



**GYMNÁZIUM F. X. ŠALDY**

PŘEDMĚTOVÁ KOMISE FYSIKY

---

# **Kruhový děj a tepelné motory**

*Poznámky & ilustrace*

Gymnázium F. X. Šaldy • Honsoft

2006 • Verze 2.0

## PŘEDZNAMENÁNÍ

Tento text slouží jako pomocný, faktografický text k výuce fyziky v gymnáziu. Nelze jej považovat za učebnici k samostatnému studiu nebo za jediný zdroj informací, se kterým má student pracovat.

Učivo o kruhovém ději patří mezi nejzajímavější (a nejhlubší) partie středoškolské látky; na jedné straně se dotýká zcela fundamentálních přírodních zákonů, na straně druhé má mnohé technické aplikace. Teoretické úvahy v termodynamice jsou dosti náročné; tento text byl připraven, aby studenti mohli „méně psát a více přemýšlet“. Nemají-li totiž být uváděné zákony jen bezmyšlenkovitě citovány (přesněji: opisovány na taháky a z nich opět opisovány do prověrek), je takové přemýšlení zcela nezbytné.

Předložený výklad se vyhýbá jakémukoliv matematickému formalismu, termodynamika „je vyprávěna jako pohádka“. Informovaný čtenář může posoudit, zda je míra zjednodušení příliš velká; autor rád přijme přesnější, přitom pro studenty střední školy stravitelný výklad.

Problémy, doplňkové otázky a příklady nejsou součástí tohoto textu; v hodinách jsou zadávány jinak. Ve vyučovacích hodinách je probírané učivo (oproti tomuto textu) přibližováno dále 3D modely. Pro vyučujícího jsou také k dispozici všechny obrázky ve formě samostatných souborů; lze je promítat dataprojektorem a komentovat.

Výklad je silně inspirován dostupnou literaturou; seznam pramenů je připojen v závěru. Tam je také přehled zdrojů použitých ilustrací. Laskavý čtenář promine „ilustrační nejednotnost“; bylo by obtížné a časově náročné vytvářet originální ilustrace. První část textu byl pořízena v typografickém systému  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ; užitý formát  $\mathcal{A}\mathcal{M}\mathcal{S}\text{-T}_{\text{E}}\text{X}$ .

Toto je druhá, podstatně změněná verze textu; autor prosí čtenáře, aby upozornili na nalezené chyby. Za připomínky k předchozí verzi textu vděčí studentům 3.B ve školním roce 2004/2005, zejména Táně Balatkové a Janu Krčkovi.

-jvk-

# KRUHOVÝ DĚJ

V předchozích kapitolách o ideálním plynu jsme odvodili vztahy pro práci vykonanou plynem. Při **izobarickém ději** platí

$$W' = p\Delta V. \quad (1)$$

V ostatních případech lze děj s plynem aproximovat  $n$  po sobě následujícími izobarickými ději; dojdeme tak k přibližnému vztahu

$$W' = \sum_{i=1}^n p_i \Delta V; \quad (2)$$

výsledek je tím přesnější, čím je  $\Delta V$  zvoleno menší. Ve vyšších ročnících ukážeme, že pomocí limitního přechodu obdržíme obecný vztah  $W' = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ .

Snahou mnoha vědců a techniků bylo využít práci, kterou plyn koná, v průmyslu. Nejprve se to podařilo v parním stroji, poté v dalších tepelných motorech. Podívejme se nejprve na teoretické úvahy související s motory; v další části si povšimneme jejich technických důsledků.

Jak známo, mechanickou energii lze měnit v energii vnitřní a naopak. Přeměna  $W \rightarrow Q$  se realizuje jednoduše (např. třením); v praxi však potřebujeme realizovat přeměnu opačnou,  $Q \rightarrow W$ . Využijeme k tomu některý z dějů s plynem, které jsme studovali dříve. Práce vykonaná pouze „při jednom ději“ je (z hlediska praxe) malá; potřebujeme, aby stroj (motor) pracoval dlouhou dobu. Proto je nutno **pracovní látku** (plyn, páru) po vykonání práce převést do původního stavu, aby se děj mohl opakovat.

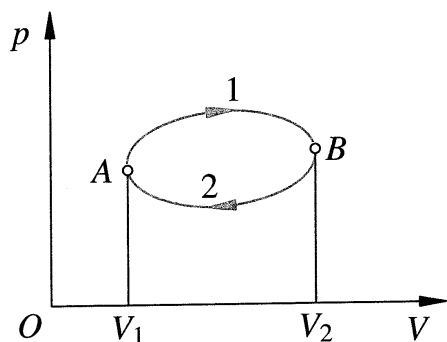
**Kruhový vratný děj (cyklus)** je takový soubor změn, po jejichž proběhnutí se vrátí pracovní látka do počátečního stavu.

Práce, vykonaná pracovní látkou, odpovídá obsahu plochy ležící „pod příslušnou křivkou“ v  $p - V$  diagramu. Sledujme OBR. 1. Práce, kterou vykoná pracovní látka při zvětšování objemu ze stavu  $A$  do  $B$ , je znázorněna obsahem plochy ležící v pracovním diagramu pod křivkou  $A1B$ . Má-li se pracovní látka vrátit z konečného stavu  $B$  do původního stavu  $A$ , musí zmenšit svůj objem. K tomu musí vykonat okolní tělesa na této látce práci. Pokud návrat proběhne opět po křivce  $B1A$ , rovná se práce (v absolutní hodnotě) vykonaná okolními tělesy práci, kterou předtím vykonal plyn; celkový zisk bude nulový. Proto je třeba, aby při zpětném přechodu konala okolní tělesa menší práci. To lze realizovat volbou jiné „zpětné cesty“. Při zpětném přechodu plynu ze stavu  $B$  do stavu  $A$  po křivce  $B2A$  vykonávají okolní tělesa práci, která je znázorněna obsahem plochy ležící pod křivkou  $B2A$ . Tento obsah (a tedy i práce) je menší, než obsah resp. práce související s křivkou  $A1B$ . Rozdíl obsahu obou ploch se rovná obsahu plochy omezené křivkou  $A1B2A$ . Odtud vyplývá: Obsah plochy uvnitř křivky zobrazující v diagramu  $p - V$  kruhový děj znázorňuje celkovou práci vykonanou pracovní látkou během jednoho cyklu.

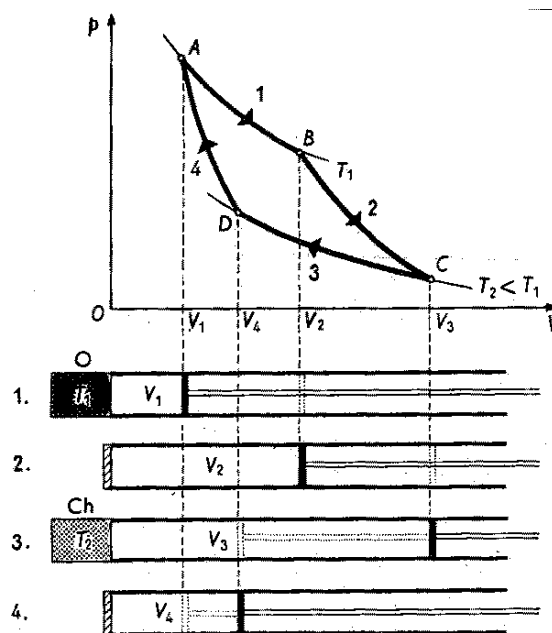
Při zvětšování objemu (expanzi) koná plyn práci  $W'_1$ , při zmenšování konají okolní tělesa práci  $W_2$ . Podle znaménkové konvence 1. TZ je tato práce kladná; proto odpovídající práce  $W'_2$  je záporná;  $W'_2 = -W_2$ . Celková práce plynu  $W'$  se rovná součtu jednotlivých prací, tedy  $W' = W'_1 + W'_2 = W'_1 - W_2$ . Tento rozdíl odpovídá v  $p - V$  diagramu obsahu plochy ohraničené křivkou  $A1B2A$ .

Který děj s plynem k tomu využít? Izochorický? – rozhodně ne, práce se při něm nekoná. Izobarický? – na práci se přeměňuje jen část dodaného tepla. Izotermický? – na práci se přeměňuje všechno dodané teplo, proto je tento děj *nejvhodnější*; práci plyn koná při izotermické expanzi. Aby při

rozpínání měl plyn stále stejnou teplotu (má to být izotermický děj!), musíme jej ohřívat ohřívačem; při zpětné kompresi jej musíme chladit chladičem. Toto se neustále cyklicky opakuje.



OBR. 1



OBR. 2

## CARNOTŮV CYKLUS

První tepelné motory (parní stroje) měly velmi malou účinnost. Bylo to nedostatky v jejich provedení, anebo tepelný stroj nemůže být v principu účinnější?

