

Základy termodynamiky a tepelné stroje

Obsah:

- deje v ideálnom plyne (izobarický, izochorický, izotermický a adiabatický), vyjadrenia vzťahov medzi stavovými veličinami
- pojem termodynamickej rovnováhy
- **termodynamické vety**, deje vratné a nevratné
- znázornenie termodynamických dejov v p-V diagrame
- **tepelné stroje**, ich účinnosť, **Carnotov cyklus**
- pohľad do dejín tepelných strojov z hľadiska fyziky
- stručne o reálnych plynach, kritická teplota a tlak Van der Waalsova rovnica

Termodynamika

Termodynamika sa zaoberá sa vnútornou energiou systémov (najmä tepelnou energiou) a riadi sa určitými zákonmi. Je disciplínou popisujúcou zákonitosti tepla a tepelných dejov, vzťahy medzi veličinami - popisuje **makroskopický** stav tepelnej sústavy a zmeny týchto veličín pri fyzikálnych dejoch spojených s výmenou tepla medzi sústavou a jej okolím.

Dôležité sú tzv. **termodynamické zákony**.

Stavové veličiny

Stav látok popisujú tzv. stavové veličiny (SV):

- teplota (T)
- tlak (p)
- objem (V)
- hustota (ρ)
- hmotnosť (m), resp. molárna hmotnosť ($M_m = m/n$)
kde n je látkové množstvo
- vnútorná energia (U)
- entropia (S)

Pozn.: Molárna (staršie mólová) hmotnosť udáva hmotnosť jednotkového látkového množstva látky (1 mólu) – jednotka [g/mol], niekedy [kg/kmol].

Teplota

Teplota (termodynamická teplota) je jednou zo siedmich základných veličín sústavy SI. Je to stavová veličina opisujúca strednú kinetickú energiu častíc. Zmenou teploty sa menia vlastnosti rôznych látok (napr. tlak, objem, elektrický odpor, ...).

Teplota vo fyzike sa meria v jednotkách Kelvin [K], v bežnom živote sa z praktických dôvodov častejšie používa **stupeň Celzia** alebo **stupeň Fahrenheita**.

Spodné ohraničenie teplotnej stupnice je tzv. **absolútna nula**. Označuje termodynamickú teplotu, pri ktorej dosiahne entropia systému minimálne hodnoty. Podľa medzinárodnej dohody je definovaná ako 0 K na kelvinovej stupnici, resp. $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ alebo $-459.67\text{ }^{\circ}\text{F}$.

Pozn.: Tzv. normálna (izbová) teplota: 20°C .

Teplota

Zhrnutie najpoužívanějších stupníc teploty:

Kelvinova stupnica T (K)

! Používa sa len Kelvin a nie stupeň Kelvina

Celsiova stupnica T_C ($^{\circ}\text{C}$)

(absolútna veľkosť 1 stupňa v Celsiovej a Kelvinovej stupnici je rovnaká t.j. $1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}$) prevod: $T_C = T - 273.15$

Fahrenheitova stupnica T_F ($^{\circ}\text{F}$)

prevod: $T_F = 9/5 T_C + 32$ (prírastok na 9°F je 5°C)

*Niektoré význačné
teploty*

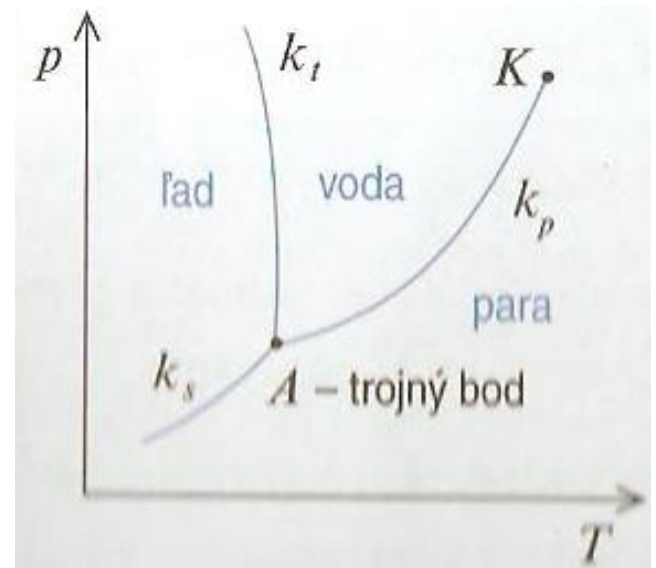
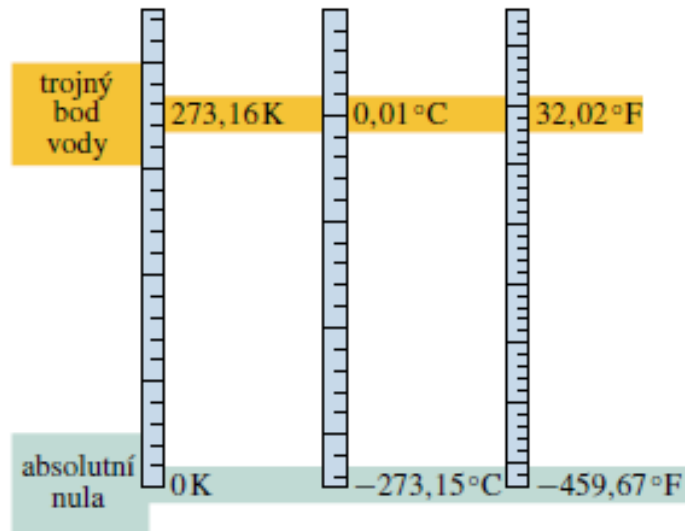
(v Kelvinoch, $^{\circ}\text{C}$ a $^{\circ}\text{F}$)

Teplota:	K	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$
varu vody	373,15	100	212
telesná	310,15	37	98,6
v miestnosti	330,15	20	68
mrznutia (vody)	273,15	0	32
absolútna nula	0	-273,15	-459,67

Teplota

Trojný bod látky je hodnota teploty a tlaku vo fázovom diagrame, pri ktorom súčasne existujú všetky tri skupenstvá tejto látky (plynné, kvapalné a pevné) za termodynamickkej rovnováhy.

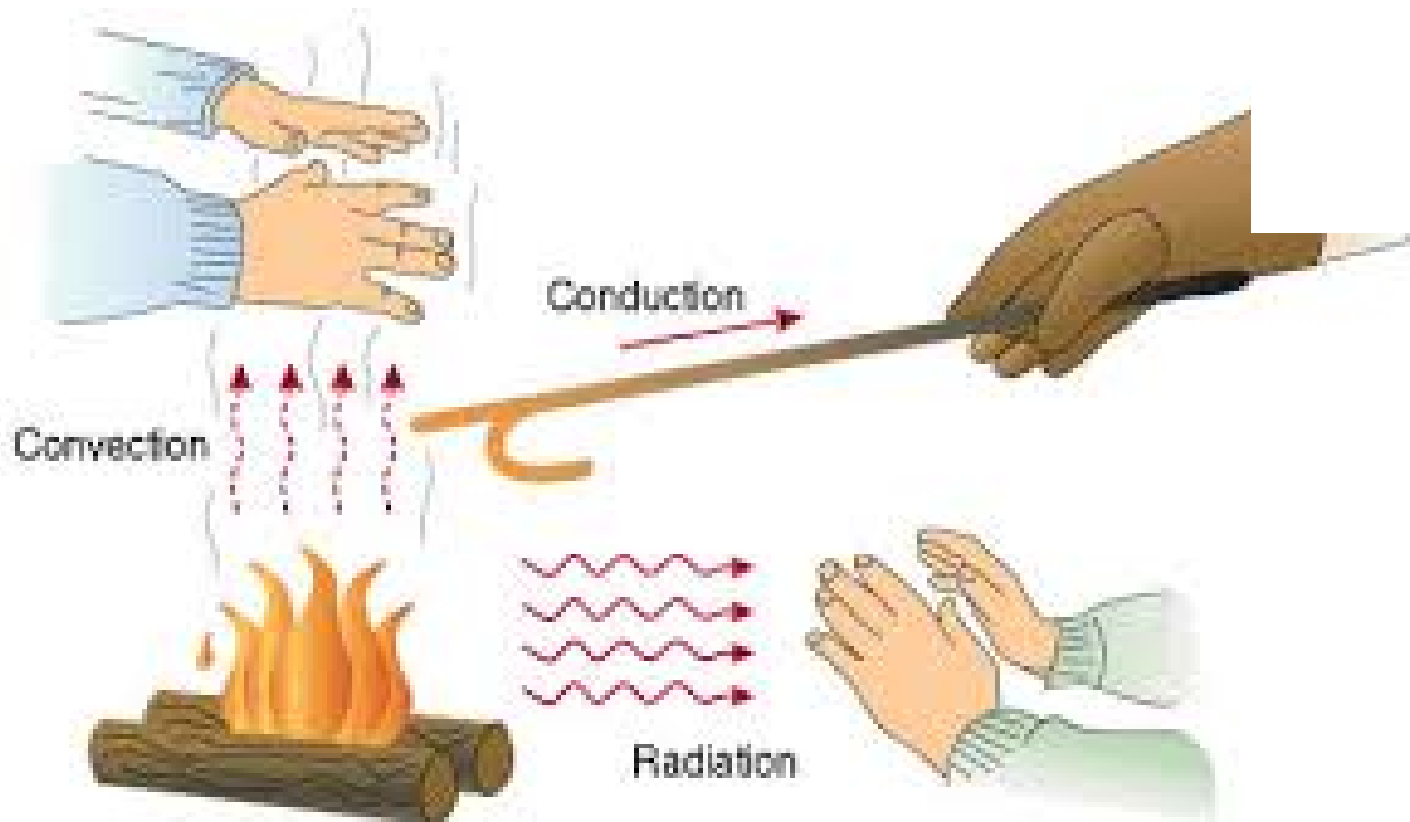
Trojný bod vody sa používa na definíciu kelvina, jednotky SI termodynamickkej teploty. Voda tento stav dosiahne pri teplote $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku 611.73 Pa . Kelvin je $1/273.15$ termodynamickkej teploty trojného bodu vody.



