

KRUHOVÝ DĚJ A TEPELNÉ MOTORY



Gymnasium F. X. Šaldy
Liberec
Honsoft 2021

SEMINÁŘ
přírodovědný

SEMINÁŘ
z fyziky

Obsah

ÚVOD

ESEJ V POLOČASU

Entropie, nikoliv energie ovládá svět 25

KRUHOVÝ DĚJ

PARNÍ MOTORY

- 1.1 Práce plynu 7
- 1.2 Definice kruhového děje 8
- 1.3 Ideální tepelný stroj 10
- 1.4 Carnotův cyklus 11
- 1.5 Účinnost Carnotova cyklu* 11
- 1.6 Věty Carnotovy 13

- 5.1 Parní stroj* 27
- 5.2 Parní turbína 28

SPALOVACÍ MOTORY

DRUHÝ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON

- 2.1 Obrácený Carnotův cyklus 14
- 2.2 Chladicí stroje & tepelná čerpadla 15
- 2.3 Ekvivalence tří formulací** 16
- 2.4 Termodynamická teplota 17

- 6.1 Pístové motory 29
- 6.2 Lopatkové spalovací motory 32

REAKTIVNÍ MOTORY

- 7.1 Proudové motory 33
- 7.2 Raketové motory 35

ENTROPIE

MALÝ SLOVNÍK POJMŮ

- 3.1 Vratný a nevratný děj 18
- 3.2 Entropie: fenomenologický přístup 19
- 3.3 Pravděpodobnost nepravděpodobného 20
- 3.4 Entropie: statistický přístup 22
- 3.5 Degradace energie 23

LITERATURA

TŘETÍ TERMODYNAMICKÝ ZÁKON

- Použitá literatura 37
- Zdroje číslovaných obrázků 37
- Zdroje ostatních obrázků 38

- 4.1 Fysika nízkých teplot 24

Úvod



Molekulová fyzika a termika

Studijní materiály
Gymnasia F. X. Šaldy

■ KE STUDIJNÍMU TEXTU PATŘÍ

sbírka úloh

pracovní listy s úlohami zadanými graficky

rozcestník odkazů na animace a videa

■ NA OBÁLCE

Na obálce jeden z „ikonických“ výjevů z filmu *2001: Vesmírná odysea* (2001: *A Space Odyssey*, 1968), režie Stanley Kubrick podle námětu Arthura C. Clarka. Film, který spojuje vize o nejmodernějších technologiích se základními otázkami lidského bytí – a plyne v čase od úsvitu dějin přes rok 2001 do „nejasného mimočasu“ –, předkládá vesmírnou choreografii v rytmu valčíku Johanna Strausse ml. (*An der schönen blauen Donau*) rámovanou symfonickou básní *Also sprach Zarathustra* Richarda Strausse.

Úvahy o kruhovém ději a souvisejících problémech patří mezi nejzajímavější (a nehlubší) partie středoškolské fyziky; na jedné straně je možné dotknout se zcela fundamentálních přírodních zákonů, na straně druhé lze ukázat běžné technické aplikace. Teoretické úvahy v termodynamice či statistické fyzice jsou myšlenkově dosti náročné; tento text byl připraven, aby studenti/studentky mohli „méně psát či obkreslovat a více přemýšlet“.

I když se výklad v některých kapitolách nevyhýbá matematickému popisu, přesto je termodynamika často „vyprávěna jako pohádka“. Zda je míra zjednodušení příliš velká, musí posoudit případný „informovaný čtenář“; autor rád přijme přesnější, přitom pro studenty středních škol stravitelný výklad.

Teprve po dokončení 2. vydání textu měl autor možnost seznámit se s velmi zajímavou učebnicí [Wal10] Jamese S. Walkera *Physics* (4th edition). Bylo příjemné zjistit, že značně erudovanější americký autor podává témata velmi podobným způsobem jako tento skromný učební text pro gymnasia. — Pro 3. vydání byl text o některé další nápady z učebnice [Wal10] doplněn.

3. vydání textu bylo také podstatně přepracováno. Zatímco úvodní teoretické úvahy jsou rozšířeny, druhá část je zkrácena – vypuštěny byly např. oběhy pro jednotlivé typy turbín. Hlavně ale text počítá s novým uspořádáním ŠVP Gymnasia F. X. Šaldy – text tak není určen pro všechny žáky, ale jen pro ty, kteří si zvolili tříhodinový přírodovědný seminář ve druhém ročníku. Předpokládá se, že k některým náročnějším partiím výkladu se žáci vrátí ve fyzikálním semináři ve 3. či 4. ročníku; takové partie jsou označeny hvězdicí či dvěma hvězdami. To také vysvětluje odlišnou úroveň použité matematiky: Zatímco v KAP. 3.2 se integrál obchází, v části KAP. 1.1, na niž navazuje odvození v KAP. 1.5, se už integrál užívá.