Aby bylo možno odpovědět na tuto otázku, začali fyzikové zkoumat **ideální tepelný stroj**, který dodané teplo nejlépe přemění na práci. Ideální stroj je definovaný těmito podmínkami:

- (1) Pracovní látkou je *ideální plyn*, uzavřený ve válci s pístem, který se pohybuje *bez tření*.
- (2) Pracovní látka má stále stejnou hmotnost, nikde neuniká.
- (3) Stroj je dokonale tepelně izolován, ztráty tepla jsou nulové.
- (4) Stroj má **ohřívač** o teplotě  $T_1$ , který dodává během pracovního cyklu pracovní látce teplo  $Q_1$ . Tepelná kapacita ohřívače je nekonečná, tzn. že i po předání tepla  $Q_1$  zůstane jeho teplota stále  $T_1$ .
- (5) Stroj má **chladič** o teplotě  $T_2$ ,  $T_1 > T_2$ , který během pracovního cyklu přijme od pracovní látky teplo  $Q_2'$ . Tepelná kapacita chladiče je nekonečná, tzn. že i po přijetí tepla  $Q_2'$  zůstane jeho teplota stále  $T_2$ .
- (6) Ohřívač resp. chladič lze k pracovní látce dokonale připojit, nebo je dokonale izolovat; teplo buď přechází zcela beze ztrát, nebo nepřechází vůbec.<sup>1)</sup>

Předpoklady jsou velmi „odvážné“. Takový stroj v realitě neexistuje; jeho zkoumání je však užitečné, neboť ukáže „fyzikální maximum“, tj. hranici účinnosti, kterou nelze překročit ani při technicky dokonalém provedení. („Víc příroda nedovolí.“) **Reálný stroj** bude mít účinnost zřejmě nižší.

<sup>1)</sup> Spojku „nebo“ chápeme tentokrát (na rozdíl od případu běžného v matematické logice) ve vylučovacím smyslu; tuto skutečnost znázorňujeme psaním čárky před spojkou, z hlediska stavby souřadného souvětí nejde o poměr slučovací, nýbrž vylučovací. Čeština je krásný jazyk.

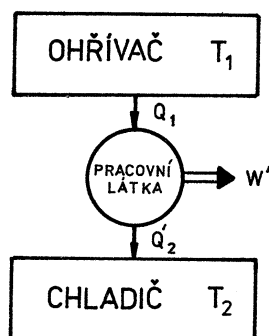
Sledujme nyní jednotlivé děje pracovního cyklu ideálního tepelného stroje. Tento cyklus se nazývá **Carnotův cyklus**.<sup>2)</sup> Příslušný diagram je v OBR. 2.

**1. Izotermická expanze.** Při tomto ději je dno válce ve styku s ohříváčem o teplotě  $T_1$ . Plyn se při teplotě  $T_1$  izotermicky rozpíná z objemu  $V_1$  na objem  $V_2$ . Při izotermické expanzi plyn přijme z ohříváče teplo  $Q_1$  a vykoná práci  $W'_1$ . Poněvadž změna vnitřní energie ideálního plynu je při izotermickém ději nulová, dostáváme pro tento děj  $W'_1 = Q_1$ .

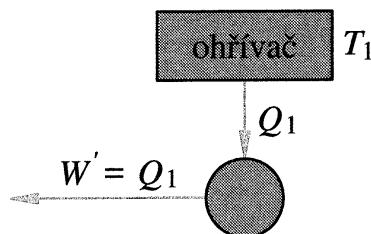
**2. Adiabatická expanze.** Po ukončení prvního děje dno válce tepelně izolujeme a necháme dále plyn adiabaticky rozpínat z objemu  $V_2$  na objem  $V_3$ . Při adiabatické expanzi se plyn ochlazuje z teploty  $T_1$  ohříváče na teplotu  $T_2$  chladiče. Práce, kterou vykoná plyn při tomto ději, se rovná úbytku jeho vnitřní energie.

**3. Izotermická komprese.** Po ukončení adiabatické expanze uvedeme dno válce do styku s chladičem o teplotě  $T_2$  a působením vnější síly se plyn při této teplotě izotermicky stlačuje z objemu  $V_3$  na objem  $V_4$ . Při izotermické kompresi vykoná vnější síla práci  $W_2$  a plyn odevzdá chladiči teplo  $Q'_2$ . Poněvadž vnitřní energie plynu zůstává při izotermickém ději stálá, platí  $W_2 = Q'_2$  neboli  $W'_2 = -Q'_2$ .

**4. Adiabatická komprese.** Při posledním ději Carnotova cyklu je dno válce opět tepelně izolováno a plyn se působením vnější síly adiabaticky stlačí z objemu  $V_4$  na počáteční objem  $V_1$ . Teplota plynu přitom vzroste z  $T_2$  na  $T_1$ . Práce, kterou vykoná vnější síla při adiabatické kompresi, rovná se přírůstku vnitřní energie plynu.



OBR. 3



OBR. 4

Provedme nyní celkovou pracovní bilanci Carnotova cyklu. Celková práce  $W'$  vykonaná plynem během jednoho cyklu je znázorněna obsahem plochy vymezené křivkou  $ABCD A$ . Poněvadž při obou adiabatických dějích plyn nepřijímá teplo od svého okolí, ani neodevzdává teplo okolním tělesům, je celkové teplo přijaté plynem během jednoho cyklu  $Q = Q_1 - Q'_2$ . Stroj, který pracuje podle Carnotova cyklu, přijímá při izotermické expanzi z ohříváče teplo  $Q_1$ , odevzdává při izotermické kompresi chladiči teplo  $Q'_2$  a koná práci  $W' = W'_1 + W'_2 = Q_1 - Q'_2$  (viz OBR. 3). Účinnost Carnotova cyklu je proto

$$\eta_C = \frac{\text{zisk}}{\text{vklad}} = \frac{W'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q'_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q'_2}{Q_1}. \quad (3)$$

Z uvedeného plyne  $\eta_C < 1$ . V tomto vztahu je účinnost vyjádřena pomocí tepel  $Q_1$  resp.  $Q'_2$ ; ta ovšem podle předpokladů neznáme. Znána je jen teplota chladiče a ohříváče.

<sup>2)</sup> Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796–1832) – francouzský fyzik, zakladatel teorie tepelných strojů (1824).

Lze dokázat (užitím integrálního počtu a znalostí o logaritmech, viz seminář), že platí **první věta Carnotova**:

$$\eta_C = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (4)$$

Odtud vyplývá, že účinnost  $\eta_C$  Carnotova cyklu závisí jen na podílu teplot ohřivače a chladiče a nezávisí na pracovní látce.<sup>3)</sup>

Carnotův cyklus je pracovním cyklem ideálního tepelného stroje pracujícího bez ztrát. Reálný stroj pracuje podle tzv. nevratného Carnotova cyklu, neboť v něm dochází ke ztrátám. Pro jeho účinnost platí  $\eta \leq \eta_C$ . Tento fakt vyjadřuje **druhá věta Carnotova**: Účinnost nevratného Carnotova cyklu není větší než účinnost vratného Carnotova cyklu, který pracuje mezi týmiž teplotami.

## DRUHÝ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON

První termodynamický zákon vyjadřující princip zachování energie vylučuje existenci stroje zvaného **perpetuum mobile prvního druhu** – tedy zařízení, které by trvale vykonávalo práci, aniž by spotřebovávalo jiný druh energie. První termodynamický zákon však nevylučuje existenci periodicky pracujícího stroje, který by veškeré teplo dodané ohřivačem  $Q_1$  přeměnil na práci  $W'$ , tedy  $W' = Q_1$ . Rozbor Carnotova cyklu však ukázal, že k získání práce je *bezpodmínečně* nutná existence dvou lázní, ohřivače a chladiče. Pracovní látka musí *nutně* odevzdávat *nějaké* teplo  $Q'_2$  chladiči, jinak stroj nemůže fungovat. Tuto skutečnost obsahuje **druhý termodynamický zákon**, který lze vyslovit třemi různými, ekvivalentními formulacemi:

**Thompsonova formulace 2. termodynamického zákona:** Není možné sestavit periodicky pracující tepelný stroj, který by jen přijímal teplo od určitého tělesa (ohřivače) a vykonával stejně velkou práci.

Hypotetický stroj (OBR. 4), který by něco takového konal, jest **perpetuum mobile 2. druhu**. Bylo by to také zajímavé zařízení: odebíralo by teplo nějakému tělesu, a konalo stejně velkou práci. Oním tělesem by např. mohl být světový oceán, snížením jeho teploty o např. setinu stupně by se pokryla energetická potřeba lidstva na velmi dlouhé období.<sup>4)</sup> Jak bylo výše uvedeno, *není* to však možné. Užitím pojmu perpetuum mobile 2. druhu lze zákon vyslovit stručněji:

**Ostwaldova formulace 2. termodynamického zákona:** Není možné sestavit perpetuum mobile druhého druhu.

### Obrácený Carnotův cyklus

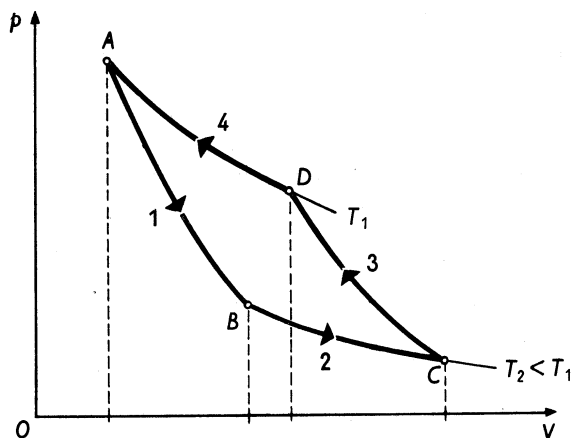
Představme si, že celý děj popsáný Carnotovým cyklem probíhá „pozpátku“. Diagram, znázorňující takový děj, bude velmi podobný OBR. 2, změní se „pouze“ směr šipek, viz OBR. 5. Energetická bilance je znázorněna v OBR. 6.

Stroj odebere z chladiče teplo  $Q_2$ , ohřivači odevzdá teplo  $Q'_1$ . Co se děje? Chladič teplo odevzdává, ohřivač přijímá. Teplo je tedy převáděno *z chladnějšího tělesa na teplejší*. Důležité však je, že takový děj *neprobíhá samovolně*, je třeba vykonat práci  $W$ ; přitom  $Q_2 + W = Q'_1$ .