Prenos tepla

Mechanizmy prenosu tepla:

1. vedenie (cez pevné látky) - conduction
2. prúdenie (prenos tepla hore – kvapalina, plyn) – convection
3. žiarenie (EM prenos) - radiation



Prenos tepla

vedenie tepla

TABLE 17.5 Thermal conductivities

Material	k (W/m K)
Diamond	2000
Silver	430
Copper	400
Aluminum	240
Iron	80
Stainless steel	14
Ice	1.7
Concrete	0.8
Glass	0.8
Styrofoam	0.035
Air (20°C, 1 atm)	0.023

Tepelná vodivosť k – vlastnosť látky viesť teplo. Predstavuje rýchlosť, s ktorou sa teplo šíri zo zahriatej časti látky do chladnejšej.

Jednotka: $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

Najviac dobrých vodičov tepla je medzi kovmi (aj vysoká el. vodivosť).

Výnimkou je diamant.

Využitie je napr. na chladenie elektronických obvodov (chipov).

Dobrá tepelná vodivosť zapríčiňuje aj pocit chladu na kovovej stoličke oproti drevenej.

Vzduch a plyny sú slabé vodiče tepla.

Prenos tepla

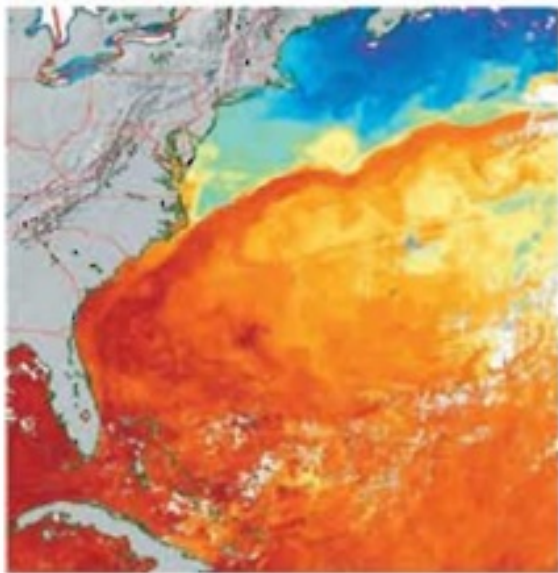
konvekcia - prúdenie



V plynoch a kvapalinách dochádza ku vzájomnému pohybu jednotlivých častí, ktoré majú rozdielnu teplotu a tým, aj rôznu hustotu (prejav vnútornej energie) - tým sa prenáša teplo.

Je to celé dôsledkom skutočnosti, že kvapaliny a plyny (najmä vzduch) sú slabé vodiče tepla.

Konvekcia je značne rýchlejšia vo vode ako vo vzduchu (príkladom je napr. možnosť dlhodobého prežitia v 20 stupňovom vzduchu a úmrtia na hypotermiu v 20 stupňovej vode).



satelitná
termo-snímka
západnej časti
Atlantického
oceánu



rozdiel cca 6 °C

Prenos tepla

radiácia - vyžarovanie

Radiácia je proces, pri ktorom látka emituje do priestoru energii vo forme elektromagnetického žiarenia. Na rozdiel od vedenia tepla a konvekcie sa môže prostredníctvom radiácie prenášať teplo aj vo vákuu.

Prenesená energia závisí od niekoľkých faktorov:

teplota telesa (platí tu tzv. Planckov zákon),
farba povrchu – najmenšie množstvo tepla je vyžarované strieborne lesklými povrchmi, najväčšie čiernymi (napr. termosky a termo-hrnčeky majú často povrch striebornej farby)
obsah plochy – vyžiarená energia je priamo úmerná veľkosti povrchu vyžarujúceho telesa.

Tlak

Tlak je fyzikálna veličina, vyjadrujúca pomer sily F (tzv. tlaková sila) kolmo, rovnomerne a spojitô pôsobiacej na plochu S :

$$p = \frac{F}{S}$$

Jednotkou tlaku je Pascal [**Pa**], čiže newton na meter štvorcový [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$].

Staršia jednotka je [bar], platí $1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$.

Tlak neúčinkuje iba v bode pôsobenia sily, ale prenáša sa objemom telesa. Patrí k základným termodynamickým veličinám.

Tlak v plynôch je vyvolaný tepelným pohybom častíc plynu (atómov alebo molekúl); nárazy týchto častíc na steny nádoby sa prejavujú pôsobiacim tlakom. Preto niekedy hovoríme o tzv. kinetickom tlaku - toto zvyrazňuje fakt, že hlavným dôvodom pre prítomnosť tlaku je skutočne pohyb molekúl.

Tlak

Hydrostatický tlak v plynch a kvapalinách je daný hmotnosťou horných vrstiev, ktoré v gravitačnom poli pôsobia silou na vrstvy pod nimi. Túto silu pôsobiacu na plochu nazývame hydrostatickým tlakom.

Atmosferický alebo **barometrický** tlak je špeciálnym prípadom hydrostatického tlaku vyvolaného hmotnosťou vzduchu tvoriaceho atmosféru. Pod vplyvom počasia atmosférický tlak mierne kolíše, preto bol zavedený takzvaný **štandardný atmosférický tlak** alebo **normálny tlak** s hodnotou 101 325 Pa (t.j. cca 100 kPa alebo 0.1 MPa) a je približne rovný priemernej hodnote tlaku na úrovni mora. Tlak v atmosfére klesá s nadmorskou výškou, pretože sa znižuje stĺpec vzduchu nad miestom merania.

Litostatický tlak je tlak horných vrstiev hornín a používa sa pri modelovaní procesov v litosfére (napr. pri vysvetľovaní tzv. izostatickej rovnováhy).

Je možné vyjadriť ho ako súčin výšky a hustoty horninového bloku s gravitačným zrýchlením: $\rho \cdot h \cdot g$

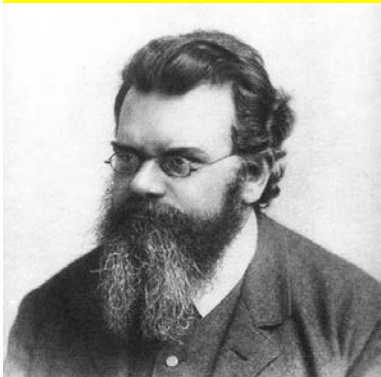
Stavová rovnica ideálneho plynu pre jeho hmotnostné množstvo n mólov:

$$pV = nRT$$

R je univerzálna plynová konštanta:

$$R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Univerzálna preto, lebo platí pre ľubovoľný plyn aj zmes plynov, bez ohľadu na chemické zloženie, ak uvažujeme hmotnostné množstvo v móloch (v prípade zmesi treba uvažovať priemernú molekulárnu hmotnosť).



$$pV = NkT$$

N - počet častíc plynu (Avogadrova konštanta

$$6.022 \ 140 \ 857 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1})$$

k - Boltzmannova konštanta = $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

Ludwig Eduard Boltzmann

*: 20.február, 1844, Vienna, Rakúsko

†: 5. september, 1906, Duino, Taliansko

Vzdelanie: University of Vienna

Publikácia: Lectures on gas theory

Deje v plynoch a $p - V$ diagram:

Podľa toho, či niektorá zo **stavových veličín** (p , V alebo T) zostáva konštantná, rozoznávame:

► **dej izobarický** - pri stálom tlaku - vid' obrázok:

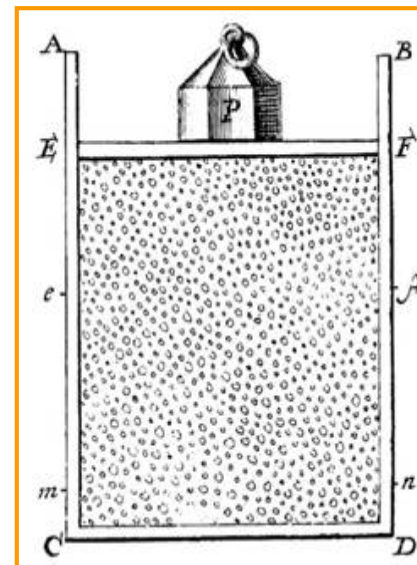
► **dej izochorický (izometrický)** - pri stálom objeme (uzavretá nádoba)

► **dej izotermický** - pri stálej teplote

Veľmi dôležitý je v termodynamike **dej adiabatický** – *ak nenastáva výmena tepelnej energie medzi plynom a okolím*. To možno zaistiť buď

- dokonalou tepelnou izoláciou alebo tým, že:

- dej prebehne tak rýchlo, aby bol prestup tepla z alebo do plynu takmer zanedbateľný.