Nově zařazené exkursy v postranních pruzích usazují téma výkladu do širších fyzikálních, obecně přírodovědných či historicko-společenských souvislostí. Problémy, doplňkové otázky a příklady nejsou součástí textu, jsou připraveny ve sbírce úloh a v pracovních listech. Termodynamika neumožňuje předvedení tak velkého množství „vděčných“ experimentů jako mechanika, elektrostatika či optika – tím roste význam 3D modelů, animací, videí. Odkazy na doporučené animace a videa jsou umístěny v rozcestníku na webu vyučujícího.

Děkuji všem, kteří pomohli svými připomínkami. Připomínky k první verzi textu dodali studenti 3. B ve školním roce 2004–2005, zejména Táša Balatková a Jan Krček; pracovní verzi vydání posledního přečetla kolegyně Mgr. Ivana Buchalová.

Tento úvod dopisuji po jarních prázdninách 2021, v čase masopustním, v době pokračující distanční výuky na středních školách. Z mediálních prohlášení politiků i sdělení ministerstva školství je zřejmé, že žáci se do škol v nejbližší době nevrátí.

Přeji všem čtenářkám a čtenářům, aby náročné téma kruhového ději zvládli i v době distanční výuky: s nadhledem, klidem i radostí. Ať už šipka času (viz KAP. 3.5) míří kamkoliv...

J. V.



Tak řízením osudu všecko v horší se zvrhá a upadá, v poklesu nazpět se řítí, nejnak, než když muž svým veslem pohání člunek naproti návalu vln, však jakmile ochabnou ruce, rázem střemhlav dolů jej proudem strhuje řeka.

Vergilius

Die Energie der Welt ist konstant.

Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

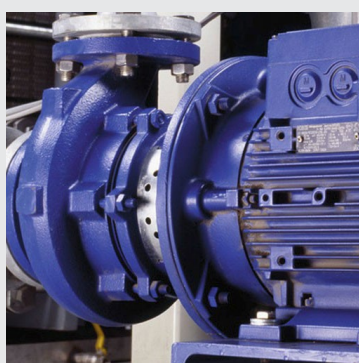
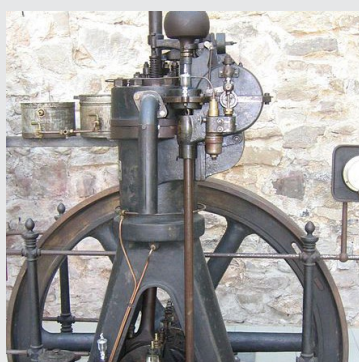
Rudolf Clausius

Druhý termodynamický zákon je jediný fundamentální fyzikální zákon, který rozlišuje minulost od budoucnosti. Žádný jiný to nečiní. Ani Newtonovy zákony ovládající mechaniku světa, ani rovnice elektřiny a magnetismu zformulované Maxwellem. Ani Einsteinovy zákony relativistické gravitace, ani rovnice kvantové mechaniky objevené Heisenbergem, Schrödingerem a Diracem. Ani zákony pro elementární částice zformulované fyziky 20. století... Ani jedna z těchto rovnic nerozlišuje minulost od budoucnosti. Dovolují-li tyto rovnice určitou posloupnost událostí, pak dovolují též stejnou posloupnost v opačném pořadí. Ve fundamentálních rovnicích světa se šipka směru času objevuje pouze tam, kde je přítomné teplo. Vnitřní provázanost času s teplem je tedy zcela zásadní: kdykoli se vyjevuje rozdíl mezi minulostí a budoucností, je přítomno teplo. V každé posloupnosti událostí, která se nám při promítání pozpátku jeví absurdní, najdeme něco, co se zahřívá. — Jen tam, kde je přítomno teplo, existuje rozdíl mezi minulostí a budoucností. Také naše vlastní myšlenky se odvíjejí z minulosti směrem do budoucnosti, nikoli naopak. A opravdu: myšlení rovněž produkuje teplo v našem mozku...

Carlo Rovelli

■ ŘÁD A ENTROPIE

Jako ukázka překvapujícího řádu přírody se v souvislosti s úvahami o entropii v anglicky psaných učebnicích uvádí irská Giant's Causeway. V našem studijním textu začínáme útvarem bližším: čedičovými sloupci na Zlatém vrchu v Lužických horách, tedy v horách, kde se už po více než dvě desetiletí koná školní výjezdový matematicko-fyzikálně-informatický seminář s podvečerní anglickou konverzací.



motory

motory využívající energii tekutin

vodní motory

vodní kola

vodní kola na spodní vodu

vodní kola na vrchní vodu

vodní turbíny

přetlakové turbíny

stejnotlakové turbíny

větrné motory

větrná kola

větrné turbíny

tepelné motory

parní motory

parní stroje

parní turbíny

přetlakové turbíny

stejnotlakové turbíny

spalovací motory

pístové motory

zážehové motory

vznětové motory

lopatkové motory

reaktivní motory

proudové motory

náporové motory

pulsační motory

turbokompresorové motory

turbodmychadlové motory

raketové motory

raketové motory 1. druhu

raketové motory 2. druhu

elektromotory

střídavé elektromotory

synchronní motory

asynchronní motory

stejnoseměrné elektromotory

sériové motory

derivační motory

Kruhový děj

Sání, komprese, expanze, výfuk — a sání...