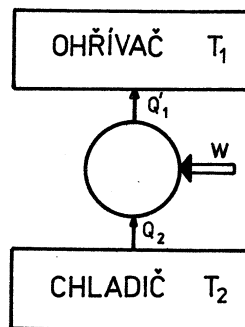
<sup>3)</sup> Starší formulace: „Účinnosti všech vratných Carnotových cyklů pracujících s týmiž lázněmi jsou stejné a závisí jen na teplotách obou lázní.“

<sup>4)</sup> V dobách, kdy byly tyto úvahy poprvé formulovány, se ještě nekladl důraz na ekologické důsledky takových činů...

**Clausiova formulace 2. termodynamického zákona:** Teplo nemůže samovolně přejít z tělesa studenějšího na těleso teplejší.



OBR. 5

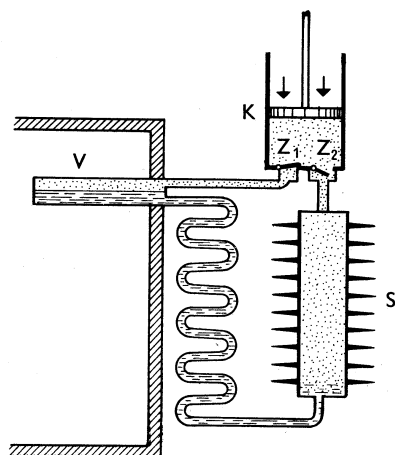


OBR. 6

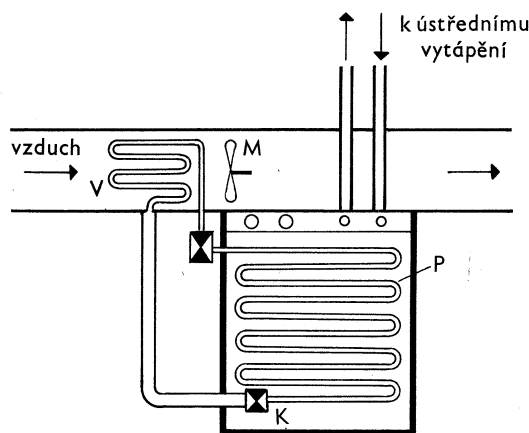
Obrácený Carnotův cyklus je pracovním cyklem **ideální chladničky** (Clausiovy chladničky). Účinnost reálných strojů využívaných k ochlazení pracovní látky je nižší. Takovými stroji jsou chladnička a tepelné čerpadlo.

**Kompresorová chladnička** (OBR. 7) využívá možnosti snižovat teplotu kapaliny jejím vypařováním za sníženého tlaku. Chladicí látka se za nižšího tlaku vypařuje ve výparníku  $V$  a přitom odebírá ochlazenému prostoru teplo odpovídající skupenskému teplu vypařování. Na jiném místě  $S$  chladicí látka kondenzuje za vyššího tlaku, který vytváří kompresor  $K$ , jehož činnost je ovládána záklopkami  $Z_1$  a  $Z_2$ . Kompresor koná mechanickou práci, chladicí látka odevzdá okolí skupenské teplo kondenzační.

**Tepelná čerpadla** lze použít k vytápění místností odčerpáváním tepla venkovnímu vzduchu, vodě v blízkém potoce, zemi ve vrtu. Jde o tepelný stroj teoreticky pracující podle Carnotova cyklu v obráceném směru. Obrazně řečeno, kdybychom zabudovali chladničku do venkovní stěny domu tak, aby její chladicí prostor s otevřenými dveřky byl venku a její chladič v místnosti, bude chladnička odebírat okolnímu vzduchu teploty  $T_2$  teplo  $Q'_2$  a za přispění jisté mechanické práce  $W$  bude do domu, jehož teplota je  $T_1$  ( $T_1 > T_2$ ) dodávat teplo  $Q'_1$ . Činnost tepelného čerpadla je patrná ze schématu v OBR. 8. Ve výparníku  $V$  odčerpává pracovní látka okolnímu vzduchu nasávanému ventilátorem  $M$  teplo potřebné k vypařování. Pracovní látka přichází v plynném stavu do pracovního prostoru  $P$ , v němž je stlačena kompresorem  $K$  na vyšší tlak, její teplota se zvýší. Plyn kondenzuje a přitom předává skupenské teplo kondenzační vodě cirkulující v systému ústředního topení. Tepelná čerpadla jsou velmi úsporným a účinným vytápěcím zařízením.



OBR. 7



OBR. 8

## Ekvivalence formulací 2. termodynamického zákona

V předchozím textu byly vysloveny tři různé formulace 2. termodynamického zákona. Ukažme, že jsou ekvivalentní. Ekvivalence Thompsonovy a Ostwaldovy formulace je zřejmá. Ukažme však, že

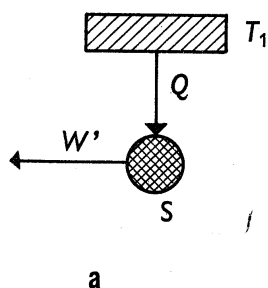
Thompsonova formulace  $\Leftrightarrow$  Clausiova formulace.

Pro stručnost uijme zkratku  $TF$  resp.  $CF$ . Máme tedy dokázat  $TF \Leftrightarrow CF$ , což je – jak známo z logiky – totéž jako dokázat  $(CF \Rightarrow TF) \wedge (TF \Rightarrow CF)$ . Uijeme však nepřímý důkaz; místo uvedených implikací dokážeme implikace obměněné, tedy  $\neg TF \Rightarrow \neg CF$  resp.  $\neg CF \Rightarrow \neg TF$ .

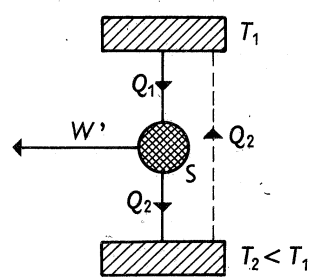
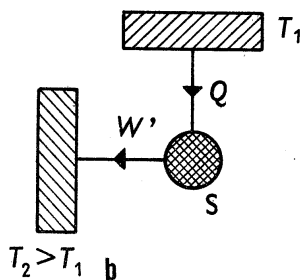
**Důkaz tvrzení  $\neg TF \Rightarrow \neg CF$ .** Předpokládejme, že neplatí  $TF$ , tj. že je možné sestrojiti perpetuum mobile druhého druhu. Tento stroj  $S$  by během každého cyklu kruhového děje přijímal od určitého tělesa o teplotě  $T_1$  teplo  $Q$  a vykonával by stejně velkou práci  $W' = Q$  (OBR. 9). Konáním práce (např. třením nebo nepružnými nárazy) lze však veškerou energii odebranou tělesu o teplotě  $T_1$  přeměnit na přírůstek vnitřní energie jiného tělesa o vyšší teplotě  $T_2 > T_1$ ; přitom soustava  $S$  konající práci se po skončení každého cyklu vrátí do svého původního stavu. Výsledek každého cyklu kruhového děje by tedy spočíval v tom, že by se úbytek vnitřní energie prvního tělesa o teplotě  $T_1$  rovnal přírůstku vnitřní energie druhého tělesa o vyšší teplotě  $T_2$ . Tento výsledek je tedy stejný, jako kdyby teplejší těleso přijalo od chladnějšího tělesa teplo, což však není podle  $CF$  druhého termodynamického zákona možné.

**Důkaz tvrzení  $\neg CF \Rightarrow \neg TF$ .** Předpokládejme, že neplatí formulace  $CF$ , tj. že těleso o vyšší teplotě může samovolně přijímat teplo od tělesa o nižší teplotě. Jak již víme, každý tepelný stroj pracuje tak, že během každého cyklu odebere z ohříváče teplo  $Q_1$  a z odebraného tepla jen část využije ke konání práce  $W'$ ; zbývající část (teplo  $Q_2$ ) předá chladiči (OBR. 10). Kdyby však neplatila  $CF$ , mohl by ohříváč o vyšší teplotě  $T_1$  přijmout od chladiče o nižší teplotě  $T_2$  zpět teplo  $Q_2$  (viz čárkovanou čáru na obrázku): Tepelný stroj na OBR. 10 by tedy pracoval tak, že by jen odebíral od ohříváče teplo  $Q_1$  a vykonával stejně velkou práci  $W' = Q_1$ , což však není podle  $TF$  možné.

Obě formulace druhého termodynamického zákona jsou proto ekvivalentní; důkaz je dokončen.



OBR. 9



OBR. 10

## TERMODYNAMICKÁ TEPLOTA

Poznatky o účinnosti Carnotova cyklu umožňují zavést termodynamickou stupnici tak, že není závislá na nahodilé volbě teplotoměrné látky (takovou látkou je v případě Celsiovy stupnice voda; v případě Fahrenheitovy stupnice voda, salmiak a lidské tělo).



Ze vztahů (3) a (4) pro účinnost Carnotova cyklu vyplývá (po vyrušení 1):

$$\frac{Q'_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (5)$$

z toho vyjádříme teplotu  $T_1$

$$T_1 = \frac{Q_1}{Q'_2} T_2. \quad (6)$$

Interpretace výsledku (6): Termodynamická teplota  $T_1$  je dána podílem dvou tepel  $Q_1, Q_2$ ; nezávisí na konkrétní látce. K měření termodynamické teploty je třeba ještě zvolit teplotu  $T_2$ ; volba padla na teplotu  $T = 273,16$  K rovnovážného stavu ledu, vody a vodní páry.

