperaturo *vrelišča* – in tam ostane. Podobno je pri ohlajanju: v ledeni vodi, po kateri plavajo kosi ledu, se termoskopski tlak zniža vedno do iste točke, temperature *ledišča* oziroma *tališča*. Kje je vrelišče, je precej odvisno od zunanjega zračnega tlaka: nižji ko tlak, nižje je vrelišče. Zmrzovališče se ne spreminja zaznavno. Pri istem zunanjem tlaku vre ali zmrzuje voda vedno pri istih temperaturah.

Absolutna temperatura Naj v bučki v ledenomrzli kopeli znaša termoskopski tlak p_0 in v vreli vodi p_1 . Poskus pokaže, da znaša relativna sprememba tlaka (AMONTONS)

$$\frac{p_1 - p_0}{p_0} = \frac{1}{2,73}. \quad (22.1)$$

To razmerje je neodvisno od začetnega tlaka p_0 in od vrste plina: zraka, kisika, vodika in drugih, ki jih še znamo pridobivati.

Absolutno temperaturo T definiramo kot sorazmerno s tlakom. Pri tem hočemo imeti med lediščem in vreliščem 100 enot, poimenujmo jih *kelvin* (K), zato moramo ledišču pripisati 273 enot:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{p}{p_0} \quad (22.2)$$

$$T_0 = 273 \text{ K}.$$

To je plinska definicija temperature. Tako definirana temperatura je vedno pozitivna. Njeno merjenje je načeloma preprosto.

Termoskop potisnemo v ledeno vodo, pri čemer pokaže tlak p_0 . Potem ga vtaknemo v merjenec, recimo v toplo vodo, in pokaže tlak p . Temperatura znaša $T = (p/p_0) \cdot 273 \text{ K}$.

Zaradi udobnosti preimenujemo tlačno skalo na manometru kar v temperaturno in dobimo *plinski termometer*. Temperatura je s tem definirana navzdol do tja, dokler merilni plin še obstaja, preden se kondenzira v tekočino, in navzgor do tam, ko še zdrži posoda. Ali je tako definirana temperatura res sorazmerna s tlakom, pa ostaja nesmiselno vprašanje, vse dokler je ne bomo merili še na kak drug način. Zdaj, ko je temperaturna skala določena, pa se nanaša enačba (22.2) tudi na poljubno stanje T_0 in p_0 . V tem smislu ji bomo rekli *plinski izohorni zakon* (GAY-LUSSAC).

Relativna
temperatura

Absolutne temperature imajo v vsakdanjem okolju neprijetno velike številske vrednosti. Zato uvedemo novo količino, *relativno temperaturo*, takole:

$$\theta = (T - 273 \text{ K}) \frac{^\circ\text{C}}{\text{K}}. \quad (22.3)$$

Njeno enoto poimenujemo *stopinja* ($^\circ\text{C}$). Relativna temperatura se šteje od ledišča vode naprej in nazaj v stopinjah, ki so enako velike kot kelvin. Ledišče vode je torej pri 0°C in vrelišče pri 100°C .

22.3 Tekočinski termometri

Živosrebrni
termometer

Merjenje s plinskim termometrom je nerodno. Kaj pa, če bi uporabili razteg tekočin? Poskušanje nas vodi do naslednjega. V stekleno bučko, ki se podaljšuje v navpično tanko cevko s stalnim premerom, natočimo živo srebro in ga previdno segrevamo nad plamenom, da se raztegne do vrha. Tedaj cevko zatalimo in pustimo, da se živosrebrna nitka zopet skrči, pri čemer nad njo ostane brezračni prostor. Tako smo izdelali *živosrebrni*

termometer (FAHRENHEIT). Zaradi zaprte cevke ni občutljiv na zunanji zračni tlak. In ker v cevki ni zraka, tudi ni občutljiv na notranji zračni tlak.

Živosrebrni termometer umerimo s plinskim termometrom v ohlajajoči se vodni (ali oljni) kopeli, stopinjo za stopinjo. Pokaže se, da so živosrebrne stopinje lepo enakomerne. Z njim merimo na intervalu med $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, ko živo srebro zmrzne, in $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, ko že precej izhlapeva ter s svojim parnim tlakom moti širjenje.

Alkoholni termometer

Za merjenje je uporaben tudi obarvan alkohol, ki ima precej nižje ledišče kot živo srebro, a tudi nižje vrelišče, okrog $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Njegove stopinje, narisane na skali, niso povsem enakomerne: ponekod so daljše in drugod krajše.



Slika 22.2 Termometer – merilnik temperature. V bučki s cevko je obarvan alkohol, ki se s porastom temperature razteza. Prikazan je stenski instrument za merjenje temperature zraka. (Weather Station Products)

Tekočinski termometri z dovolj tankimi cevkami omogočajo odčitavanje temperature na $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ natančno. Z njimi izmerimo, da ima zdravo človeško telo temperaturo $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Temperatura zraka v Ljubljani znaša od $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ pozimi do $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ poleti. Temperature v puščavah presegajo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ in na polih padejo pod $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vsak termometer kaže svojo lastno temperaturo. Ko, recimo, vtaknemo hladni termometer v topel merjenec, se temperaturi izravnata: termometer se segreje in merjenec se ohladi. Termometer mora biti tako majhen, da je sprememba merjenja neznatna.

22.4 Plinska enačba stanja

Enačba stanja

Odvisnost med tlakom in prostornino plina (pri stalni temperaturi) $p \propto 1/V$ ter odvisnost med tlakom in temperaturo (pri stalni prostornini) $p \propto T$ združimo v odvisnost $p \propto T/V$. To pomeni, da $pV/T = \text{const} = p_0V_0/T_0$. Upoštevamo še, da je pri stalnem pritisku in temperaturi prostornina plina sorazmerna z njegovo maso $V \propto m$, pa dobimo $pV/T = (m/m_0)p_0V_0/T_0$. Desno stran – količine z indeksom 0 – enkrat za vselej izmerimo in izračunamo ter dobimo za zrak

$$pV = mRT \quad (22.4)$$

s plinsko konstanto $R = 290\text{ J/kgK}$. To je *plinska enačba* za zrak. Povezuje tri količine in pove, da je katerakoli od njih enolično

določena s preostalima dvema. Enačba velja tudi za druge pline, recimo za vodno paro, le da je plinska konstanta zanjo drugačna, 460 J/kgK.

Plinska enačba vsebuje oba plinska zakona – $p \propto 1/V$ in $p \propto T$, saj je bila iz njiju izpeljana. Iz nje pa očitno sledi še tretji plinski zakon, namreč $V \propto T$. Poimenujemo ga *plinski izobarni zakon* (CHARLES). Pravzaprav bi mu morali reči izrek.

Redčenje zraka z
višino

Plinska enačba nadalje pove, kako je gostota plina odvisna od tlaka in temperature: $p = \rho RT$. Ko to odvisnost vstavimo v enačbo za hidrostatični tlak kratkega zračnega stolpca $dp = -\rho dz$ in integriramo po višini, pri čemer predpostavimo, da je temperatura povsod enaka, dobimo

$$p = p_0 \exp \frac{-gz}{RT}. \quad (22.5)$$

Tlak pada z višino eksponentno, prav tako gostota. Na polovico pade pri $z_{1/2} = (RT/g)\ln 2$, kar pri stalni temperaturi 0 °C znese 5,5 km. Z barometrom torej lahko udobno izmerimo višino gore. Ker se temperatura ponavlja z višino spreminja (večinoma pada), upoštevamo njeno srednjo vrednost.