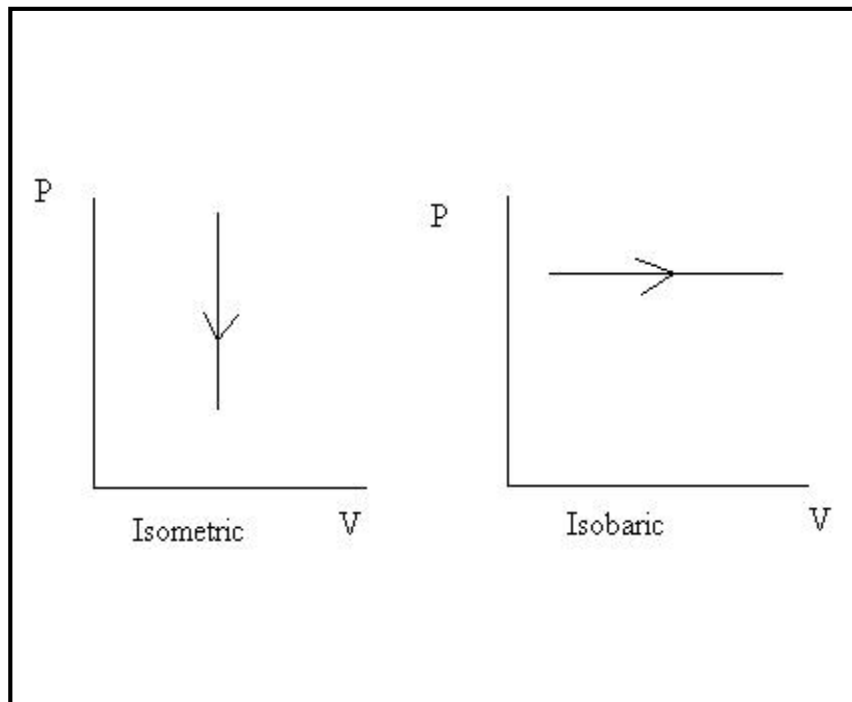
Process	Condition	Relation A,B	$U_{A \rightarrow B}$	$Q_{A \rightarrow B}$	$W_{A \rightarrow B}$
Isochor	$V = \text{const}$	$T_A/p_A = T_B/p_B$	$C_V(T_B - T_A)$	$C_V(T_B - T_A)$	0
Isoterm	$T = \text{const}$	$p_A V_A = p_B V_B$	0	$nRT \ln \frac{V_B}{V_A}$	$nRT \ln \frac{V_B}{V_A}$
Isobar	$p = \text{const}$	$T_A/V_A = T_B/V_B$	$C_V(T_B - T_A)$	$C_p(T_B - T_A)$	$p(V_B - V_A)$
Adiabatic	$Q_{A \rightarrow B} = 0$	$p_A V_A^\gamma = p_B V_B^\gamma$	$C_V(T_B - T_A)$	0	$-C_V(T_B - T_A)$
Adiabat. Free exp.	$Q_{A \rightarrow B} = 0$	$p_A V_A = p_B V_B$	0	0	0

Index **A** zodpovedá **počiatočnému** stavu, index **B** **konečnému**. $C_V(C_p)$ = špecifické teplo pri stálom objeme (tlaku). Veličina **U** značí zmenu **vnútornej energie plynu**, veličina **Q** zmenu **tepelnej energie** (teplo plynom prijaté alebo mu odobraté) a veličina **W** predstavuje **mechanickú prácu na plyne vykonanú** (mechanickú prácu na plyne vykonanú (+) alebo plynom odovzdanú (-)).

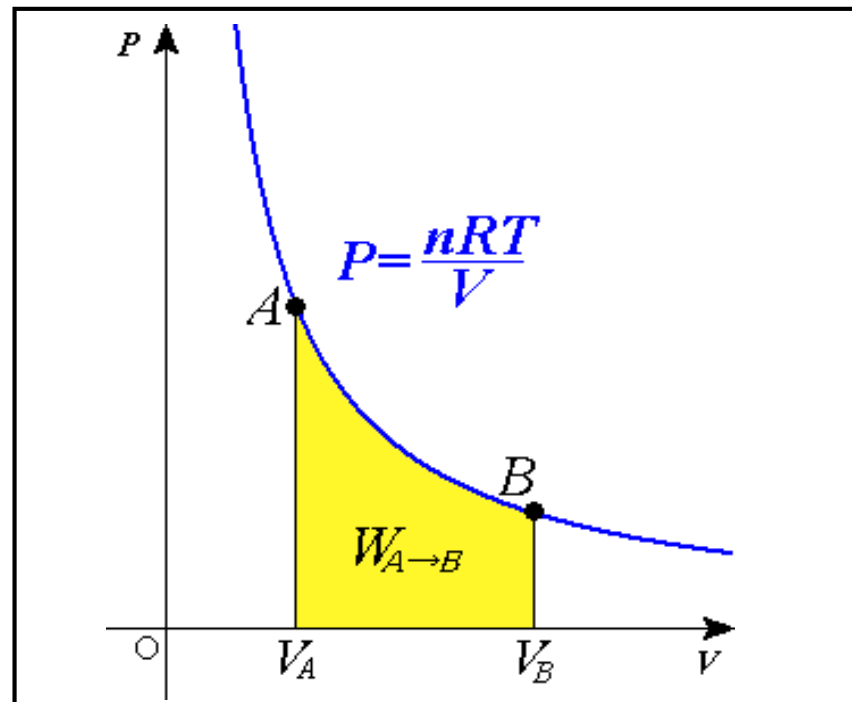
Prvá veta termodynamická hovorí, že prírastok **ΔU** = súčtu prírastkov (zmien) (**$\Delta Q + \Delta W$**)

Znázornenie dejov v plynach pomocou $p - V$ diagramov:

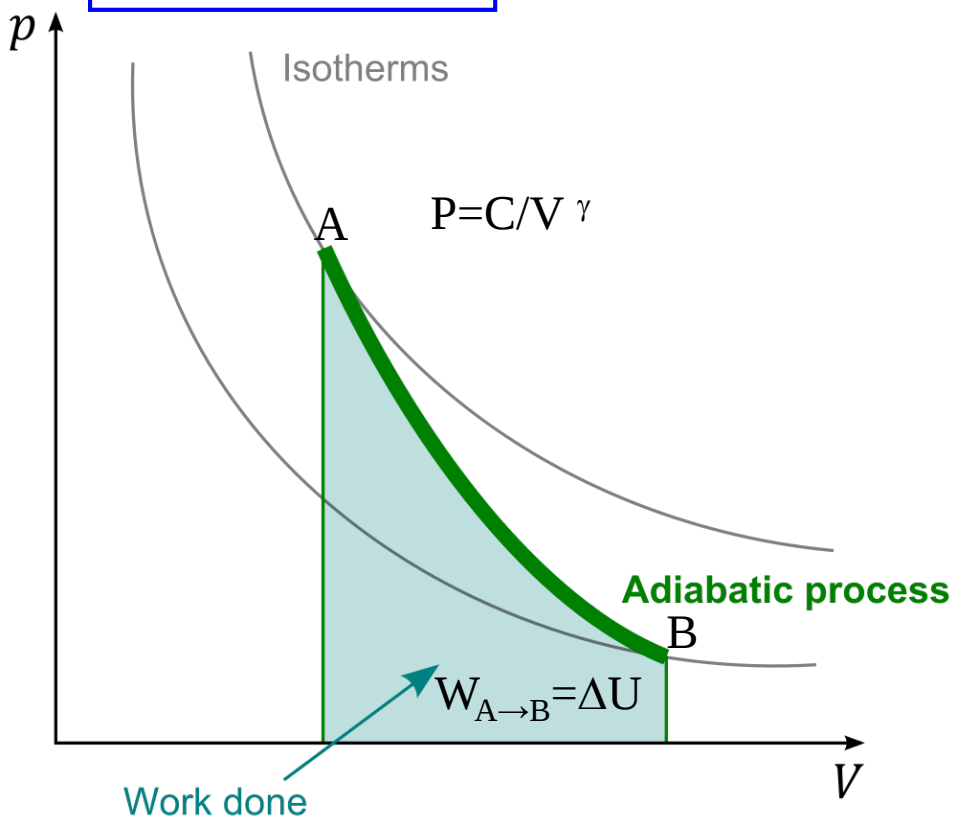
Dej izochorický a izobarický:



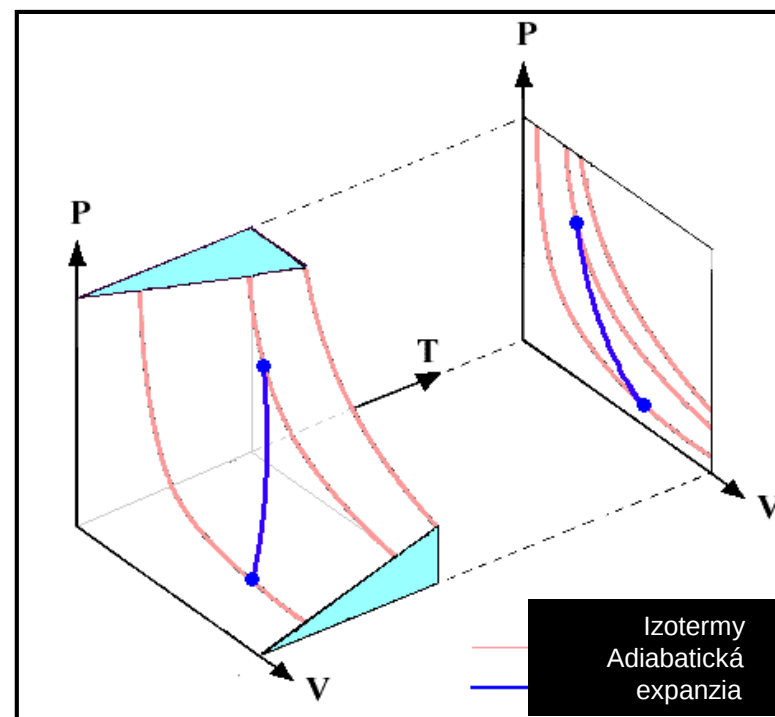
Dej izotermický:



Dej adiabatický:



Všetky 3 veličiny (p , V , T) naraz možno ukázať iba na 3-D grafe v axonometrii:



Vo výraze $p = C / V^\gamma$ je veličina γ tzv. **adiabatický exponent**, ktorý sa rovná pomeru merných (špecifických) tepiel plynu pri stálom tlaku c_p a stálom objeme c_v ($\gamma = c_p / c_v$)

Obrázok vpravo ukazuje, ako pri adiabetickej expanzii teplota plynu klesá, teda pohybujeme sa smerom k izotermickej krivke (hyperbola) pre nižšiu teplotu.

Adiabatická krivka je strmšia ako izotermická.