Pracovní doby čtyřdobého motoru se opakují podobně, jako se opakují čtyři roční období. **Cyklické děje** (česky: **kruhové děje**) jsou podstatou nejen spalovacích motorů, ale i řady dalších tepelných strojů. Teorie, podle níž jsou vybudována zařízení, bez nichž si lze naši civilizaci jen těžko představit, však nabízí mnohem více: Ukazuje na hluboké zákonitosti vesmíru, v němž žijeme, a souvisí se základními otázkami, které si člověk kladl a klade: *Co je čas? Jak čas plyne?*

Poslední desetiletí vývoje fyziky s naléhavostí ukazují, že můžeme oprávněně klást otázku stejně radikální jako sv. Augustin již ve 4. století n.l.: *Existuje čas?*

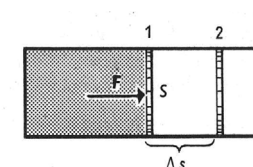
1.1 PRÁCE PLYNU

V tématu *Struktura a vlastnosti plynného skupenství látek* jsme odvodili vztahy pro práci vykonanou ideálním plynem. Připomeňme tato odvození.

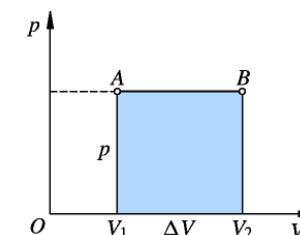
Práce plynu při stálém tlaku. Molekuly plynu uzavřeného ve válcové nádobě s pístem (OBR. 1) narážejí při svém chaotickém pohybu na sebe, na stěny nádoby a na píst. Nárazy molekul na píst o ploše S vyvolávají tlakovou sílu, pro jejíž velikost platí $F = pS$. Posune-li tato síla píst o délku Δs , vykoná práci

$$W' = F\Delta s = pS\Delta s = p\Delta V, \quad (1)$$

protože $\Delta V = S\Delta s$ je objem části válcové nádoby o obsahu podstavy S a výšce Δs . Znázorníme tento děj v p - V diagramu (OBR. 2). Součin $p\Delta V$ odpovídá obsahu obdélníka pod úsečkou AB , která znázorňuje tento isobarický děj (obdélník je „zdola“ omezen osou V). Souvislost mezi prací W' vykonanou plynem a obsahem určité plochy v p - V diagramu je obecná; využijeme ji jednak v následujícím odvození, jednak při řešení řady úloh.



OBR. 1

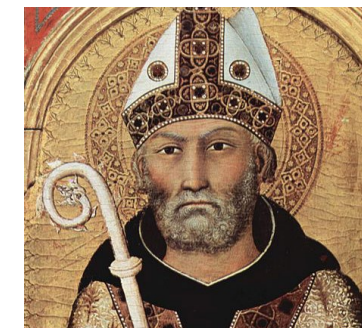


OBR. 2

Práce plynu při proměnném tlaku. V obecném případě, tedy při proměnném tlaku, je práce vykonaná plynem W' dána také obsahem plochy pod křivkou znázorňující tento děj (OBR. 3). Jak ale spočítat obsah této plochy? Vzorce pro obsah obdélníku, kruhu, rovnoběžníku či lichoběžníku, jak je známe z elementární geometrie, nemůžeme jednoduše použít. Jak tedy postupovat?

K OPAKOVÁNÍ

nultý termodynamický zákon
první termodynamický zákon
znaménková konvence 1. TZ
perpetuum mobile (1. druhu)



Sv. Augustin zařadil do své knihy *Vyznání* několik kapitol o podstatě času.

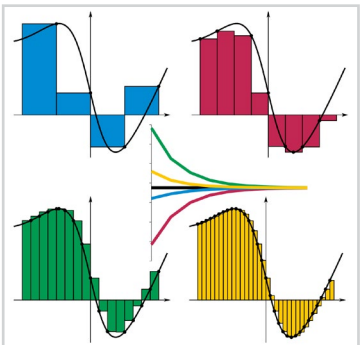
Píše: „O čase často hovoříme, rozumíme mu; co vlastně je, dokážeme však říci stěží. Rozlišujeme tři druhy času: minulý, přítomný a budoucí. Minulý existuje proto, že věci mívají, budoucí proto, že jiné věci nastávají. Ve skutečnosti však nemůže existovat minulý čas, protože již není, ani čas budoucí, protože ještě nenastal. Kdyby však existoval pouze čas přítomný, nemohli bychom hovořit o čase, jednalo by se o věčnost. Proto se musí přítomný čas proměňovat v minulý. Přestože čas nedokážeme vymezit, měříme jej; říkáme, že některý čas byl dlouhý či krátký, když hovoříme o čase minulém, nebo, že některý čas bude dlouhý či krátký, hovoříme-li o budoucnosti. Sotva však můžeme říkat, že minulý čas byl krátký či dlouhý, když ho již vůbec není, nebo že budoucí čas bude dlouhý či krátký, když ho ještě není. Existuje pouze čas přítomný, u nějž však jeho délku nemůžeme změřit, protože je měřitelný pouze tehdy, když uplyne, a to se pak stává časem minulým, který již není.“ Augustinovy úvahy o času jsou ve světle současných fyziky v mnohém přiléhavější než newtonovský koncept absolutního času – viz úvahy na s. 23.