22.5 Raztezni koeficienti

Dolžinski raztezek

Kako bi s številom opisali, koliko se raztegne telo, če ga segrevamo? Kovinska palica dolžine l naj se raztegne za dl , ko jo segrejemo za dT . Dve taki palici, zaporedno sestavljeni, bi se raztegnili dvakrat toliko. Zato pričakujemo pri majhnih spremembah temperature sorazmernost

$$\frac{dl}{l} = \alpha dT. \quad (22.6)$$

S tem je definiran dolžinski razteznostni koeficient α trdnine. Poskus potrди pričakovanje. Za baker, na primer, izmerimo razteznostni koeficient $17 \cdot 10^{-6}/K$. To pomeni, da se 1 m dolga palica, segreta od ledišča do vrelišča vode, raztegne za 1,7 mm. Koeficient je rahlo odvisen od temperature. Ko gradimo mostove iz kovinskih delov, je potrebno paziti na njihovo poletno raztezanje in zimsko krčenje.

Raztezanje kovin izkoristimo za merjenje temperature. Dva trakova iz različnih kovin, ki imata različna razteznostna koeficienta, položimo drugega na drugega in ju zakovčimo skupaj. Ko tak sestavljen trak segrevamo, se ukrivi: ena kovina se pač bolj širi kot druga. Vse skupaj opremimo s kazalcem in dobimo robusten *bimetalni termometer*. Pred uporabo ga umerimo s plinskim ali tekočinskim termometrom.

Prostorninski raztezek

Za prostorninsko raztezanje vseh vrst teles – trdnin, tekočin in plinov – velja podobno:

$$\frac{dV}{V} = \beta dT \quad (22.7)$$

$$\beta = 3\alpha.$$

Prostorninski razteznostni koeficient β določimo s poskusom. Za živo srebro dobimo $0,18 \cdot 10^{-3}/K$ in za alkohol $1,1 \cdot 10^{-3}/K$. Alkoholni termometri so torej precej bolj občutljivi od živosrebrnih. Voda je nekaj posebnega: od ledišča do 4 stopinj se krči, nato pa razširja. To pomeni, da je pri tej temperaturi najgostejša in jo zato najdemo na dnu oceanov. Za pline pa lahko razteznostni koeficient kar izračunamo. Če namreč logaritmujemo in diferenciramo $V \propto T$, ugotovimo $\beta = 1/T$. Razteznostni koeficient plinov je torej hudo odvisen od temperature. Čim višja je temperatura, tem manjši je relativni raztezek plina.

22.6 Notranja energija, delo in toplota

Delo in notranja energija

Pri vrtanju lesa se sveder in les močno segrevata. Še bolj je to opazno pri vrtanju kovin, recimo bronastih topov. Predstavljamo si, da z drgnjenjem povečamo gibanje molekul, in to gibanje se kaže kot temperatura. Bolj nadzorovano raje mešamo vodo z lopatastim kolesom, ki ga poganja padajoča utež. Voda se pri tem segreva.



Slika 22.3 Mešalec za mehanično segrevanje vode, ki ga je uporabljal J. Joule. (Science Museum, London)

Poskus pokaže, da je prirast temperature ΔT v masni enoti m vode sorazmeren z delom $A = F_g h$, ki ga opravi padajoča utež (JOULE):

$$cm\Delta T = F_g h. \quad (22.8)$$

Sorazmernostni koeficient znaša $c = 4,2 \cdot 10^3 J/kgK$ in je približno stalen povsod med lediščem in vreliščem. Skoraj pol tone mora torej pasti za en meter, da se en liter vode segreje za eno stopinjo. Pri mešanju je vseeno, kako delo dovajamo: z lahko utežjo po dolgi poti, ali s težko utežjo po kratki poti, ali celo s spremenljivo utežjo preko ustreznih zaporednih poti. Vodi dovedeno delo A je s proglasom enako prirastu njene *notranje energije* ΔU :

$$\Delta U = A. \quad (22.9)$$

Sprememba tako definirane notranje energije se kaže preko spremembe temperature kot

$$\Delta U = cm\Delta T. \quad (22.10)$$

To pomeni, da je izguba potencialne energije uteži enaka povečanju notranje energije vode. Vsota potencialne in notranje energije sistema se ohranja.

Notranja energija in toplota

Voda v posodi se segreje tudi brez dovajanja dela, če jo le spravimo v stik s toplejšim telesom. Takrat rečemo, da je sprememba notranje energije enaka dovedeni *toploti* Q :

$$\Delta U = Q. \quad (22.11)$$

S tem smo toploto definirali in naredili merljivo preko spremembe notranje energije, ki je sama merljiva preko spremembe temperature. Toploto si predstavljamo kot molekularno delo: medtem ko mehansko delo opravljajo molekule z organiziranim gibanjem, opravljajo molekularnega z mrgolenjem. Za vodo, ki prejema tako delo kot toploto, pa sledi

$$\Delta U = A + Q. \quad (22.12)$$

To je *energijski zakon*. Za praktične potrebe poimenujemo $4,2 \cdot 10^3 \text{ J}$ v 1 *kilokalorijo* (kcal). To je toliko energije, dovedene z delom ali toploto, da segreje 1 kg vode za 1 °C. Tisočkrat manjši enoti pa rečemo *kalorija*.

22.7 Specifična toplota

Mešanje tople in hladne vode

Ko zmešamo dve posodi vode, eno hladno in drugo toplo, se prva segreje in druga ohladi; obe dosežeta isto vmesno temperaturo. Izmerimo jo s termometrom ter ugotovimo, da je povečanje notranje energije pri prvi vodi enako njenemu zmanjšanju pri drugi. Notranja energija, kakor smo jo definirali, se torej ohranja. To je hkrati tudi potrditev, da je vzpostavljena temperaturna skala smiselna.

Toplotni stik

V hladno vodo vržemo vroč kos bakra. Oba dosežeta končno temperaturo. Ugotovimo (BLAKE)

$$c_1 m_1 \Delta T_1 = c_2 m_2 \Delta T_2 \quad (22.13)$$

(indeks 1 se nanaša na vodo in 2 na baker), s čimer je definirana in eksperimentalno določena specifična toplota c_2 bakra. Ta pove, koliko toplote je potrebno, da se masna enota obravnavane snovi segreje za temperaturno enoto. Specifično toploto vode že poznamo od prej. Bakru izmerimo 380 J/kgK in to je precej manj od vode. Visoka specifična toplota vode povzroča, da se morja segrevajo in ohlajajo počasi in ne tako hitro kot kamnita tla. Ob morjih je zato podnebje bolj milo – z manjšimi nihanji temperature zraka – kot v notranjosti kontinentov.

Delo tlaka Doslej je prenos energije z delom in toploto potekal le med telesi, ki se jim pri tem ni znatno spremenila prostornina. Pri plinih je drugače: če niso zaprti v togi posodi, se raztezajo ali stiskajo. Ob tem iz okolice prejemajo ali vanjo oddajajo delo. Naj ima posoda obliko cilindra s premičnim batom preseka S , na katerega deluje z obeh strani sila F . Bat se naj premakne za ds . Tedaj znaša delo pri premiku $dA = F ds$ oziroma $A = \int F ds = \int p S ds = - \int p dV$. Negativni predznak poskrbi, da je delo pozitivno, torej da ga plin prejema, kadar se mu prostornina zmanjša. Steno poljubne deformabilna posode z neelastičnimi stenami si predstavljamo kot množico majhnih batov, zato tudi zanjo velja

$$A_{\text{exp}} = - \int p dV. \quad (22.14)$$

Izmenjava dela z okolico vpliva na zalogo notranje energije plina v posodi. Energijski zakon (22.12) se zato v primeru raztezanja snovi (in če ni drugega dela razen razteznega) zapiše kot

$$\Delta U = A_{\text{exp}} + Q. \quad (22.15)$$

Sprememba notranje energije je enaka do/odvedenemu razteznemu delu in do/odvedeni toploti. Kadar je sprememba prostornine majhna, kot pri vodi ali bakru, je raztežno delo zanemarljivo.