Plocha na $p - V$ diagrame zodpovedá energii (pri deji uvoľnenej alebo spotrebovanej).

Merné teploty plynov pri *stálom tlaku* c_p a pri *stálom objeme* c_v sa líšia (u kvapalín a pevných látok prakticky nie, preto u nich uvádzame jedinou hodnotu merného tepla). Ak zohrievame plyn pri stálom tlaku, musíme mu umožniť expanziu. Pri nej plyn koná dodatočnú prácu, ktorú musí dodať tepelný zdroj. Je preto $c_p > c_v$

Hodnota adiabatického exponentu (niekedy sa označuje ako *Poissonov koeficient*) závisí iba na molekulárnej štruktúre plynu (počtu atómov v molekule).

Základné vety termodynamiky. Deje vratné a nevratné:

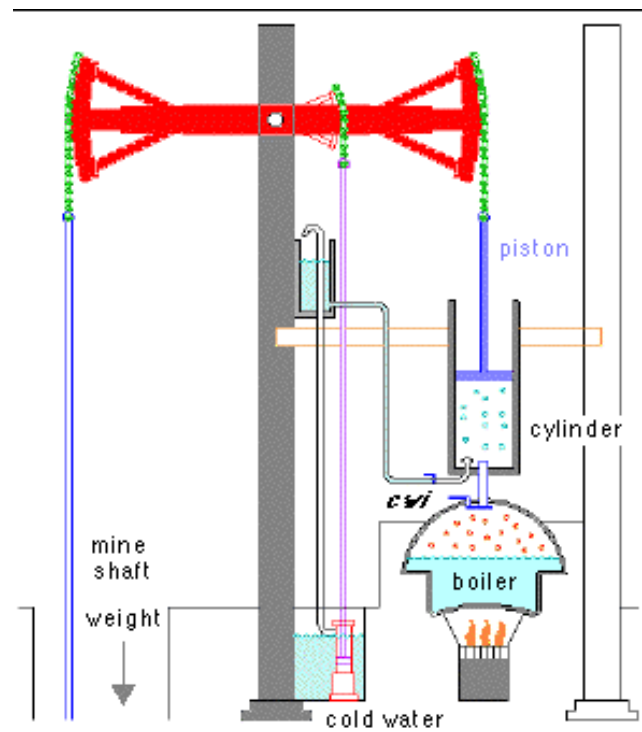
- ▶ **1.veta termodynamická** (v podstate zákon zachovania energie aplikovaný v termodynamike): nemôže existovať zariadenie (stroj), ktorý by trvale konal prácu bez zmeny vnútornej energie (napr. celkovej energie pohybu molekúl) alebo energie okolia (tzv. perpetuum mobile 1.druhu).
- ▶ **2.veta termodynamická**: nemôže existovať zariadenie (stroj), trvale konajúci prácu iba „na účet“ trvalého ochladzovania nejakého telesa. Ekvivalentná formulácia: samovoľne môže teplo (tepelná energia) prechádzať iba z telesa teplejšieho na chladnejšie, nikdy opačne (dôležité je slovo „samovoľne“). Také zariadenie by sa označovalo ako „perpetuum mobile 2.druhu“.
- ▶ **3.veta termodynamická**: absolútnu nulu teploty nie je možné dosiahnuť nijakým termodynamickým procesom v konečnom čase (tzv. Nernstov teorém).

Tepelné stroje, ich účinnosť. Carnotov cyklus.

Tepelné stroje (*zariadenia premieňajúce tepelnú energiu na mechanickú prácu*) tvoria bez zveličovania základ modernej civilizácie. Historicky prvý bol **parný stroj**, pri zlepšovaní ktorého boli precizované termodynamické vzťahy a zákony.

Ale aj **spaľovací motor, parné a plynové turbíny** sú tepelné stroje. Je pravdou, že v modernej spoločnosti sa čoraz viac využíva **energia elektrická**, túto ale vyrábame **väčšinou** pomocou **tepelných strojov** (s výnimkou fotovoltiky) (aj vodnú elektrárňu možno – svojím spôsobom – považovať za „tepelný stroj“, lebo vyparovanie vody do atmosféry, jej kondenzácia a prúdenie v riekach sa deje na účet **tepelnej energie zo Slnka**).

Prvý, tzv. **„atmosférický“** parný stroj skonštruoval **Thomas Newcomen r. 1712**. Používal sa iba na čerpanie vody z anglických baní. Jeho účinnosť bola veľmi malá, **pracoval pomaly**, ale pre uvedený účel to postačovalo. Ventily pre vodu a paru sa ovládali ručne, ale už r.1713 mladý učeň **Humphrey (nie Harry!) Potter** dostal nápad ich ovládať „automaticky“ pohybom piestu. (Nová Baňa – Potterov ohňový stroj Pohronské múzeum)
Všeobecne sa v Anglicku a neskôr inde rozšíril až parný stroj zdokonalený Jamesom Wattom (1736 – 1819). Vo Wattovom stroji para tlačila na piest *striedavo z oboch strán*, stroj mal *odstredivý regulátor otáčok* a Watt neskôr konštruoval *dvojvalcové stroje s kludnejším chodom*. **Prvý rýchlobežný stroj postavil r. 1774** a v spolupráci s továrnikom Matthewom Boultonom začala komerčná výroba parných strojov podľa Wattových patentov r. 1776. **Roku 1800 Wattovým patentom vypršala platnosť**.





James Watt
(1736-1819)

James Watt (1736 – 1819) sa dožil mohutného a víťazného nástupu parných strojov. V roku 1800, keď vypršali patentové práva, už v celom Anglicku fungovalo viac ako **1500 jeho strojov**.

Na obrázku vpravo je presná (a fungujúca !) kópia Wattovho stroja z roku 1788. Je v ► technickom múzeu Henryho Forda v Dearborne (Detroit) v USA. Výkon stroja bol 10 „konských síl „ (v dobových jednotkách) , točil 50 otáčok za min.



Parné stroje dobývali dopravu (lokomotívy, parolode), využívali sa aj v poľnohospodárstve (stacionárne stroje) a ďalej sa zlepšovali. Napriek technickým a technologickým úpravám a zdokonaleniam však **účinnosť** zostávala na pomernej nízkej hodnote okolo **12 – 15 %**. Vec objasnil roku 1824 ►►

francúzsky vynálezca (armádny dôstojník – na ►
obrázku v uniforme kadeta prestížnej dôstojníckej
školy) **Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796 – 1832)**.

Žiaľ, zomrel 36-ročný v Paríži počas cholerovej
epidémie. Jeho synovec, Marie François Carnot, bol
v rokoch 1887 – 1894 francúzskym prezidentom.

Skonštruoval matematický model (Carnotov cyklus),
ktorým dokázal, že existuje neprekročiteľná hranica
účinnosti tepelného stroja, ktorá je daná iba **pomerom**
absolútnych teplôt tzv. ohrievača T_H (pracovného
plynu do stroja vstupujúceho) a **tzv. chladiča T_C**
(plynu opúšťajúceho stroj - jeho pracovný priestor).

Táto účinnosť η je daná **Carnotovým vzťahom**:

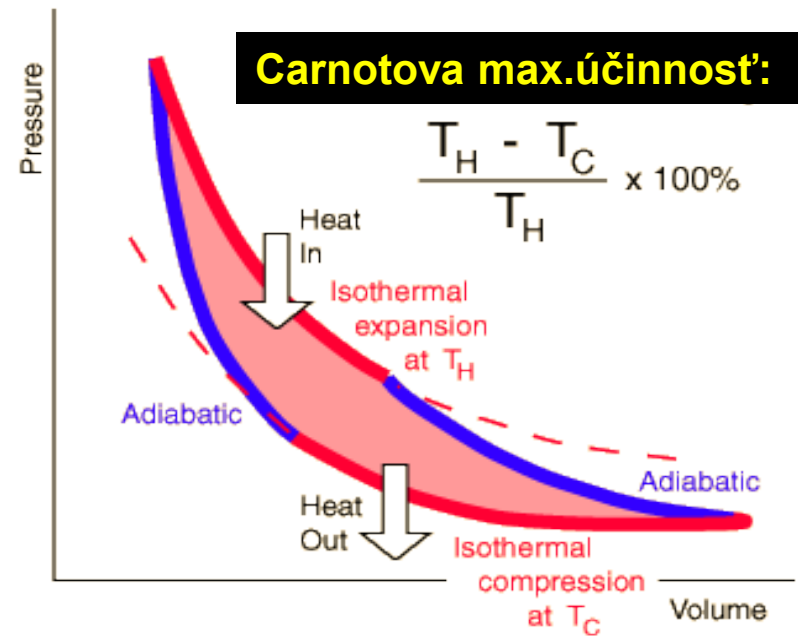
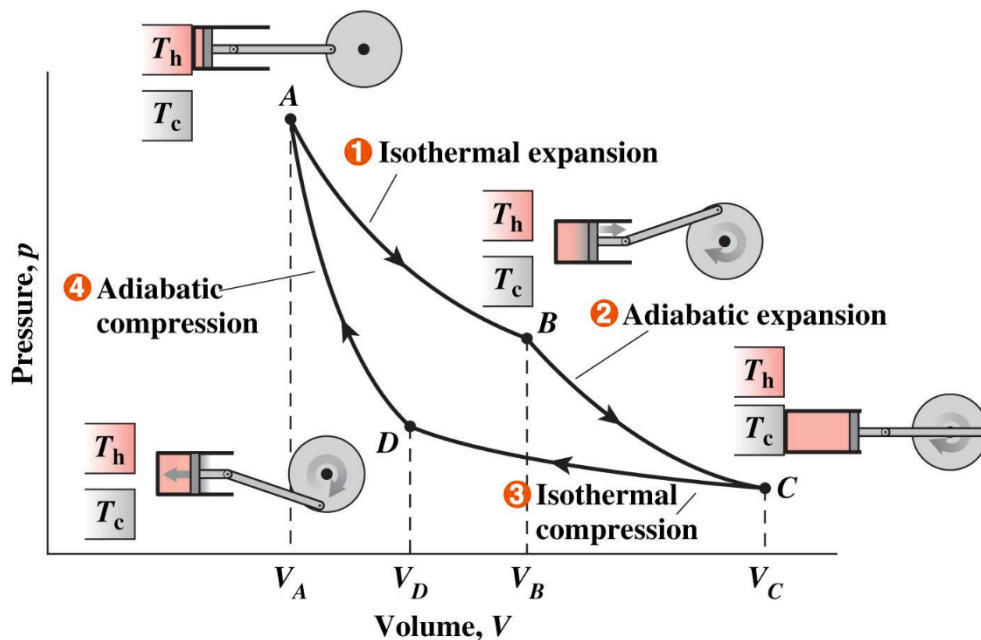
$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (1)$$



W je užitočná mechanická energia
ktorú môžeme zo stroja získať;
 Q_H je tepelná energia za rovnaký
čas do stroja vstupujúca

Akýmkoľvek technickým zdokonaľovaním stroja sa k tejto hranici možno iba priblížiť.