Gottfried Wilhelm von Leibniz

Potřeba řešení takovýchto a podobných fyzikálních, zejména mechanických problémů vedla v 17. století k objevu integrálního počtu. Vedle Newtona je za jeho objevite považován právě Leibniz, který pracoval „s nekonečně mnoha nekonečně malými veličinami“. V Leibnitzových poznámkách se také poprvé objevuje dnes užívaný symbol integrálu, stylizované písmeno S značící součet (sumu). Porovnáním vztahů (3) a (4*) se stává zřejmým, jak integrál vznikl.

Současná matematika s „nekonečně malými veličinami“ zachází obezřetněji.



Aproximace integrálu konečnými součty**

Pomocí obdobných, ale obecnějších úvah je definován Riemannův integrál. Aproximaci integrálu konečnými součty lze však najít i pro Newtonův integrál, ostatně pro spojitě funkce na kompaktním intervalu oba integrály existují a jsou si rovné. Definice Newtonova integrálu (pomocí primitivních funkcí) je však jednodušší a „praktičtější“.

Rovinný útvar, jehož obsah hledáme, *aproximujeme* („přibližně nahradíme“) soustavou n obdélníků. Šířku každého obdélníku volíme stejnou (a označíme ji ΔV); výška každého obdélníku odpovídá střední hodnotě tlaku ve zvoleném intervalu. Tlak v i -tém intervalu označíme p_i , přitom $i = 1, 2, \dots, n$; počáteční objem je V_1 , objem na konci uvažovaného děje V_2 . Potom platí

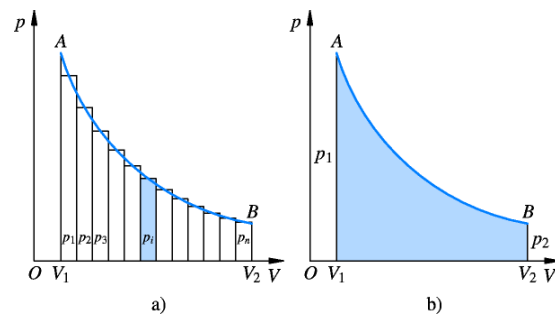
$$W' = p_1 \Delta V + p_2 \Delta V + p_3 \Delta V + \dots + p_n \Delta V; \quad (2)$$

rovnost přepíšeme pomocí symbolu suma

$$W' = \sum_{i=1}^n p_i \Delta V; \quad (3)$$

aproximace je tím přesnější, čím je zvolené ΔV menší. Intuice napovídá – a matematický důkaz v matematickém semináři potvrdí –, že přesného výsledku dosáhneme, užijeme-li „nekonečně mnoho nekonečně tenkých obdélníků“, tedy pro $n \rightarrow \infty$ a pro $\Delta V \rightarrow 0$. Pomocí Newtonova integrálu zapíšeme výsledný vztah

$$W' = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV. \quad (4^*)$$



OBR. 3

Práce vykonaná plynem při isotermickém ději.* V dalších výpočtech (KAP. 1.5) využijeme vztah pro práci vykonanou plynem při isotermickém ději. Odvoďme jej užitím integrálního počtu. Ze stavové rovnice $pV = nRT$ vyjádříme tlak p a dosadíme do rovnosti (4*). Užijeme větu o linearitě Newtonova integrálu – konstanty (včetně konstantní teploty T) „přesuneme“ před integrál:

$$W' = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} \, dV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} \, dV. \quad (5)$$

Protože primitivní funkcí k $1/x$ je pro $\forall x \in \mathbf{R}_+$ funkce $\ln x$, dostaneme

$$W' = nRT [\ln V]_{V_1}^{V_2} = nRT (\ln V_2 - \ln V_1). \quad (6)$$

Aplikujeme větu o logaritmu podílu a získáme hledaný vztah

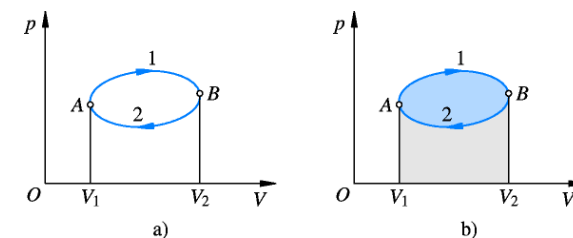
$$W' = nRT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (7)$$

1.2 DEFINICE KRUHOVÉHO DĚJE

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 teplo, a naopak. Přeměna mechanické práce na teplo se realizuje jednoduše (např. třením); v praxi však spíše potřebujeme realizovat přeměnu opačnou, přeměnu tepla na využitelnou práci. Využijeme k tomu některý z dějů s plynem, které jsme studovali dříve. Práce vykonaná pouze „při jednom průběhu děje“ 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 znovu a znovu opakovat.