## VRATNÝ A NEVRATNÝ DĚJ; DEGRADACE ENERGIE

Některé fyzikální děje jsou vratné, jiné nevratné.

**Vratný (reversibilní) děj** může probíhat v obou směrech, přičemž soustava přejde při obráceném ději všemi stavy jako při přímém ději, avšak v obráceném pořadí. Vratné jsou mechanické děje bez tření (přeměna  $E_k$  na  $E_p$  a opačně), Brownův pohyb, pohyb planet kolem Slunce.

**Nevratný (ireversibilní) děj** je každý děj, který není vratný. Např. při třetí se všechna práce přemění na teplo, ale opačný děj (všechno teplo se přemění na práci) možný není. Dále jsme poznali, že teplo přechází samovolně z teplejšího tělesa na chladnější, ale v opačném směru nikoliv. Proto i tento děj je nevratný. Dalšími nevratnými jevy jsou např. zastavení pohybujícího se tělesa po vodorovné podložce vlivem tření, zastavení kola rotujícího na hřídeli, pád nepružného tělesa na podložku, expanze plynu do vyčerpané nádoby apod.

Při rozboru Carnotova cyklu jsme poznali, že v tepelném stroji musíme odvádět teplo při izotermické kompresi do chladiče; jinak zařízení nemůže fungovat. Toto teplo je ovšem *již nevyužitelné* ke konání práce v daném stroji. Proto se nazývá **tepelný odpad**. Všechny druhy energie lze (celkem snadno) změnit na teplo (např. třením), ale teplo na jiné formy energie jen zčásti. Proto lze říci, že teplo je nejnižší forma energie; v tepelných strojích se jiné, „vyšší“ formy energie *degradují* na energii tepelnou. Tento jev se nazývá **degradace energie**.

## STATISTICKÝ VÝZNAM DRUHÉHO TERMODYNAMICKÉHO ZÁKONA

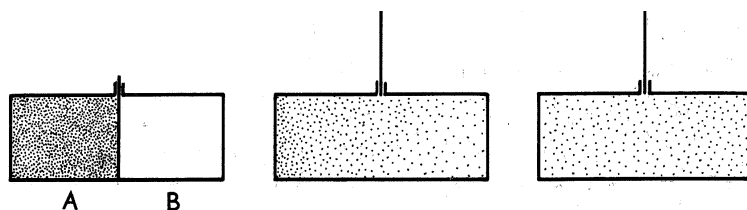
Termodynamické děje jsou tvořeny mechanickým pohybem částic. Přitom mechanické děje (bez tření) jsou vratné, zatímco termodynamické děje vratné nejsou. Není v tom spor?

Pokusme se vše vysvětlit. Předpokládejme např., že máme nádobu, která je přepážkou rozdělena na dvě stejné části  $A$  a  $B$ ; v části  $A$  je plyn (OBR. 11). Odstraníme-li přepážku, plyn se rovnoměrně rozptýlí po celém vnitřním prostoru nádoby. Ze zkušenosti je známo, že při větším počtu  $N$  molekul se molekuly nevrátí samovolně zpět; proto říkáme, že tento děj je nevratný.

Molekuly se ovšem pohybují chaoticky. Proto je *v principu možné* aby se při svém *chaotickém pohybu* vrátily pouze do části  $A$  nádoby; v části  $B$  bude opět vakuum. Spočítejme pravděpodobnost takového jevu. Z elementárních výpočtů podle klasické definice pravděpodobnosti (byly provedeny

ve vyučovací hodině) vyplývá, že pravděpodobnost je dána vztahem  $P = 1/2^N$ . Pro 1 molekulu plynu je taková pravděpodobnost 50 %, pro 2 je 25 %, pro 3 je 12,5 %, pro 4 cca 6 %. Pro 100 částic vychází už  $P = 0,8 \cdot 10^{-30}$ . (Pro srovnání: stáří Země je cca  $3 \cdot 10^{17}$  s.) Ve skutečném plynu není částic jen sto, ale řádově (v jednom molu)  $10^{23}$ . Závěr: Pravděpodobnost samovolného stlačení plynu do jedné poloviny nádoby je extrémně nízká, velmi se blíží nule.<sup>5)</sup>

Z uvedeného příkladu vyplývá, že soustava při termodynamických dějích přechází z počátečního méně pravděpodobného stavu do stavů pravděpodobnějších. Nejpravděpodobnější je **rovnovážný stav**, a proto v něm soustava setrvává nejčastěji.



OBR. 11

Podle druhého termodynamického zákona teplejší těleso nemůže přijímat teplo od chladnějšího tělesa. Příčinu platnosti tohoto zákona snadno pochopíme, uvědomíme-li si, že tepelná výměna je nevratný děj. Předpokládejme např., že dvě tělesa *A* a *B* o různých počátečních teplotách  $T_1 > T_2$  se navzájem dotýkají. Poněvadž těleso *A* má vyšší teplotu než těleso *B*, je také střední kinetická energie částic tělesa *A* větší než střední kinetická energie částic tělesa *B*. Je proto přirozené, že při vzájemných srážkách částic, ke kterým dochází na styčné ploše obou těles, částice teplejšího tělesa předávají část své energie částicím chladnějšího tělesa. Opačný děj není sice v principu vyloučený, je však velmi málo pravděpodobný. V tom spočívá také důvod, proč teplejší těleso ve shodě s druhým zákonem termodynamiky předává teplo chladnějšímu tělesu, a ne naopak.

## „Pravděpodobnost nepravděpodobného“

Úvahy z minulých odstavců můžeme rozšířit na ještě názornější situaci: Víme, že každé volné těleso v tíhovém poli Země („obvykle“) klesá svisle dolů. Z pohledu kinetické teorie látek je nejpravděpodobnější zcela neuspořádaný a chaotický pohyb všech molekul prostředí (tj. vzduchu), a tak výslednice všech sil vyvolaných jejich účinky je v každém časovém okamžiku právě rovna nule. Z toho důvodu nemůže způsobit ani zpomalení nebo zrychlení pohybu tělesa, ani vyvolat změnu jeho směru. Ale co kdyby nastal takovýto případ: Pohyb molekul by měl *jeden význačný směr*, vzhůru. Výsledný silový účinek by již pak nebyl nulový, ale směřoval by proti tíhové síle Země a těleso by se vzdalovalo od zemského povrchu. Vzhledem k tomu, že pohyb molekul prostředí je chaotický, *může* taková situace nastat, ale – jak jsme viděli v případě nádoby s plynem – je to extrémně nepravděpodobné. Uzavřeme tedy naše úvahy: Jevy typu: „plyn je samovolně jen v polovině nádoby“, „kámen se vznáší“, „voda teče nahoru“, „člověk chodí po hladině vody“ nejsou zcela nemožné, ale jsou **VELMI** nepravděpodobné. Tyto skutečnosti lze vyjádřit – patrně překvapivým – heslem: „zázraky jsou fyzikálně možné, ale jsou **VELMI** nepravděpodobné“.

<sup>5)</sup> Náš výpočet není zcela korektní, neboť jsme neuvažovali, že jednotlivé částice jsou *nerozlišitelné*. To v důsledku vede k tzv. Gibbsovu paradoxu.

## ENTROPIE

V předchozích úvahách byly použity pojmy vratný a nevratný děj. Nyní zavedeme veličinu, pomocí níž lze tyto dva typy dějů rozlišit.

Účinnost kruhového děje je dána obecně vztahem (3):

$$\eta = \frac{Q_1 - Q'_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q'_2}{Q_1}. \quad (7)$$

Účinnost **vratného** Carnotova cyklu vztahem (4):

$$\eta_{REV} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (8)$$

Položme oba vztahy do rovnosti. Číslo 1 se vyruší a dostáváme

$$\frac{Q'_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (9)$$

odtud jednoduchou úpravou dostaneme rovnosti

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q'_2}{T_2} \Rightarrow \frac{Q'_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} = 0 \quad (10)$$

Definujme novou veličinu **entropie**  $S$  vztahem  $S = Q/T$ . Potom ovšem je  $Q'_2/T_2 = S_2$  a rovněž  $Q_1/T_1 = S_1$ . Pro rozdíl entropií ve stavu 1 a 2 pak podle rovnosti (10) platí:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q'_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} = 0. \quad (11)$$

To vše bylo odvozeno pro vratný děj. Závěr: Při *vratném* ději je změna entropie nulová, tedy entropie je *konstantní*.

Účinnost **nevratného** děje  $\eta_{IR}$  je menší než účinnost vratného děje  $\eta_{REV}$ . Protože podle obecného vztahu je  $\eta_{IR} = 1 - Q'_2/Q_1$  a  $\eta_{REV} = 1 - T_2/T_1$ , platí

$$\eta_{IR} < \eta_{REV} \Rightarrow 1 - \frac{Q'_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (12)$$

z toho postupně (při násobení  $-1$  se mění znaménko nerovnosti):

$$\frac{Q'_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} < \frac{Q'_2}{T_2} \Rightarrow \frac{Q'_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} > 0. \quad (13)$$

Pro rozdíl entropií pak dostáváme

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q'_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} > 0. \quad (14)$$

Závěr: Při *nevratném* ději je přírůstek entropie kladný, tedy entropie *roste*.

Entropie je tedy konstantní (při vratném ději), nebo rostoucí (při nevratném ději). Jiná možnost není. Zároveň však víme, že každá soustava se snaží dospět do stavu rovnováhy, a tento stav je nejpravděpodobnější. V takovém stavu je potom entropie *maximální*.