Stalna prostornina Kadar je torej zrak zaprt v togi posodi, recimo bakreni, ni težav. Zrak in posodo skupaj obravnavamo kot neraztezen kos snovi. V mislih ga segrejemo, potopimo v hladno vodo in počakamo, da se temperature izenačijo. Toplota, ki jo oddata zrak in posoda, je enaka toploti, ki jo prejme voda. Ker poznamo specifični toploti vode in bakra, lahko izračunamo toploto, ki jo je oddal zrak, Q . Ta toplota je šla iz zaloge njegove notranje energije:

$$\Delta U = Q = mc_V \Delta T. \quad (22.16)$$

S tem je določena specifična toplota zraka pri stalni prostornini, c_V . Ta pove, koliko toplote je potrebno do/odvesti masni enoti zraka, da se, zaprt v togi posodi, segreje/ohladi za temperaturno enoto. Žal pa je pri dejanskem poskusu masa vročega zraka tako majhna (~ 1 gram) v primerjavi z maso posode, da ne moremo zanesljivo določiti toplote, ki jo je zrak oddal, in zato tudi ne njegove vrednosti c_V .

Stalni tlak Podobno obravnavamo vroč zrak v posodi, katere bat je pod stalnim zunanjim tlakom. Sedaj zrak – tako razmišljamo – pri ohladitvi odda okolici toploto Q , kar gre iz zaloge njegove notranje energije, ki pa se hkrati poveča z dovedenim delom, saj se zrak pri ohlajanju stisne. Ugotovimo

$$\Delta U + p \Delta V = Q = mc_p \Delta T. \quad (22.17)$$

S tem je definirana specifična toplota zraka pri stalnem tlaku, c_p . Ta pove, koliko toplote je treba do/odvesti, da se masna enota zraka, zaprtega v raztezni posodi pod zunanjim tlakom,

segreje/ohladi za temperaturno enoto. Žal tudi c_p ne moremo zanesljivo izmeriti zaradi premajhne mase zraka.

Ker $p\Delta V = mR\Delta T$, je notranja energija zraka odvisna zgolj od temperature $\Delta U = m(c_p - R)\Delta T$ in velja

$$c_p - c_V = R. \quad (22.18)$$

22.8 Stiskanje in raztezanje plina

Izotermno stiskanje

Ob povečanju ali zmanjšanju zunanje tlaka se zrak stisne ali razpne. Pri počasnem stiskanju v neizolirani posodi se temperatura ne spreminja, zato pričakujemo, da se ne spreminja niti notranja energija. Vse dovedeno delo se sproti odda v okolico kot toplota. Rečemo, da je to *izotermno* stiskanje. Kolikšno pa je opravljeno delo $A = -\int p dV$? Tlak med stiskanjem ni stalen, ampak velja $pV = p_0 V_0$. Ko to upoštevamo, dobimo z integriranjem $A = p_0 V_0 \ln(V/V_0)$. Stiskanje 1 litra zraka za faktor 10 torej proizvede 230 J toplote. S potrebnimi spremembami velja vse povedano tudi pri izotermnem raztezanju.

Adiabatno stiskanje

Če stiskamo zrak v dobro izolirani posodi, se v okolico ne oddaja nič toplote in se vse delo naloži v notranjo energijo. Rečemo, da je to *adiabatno* stiskanje: $pdV = mc_V dT$. Tlak izrazimo z enačbo stanja, nakar v dobljeni diferencialni enačbi ločimo spremenljivke ter integriramo:

$$TV^{\kappa-1} = \text{const} \quad (22.19)$$

$$\kappa = \frac{c_p}{c_V}.$$

Kot vemo, količin c_p in c_V še ne poznamo, zato κ ne moremo izračunati. Lahko ga pa izmerimo iz strmine grafa $\lg(T/T_0) = -(\kappa - 1) \lg(V/V_0)$. Za zrak dobimo $\kappa = 1,4$. Stisk na 1/10 prostornine ga segreje od 0 na 250 °C. Razteg na dvojno prostornino pa ga ohladi od 20 °C na -50 °C. In kolikšno je delo pri stiskanju? Tolikšno, kot je povečanje notranje energije: $A = mc_V(T - T_0)$. Pri omenjenem stisku 1 litra torej 230 J.

Iz enačb $\kappa = c_p/c_V$ in $c_p - c_V = R$, v katerih poznamo κ in R , zlahka izračunamo c_p in c_V . Za zrak dobimo $c_V = 720 \text{ J/kgK}$ in $c_p = 1010 \text{ J/kgK}$. Druga vrednost je večja od prve, saj je treba zraku dovesti več toplote, da ga segrejemo za 1 stopinjo, če se pri tem razteza in del dovedene toplote zapravlja za opravljanje dela.

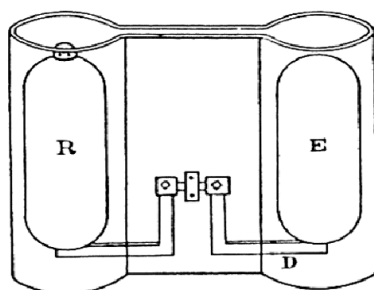
Adiabatna stisljivost

Stisljivostni modul plina K smo svoj čas [20.4] definirali z enačbo $dp = KdV/V$ in ga izračunali za izotermno stiskanje: $K = p$. Zdaj ga lahko izračunamo še za adiabatno stiskanje. Ugotovitev $TV^{\kappa-1} = \text{const}$ z uporabo enačbe stanja preoblikujemo v obliko $pV^{\kappa} = \text{const}$, logaritmujemo in diferenciramo, pa dobimo $K = \kappa p$. Adiabatni stisljivostni modul je torej za faktor 1,4 večji od izotermnega. S tem je pojasnjen tudi empirični koeficient v enačbi za hitrost zvoka (21.10). Slednjo lahko zdaj z uporabo

enačbe stanja poenostavimo v obliko $c^2 = \kappa RT$. Hitrost zvoka je torej odvisna le od temperature.

Prosto razpenjanje

Zrak, stisnjen v posodi, lahko iz nje izpustimo skozi zaklopko v drugo, prazno posodo. Obe posodi skupaj obravnavamo kot en sam, toplotno izoliran sistem. Pri odprtju zaklopke se zrak sicer razširi; ker pa sta posodi togi, ne izmenjuje dela z okolico. Zato se notranja energija zraka ne spremeni. Pričakujemo, da se zato ne spremeni niti temperatura. Meritve to potrdijo, in sicer za ne preveč stisnjene pline do okrog 1 bara. Natančne meritve bolj stisnjenih plinov pa povedo, da se skoraj vsi plini (pri sobni temperaturi) ohladijo. Izjema sta helij in vodik, ki se segrejeta. Odkrijemo tudi, da za vsak plin obstaja določena *inverzijska temperatura*, pod katero se ohlajajo in nad katero se segrevajo. Ker je notranja energija sestavljena iz kinetičnih in potencialnih energij molekul, sklepamo, da ohlajanje pomeni pretvorbo kinetične v potencialno energijo, segrevanje pa obratno.