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



OBR. 4

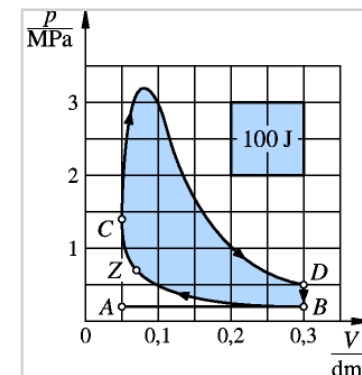
Analizujeme práci vykonanou během jednoho cyklu, sledujme OBR. 4. Práce, kterou vykoná pracovní látka při zvětšování objemu ze stavu A do stavu B , je znázorněna obsahem plochy ležící v pracovním diagramu pod křivkou $A1B$. Má-li se pracovní látka vrátit z konečného stavu B do původního stavu A , musí se zmenšit její objem. K tomu musí vykonat okolní tělesa na této látce práci. Pokud návrat proběhne opět po křivce $B1A$, rovná se práce vykonaná okolními tělesy (v absolutní hodnotě) práci, kterou předtím vykonal plyn; pracovní zisk bude nulový. Proto je třeba, aby při zpětném přechodu konala okolní tělesa menší práci. To lze realizovat volbou jiné „zpáteční 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 uzavřenou křivkou $A1B2A$. Odtud vyplývá:

Obsah plochy uvnitř křivky zobrazující v p - V diagramu kruhový děj znázorňuje celkovou práci vykonanou pracovní látkou během jednoho cyklu.

Při zvětšování objemu (expanzi) koná plyn práci W'_1 , při zmenšování objemu 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 dílčích prací, tedy $W' = W'_1 + W'_2 = W'_1 - W_2$. Tento rozdíl v p - V diagramu odpovídá obsahu plochy ohraničené křivkou $A1B2A$.

Který děj s plynem v tepelném stroji nejraději využít? — Izochorický děj nikoliv, protože se při něm nekoná práce (při stálém objemu je $\Delta V = 0$ a podle (3) je také $W' = 0$). Protože při isobarickém ději se na práci přeměňuje jen část dodaného tepla, zaměříme se na děj isotermický. Plyn koná práci při isotermické expanzi, na práci se přeměňuje všechno dodané teplo. Aby však při rozpínání měl plyn stále stejnou teplotu (má to být isotermický děj!), musíme jej ohřívat ohřívacem; při zpětné kompresi jej musíme chladit chladičem.



Obsah plochy v p - V diagramu

Obsah plochy uvnitř křivky zobrazující v p - V diagramu kruhový děj znázorňuje celkovou práci vykonanou pracovní látkou během jednoho cyklu.

V jakém smyslu *znázorňuje*?

Pokud p - V diagram sestojíme tak, že objem bude vynesen v m^3 , tlak v Pa a pro číselné hodnoty takto vyjádřených veličin spočítáme obsah příslušné plochy, pak se jeho číselná hodnota rovná práci plynu vyjádřené v joulech.

Nemůžeme však říci, že se „obsah plochy rovná práci plynu“, protože tyto veličiny mají odlišné jednotky (a rozměr). Nestačí také říci, že „se tyto veličiny rovnají číselně“, to může být částečně pravda, pokud však užijeme jiné jednotky, než je výše uvedeno, není to zaručeno – tak jako v připojeném diagramu. Zde je obsah čtvercové plochy číselně roven 0,1, což neodpovídá číselné hodnotě 100 J. Problém je samozřejmě v nekoherentních jednotkách.