Nejpravděpodobnější stav je stav rovnovážný, tedy neuspořádaný. Každá soustava samovolně spěje do neuspořádaného stavu, do chaosu, v němž má maximální entropii. Proti chaosu lze „bojovat“ jedině budováním uspořádanosti, tedy konáním práce; jedině při tom entropie **klesá**.

Pojmy uspořádanost a neuspořádanost mají stejný význam i v našem běžném životě. Tak uklizená místnost, fungující služby a doprava – to vše pro nás znamená uspořádanost a dobrou organizaci. Ale například kupící se špinavé nádobí v kuchyni, liché ponožky v našem šatníku, zaplevelená zahrádka – tak si představujeme neuspořádanost, špatnou organizaci. Z našeho hlediska je tedy entropie mírou dezorganizovanosti a neuspořádanosti. Platí

uspořádanost – malá entropie; neuspořádanost – velká entropie; úplný chaos – maximální entropie.

Americký matematik Norbert Wiener si uvědomil, že existuje něco, co je opakem entropie a co nazýváme **informací**, která je tak mírou organizace, uspořádanosti. Informaci můžeme kvantitativně definovat jako zápornou entropii. Norbert Wiener rozvíjel tyto úvahy dále a vybudoval na nich základy **kybernetiky**.

Podle některých teorií celý vesmír spěje postupně do stavu úplného chaosu, v němž bude mít maximální entropii. Bude pak jen soustavou samostatných, chaoticky se pohybujících částic (bez hvězd, galaxií ...). Taková situace se nazývá **tepelná smrt vesmíru**. Jde ovšem jen o hypotézu. Ve vesmíru totiž také existují místa, kde entropie (konáním práce) klesá. A potom: Uvedené zákony platí pro uzavřené soustavy. Je však vesmír uzavřený?<sup>6)</sup>

## TŘETÍ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON

V úvahách o entropii se objevily pouze výrazy  $\Delta S$ , tedy změny entropie. Jaká je však absolutní velikost entropie?

Max Planck<sup>7)</sup> ukázal, že při teplotě 0 K je entropie nulová.<sup>8)</sup> Důsledkem tohoto zjištění je **3. termodynamický zákon**: Žádným postupem, ať jakkoliv idealizovaným, nelze u žádné soustavy dosáhnout snížení její teploty na hodnotu 0 K konečným počtem operací.

## Fyzika nízkých teplot

Mnohé látky mají při nízkých teplotách zajímavé vlastnosti.

**Supratekutost** se projevuje u kapalin. Kapaliny mají nulovou viskozitu, protékají i velmi úzkými kapilárami prakticky bez tření. Měrná tepelná kapacita a teplotní koeficient délkové roztažnosti se blíží nule.

**Supravodivost** – odpor některých kovů při teplotách několika kelvinů prakticky mizí. Proud vzbuzený v oloveném prstenci protéká ještě po dobu několika dní po odstranění zdroje. K vysvětlení je třeba znalostí z kvantové mechaniky: Cooperovy páry, které se vytvoří, se nechovají jako fermiony, pro které platí Pauliho vylučovací princip, ale jako bosony, pro které tento princip neplatí.

Nízké teploty mohou mít velký význam pro techniku. Metody získávání nízkých teplot:

<sup>6)</sup> Úvaha je převzata z knihy [Ves88].

<sup>7)</sup> Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947) – německý fyzik zabývající se termodynamikou, teorií tepelného záření, fyzikální chemií; 14.12.1900 položil základ kvantové teorie.

<sup>8)</sup> Toto tvrzení platí pro chemicky čisté látky, u některých slitin tomu tak není – děje v nich probíhají tak pomalu, že *nenastane* stav rovnováhy.

- 1. zkapalňování plynů** – teplota tuhnutí kyslíku při normálním tlaku je 54 K, dusíku 63 K, vodíku 14 K, izotopy  $^4\text{He}$  a  $^3\text{He}$  při atmosférickém tlaku již netuhnou. Ke chlazení se postupně užívají dusík, pak helium  $^4\text{He}$ , nakonec  $^3\text{He}$ , neboť je extrémně drahé.
- 2. rozpouštění  $^3\text{He}$  ve  $^4\text{He}$**  – spojeno s absorpcí tepla, podobně jako při odpařování kapaliny. Objevitel metody: L. D. Landau<sup>9)</sup> ; minimální teplota 2 mK.
- 3. adiabatická demagnetizace paramagnetika** – ochlazovaná látka (např. měď Cu) se vloží do paramagnetické soli (např. kamenec chromito-draselný  $\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ ) a ochladí na teplotu 1 K jinou metodou. Pak se vloží do silného magnetického pole, domény se orientují podle pole, přitom se uvolňuje teplo, které odvádíme lázní pryč. Poté se pole vypne, magnetická orientace se vrací, k tomu je třeba energie. V důsledku „spotřebování“ energie se sůl ochladí a chladí také užitou látku (měď). Princip navrhli Debye a Giauque, minimální teplota 0,5 mK.
- 4. jaderná demagnetizace** – dosažena minimální teplota 27  $\mu\text{K}$  (rok 1983).

---

<sup>9)</sup> Лев Давидович Ландау (1908–1968) – sovětský fyzik, Nobelova cena 1962 za teorie o kondenzovaném stavu.

# PARNÍ MOTORY

## 1. Parní stroj

Parní stroj je nejstarší tepelný motor. Mezníky vývoje:

1689 Denis Papin, Thomas Savery – první, zoufalé experimenty; snaha sestavit tepelný motor

1699 Guillaume Amontons – první projekt parního stroje pro Pařížskou akademii

1705 Thomas Newcomen, John Cawley – první funkční parní stroj

1707 Denis Papin – první vysokotlaký parní stroj

1781 James Watt – četná vylepšení parního stroje (proto bývá pokládán za „vynálezce“)

### Schéma parního stroje (OBR. 12A)

$A$  – kotol,  $B$  – válec,  $C$  – chladič,  $D$  – pumpa.

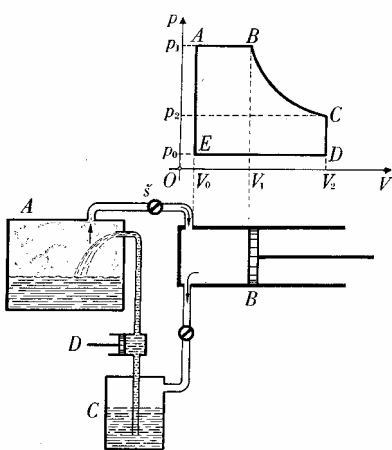
### Ideální cyklus parního stroje (OBR. 12B)

Idealizované předpoklady: nedochází ke ztrátám únikem tepla vedením nebo zářením, nedochází ke tření, pracovní látka neuniká ven.

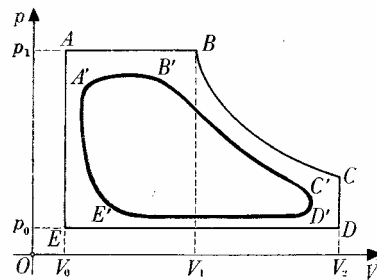
Reálné předpoklady: tepelné rezervoáry (ohřivač, chladič) nemají nekonečné tepelné kapacity (jako tomu bylo u Carnotova cyklu).

Práce vykonaná během jednoho cyklu je dána obsahem plochy uvnitř diagramu. Pracovní cyklus lze rozložit do 5 dějů:

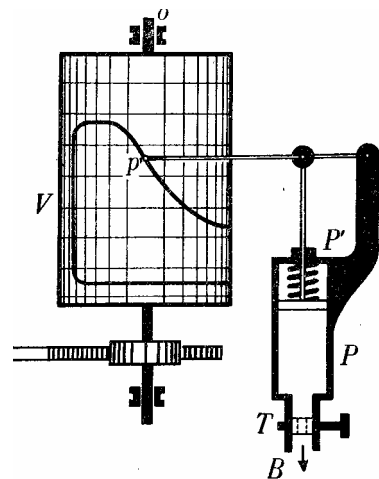
	$E$	Píst umístěn tak, že objem prostoru ve válci je minimální; uvnitř minimální objem $V_0$ a tlak vnějšího vzduchu $p_0$ .	
1	$E \rightarrow A$	Pára vniká z kotle do válce, píst se ještě nepohybuje, tlak páry vzroste na tlak $p_1$ , který je v kotli.	isochorický
2	$A \rightarrow B$	Pára se rozpíná, píst se pohybuje vpravo, přitom je válec stále spojen s kotlem – proto stále tlak $p_1$ , který je v kotli.	isobarický
	$B$	Přívod páry se zastaví šoupátkem.	
3	$B \rightarrow C$	Pára se adiabaticky rozpíná na objem $V_2$ , přitom tlak klesá na $p_2$ , klesá i teplota.	adiabatický
	$C$	V krajní poloze pístu se otevře spojení s chladičem.	
4	$C \rightarrow D$	Válec je otevřen do vnějšího prostoru, proto tlak klesá na hodnotu vnějšího tlaku $p_0$ , píst se zatím nevrací.	isochorický
	$D \rightarrow E$	Píst poháněný setrvačnickem vytlačí páru do kotle, objem se sníží na $V_0$ , kruhový děj se uzavírá.	



OBR. 12A



OBR. 12B



OBR. 13

## Reálný cyklus parního stroje

Získá se experimentálně pomocí záznamového zařízení zvaného indikátor (OBR. 13), výsledná křivka je v OBR. 12 uvnitř. Práce vykonaná během jednoho cyklu je opět dána obsahem plochy uvnitř křivky v diagramu.