Carnotov cyklus:



Úsek **1**: izotermická expanzia pri teplote T_h (pre jej udržanie treba **dodávať** tepelnú energiu Q_2)

Úsek **2**: adiabatická expanzia (bez prívodu tepla), teplota plynu poklesne z T_h na T_c

Úsek **3**: izotermická kompresia pri teplote T_h (pre jej udržanie treba **odviesť** tepelnú energiu Q_1)

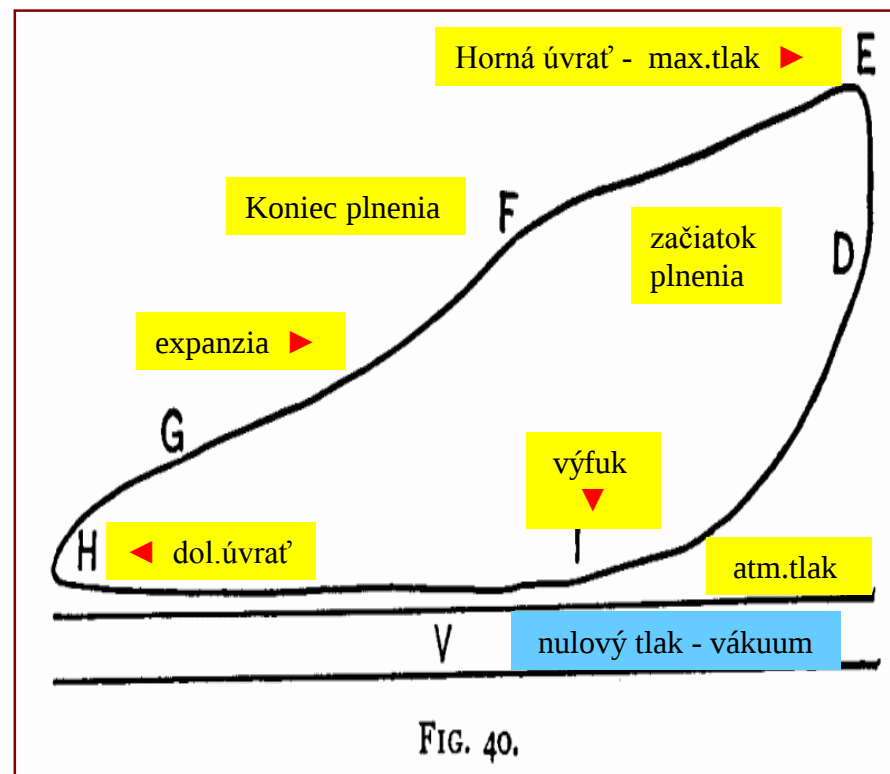
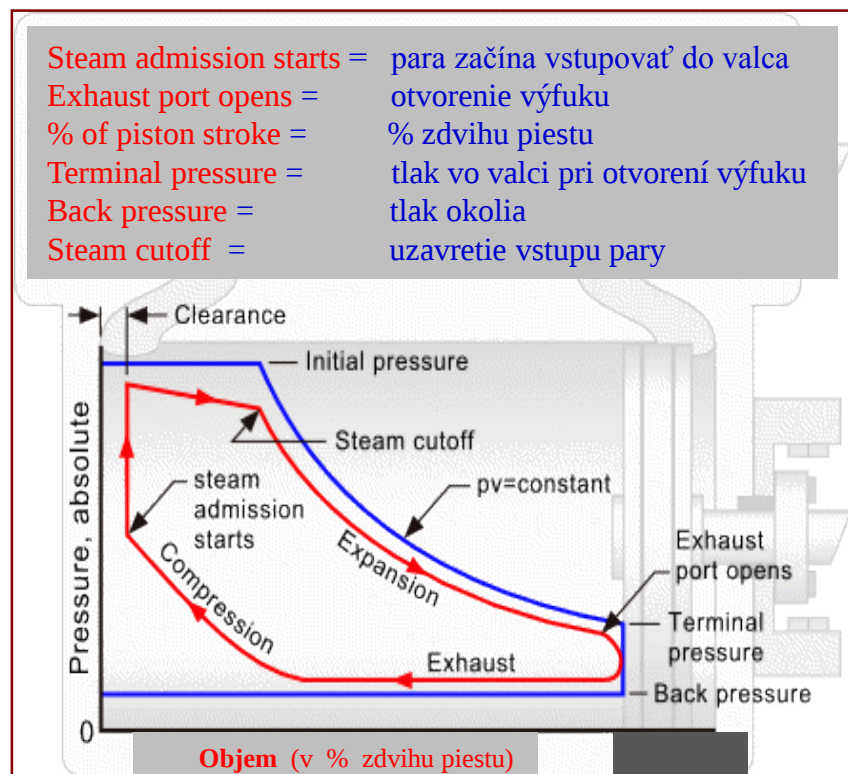
Úsek **4**: adiabatická kompresia (bez prívodu tepla), teplota plynu sa zvýši z T_c na T_h

Vo forme **mechanickej práce** možno získať **najviac** rozdiel tepelných energií ($Q_2 - Q_1$).
Cyklus môže prebiehať aj **opačným smerom** (chladnička, tepelné čerpadlo) – vtedy musíme **mechanickú prácu** do systému **dodávať**.

Oproti iným formám energie – súvisiacim s *usporiadaným pohybom* častíc, napr. *elektrický prúd* – predstavuje *tepelná* energia *chaotický – neusporiadaný – pohyb* molekúl látky. Preto je, obrazne povedané „menej ušľachtilá“ a nemožno ju nijakému telesu odobrať **úplne**.

► Tlak vo valci stroja možno zmerať manometrom, práve tak ako *objem pracovného priestoru* je úmerný polohe piestu. Jeho pracovný cyklus v **p – V** diagrame môžeme vykresliť – dostaneme tzv. *indikátorový diagram stroja* – viď obrázok získaný počas skúšok:

▼ (diagram je otočený o 180°)



Historická zaujímavosť: *absolútne najväčšie a najvýkonnejšie* klasické parné stroje postavila v rokoch 1910 – 1911 firma Harland & Wolff z Belfastu pre známy parník *Titanic*. ▼

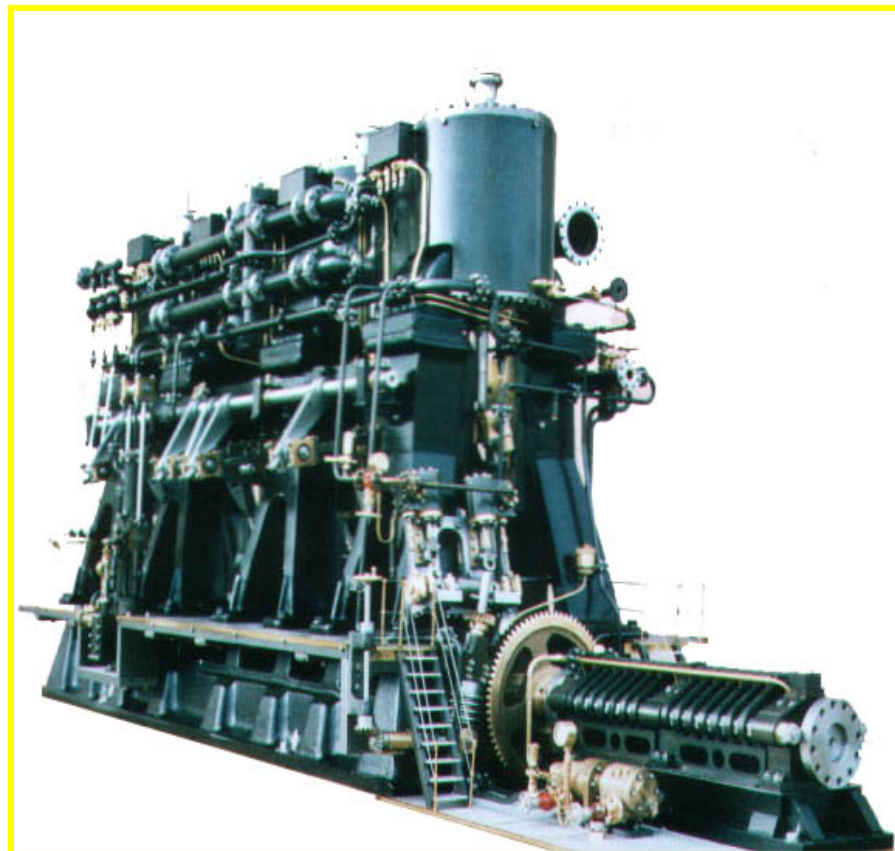
Na obrázku vpravo je presný model stroja: ►

Titanic mal dva takéto stroje po 4 valce - jeden vysokotlaký, jeden strednotlaký a dva nízkotlaké (para cez ne prúdila postupne). Celý stroj bol 10 m vysoký a vážil približne 1000 ton.