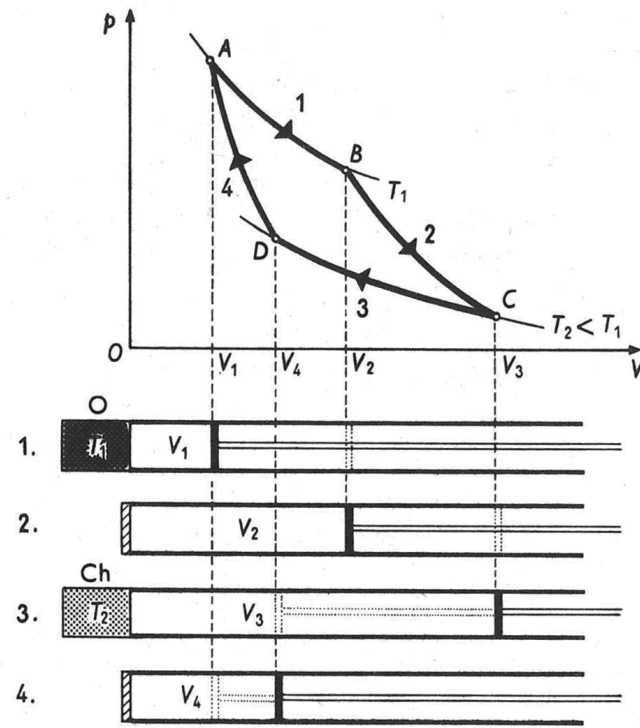
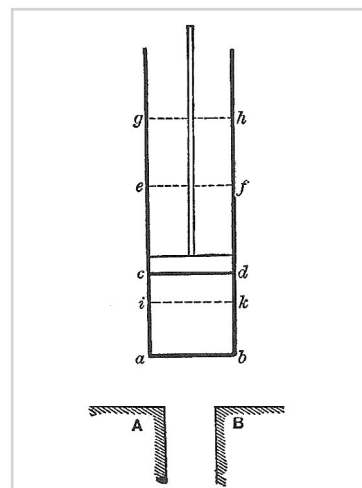
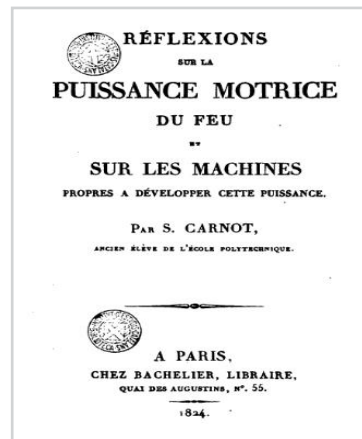
Správná formulace je např. tato: „Vyjádříme-li v p - V diagramu tlak a objem v koherentních jednotkách SI, pak se obsah plochy uvnitř křivky zobrazující v p - V diagramu kruhový děj číselně rovná práci vykonané při tomto ději plynem a vyjádřené v J.“

Cenou za přesnost je jistá nepřehlednost výsledné formulace.



Nicolas Léonard Sadi Carnot

Francouzský fyzik, zakladatel teorie tepelných strojů. V roce 1842 sepsal brožurku *Úvahy o hybné síle ohně*. V ní se pokusil porozumět teoretické podstatě fungování těchto strojů. Krátké pojednání je plné chybných předpokladů. Carnot si představuje, že teplo je hmatatelná entita, jakýsi druh tekutiny, jež produkuje teplo tím, že „padá“ z horkých věcí na studené, tak jako produkuje energii voda padající ve vodopádu shora dolů. Obsahuje ale také zcela zásadní myšlenku: Parní stroje fungují v principu proto, že teplo přechází z horkého do studeného.



OBR. 5

1.3 IDEÁLNÍ TEPELNÝ STROJ

První tepelné motory (parní stroje) měly velmi malou účinnost. Bylo to nedostatkem 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 ji od nich dokonale izolovat; teplo buď přechází zcela beze ztrát, nebo nepřechází vůbec.

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 – „více příroda nedovolí“. **Reálný stroj** má účinnost nižší.

1.4 CARNOTŮV CYKLUS

Sledujme nyní jednotlivé děje pracovního cyklu ideálního tepelného stroje. Tento cyklus se nazývá **Carnotův cyklus**. Diagram je v OBR. 5.

1. Izotermická expanze. Při tomto ději je dno válce ve styku s ohřívačem o teplotě T_1 . Plyn se při teplotě T_1 isotermicky rozpíná z objemu V_1 na objem V_2 . Při isotermické expanzi plyn přijme z ohřívače teplo Q_1 a vykoná práci W_1' . Poněvadž změna vnitřní energie ideálního plynu je při isotermickém 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 ohřívače 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 isotermicky stlačuje z objemu V_3 na objem V_4 . Při isotermické kompresi vykoná vnější síla práci W_2 a plyn odevzdá chladiči teplo Q_2' . Poněvadž vnitřní energie plynu zůstává při isotermickém ději stálá, platí $W_2 = Q_2'$, což je ekvivalentní s rovností $W_2' = -Q_2'$.

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.

Proveďme nyní celkovou energetickou bilanci Carnotova cyklu. Změny energie a výměny tepla, jež jsou dále popsány rovnicemi, můžeme znázornit pomocí blokových schémat (OBR. 6). Celková práce W' vykonaná plynem během jednoho cyklu je znázorněna obsahem plochy vymezené křivkou $ABCD$. 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 isotermické expanzi z ohřívače teplo Q_1 , odevzdává při isotermické kompresi chladiči teplo Q_2' a koná práci $W' = W_1' + W_2' = Q_1 - Q_2'$ (viz OBR. 6). Účinnost Carnotova cyklu je proto

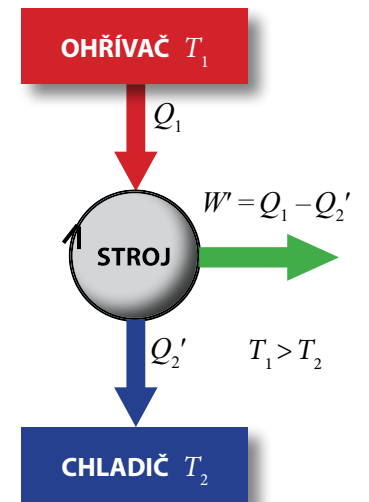
$$\eta_{id} = \frac{\text{získaná práce}}{\text{vložená energie}} = \frac{W'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} = \frac{Q_1}{Q_1} - \frac{Q_2'}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2'}{Q_1}. \quad (8)$$

V tomto vztahu je účinnost vyjádřena pomocí tepel Q_1 , resp. Q_2' ; ta ovšem podle předpokladů neznáme. Známá je jen teplota chladiče T_2 a teplota ohřívače T_1 ; účinnost Carnotova cyklu tedy vyjádříme pomocí těchto teplot.