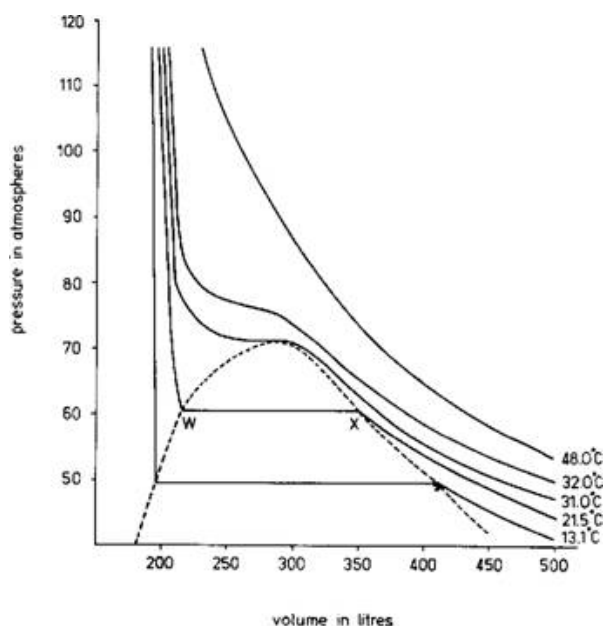
Slika 22.4 Prosto razpenjanje plina. Pod določeno temperaturo se plin ohlaja, nad njo segreva. (Joule, 1852)

Namesto zaklopke med dvema posodama lahko uporabimo tudi porozen čep, plin pa se pretaka skozenj zaradi razlike v tlakih na obeh straneh. Pri izbrani temperaturi je sprememba temperature sorazmerna z razliko pritiskov. Sorazmernostni koeficient je odvisen od temperature. Ogljikov oksid, na primer, se pri sobni temperaturi ohlaja za 1 K/bar.

22.9 Utekočinjanje plina

Utekočinjanje plina

Pri sobni temperaturi izotermno stiskajmo ogljikov oksid! Tlak plina se večja. Ko doseže nasičeno vrednost, se začne kondenzirati v tekočino. Tlak se ne spreminja, dokler se ne utekočini ves plin. Pri utekočinjanju se sprošča toplota, ki odteka v okolico. Podobno utekočinimo tudi klor. Nikakor pa pri sobni temperaturi ne moremo s stiskanjem utekočiniti zraka. Morda bi lahko to storili pri nižji zunanji temperaturi? Morda je sploh tako, da lahko plin s stiskanjem utekočinimo le pri temperaturi, ki je manjša od neke *kritične temperature*, značilne za vsak plin posebej?



Slika 22.5 Kritična izoterma ogljikovega oksida in nekaj sosednjih izoterm. (Andrews, 1869)

Kritična temperatura

Domnevo preverimo kar na ogljikovem oksidu. Res je: ko ga stiskamo pri temperaturah nad 31 °C, se noče več utekočiniti, ampak postaja le čedalje bolj gost. To je njegova kritična temperatura. Tlak, ki je potreben za kondenzacijo plina tik pod kritično temperaturo, poimenujemo kritični tlak. Za ogljikov oksid znaša 73 bar. Za klor sta merodajni vrednosti 144 °C in 76 bar, za vodno paro pa 374 °C in 217 bar. Kritično temperaturo in ustrezni tlak poimenujemo skupaj *kritično stanje*. V tem stanju postane površinska napetost enaka nič.

22.10 Talilna, izparilna in sežigna toplota

Taljenje ledu

Kako pa je s toploto pri faznih spremembah snovi? Vemo, da led za taljenje potrebuje dovod toplote, vendar se mu pri tem temperatura nič ne spreminja. V vrelo vodo vržemo kos ledu z maso m , ko se je ravno začel taliti, in počakamo, da se stali ter da dobi vsa voda isto temperaturo. Iz toplotne bilance ugotovimo, da je za taljenje potrebna toplota

$$Q = q_t m, \quad (22.20)$$

s čimer je definirana *talilna toplota* ledu q_t ; ta znaša $330 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$. Kilogram ledu potrebuje torej za stalitev toliko toplote, kot je potrebno za segretje kilograma vode za 80 °C. Ko enkrat to toploto poznamo, lahko taljenje ledu uporabimo za merjenje dovedene toplote.



Slika 22.6 Kalorimeter – merilnik toplote. Prikazan je prvi kalorimeter na led, ki ga je uporabljal A. Lavoisier. (Musee des Arts et Metiers, Pariz)

Srečo imamo, da je talilna toplota ledu tako velika. Če bi bila recimo desetkrat manjša, bi vsako pomlad, ko se tali sneg, doživeli hude poplave.

Vretje vode Podobno je pri izparevanju vode, segrete do vrelišča. Pokrit lonec vode pri sobni temperaturi začnemo segrevati s plinskim gorilnikom. Iz porasta temperature določimo, kolikšen je dotok toplote na časovno enoto. Ko začne voda vreti, pokrov odstranimo. Privzamemo, da ostaja dovod toplote nespremenjen in s tehtnico izmerimo, za koliko se zmanjša masa lonca z vodo v časovni enoti, to je, kolikšna je masa m izparele vode. Dobimo

$$Q = q_i m. \quad (22.21)$$

S tem je definirana *izparilna toplota* vode q_i ; znaša $2,3 \cdot 10^6$ J/kg. Za izparitev kilograma vode pri vrelišču je torej potrebno 8-krat toliko toplote kot za stalitev kilograma ledu pri ledišču. Meritev je dokaj nenatančna.

Voda ne izpareva le pri vrelišču, ampak izhlapeva tudi pri nižjih temperaturah. Tudi za to je potrebna izparilna toplota, ki je skoraj neodvisna od temperature. Zaradi izhlapevanja se voda in njena okolica ohlajata. Z mokrim blagom ovita čutara vode ostaja zato hladna. Prebivalci vročih in suhih krajev pa shranjujejo vodo v poroznih glinenih vrčih. Ko pridemo mokri iz vode, nas zebe. In ko je vroče, nas hladi izhlapevajoč znoj. Izhlapela para je očem nevidna, tako kot zrak. Tisto, kar se pri vretju dviga iz lonca, so drobne kapljice, v katere se je para kondenzirala ob ohlajanju.

Sežiganje goriv Toploto pridobivamo s sežiganjem goriv. Nastala toplota je sorazmerna z maso goriva:

$$Q = q_s m. \quad (22.22)$$

Sorazmernostni koeficient poimenujemo *sežigna toplota*. V njej je všteta tudi izparilna toplota pri gorenju nastale vode, tipično okrog 10 %. Pri kurjenju ta del toplote seveda izgubimo. Sežigna toplota za suh les znaša 4000 kcal/kg, za črni premog 8000 kcal/kg in za bencin 10 000 kcal/kg. V kilogramu goriva nakopičena toplotna energija je zelo velika. Za skoraj vsako gorivo je večja od potencialne težne energije enake množine snovi na višini 1000 km!

V naših telesih neprestano gori hrana. Sladkor, škrob in beljakovine dajejo po 4 kcal/g, olje in mast pa po 9 kcal/g. Na dan potrebuje sedeč človek okrog 2500 kcal, pri zelo težkem delu, recimo pri podiranju drevja, pa dvakrat toliko.