Priemery valcov boli v poradí – 1,35 m, 2,1 m a 2,43 m, zdvih bol spoločný – 1,87 m.

Pri menovitom výkone 16000 konských síl, čo je 11700 kW, otáčali priamo lodnou skrutkou 76 otáčok za minútu.

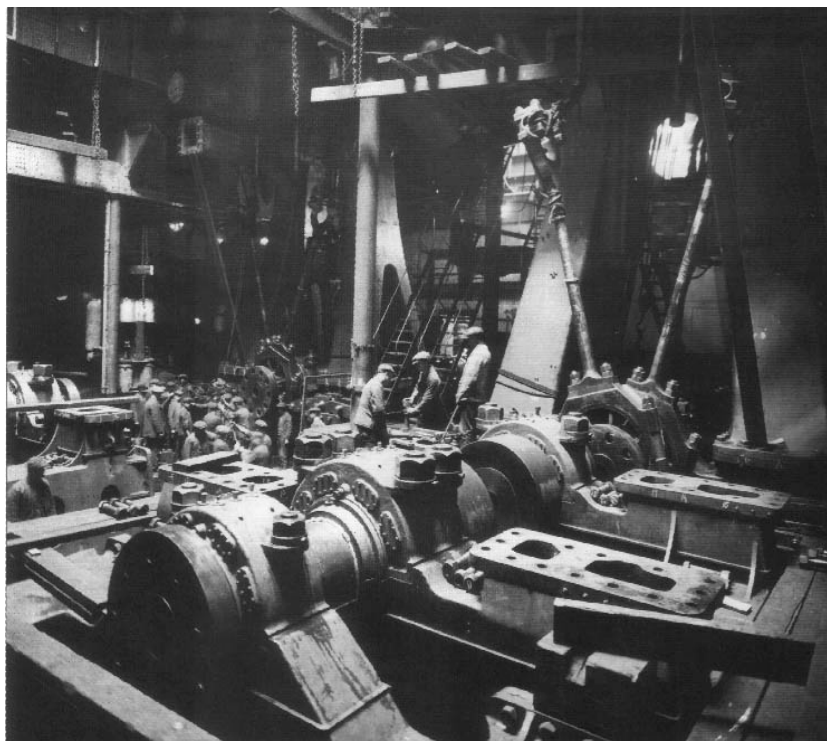
Do vysokotlakých valcov vstupovala para pod tlakom približne 1,5 MPa (14,8 atmosfér). **Paru vyrábalo 29 veľkých kotlov, čo si vyžadovalo „armádu“ 174 kuričov, ktorí pracovali v priamo vražednom tempe (museli sa striedať po hodine).** Kúrilo sa uhlím, spotreba (pri menovitom výkone na jeden stroj) bola 35 ton za hodinu – **každý kurič musel za hodinu „obsłužiť“ vyše 400 kg uhlia.**



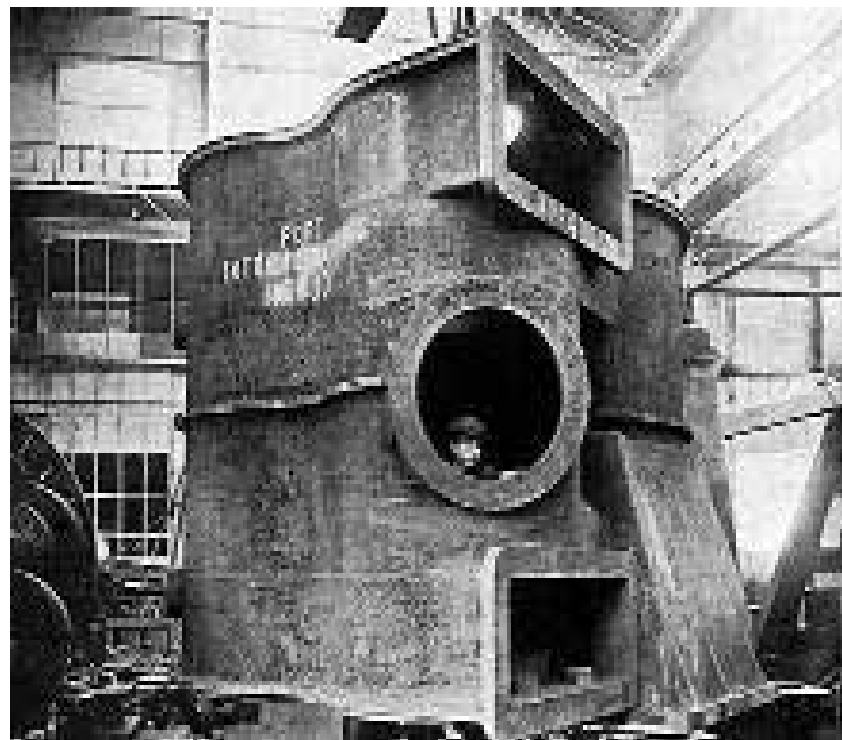
Značná zotrvačnosť pohyblivých častí mala nevyhnutne za následok, že akékoľvek zmeny rýchlosti strojov vyžadovali dlhší čas – čo aj napomohlo tragickému záveru prvej (a poslednej) plavby.

Nasledujúce **dobové fotografie** dávajú predstavu o skutočnej veľkosti strojov Titanicu:

Kľukový hriadeľ stroja uložený v spodnej časti lôžka (z pochopiteľných príčin sa montáž stroja vykonávala priamo vo vnútri lodného trupu):



Teleso jedného valca stroja (v oválnom hrdle pre výstup pary je vidieť hlava robotníka). Valce boli vlastne dva – **hlavný valec** (s väčším priemerom) a **valec pre šúpä** (prívod pary striedavo z obidvoch strán piesta):

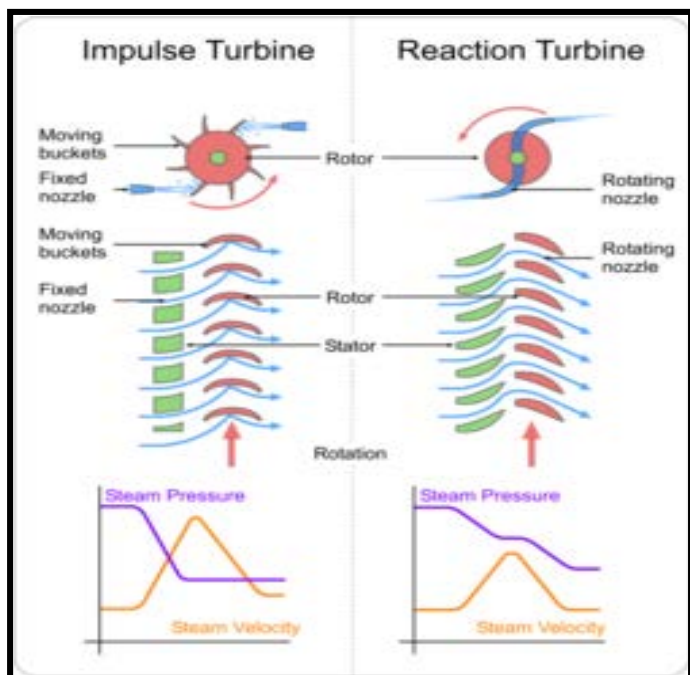


Parné turbíny:

Parná turbína je dnes najvýznamnejší tepelný stroj – hoci si to väčšinou neuvedomujeme! Približne 80% svetovej výroby elektrickej energie zaisťujú generátory poháňané **parnými turbínami**.

Princíp činnosti je jednoduchý – para o vysokom tlaku a teplote (dnes sú hranice okolo 15 MPa – 150 atmosfér – a + 600°C), prúdi medzi rotorovými a satorovými lopatkami a časť energie odovzdáva rotoru.

▼ Činnosť dvoch základných usporiadaní turbín ukazuje obrázok.



◀ **Impulzné a reaktívne usporiadanie** sa líši tým, či „trysky“ – teda časti stroja, v ktorých, obrazne povedané, „vymieňame“ tlak za rýchlosť – čiže energiu potenciálnu za kinetickú - sú pevné alebo pohyblivé.

Na dolných grafoch vidíme schematický priebeh tlaku a rýchlosti pary pozdĺž osi otáčania turbíny.



▲ Časť rotora parnej turbíny, doteraz najvýkonnejšej na svete, s výkonom 1750 MW. Výrobok francúzskej firmy ALSTOM – 4 takéto turbíny pracujú vo francúzskej elektrárni Flamanville.

„Otcom“ parnej turbíny je anglický inžinier, geniálny konštruktér **Charles Algernon Parsons (1854 – 1931)**. Roku 1911 bol za zásluhy povýšený do šľachtického stavu. ▼

Hlavnou výhodou turbíny - oproti klasickým piestovým strojom – je **výhradne rotačný pohyb** všetkých pohyblivých častí (*neexistencia vratného pohybu*). Odpadajú **kľuky, ojnice apod.**

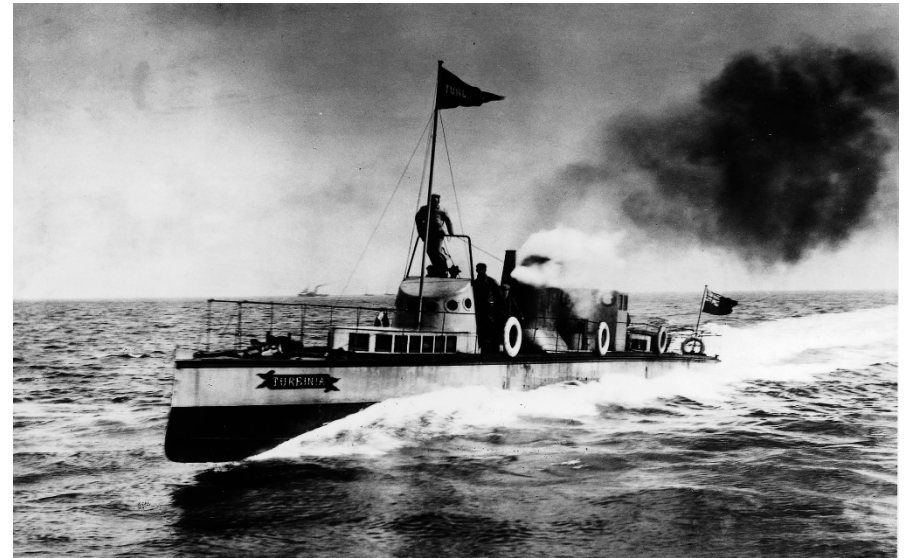
Určitou nevýhodou (najmä u veľkých strojov) je *zotrvačnosť rotora*, ktorá nedovoľuje *rýchle zmeny otáčok* (výkonu). Preto sa neuplatnili ľahké turbíny napr. v automobiloch (hoci majú oproti tradičnému spaľovaciemu motoru podstatne vyššiu účinnosť).