1.5 ÚČINNOST CARNOTOVA CYKLU*

Vyjděme opět z OBR. 5. V bodech A, B, C, D je plyn mj. charakterizován dvojicemi stavových veličin $V_1, p_1; \dots; V_4, p_4$. Aplikujme na jednotlivé děje, kterými plyn přechází mezi těmito stavy, zákony pro ideální plyn. Pro isotermickou expanzi $A \rightarrow B$ platí Boyleův-Mariottův zákon

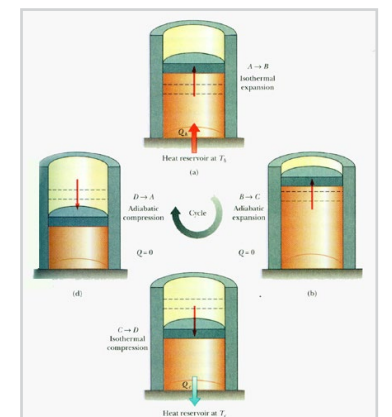
$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad (11)$$



OBR. 6

Blokové schéma ideálního tepelného stroje

Na OBR. 6 a na dalších obrázcích ve studijním textu jsou tepelné stroje znázorněny pouze v principu, bez ohledu na technické detaily. Pracovní látka tepelného stroje je znázorněna kruhem uprostřed schématu (ohraničující kružnice opatřená šipkou zároveň symbolizuje kruhový děj); obdélníky znázorňují tepelné rezervoáry, šípky vyznačují směr proudění tepla, resp. ukazují, zda práci koná pracovní látka, nebo zda vnější síly konají práci na pracovní látce.



Carnotův cyklus

Podrobnější pohled na Carnotův cyklus z hlediska dějů v pracovním prostoru stroje.

■ K OPAKOVÁNÍ

isochorický děj

isobarický děj

isotermický děj

adiabatický děj

zákony popisující děje

s ideálním plynem

věty o počítání s logaritmy

pro adiabatickou expanzi $B \rightarrow C$ Poissonův zákon

$$p_2 V_2^\kappa = p_3 V_3^\kappa, \quad (12)$$

pro isotermickou kompresi $C \rightarrow D$ platí Boyleův-Mariottův zákon

$$p_3 V_3 = p_4 V_4, \quad (13)$$

pro adiabatickou kompresi $D \rightarrow A$ Poissonův zákon

$$p_4 V_4^\kappa = p_1 V_1^\kappa. \quad (14)$$

Najdeme vztah mezi objemy plynu v uvedených stavech. Nejprve všechny rovnice vynásobíme, dostaneme

$$p_1 p_2 p_3 p_4 V_1 V_2^\kappa V_3 V_4^\kappa = p_2 p_3 p_4 p_1 V_1^\kappa V_2 V_3^\kappa V_4,$$

vydělíme nenulovými veličinami, jež se vyskytují na obou stranách:

$$V_2^{\kappa-1} V_4^{\kappa-1} = V_3^{\kappa-1} V_1^{\kappa-1}. \quad (15)$$

Vzniklou rovnost umocníme na $1/(\kappa - 1)$ a upravíme do tvaru podílu:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}. \quad (16)$$

Pokračujeme dále analýzou tepelné bilance dle vztahu (8) a OBR. 6. Při isotermické expanzi $A \rightarrow B$ přijme pracovní látka od ohříváče teplo Q_1 a vykoná stejně velkou práci W'_1 ; protože jde o isotermický děj při teplotě T_1 , dosadíme dle vztahu (7):

$$Q_1 = W'_1 = nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (17)$$

Při isotermické kompresi při teplotě T_2 naopak konají práci W_2 vnější síly, pracovní látka odevzdává teplo Q'_2 chladiči, platí tedy

$$Q'_2 = W_2 = -W'_2 = -nRT_2 \ln \frac{V_4}{V_3}; \quad (18)$$

ve vztahu (7) jsme upravili indexy pro děj $C \rightarrow D$. Pro celkovou práci vykonanou pracovní látkou dostáváme

$$W' = Q_1 - Q'_2 = nR \left(T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + T_2 \ln \frac{V_4}{V_3} \right) = nR \left(T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + T_2 \ln \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{-1} \right).$$

Užijeme větu o logaritmování mocniny a dále dříve odvozenou rovnost (16), po dosazení do předchozího vztahu získáme

$$W' = nR \left(T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - T_2 \ln \frac{V_3}{V_4} \right) = nR \left(T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - T_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \right), \quad (19)$$

kde můžeme vytknout

$$W' = nR \ln \frac{V_2}{V_1} (T_1 - T_2). \quad (20)$$

Účinnost vratného Carnotova cyklu vyjádříme dle vztahu (8), do kterého dosadíme (17) a (20); ve výrazu krátíme:

$$\eta_{id} = \frac{W'}{Q_1} = \frac{nR \ln \frac{V_2}{V_1} (T_1 - T_2)}{nR \ln \frac{V_2}{V_1} T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (21)$$