22.11 Parni tlak tekočin

Meritev parnega tlaka

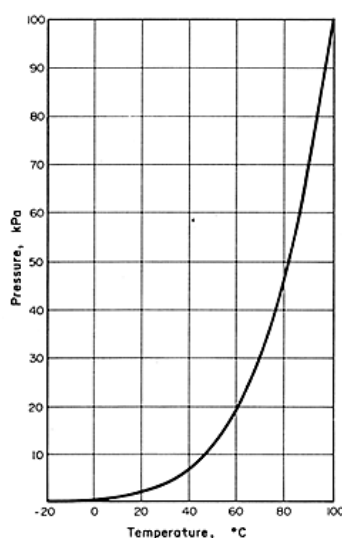
Nad vodno gladino je v zraku zmeraj nekaj vodne pare. Ko v odprti posodi segrejemo vodo do vrelišča, nastajajoča para odpihne zrak in nad gladino preostane le para. Ta je pod tlakom zunanjega zraka, torej 1 bar. Posodo zapremo, da zrak ne more več vanjo, in jo počasi ohlajamo. Sproti merimo temperaturo in tlak. S padanjem temperature pada tudi tlak. Očitno se para sproti kondenzira v vodo. Nato merimo obe količini pri segrevanju: tlak raste, para nastaja. Odvisnost med temperaturo in tlakom je enolična: dani temperaturi T ustreza natanko en tlak p_s ; količina pare nad gladino je omejena. Rečemo, da je takrat para *nasičena*. Pridruženi temperaturi pa rečemo *rosišče*.

Enačba parnega tlaka

Iz meritev ugotovimo, da je $\ln(p_s/p_0)$ sorazmeren z $1/T$, določimo nagib premice ter ga poskušamo izraziti z že znanimi količinami. Vemo, da mora imeti sorazmernostni koeficient enoto K (kelvin) in da prideta v poštev izparilna toplota q_i ter plinska konstanta R za vodo. Pravo dimenzijo ima njun kvocient. Ko ga izračunamo, vidimo, da ima tudi pravo številčno vrednost. Dobimo povezavo (CLAUSIUS)

$$p_s = p_0 \exp \frac{q_i}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right). \quad (22.23)$$

Konstanti T_0 in p_0 znašata 373 K in 1 bar. Vodo v zaprti posodi lahko segrevamo preko 100 °C. Pri 200 °C naraste tlak na 15 bar.



Slika 22.7 Nasičeni parni tlak vode. Izračunan. Tlak je podan v "kilopascalih": 1 kilopascal znaša 10^{-2} bar. Pri 100 °C znaša tlak 1 bar in pri 0 °C pade na 6 milibarov. (Institute for Food Science, New Zealand)

Vrelišče in tlak

Odvisnost nasičenega parnega tlaka od temperature, pogledana z nasprotni strani, pomeni odvisnost vrelišča od zunanjega tlaka. Ko v odprti posodi segrevamo vodo, ta navadno zavre pri 100 °C,

saj je zunanji tlak navadno 1 bar. Če bi kuhali na visoki gori, kjer je tlak manjši, bi pa voda vrela pri nižji temperaturi. Kuhanje v odprti posodi ne bi bilo več učinkovito. Gorniki zato kuhajo v zaprtih posodah z ventilom za uravnavanje tlaka. Seveda velja vse povedano tudi za druge snovi, ne le za vodo.

Gorniške izkušnje pokažejo novo, presenetljivo uporabo kuhanja. Na vrhu gore segrevamo vodo v odprtem loncu. Ko voda zavre, je njen parni tlak enak zračnemu tlaku. Izmerimo temperaturo in iz nje izračunamo ustrezeni tlak (22.23). Potem pa iz povezave med zračnim tlakom in višino (22.5) določimo višino gore. Tako gore ni treba meriti z barometrom, ampak za to uporabimo kar termometer!

22.12 Vlažni zrak

Mešanica plinov

V okolju s stalno temperaturo imejmo dve enako veliki togi posodi; v prvi naj bo zaprt dušik pri tlaku p_1 in v drugi kisik pri tlaku p_2 . Povežimo posodi z ventilom ter z batom izotermno potisnimo vsebino druge posode v prvo (ali prve v drugo). Priključeni manometer pokaže, da se je tlak povečal na

$$p = p_1 + p_2. \quad (22.24)$$

To pomeni, da vsak plin v mešanici izvaja enak tlak, kot bi ga, če drugih plinov ne bi bilo, skupni tlak pa je enak vsoti *delnih tlakov* (DALTON). Vsak plin zase in vsi plini skupaj se pokoravajo ustreznim enačbam stanja.

Vlažnost zraka

Povedano velja tudi za vodno paro v zraku. Koliko je je, bomo opisali z gostoto $\rho_v = m_v/V$ in rekli, da je to *absolutna vlaga*. Aktualna gostota pare je manjša ali kvečjemu enaka nasičeni; tvorimo njuno razmerje in dobimo *relativno vlago*:

$$f = \frac{\rho_v}{\rho_{vs}} = \frac{p_v}{p_{vs}}. \quad (22.25)$$

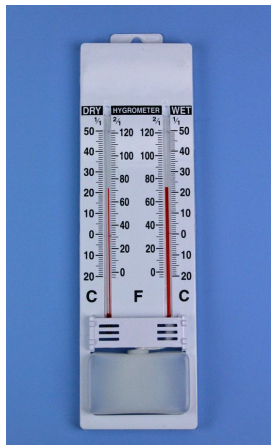
Podajali jo bomo v odstotkih med 0 in 100 %. Masi pare na masno enoto vlažnega zraka pa bomo rekli *specifična vlaga*:

$$r = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{R}{R_v} \frac{p_v}{p}. \quad (22.26)$$

Psihrometer

Kako naj vlago izmerimo? Merjeni zrak naj ima neznano specifično vlago r in znano (izmerjeno) temperaturo T . S primernim ventilatorjem ga potiskajmo skozi vlažno krpo, kjer postane nasičeno vlažen, r_s . Iz krpe izhlapi ustrezna količina vode. Za to potrebna izparilna toplota ohladi zrak na T' . To temperaturo izmerimo s termometrom, vtaknjnim v krpo (pravzaprav je krpa ovita okrog bučke termometra). Vse poteka pri stalnem tlaku. Velja $q_i \cdot (r_s(T') - r) = c_p \cdot (T - T')$, iz česar izračunamo r , saj so vse druge količine poznane. Za merjenje

vlage sta torej potrebna dva termometra – suhi in mokri – ter ventilator. Celotno sestavo imenujemo *psihrometer*.



Slika 22.8 Psihrometer – merilnik vlage v zraku. Sestavljen je iz dveh termometrov. Bučka desnega je ovita z mokro krpo. Temperaturna skala je podana v stopinjah Celzija in v stopinjah Fahrenheita. (Avogadro's Lab Supply)

Higrometer

Merjenje s psihrometrom je okorno. K sreči odkrijemo, da se človeški lasje raztezajo, če se vlaga v zraku večja, in krčijo, če se manjša. Pramen las napnemo na okvir, ga opremimo s kazalcem ter dobimo *higrometer*, ki kaže relativno vlago. Umerimo ga s psihrometrom.