**Výfukové motory** – po proběhnutí cyklu je pára vyfouknuta ven ze stroje a dále se s ní nepracuje.

**Kondenzační motory** – po proběhnutí cyklu se pára ochladí v kondenzátoru, teplo se znovu využije.

**Dvojčinné motory** – pracovní prostor je po obou stranách pístu.

**Účinnost.** Horní hranice dle Carnotova cyklu: teplota ohřivače 197 °C, chladiče 30 °C, proto  $\eta_{id} = 35 \%$ .  
Reálná účinnost: cca 16 %.

## 2. Parní turbína

Parní turbíny se užívají i v dnešní době (tepelné, jaderné elektrárny). Využívá se tlakových a pohybových účinků páry (pára proudí tryskami na lopatky oběžného kola). Kolo ovšem nelze konstruovat tak, aby se využila všechna energie páry (rychlost 900–1500 m/s), omezeno pevností kola, po průchodu oběžným kolem má pára velkou energii, kterou by byla škoda nevyužít, takže se pára soustavou rozváděcích lopatek (rozdávěcí kolo) vede do dalšího oběžného kola. Na jedné ose upevněno několik oběžných a rozváděcích kol, celek se nazývá Curtisovo kolo. (Počet dvojic oběžných a rozváděcích kol udává stupeň turbíny.)

Podle chování páry mezi lopatkami dělíme turbíny na:

a) **stejnотlaké (Lavalovy)** – tlak páry před vstupem i po vstupu do oběžného kola stále stejný, mění se rychlost páry; průběh tlaku a rychlosti páry v jednotlivých částech turbíny je v OBR. 14,

b) **přetlakové (Pearsonovy)** – pára expanduje i v lopatkách oběžného kola, tlak se tedy mění, OBR. 15.

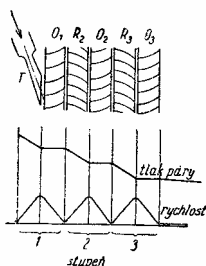
Stejnотlaká turbína bývá krátká, přetlaková dlouhá. Proto se volí **kombinované turbíny**, v nichž pracuje ve vysokých tlacích část stejnotlaková, v tlacích nižších část přetlaková. Podobně jako u praních strojů se rozeznávají turbíny výfukové a kondenzační.

**Ideální pracovní cyklus** – Rankinův oběh (OBR. 16)

1	$A \rightarrow B$	Vstup páry vysokého tlaku do turbíny	isobarický
2	$B \rightarrow C$	Expanze, koná se práce.	adiabatický
3	$C \rightarrow D$	Kondenzace při nízkém tlaku.	isobarický
4	$D \rightarrow A$	Návrat do původního stavu.	isochorický

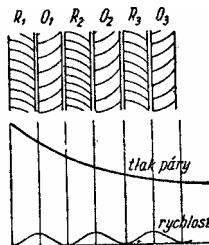
Výhody parní turbíny oproti parnímu stroji:

- jednodušší konstrukce; tichý, rovnoměrný chod,
- velký počet obrátek, vysoký výkon,
- účinnost 20 %.



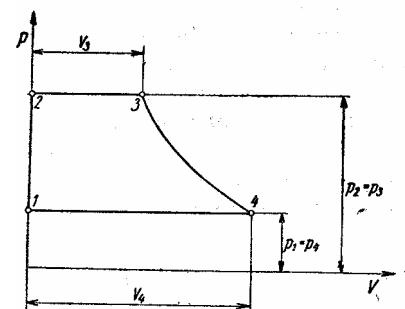
Obr. (4.4) 30. Průběh tlaků a rychlostí ve stejnotlakové turbíně se dvěma tlakovými stupni ( $T$  – tryska,  $O$  – oběžné kolo,  $R$  – rozváděcí kolo)

OBR. 14



Obr. (4.4) 31. Průběh tlaků a rychlostí v přetlakové turbíně ( $O$  – oběžné kolo,  $R$  – rozváděcí kolo)

OBR. 15



OBR. 16

# SPALOVACÍ MOTORY

Spalování paliv se neděje v kotli, ale přímo v motoru; tepelná energie se mění na mechanickou.

**Pístové motory** – spalování ve válci, translační pohyb pístu převáděn klikovým hřídelem na rotační.

**Rotační motory (spalovací turbíny)** – spalování v komoře, spaliny vedeny na lopatky.

## 1. Pístové spalovací motory

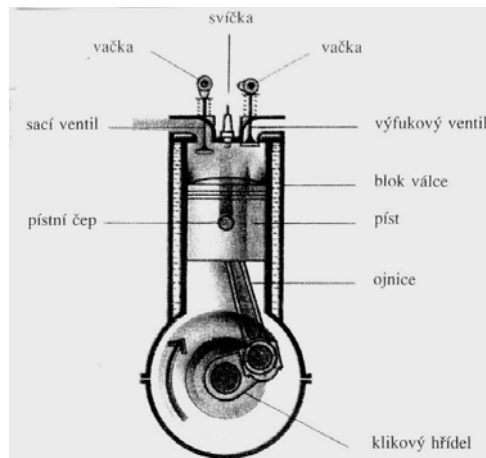
Ve válci zapálena směs, zplodiny tlačí na píst a pohybují jím.

Části klasického pístového motoru: píst, ojnice, klikový hřídel (OBR. 17).

Dělení pístových spalovacích motorů:

a) podle typu: zážehový (= výbušný, Ottův), vznětový (= stálotlakový, Dieslův);

b) podle počtu zdvihů na jeden cyklus: čtyř-, tří-, dvoudobé.



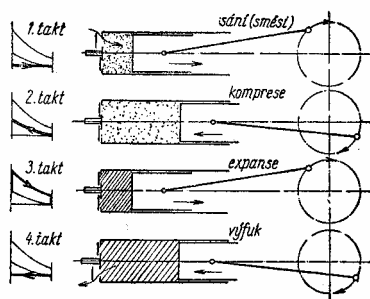
OBR. 17

### Zážehový (výbušný) čtyřtaktní motor (OBR. 18, 19)

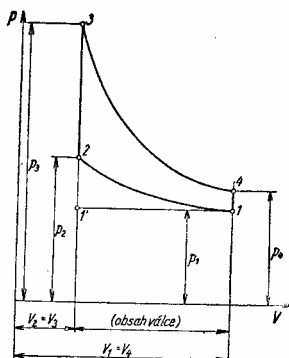
I.	sání	$1' \rightarrow 1$	Nasává se výbušná směs (vzduch a páry benzínu, zemní plyn, propan-butan), roste objem, stále atmosférický tlak	isobarický
II	komprese	$1 \rightarrow 2$	Směs stlačena pístem, roste $p$ , klesá $V$ .	adiabatický
III	exploze	$2 \rightarrow 3$	Zápálení směsi svíčkou, okamžité zvýšení teploty a tlaku.	isochorický
	expanze	$3 \rightarrow 4$	Expanze, koná se práce, klesá teplota.	adiabatický
IV	výfuk	$4 \rightarrow 1$	Ve 4 se otevře výfukový ventil, část spalin unikne, klesne tlak, objem konstantní.	isochorický
		$1 \rightarrow 1'$	Zbytek spalin vytlačen pístem, cyklus je uzavřen (což je ale přísně vzato nepravda – protože je to jiný plyn; doslova platí jen u parního motoru).	isobarický

Účinnost závisí zejména na adiabatickém ději, práce vykonaná při tomto ději na kompresním poměru. Při velkém kompresním poměru ovšem hrozí nebezpečí samovznícení (klepání motoru).

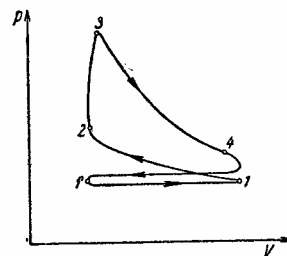
Ideální účinnost cca 38 %, realita cca: 30 %.



Obr. (4.4) 32. Schéma funkce čtyřdobého výbušného motoru



Obr. (4.4) 33. Srovnávací oběh výbušného motoru v diagramu  $p$ - $V$



Obr. (4.4) 34. Příklad skutečného oběhu čtyřdobého výbušného motoru

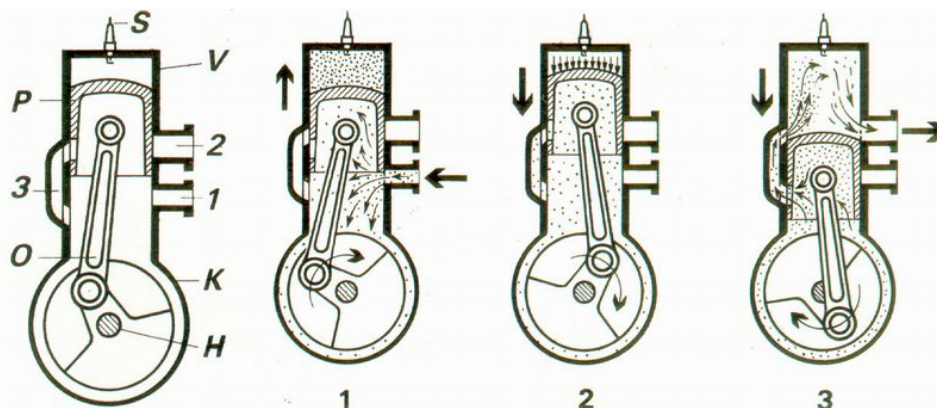
OBR. 18

OBR. 19



## Dvoutaktní motor

Při popisu vyjděme z předchozího typu motoru. Zde nejsou ventily, ale šoupátka, šoupátkem zpravidla přímo píst. Dále je zde prepouštěcí kanál. Pracovní doby jsou spojeny, palivo přetéká prepouštěcím kanálem (OBR. 20).