Parsons zostrojil prvú pokusnú turbínu v r.1884. Už predtým ju ponúkol (ale iba vo forme výkresov) anglickej admiralte ako perspektívny pohon lodí – bol odmietnutý.

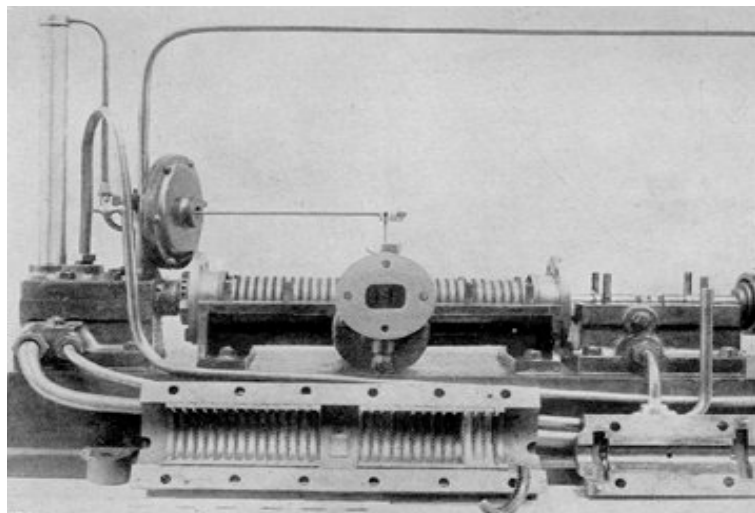


Kúpil starú vyradenú jachtu a so spolupracovníkmi ju vybavil parnou turbínou. Dal jej meno **Turbinia** a roku 1897 – na slávnostnej námornej prehliadke pri diamantovom výročí kráľovnej Viktórie – vplával medzi ozrutné vojnové lode a kľučkoval pomedzi ne viac ako dvojnásobnou rýchlosťou (32,5 uzla čiže 60 km . h⁻¹ – vtedajšie bojové lode dosahovali sotva polovičnú rýchlosť).

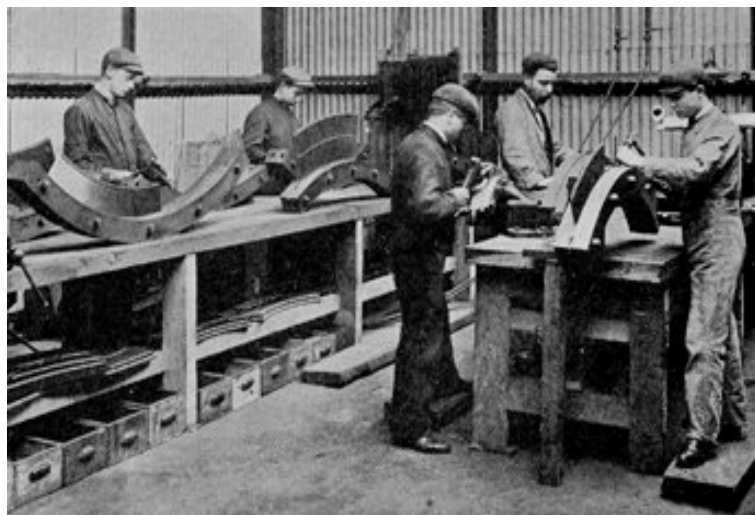
Admiralita rýchlo zmenila názor a odvtedy začali vojnové lode vybavovať iba turbínovým pohonom. Ten sa po čase presadil aj v civilnom loďstve.



Zábery prvých parných turbín:



- ◀ Prvá Parsonsova turbína z roku 1884 (fungovala na dielenskom stole).

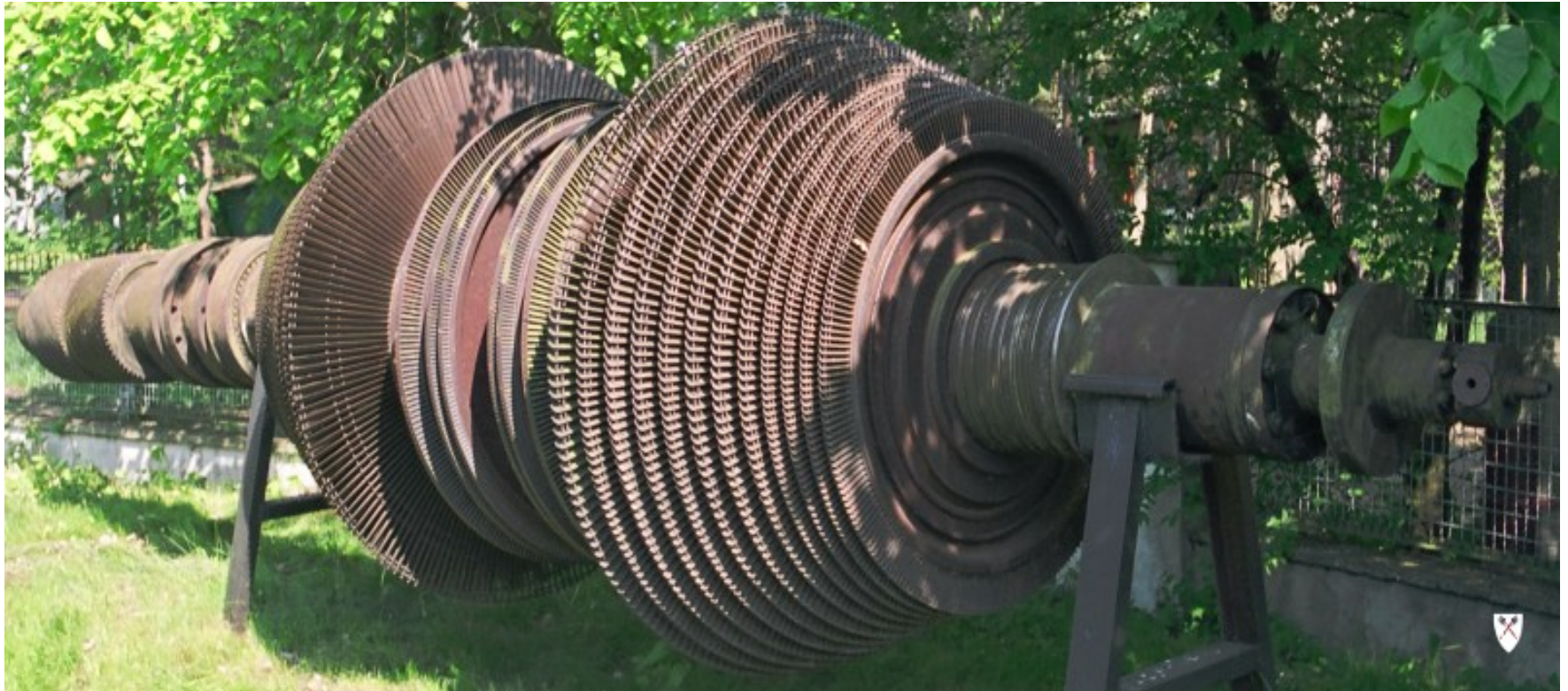


- ◀ Takto Parsons so spolupracovníkmi vyrábal diely turbíny použitej na jachte „Turbinia“.

Parné turbíny významne zdokonalil švédsky inžinier **Carl Gustaf de Laval (1845 – 1913)**, ktorý vhodným tvarovaním lopatiek dosiahol prúdenie pary medzi nimi *nadzvukovou rýchlosťou*.

Snímok ukazuje (dnes múzejný exponát) rotor jednej z dvoch turbín poháňajúcich hrdinský poľský torpédoborec „Wichor“, ktorý sa vyznamenal počas II. svetovej vojny.

Vidíme **dva rotory** na spoločnom hlavnom hriadeli – zmysel zakrivenia lopatiek bol na nich opačný, para vstupovala z obidvoch strán (koncov) a odchádzala stredom.