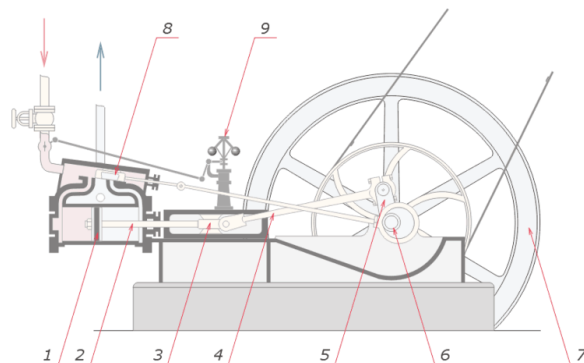
Meritve zraka v Ljubljani pokažejo, da znaša relativna vlaga ob dveh popoldne, ko je navadno najbolj vroče, okrog 60 %, poleti četrtno manj in pozimi četrtno več. Zjutraj in zvečer je ustrezno večja. Kadar dežuje, pa znaša, pričakovano, 100 %. Ko je vroče, je bolje, če je relativna vlaga nizka, saj je tedaj izhlapevanje znoja močnejše in hlajenje učinkovitejše.

22.13 Parni stroj

Ko kuhamo vodo v loncu, nastajajoča para s svojim tlakom privzdiguje pokrov. To nas navede na misel, da bi silo pare izkoristili za opravljanje dela.

Način delovanja

Osnovna zamisel za željeni *parni stroj* je naslednja (WATT). Paro proizvajamo v kotlu z vodo, pod katerim kurimo, in jo po cevi, parovodu, vodimo iz njega. Zraven kotla stoji vodoraven valj s premičnim batom. Valj ima na vsaki strani zaklopko. Vsaka zaklopka ima dva položaja: v enem je povezana s parovodom in v drugem z odvodno cevjo. Ko je bat v skrajno desni legi, se desna zaklopka poveže s parovodom in leva z odvodno cevjo. Dotekajoča stisnjena para porine bat v levo. Ko je bat v skrajno levi legi, pa se leva zaklopka poveže s parovodom in desna z izpušno cevjo. Bat porine v desno. To se ponavlja. Gibanje bata se preko križnega drsnika prenaša na gonilno kolo. Os tega kolesa premika povratni drog, ki krmili obe zaklopki, da se pravilno preklapljata. To je povratna zveza: bat krmili sam sebe. Raztegnjena in ohlajena para potuje po odvodni cevi skozi dimnik na prostost. Lahko pa teče v hlajeno posodo, kjer se kondenzira, črpalka (ki jo poganja gonilno kolo) pa prečrpa nastalo vodo nazaj v kotel.



Slika 22.9 Parni stroj. 1 = bat. 3 = križni drsnik. 7 = vztrajnik. 8 = premična zaklopka. 9 = centrifugalni regulator. (Anon)

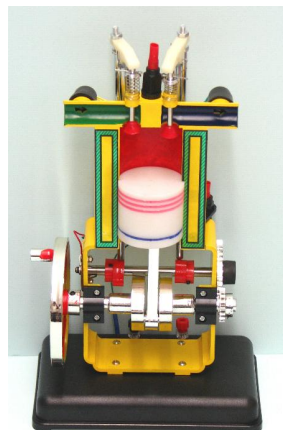
Pomembne podrobnosti	Za dobro delovanje stroja je potrebnih precej domiselnih podrobnosti. — Toploto goriva bolje ujamemo tako, da vroče pline iz kurišča vodimo po razvejanih ceveh skozi kotel in nato v dimnik. — Da para ne raznese kotla, ga opremimo z varnostnim ventilom. — Hitrost delovanja nastavljamo s centrifugalnim regulatorjem: gonilno kolo vrti dvojico uteži na visečih ročicah okrog navpične osi, njun dvig zaradi centrifugalne sile pa preko vzvodov uravnava pretok pare. — Gonilno kolo mora biti težko, da deluje kot vztrajnik; tedaj premaguje mrtve točka bata in zagotavlja, da se ta giblje čim bolj enakomerno. — Zaradi gibanja bata se premika težišče stroja sem in tja; izničimo ga z ustrezno utežjo na robu vztrajnika. — Večjo moč dosežemo z zaporedno vezavo več valjev (odvodna cev prvega valja postane vhodna cev drugega, večjega) ali z njihovo vzporedno vezavo na isto os.
Področja uporabe	Parni stroj prinese revolucijo v industrijo in promet. V rudnikih poganja vodne črpalke in v tovarnah tekstilne stroje. Ni več potrebno, da gradimo tovarne ob rekah. Postavimo stroj na ladjo in dobimo parnik na lopatasto kolo ali na vijak! Ni se več potrebno zanašati na gonilno silo vetra. Postavimo stroj na voz na tirih in dobimo parni vlak! Parnik in vlak zmanjšata svet. Za pogon vozov po cestah pa je stroj preneroden in pretežek.
Moč in izkoristek	Tipičen stroj poganja para s tlakom 10 barov. Kotel kurimo s premogom. Stroji oddajajo moč med 10 HP (traktor), 10^3 HP (lokomotiva) in 10^4 HP (čezooceanski parniki). Razmerje med oddanim delom in sežgano toploto - <i>izkoristek</i> - je majhen, pod 10 %. In vsi stroji so zelo težki: razvijajo moč okrog 10 HP na tono. Moč stroja merimo neposredno z dviganjem bremena. Bolj preprosto pa je, če na os natakne obroč in ga tesno stisnemo. Obroč se podaljšuje v ročico, na katero obesimo primerno utež. To je <i>navorni jarem</i>. Ko se os stroja zavrti, se ročica postavi v neko lego, ki je odvisna od tega, kako krepko je obroč stisnjen. Pri enakomernem vrtenju osi je vsota navorov nanjo enaka nič;

navor stroja je torej enak navoru sile trenja, ki pa je enak navoru uteži. S tem je sila stroja določena. Če izmerimo še frekvenco vrtenja osi, poznamo tudi njeno obodno hitrost in s tem moč stroja, saj $P = A/t = Fs/t = Fv$.

22.14 Eksplozijski motor

Namesto da bat potiska vodna para, bi to lahko opravil segret in napet zrak. Pravzaprav ni treba, da bi zrak segrevali zunaj delovnega valja, ampak lahko to naredimo kar znotraj, in sicer tako, da mu primešamo primerno tekoče gorivo, ter ga zažgemo. Izgorele pline pa spustimo kar na prosto. To je vodilna zamisel za *eksplozijski motor*.

Opis delovanja Domišljen eksplozijski motor s kompresijskim vžigom deluje takole (DIESEL). — Navpični delovni valj z batom ima na vrhu dve zaklopki in šobo za vbrizg plinskega olja [11.6]. Ena zaklopka ureja dotok svežega zraka in druga odtok izgorelih plinov. Gibanje bata poteka v naslednjih taktih. — Ko je bat na vrhu, se dotok odpre in iztok zapre. Pri gibanju navzdol bat vsesava sveži zrak. — Ko bat doseže dno, se dotok zapre. Pri dviganju bat stisne zrak na majhen del prvotne prostornine, tipično na 1/15. Zrak se zato močno segreje. — Šoba vbrizga nekaj kapljic goriva, ki se takoj vžge. Nastali plini potisnejo bat navzdol. — Ko bat doseže dno, se odpre odtok. Dvigajoči bat iztisne izgorele pline. Nato se postopek ponovi. Kako se zaklopke odpirajo in kdaj šoba brizga, določa vrtilna gred preko povratnih vzvodov. Kritični del stroja je črpalka, ki mora skozi šobo pod velikim tlakom in v kratkem hipu izbrizgati natančno količino goriva. Motorja ne moremo zagnati z roko, ker je ciljni tlak prevelik, ampak uporabimo predhodno stisnjen zrak.