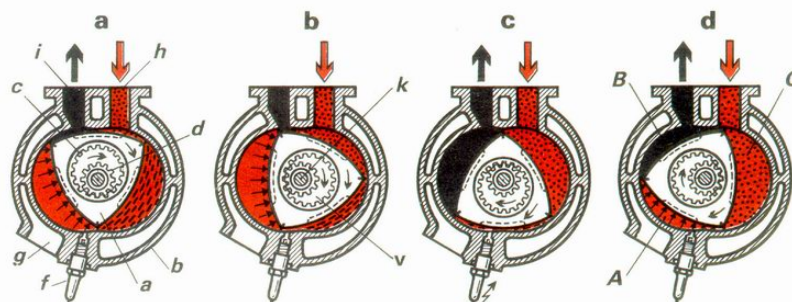


OBR. 20

## Třídobý Wankelův motor

Otáčivý trojúhelníkový píst, proto odpadá klikový mechanismus (výhodnější přenos energie, nevýhodou opotřebení ve „vrcholech trojúhelníku“). Jednotlivé části pracovního cyklu probíhají zároveň v různých částech motoru (OBR. 21). Užito ve některých vozech Mazda, problémy s opotřebením.

209 Činnost Wankelova motoru *a* rotační píst, *b* pevná pístní skříň, *c* vnitřní ozubení pístu, *d* ozubené kolo pevně spojené se stěnou skříně, *f* svíčka, *g* vodní chlazení pístní skříně, *h* sací kanálek, *i* výfukový kanálek, *k* hřídel motoru, *v* vnitřek pístu, *a* pracovní cyklus, *b* výfuk, *c* sání

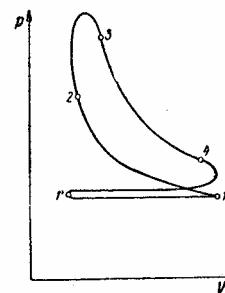
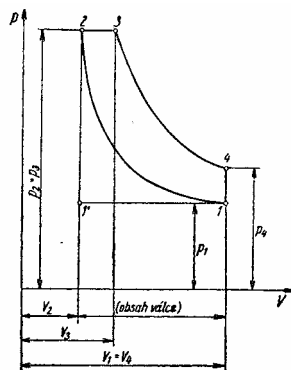
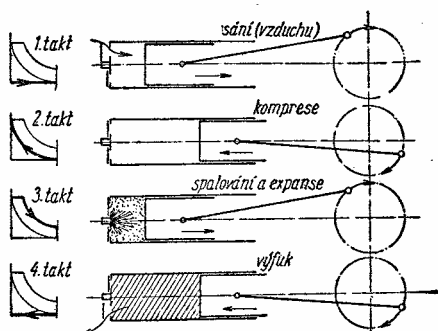


OBR. 21

Vznětový (stálotlakový, Dieselův) motor (OBR. 22)

I.	sání	$1' \rightarrow 1$	Nasává se (pouze) vzduch, roste objem, stále atmosférický tlak	isobarický
II	komprese	$1 \rightarrow 2$	Vzduch stlačen pístem asi na 1/5 původního objemu, roste tlak.	adiabatický
III	exploze	$2 \rightarrow 3$	Do stlačeného vzduchu se vstříkne palivo (nafta, petrolej), v rozžhaveném vzduchu hoří při stálém tlaku, stoupá teplota a objem	isobarický
	expanze	$3 \rightarrow 4$	Expanze, koná se práce.	adiabatický
IV	výfuk	$4 \rightarrow 1$	Otevře se výfukový ventil, část spalin unikne, klesne tlak, objem konstantní.	isochorický
		$1 \rightarrow 1'$	Zbytek spalin vytlačen pístem.	isobarický

Výhody tohoto motoru: vyšší kompresní poměr, lepší využití paliva, nedochází k samovznícení.  
 Ideální účinnost: 63 %.



Obr. (4.4) 36. Srovnávací oběh stálotlakového (Dieselova) motoru v diagramu  $p-V$

Obr. (4.4) 37. Příklad skutečného oběhu čtyřdobého stálotlakového (Dieselova) motoru

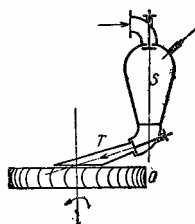
## OBR. 22

## 2. Spalovací rotační motory (spalovací turbíny)

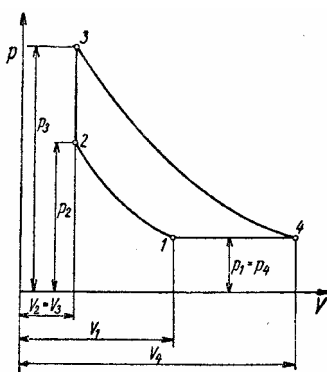
**Výbušná turbína.** Stlačený vzduch se vede vstupním ventilem do spalovací komory, kde se do něj vstříkne jemně rozprášené palivo. Směs se zapálí elektrickou jiskrou a po shoření za stálého objemu vstupuje tryskou do oběžného kola (OBR. 23). Oběh se dokončí výfukem. Příslušný diagram, Humphreyův oběh, je v OBR. 24 (1→2 adiabatická komprese; 2→3 isochorické spalování, 3→4 adiabatická expanze v trysce a oběžném kole; 4→1 isobarický výfuk).

**Stálotlaková turbína.** Spalování probíhá při stálém tlaku. Příslušný Braytonův oběh je v OBR. 25. Popis je podobný jako v předchozím případě, úsek 2→3 představuje isobarické spalování.

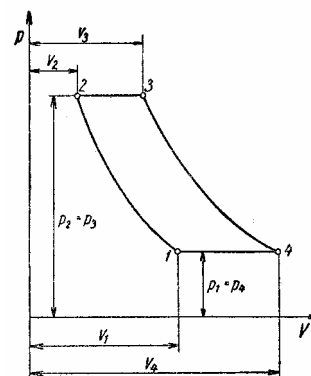
Teploty plynů v turbínách jsou až 900 °C, otáčky až 20 000 min<sup>-1</sup>. Odstředivá zrychlení až 10<sup>5</sup>× větší než normální tíhové zrychlení.



Obr. (4.4) 38. Princiální schéma výbušné turbíny:  $S$  — spalovací komora s uzavíracími orgány a se zapalováním,  $T$  — tryska,  $O$  — oběžné kolo



OBR. 24



OBR. 25

## REAKTIVNÍ MOTORY

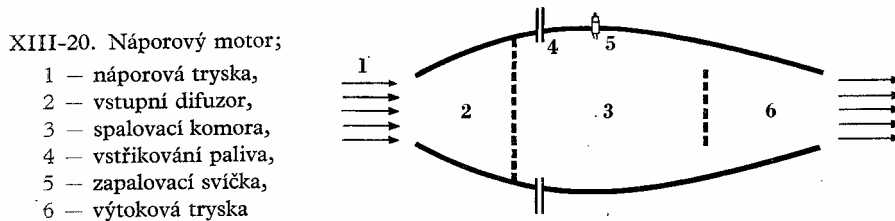
Reaktivní motory využívají reakční sílu (princip akce a reakce) při výtoku spalin plynů tryskou (proto také: tryskové motory). Dělí se na proudové a raketové podle toho, zda potřebují k provozu atmosférický vzduch. V dalším výkladu uvedeme pouze základní typy a několik historických poznámek; podrobnější informace si zvidavý čtenář najde např. v internetu.

## 1. Proudové motory

K provozu potřebují oksyličovadlo; oksyličovadlem a současně pracovní látkou motoru je atmosférický vzduch. Ten vstupuje do motoru v přední části, tryskou unikají ven ohřáté plyny, reakcí je pohyb (motoru, letadla) v opačném. Pro ekonomický provoz nutno vzduch nejprve stlačit; podle způsobu stlačení vzduchu se motory dále dělí:

### Náporový motor (OBR. 26)

Konstrukčně nejjednodušší. Vzduch vchází vstupním otvorem do difuzoru. Zde ztrácí kinetickou energii, takže roste tlak. Ve spalovací komoře se vstříkne palivo a zapálí svíčkou. (Později – při vyšší teplotě – se palivo vzněcuje už samo.) Stlačení se děje nápořem vzduchu (odtud název motoru); motor musí mít dostatečnou rychlost. Nestartuje sám, nýbrž pomocí startovacích raket. Hospodárné při nadzvukových rychlostech; použito v pokusných konstrukcích.

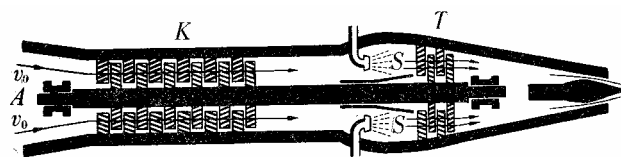


OBR. 26

### Turbokompresorový motor (OBR. 27)

Tento motor má kompresor, sloužící ke stlačení nasávaného vzduchu, a plynovou turbínu, která kompresor pohání. Vzduch vnikající předním otvorem motoru *A* je stlačován kompresorem *K*; tlak a tepelný obsah vzduchu přitom stoupá. Stlačený vzduch jde do spalovací komory *S*, kde v průběhu spalování dále roste jeho teplota a tepelný obsah. Spaliny procházejí rozvodovým zařízením plynové turbíny *T* na oběžné kolo, které roztáčí kompresor.