Keď hovoríme o parných turbínach, pripomeňme si nášho rodáka, slovenského inžiniera Aurela Stodolu:

Aurel Stodola (11.5.1859 Liptovský Mikuláš - 25.12.1942 Zürich, Švajčiarsko)

1877 - začal študovať strojné inžinierstvo v Zürichu na polytechnike

1884 - s vyznamenaním ukončil štúdiá v Paríži

od **1892** - docent, neskôr profesor na ETH (Eidgenössische Technische Hochschule v Zürichu, vedúci katedry konštrukcie a stavby tepelných strojov;
úzko spolupracuje s firmou **Brown, Boveri et Cie.**, ktorá bola prvým výrobcom parných turbín na kontinente (mimo Anglicka)

1903 - prvé vydanie jeho základného diela „**Die Dampfturbinen**“ (1140 strán)

1924 - vychádza už 6.vydanie, kniha bola preložená do 4 jazykov

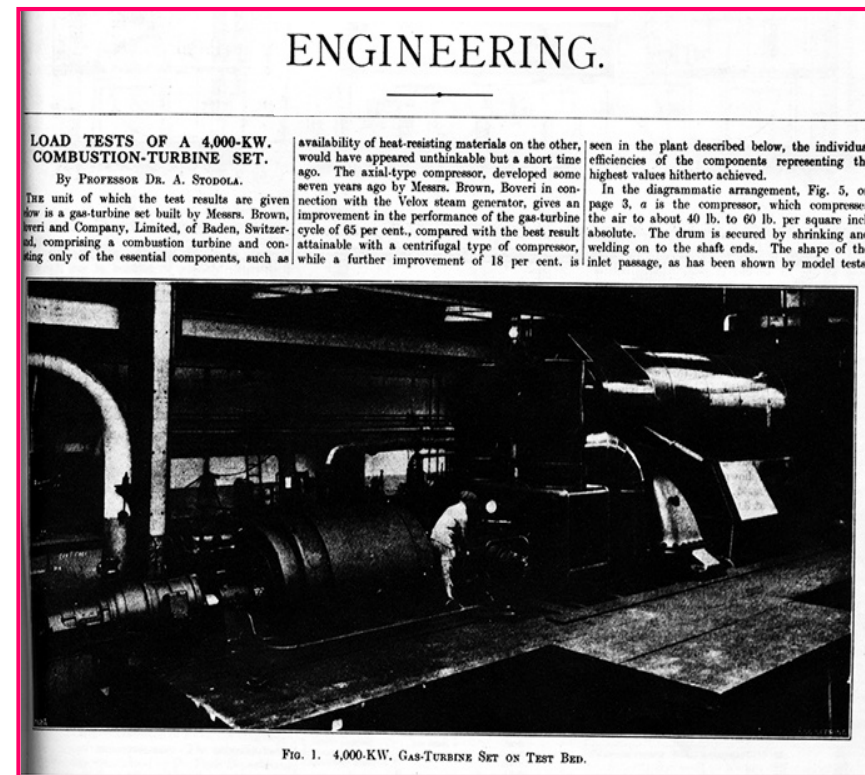
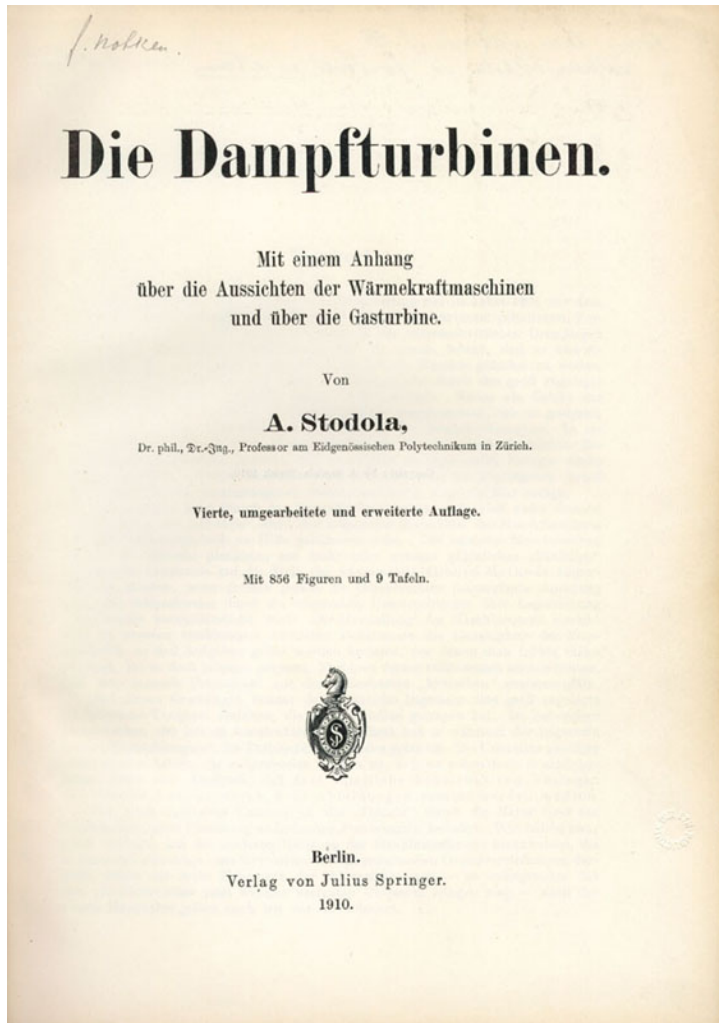
1931 - vzdáva sa profesorského miesta a vedenia katedry, ale pokračuje v spolupráci s horeuvedenou firmou na zdokonaľovaní turbín.



Bol tiež priekopníkom **automatickej regulácie** strojov a teórie aj praxe **servomechanizmov**.

Pod jeho vedením sa na ETH Zürich vybudovali rozsiahle laboratóriá a skúšobne stroje.

Správa z tlače o úspešných skúškach spaľovacej (plynovej) turbíny o výkone 4000 kW, ktorú skonštruoval Prof. Stodola a vyrobila firma **Brown-Boveri** v roku 1939.



▲
Titulný list 4. nemeckého vydania Stodolovej knihy z roku 1910.

/BBC+ASEA=**ABB** (1988)/ ▼

BBC
BROWN BOVERI

+

ASEA

=



Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget

Reálne plyny:

Za **vysokých tlakov** (stredné vzájomné vzdialenosti molekúl plynu už nie sú podstatne väčšie ako rozmery molekúl), alebo **vysokých teplôt** (priemerné rýchlosti molekúl sú značné), resp. v oboch situáciách – sa plyny už **nesprávajú** podľa jednoduchej stavovej rovnice $p \cdot V = R \cdot T$

Podobné správanie plynov pozorujeme aj „na opačnej strane“ pri **nízkych teplotách** – v blízkosti bodu varu danej látky, keď sa blížime kondenzácii.

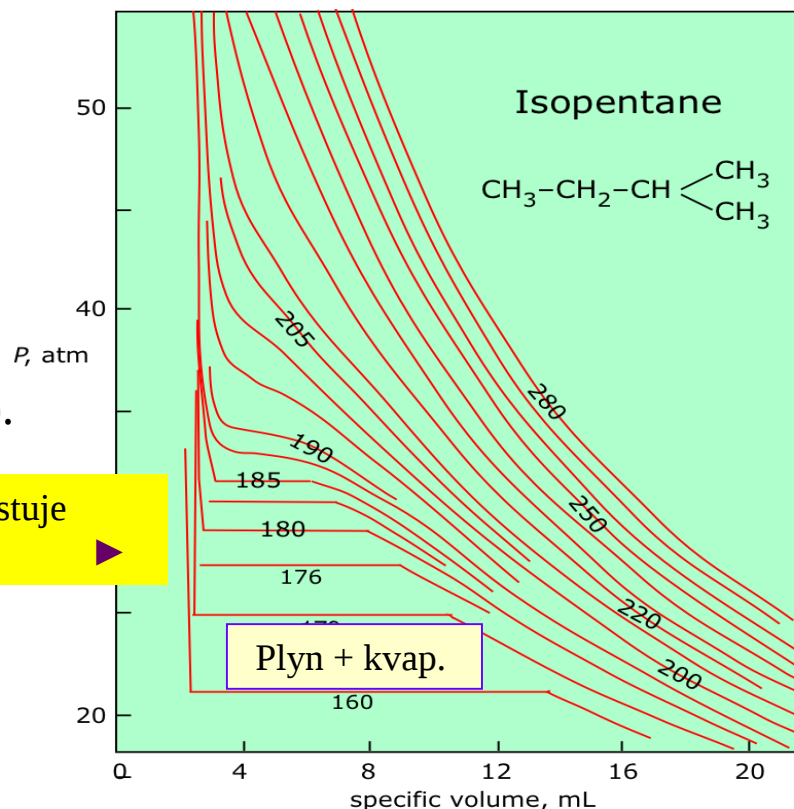
Na grafe vidíme časť $p - V$ diagramu uhľovodíku Izopentánu. *Izotermické krivky* (značené teplotou v K) zodpovedajú pre $T > 220$ K ideálnym (hyperboly). Pri nižších teplotách sa akosi „deformujú“ – objavujú sa **vodorovné úseky**, na ktorých **tlak nezávisí od objemu**.

To zodpovedá tzv. **fázovým prechodom**, kedy môžu **koexistovať dve skupenstvá** (plyn a kvapalina).

Kvapaliny sú takmer **nestlačiteľné** – objem nezávisí na tlaku – izotermy „idú“ **zvisle**.

V tejto oblasti už existuje iba kvapalina

Na **vodorovných** úsekoch izoterm sa mení **pomerný podiel plynu a kvapaliny**. Izoterma, na ktorej sa začne objavovať vodorovný úsek, je **kritická izoterma**. Prislúcha jej **kritická teplota T_K** a vodorovnému úseku **kritický tlak p_K** .



Stavová rovnica pre reálne plyny (van der Waalsova):

Odvodil ju holandský fyzik *Johannes Diderik van der Waals* (1837 – 1923; v roku 1910 získal **Nobelovu cenu za fyziku**). Trvale pôsobil na amsterdamskej univerzite. ▼

$$\left[P + a \left(\frac{n}{V} \right)^2 \right] \left(\frac{V}{n} - b \right) = RT$$



Veličiny p , V , R , T sú nám už známe zo stavovej rovnice ideálneho plynu, n je počet mólov plynu. Parametre a , b sú charakteristické pre každý plyn a získajú sa z experimentu – meraním.

Van der Waalsova rovnica vcelku presne opisuje správanie reálnych plynov. Dodatočné parametre a aj b fyzikálne vystihujú jednak to, že molekuly majú vlastný objem, teda *objem* plynu nikdy nemôže *klesnúť presne na nulu* (parameter b). Parameter a rešpektuje vplyv *síl medzi molekulami na malých vzájomných vzdialenostiach* (nazývané **van der Waalsove sily**).