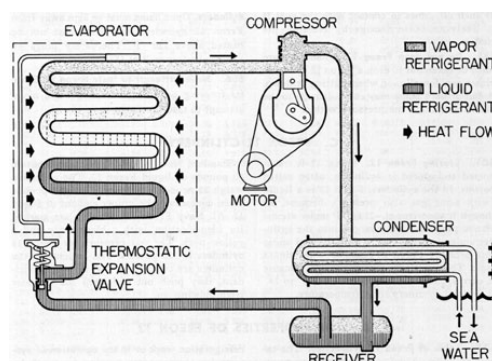
Slika 22.10 Model eksplozijskega motorja. (Lab Connections)

Opisani motor, recimo mu kar naftni, ima izkoristek 50 % in 10-krat boljše razmerje med močjo in težo kot parni stroj. V tekmovalno naravnem svetu zato slednjega popolnoma izrine. Izkaže se, da je primeren tudi za pogon vozil po cestah,

avtomobilov. S tem vzpodbudi silovit razmah avtomobilske in naftne industrije.

22.15 Hladilni stroj

Če prenehamo kuriti pod kotlom parnega stroja, bo ta še nekaj časa deloval, potem pa se bo ustavil. Pa poganjajmo bat naprej z zunanjo silo! Potem bo bat srkal paro iz kotla, voda v kotlu bo izhlapevala in se zato hladila. Posrkano paro bo bat tlačil naprej v kondenzator, kjer se bo delno utekočinila. Prej ali slej bo voda v kotlu postala hladnejša od tiste v kondenzatorju. Stroj bo torej z dovajanim delom črpal toploto iz hladnega v toplo področje. To je osnovna zamisel za *hladilni stroj*.



Slika 22.11 Hladilnik na izparevanje amoniaka. (Navpers, 1945)

Opis delovanja

Praktični hladilni stroj (LINDE) uporablja amoniak, ki ima pri tlaku 1 bar vrelišče $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, hitreje izhlapeva ter močnejše hladi od vode. Primeren je tudi ogljikov oksid. Notranjost hladilne komore je obdana s cevjo, v katero curlja tekoči amoniak, izhlapeva in hladi vsebino komore. To je izparilnik. Amoniakove pare srka kompresor (ki ga vrti naftni motor) in jih stiska v kondenzator na zunanji strani komore. Tam se pare kondenzirajo, nastala toplota pa oddaja v okolico. Izhodna cev iz kondenzatorja je opremljena s šobo, ki spušča tekoči amoniak naprej v izparilnik. Na vhodni strani šobe je tlak visok in na izhodni je nizek. S tem je krogotok sklenjen. Pretok skozi šobo uravnava zaporna igla, ki jo krmili batni plinski termoskop v komori. Takšni hladilniki zlahka dosežajo temperature do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. V njih shranjujemo hrano in delamo led.

Nizke temperature

Kako bi ohladili zrak še bolj? Morda celo pod njegovo kritično temperaturo, ko ga s stiskanjem lahko utekočinimo? Pomaga nam prosto razpenjanje: zrak zapovrstjo stiskamo, ohlajamo in prosto razpenjamo; pri tem že ohlajeni zrak hladi dotekajočega. Za stiskanje uporabimo zračni kompresor, ki ga vrti naftni motor. Po več ponovitvah dosežemo kritično temperaturo in tlak za kisik ($-130\text{ }^{\circ}\text{C}$, 51 bar) ter ga utekočinimo. Postopek lahko peljemo naprej in utekočinimo še dušik.

22.16 Konvekcija

Dimnik Ko kurimo, ogenj segreva zrak; ta se – pomešan z izgorelimi plini in dimom – razpenja, njegova gostota se zmanjša in zaradi vzgona se začne dvigati. Dim je moteč, zato so se ga ljudje že zdavnaj naučili odvajati po cevi – iznašli so dimnik. Pri tem so odkrili, da tak dimnik "vleče", to je, da ogenj pod njim močnejše gori. Podobno je pri svetilki na petrolej, ki bolje sveti, če jo obdamo s steklenim valjem. Kako si to razložimo?

Zrak v dimniku višine h naj ima temperaturo T' in gostoto ρ' , zunanji zrak pa T in ρ . Na vrhu dimnika je notranji tlak enak zunanjemu. Notranji tlak se do tal poveča za $\rho'gh$ in zunanji za ρgh . Razlika teh dveh tlakov potiska zrak v dimnik in je enaka gostoti kinetične energije, ki jo zrak pridobi. S tem je določena tudi hitrost dotekanja in s presekom dimnika S še prostorninski tok: $\Phi_V = Sv(2gh\Delta T/T)$. Višji in bolj vroč dimnik bolj vleče.

Nevihetni oblak Poleti čez dan Sonce močno segreje nekatere zemeljske površine, recimo južna pobočja gora. Zrak nad njimi se ogreje bolj kot zrak v okolici, se zredči in zaradi vzgona začne dvigati. Pri tem se razteza, ker prihaja v območja čedalje nižjega tlaka, in zaradi tega tudi adiabatno ohlaja. Nastane navzgor usmerjen tok zraka, vzgornik. Razredčino, ki nastaja pri tleh, pa sproti zapolnjuje spuščajoči se okolišnji zrak. To je *ozračna konvekcija*.

Kako se ohlaja dvigajoči se zrak? — Energijski zakon (22.15) pove $dQ = mc_VdT + pdV$. Plinsko enačbo (22.4) diferenciramo in dobimo $pdV + Vdp = mRT$. Izraz pdV iz druge enačbe vstavimo v prvo enačbo, upoštevamo povezavo (22.18) $c_p - c_V = R$, delimo z maso ter dobimo energijski zakon v "meteorološki" obliki

$dq = c_p dT - dp/\rho$. Hidrostatična enačba (10.2) se z diferenciali zapiše kot $dp = -g\rho dz$. Izraz za dp vstavimo v energijsko enačbo, postavimo še $dq = 0$ in dobimo

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{g}{c_p}. \quad (22.27)$$

Številčno to znaša 10 K/km.

Na višini, kjer se vzgornik dovolj ohladi, se začne vodna para v njem zgoščevati v oblačne kapljice. Nastane kopast oblak, *kumululus*. Kapljice so zelo drobne in tok jih nosi s seboj. Pri kondenzaciji se sprošča toplota in vzgornik se zato z višino ohlaja počasneje, kot bi se sicer. Para je tako rekoč gorivo, ki ga poganja. Oblak raste vse dotlej, dokler je njegova temperatura višja od temperature okolice. V "ugodnih" razmerah zraste preko 10 km višine in se ohladi pod -50°C . To je nevihtni oblak, *kumulonimbus*. Kapljice v njem rastejo zaradi kondenzacije pare in trkov ter zmrzujejo. Ko padavinski delci postanejo dovolj težki, jih vzgornik ne more več prenašati in izpadejo kot dež ali toča.



Slika 22.12 Nevihtni oblak. (Anon)

Ozračna konvekcija meša prizemno plast zraka, prenaša toploto in ustvarja navpični profil temperature. V povprečnem ozračju na zmernih zemljepisnih širinah pada temperatura z nadmorsko višino od 15°C (0 km) do -50°C (10 km), to je z gradientom $6,5^{\circ}\text{C/km}$, nakar se ustali. Profil izmerimo s termometrom in z barometriškim višinomerom na dvigajočem se balonu.

22.17 Toplotni vetrovi

Toplotni vetrovi

Podnevi se kopno znatno segreje, morje pač ne. Nad kopnim se zato razvije konvekcija, ki jo pri tleh zapolnjuje okolišnji zrak: z morja na kopno začne pihati morski veter, ki ga cenijo dopustniki in jadralci. Ponoči se pa kopno ohladi močnejše kot morje in pihati začne kopni veter.