Tah motoru může být vyvozen: a) pouze expanzí spalin v trysce – **čistě proudové motory**, b) expanzí spalin v trysce a tahem vrtule – **turbovrtulové motory**. Turbovrtulové motory jsou konstruovány dvojím způsobem – jako jednoturbinové (jednohřídelové) nebo jako dvouturbinové (dvouhřídelové). V **jednoturbinových** proudových motorech jediná turbina pohání turbokompresor pro přívod vzduchu do spalovací komory i vrtuli. Ve **dvouturbinových** proudových motorech mají jak turbokompresor, tak vrtule vlastní turbínu. Reduktor je převodové zařízení, ve kterém se otáčky turbíny snižují (redukují) na otáčky vhodné pro vrtuli.



XIII-21. Turbokompresorový motor; 1 – vstupující vzduch, 2 – vstupní komora, 3 – spouštěcí motor, 4 – kompresor, 5 – spalovací komora, 6 – rozprašovač paliva, 7 – svíčka, 8 – turbína, 9 – výstupní tryska, 10 – uzavírací kužel, 11 – vystupující plyny

OBR. 27

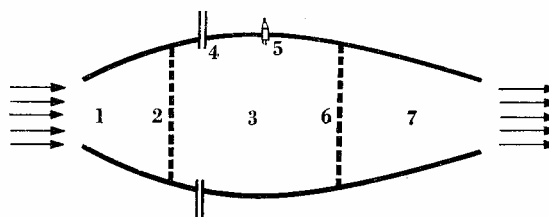
### Pulsační motor (OBR. 28)

Pulsační proudové motory na rozdíl od předchozích typů nepracují plynule, ale přerušovaně – pulzují. Vzduch a palivo jsou dodávány v časových intervalech, ohraničených samočinným otevíráním a uzavíráním vstupního otvoru pružnými žaluziemi. Motor se startuje přivedením proudu vzduchu na vstup k žaluziím. Žaluzie se tlakem vzduchu odtlačí a proud vzduchu ve spalovací komoře strhne a rozpráší palivo přiváděné do trysky. Po zapálení směsi paliva se vzduchem zvýšený tlak spalin přitlačí žaluzie na opěrnou mříž. Spaliny unikají tryskou a uvádějí motor do pohybu. Při poklesu tlaku ve

spalovací komoře odtláčí nápor vzduchu před motorem žaluzie, vzduch vstupuje do spalovací komory, strhává a rozprašuje palivo a celý pulzační cyklus se opakuje. Frekvence pulsů raket V-1 byla  $45 \text{ s}^{-1}$ . Z popisu je zřejmé, že k nastartování motoru je třeba vyvolat nápor vzduchu ve vstupu do motoru. To je možno uskutečnit například startem za pomoci startovacích raket.

XIII-22. Pulsační motor;

- 1 – vstupní difuzor,
- 2 – vstupní ventily,
- 3 – spalovací komora,
- 4 – rozprašovač paliva,
- 5 – svíčka,
- 6 – výstupní ventily,
- 7 – výstupní tryska



OBR. 28

## 2. Raketové motory

Raketové motory mohou pracovat bez atmosféry; okysličovadlo nesou s sebou. Podle typu paliva se dělí do dvou skupin: **raketové motory prvního druhu** (tuhé palivo), **raketové motory druhého druhu** (kapalné palivo).

### Raketové motory prvního druhu (pevné palivo) (OBR. 29)

Pevné, práškové palivo (zpravidla střelný prach slisovaný do tvaru dutého válce) je smíšeno s okysličovadlem. Vznikají vysoké tlaky, doba hoření je krátká, lze ji jen těžko regulovat. Motor nelze zastavit. Využito u některých střel (sovětské kaťuše).

### Raketové motory druhého druhu (kapalné palivo) (OBR. 30)

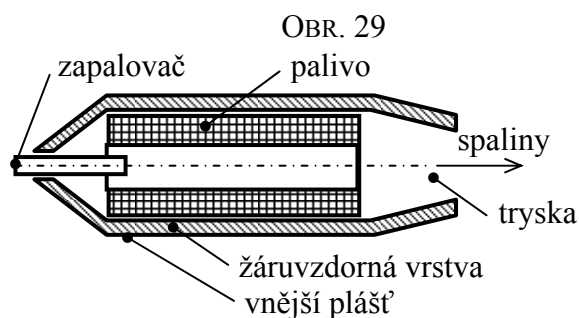
Palivo v těchto motorech jsou: **výrobky z ropy**, např. parafíny (krystalické směsi vyšších nasycených alifatických uhlovodíků), aromatické uhlovodíky (benzen, toluen, xylen, ethylbenzen), nafteny čili cyklické uhlovodíky (cyklopentan, cyklohexan); **alkoholy** (methanol, ethanol); **nitrosloučeniny**. Jako okysličovadlo se užívá kapalný kyslík, peroxid vodíku, kyselina dusičná, oxid dusičný atd.

Palivo a okysličovadlo jsou v kapalném stavu uloženy v zásobnících. Do spalovací komory jsou dopravovány a) přetlakem vzduchu, přiváděného do zásobníků paliva a okysličovadla ze zvláštních tlakových nádob, b) čerpadly. Turbiny pro pohon čerpadel paliva a okysličovadla mohou být poháněny spalinami vznikajícími ve spalovací komoře motoru nebo ve zvláštních k tomu speciálně určených spalovacích komorách.

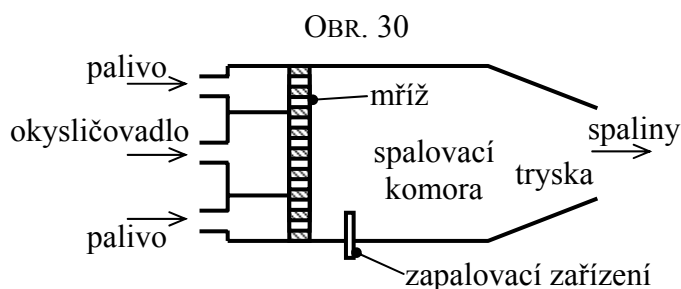
## Použití tryskových motorů

**Motory proudové:** letadla, silniční vozidla, saně atd.

**Motory raketové:** meziplanetární rakety, družice (ke korekci pohybu a polohy), letadla (zkrácení startovací nebo přistávací dráhy), pro vyvození síly při měření různých namáhání (modelování síly větru u pozemních konstrukcí jako mostů a stožárů nebo zkoumání vlivu boční síly větru u vozidel), raketové střely ve vojně.



Základní uspořádání raketového motoru na tuhé palivo



Základní uspořádání raketového motoru na kapalné palivo

## MALÝ SLOVNÍČEK POJMŮ

Uvádění anglických ekvivalentů českých pojmů probíraných v textu není v dnešní době snobismem, nýbrž nutností. Z důvodů „lepší čitelnosti“ textu nejsou anglické pojmy uváděny na příslušných místech textu, ale souhrnně zde v závěru.

Pojmy jsou řazeny v tom pořadí, v jakém se v textu postupně objevují. Všechny anglické termíny jsou převzaty z publikace [VSF].

práce	work
vnitřní energie	internal energy
druhý / třetí termodynamický zákon	second / third law of thermodynamics
perpetuum mobile 2. druhu	perpetual motion machine of the second kind
zákon růstu entropie	increase in entropy principle
vratný děj	reversible process
kruhový děj	thermal cycle
ohřívač	heat reservoir
chladič	cooler, refrigerator
Carnotův cyklus / stroj	Carnot cycle / engine
Carnotova věta	Carnot's theorem
tepelný motor	heat engine
parní stroj / turbína	steam engine / turbine
pístový spalovací motor	piston engine
čtyřdobý / dvoudobý spalovací motor	four-stroke / two-stroke engine
four-stroke spark-ignition engine	čtyřdobý zážehový motor
vznětový motor	compression ignition engine, Diesel engine
spalovací turbína	internal combustion turbine
tryskový reaktivní motor	reaction engine, jet-propulsion engine, turbo-jet engine
tepelné čerpadlo	heat pump

## LITERATURA

- [MFT] Bartuška, K. – Svoboda, E.: Fyzika pro gymnázia: Molekulová fyzika a termika. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2001.
- [Svo92] Svoboda, E. – Bakule, R.: Molekulová fyzika. 1. vyd. Praha: Academia, 1992.
- [Hla71] Hlavička, A. – Bělař, A. – Krčmešský, J. – Špelda A.: Fyzika pro pedagogické fakulty. 1. vyd. Praha: SPN, 1971.
- [Hor61] Horák, Z. – Krupka, F. – Šindelář, V.: Technická fyzika. 3. vyd. Praha: SNTL, 1961.
- [FC2] Fuka, J. – Frei, V. – Svoboda, M.: Cvičení z fyziky II. 1. vyd. Praha: SPN, 1985.
- [Lep87] Lepil, O. – Bartuška, K. – Koubek, V. – Vachek, J.: Vybrané kapitoly z fyziky. 1. vyd. Praha: SPN, 1987.
- [Ves88] Veselá, E.: Co nám příroda nedovolí. 1. vyd. Praha: Panorama, 1988.
- [LFy] Fyzikové. 1. vyd. Praha: Encyklopedický dům, 1997.
- [Lau59] Laue, M. von: Dějiny fyziky. 1. vyd. Praha: Orbis, 1959.
- [VSF] Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001.

## Zdroje obrázků

- [MFT] 1, 4
- [Svo92] 3, 6
- [Hla71] 12, 13, 26–28
- [Hor61] 14–16, 18–19, 22–25
- [FC2] 2, 5, 7–8
- [Lep87] 9–11