Isti pojav opazimo tudi pri večjih razmerah. Poleti se kopenska Sibirija segreje in iz Indijskega oceana začne proti njej preko indijske podceline pihati topel, z vlago nasičen morski veter, vlažni monsun. Ta zadene ob gorsko pregrado Himalaje, se ob njej prisilno dviga, ohlaja in s padavinami napaja velike reke. Pozimi pa se Sibirija ohladi in iz nje začne proti Indijskemu oceanu pihati kopenski veter, suhi monsun.

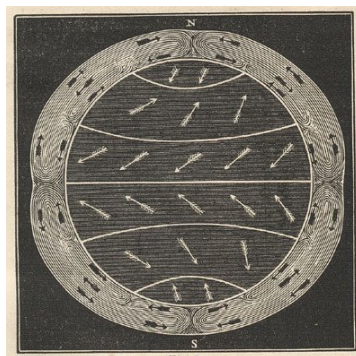
Planetarni vetrovi

Ob ekvatorju je konvekcija posebno močna in obsežna. Pri tleh bi jo morali zapolnjevati vetrovi s severa in juga, v višinah pa bi se zrak moral raztekati proti obema poloma. Vendar se zaradi vrtenja Zemlje in s tem povezane odklonske sile na severni polobli vetrovi obračajo v desno in na južni v levo. Zemlja je tako velika in se tako hitro vrti, da prizemni vetrovi ne morejo priti prav od daleč, preden se obrnejo povsem proti zahodu. Pridejo lahko le iz zemljepisne širine 30° . Na severni strani ekvatorja zato nastane prizemni pas severovzhodnih vetrov, pasatov, ki so ugodni za potovanje trgovskih jadrnic proti zahodu. V višinah pa pihajo jugozahodni vetrovi. Na južni strani ekvatorja so razmere zrcalno simetrične. Ko višinski vetrovi dosežejo širino 30° , se spuščajo, da zapolnijo prostor, ki ga praznijo pasati. Tako je krog sklenjen. Spuščajoči zrak se stiska, segreva in relativna vlažnost se mu manjša. Tako ustvarja pas puščav.

Razmere na polih so obratne. Glejmo le severni pol. Tam je površina hladna, zrak nad njo se hladi, spušča in razliva proti ekvatorju. Zaradi odklonske sile se usmerja proti zahodu in do širine 60° ustvari prizemni pas severovzhodnih vetrov. Tam se začne zrak dvigati, da zapolni praznino, ki jo ustvarjajo višinski jugozahodni vetrovi. Dvigajoči zrak se razteza, ohlaja in relativna

vlaga se mu viša. Tako ustvarja pas oblačnega vremena. Razmere na južni polobli so zrcalno simetrične.

Med obema velikima konvektivnima celicama – ekvatorsko in polarno – pihajo pretežno zahodni vetrovi, tako nižinski kot višinski, in pri tem valovijo proti severu in jugu ter tako prenašajo toploto v poldnevniški smeri. To je pas spremenljivega vremena. Uporabljajo ga trgovske jadrnice za potovanja proti vzhodu.



Slika 22.13 Planetarni vetrovi. Povzročata jih Sončevo segrevanje in vrtenje Zemlje. Prikazano je gibanje zraka v tlorisu in v navpičnem prerezu. (Ferrel, 1860)

Ozračje je torej ogromen toplotni stroj, ki ga poganja sončno segrevanje, njegove gibljive dele – vetrove – pa urejata vrtenje Zemlje in fazne spremembe vode. Ko vetrovi pihajo nad oceani, v njih ustvarjajo morske tokove. Gibanje tokov se dobro ujema z gibanjem vetrov. Ujemanje pa ni popolno, ker lahko vetrovi nemoteno pihajo okrog Zemlje, tokove pa zaustavljajo celinske pregrade.

22.18 Toplotni tok

Toplotni tok Kakršnekoli že toplotne spremembe doživlja sistem, vse so povezane s toplotnimi tokovi skozi njegovo površino. Če je okolica bolj topla kot sistem, potuje notranja energija okolice, kot toplota, navznoter in obratno. Predstavljamo si, da bolj "vroče" molekule, ki se hitreje gibljejo, prenašajo svoje gibanje manj vročim, počasnejšim. Čim več toplote je dovedeno opazovanemu sistemu na časovno enoto, tem večji je *toplotni tok* vanj; definiramo ga kot

$$P = \frac{Q}{t}. \quad (22.28)$$

Gostota toka Ko tok preračunamo na pravokotno postavljeno ploskovno enoto, dobimo *gostoto (toplotnega) toka*:

$$j = \frac{P}{S}. \quad (22.29)$$

Toplotna prevodnost Bolj ko je mrzlo, debelejšo obleko nosimo, da nas ne zebe. Očitno je tok toplote od toplega k mrzlemu telesu skozi vmesno pregrado odvisen od njune temperaturne razlike ΔT in od debeline l pregrade, pa tudi od snovi, iz katere je narejena. Ustrezni poskusi potrdijo, da velja:

$$j = \lambda \frac{\Delta T}{l}. \quad (22.30)$$

Sorazmernostni koeficient je odvisen od vrste snovi; poimenujemo ga *toplotna prevodnost*. Določimo ga s poskusom. Za baker, recimo, uporabimo bakreno cev znane debeline in dolžine; skozi jo vodimo paro, od zunaj pa cev hladimo z ledom ter merimo, koliko se ga stali v časovni enoti. Toplotna prevodnost bakra znaša 390 W/Km. Za vodo izmerimo dva reda velikosti manj, 0,6 W/Km, in za zrak še red manj, 0,03 W/Km. Zdaj vemo, zakaj moramo v hudem mrazu nositi volnena oblačila: polna so zračnih žepkov. Pri prevajanju toplote skozi tekočino in plin velja zapisani zakon le, če snov miruje, to je, če ni konvekcije.

Toplota in bitja Toplokrvne živali (ptiči in sesalci) vzdržujejo stalno telesno temperaturo. Pri živali z dolžino l je proizvodnja toplote sorazmerna s prostornino, torej $P_{\text{gain}} \propto l^3$, oddajanje toplote pa je sorazmerno s površino, torej $P_{\text{loss}} \propto l^2$. Z večanjem ali manjšanjem živali se spreminja razmerje med proizvodnjo in izgubo toplote: $P_{\text{loss}}/P_{\text{gain}} \propto 1/l$. Majhna žival oddaja večji delež toplote kot velika žival, zato mora relativno več jesti: rove na dan poje za svojo lastno težo hrane, slon pa le okrog 5 %.

Majhna toplokrvna žival živi hitreje, plodi se hitreje in umira hitreje. Ni ptic in sesalcev tako majhnih, kot so lahko žabe in ribe: niti ne morejo dobiti, niti prebaviti vse potrebne hrane. Kolibri je ujetnik svojega telesa: jesti mora nenehno. Toplotna izguba je še posebej kritična na polih in v morju. Sever je dom velikih ptic, ne majhnih. Ni majhnih sesalcev v morju. Najmanjši delfini živijo v toplih morjih.

Tudi oblika telesa je pomembna: okrogla telesa imajo relativno manjšo površino kot podolgovata. V mrzlem okolju imajo zato čokate živali prednost pred vitkimi, saj bolje ohranjajo toploto. V toplem okolju pa je ravno obratno: hitreje se pregrevajo. To velja tudi za ljudstva. □