1.6 VĚTY CARNOTOVY

Z odvození v předchozí kapitole plyne **první věta Carnotova**:

Účinnost η_{id} ideálního tepelného motoru pracujícího podle vratného Carnotova cyklu závisí jen na podílu teplot ohříváče a chladiče, nezávisí na pracovní látce; má hodnotu

$$\eta_{id} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (22)$$

Protože teploty T_1, T_2 ve výrazu $\frac{T_2}{T_1}$ jsou teploty termodynamické, tedy nezáporné, je $\eta_{id} \leq 1$. Rovnost $\eta_{id} = 1$ by platila jen tehdy, pokud by T_2 bylo rovné 0 K (absolutní nula). Taková možnost je však podle 3. termodynamického zákona (viz KAP. 4) vyloučena; vždy tedy platí, že

$$\eta_{id} < 1. \quad (23)$$

Ani ideální tepelný stroj tedy nemá 100% účinnost, „100% motor“ neexistuje.

Vratný Carnotův cyklus je pracovním cyklem ideálního tepelného stroje pracujícího bez ztrát. V reálném tepelném stroji však dochází ke ztrátám, jeho účinnost není vyšší než účinnost stroje ideálního; platí proto

$$\eta_{real} \leq \eta_{id}. \quad (24)$$

Reálný stroj pracuje podle tzv. nevratného Carnotova cyklu. Proto se **druhá věta Carnotova** formuluje obvykle takto:

Účinnost nevratného Carnotova cyklu není větší než účinnost vratného Carnotova cyklu, který pracuje mezi týmiž teplotami.



Thrust SSC (SuperSonic Car)

Nejrychlejší pozemní „vozidlo“, které v roce 1997 překonalo rychlost zvuku. Pohon zajišťují dva proudové motory s forsáží Rolls-Royce Spey používané ve stíhačkách F-4 Phantom II. Motory vyvinou tah o síle 223 kN a spálí okolo 18 litrů paliva za sekundu.

Žádný motor, žádné zařízení v budoucnosti využívající třeba dosud neznámé technologie nebude mít nikdy účinnost vyšší, než stanovuje 1. věta Carnotova. Maximální účinnost nezáleží na pracovní látce, může to být kapalina, může to být plyn; může jít o Dieselův motor nebo o motor raketový, stále je maximální účinnost zařízení určena vztahem (22).

Libovolný reálný motor se svými nevratnými ději a ztrátami užitečné energie je ještě méně účinný. Kdyby motor automobilu byl ideálním tepelným motorem, měl by podle rovnice (22) účinnost cca 55 %; jeho skutečná účinnost je jen cca 30 %.



Jaderný reaktor a chladičí věže JE Temelín

Jaderná elektrárna odebírá teplo z aktivní zóny reaktoru („ohříváče“), koná práci pomocí turbíny a odvádí teplo do „chladiče“, do vzduchu či do vody. Kdyby byla jaderná elektrárna ideálním motorem, měla by účinnost kolem 40 %; její skutečná účinnost je však kolem 30 %.



Mount Washington Cog Railway

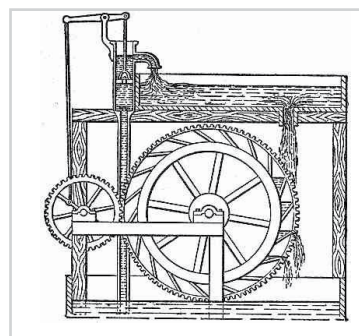
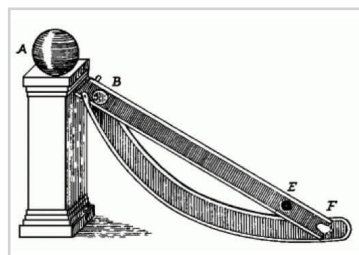
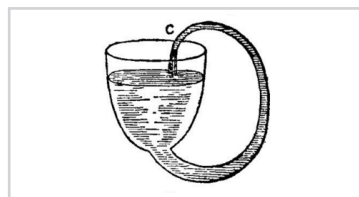
Čím je způsoben „kouř dvou barev“?



Na znaménku záleží...

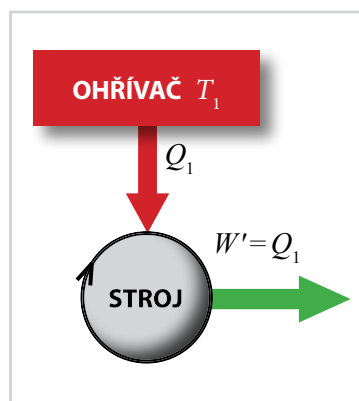
Během odvození se několikrát mění znaménko před členem popisujícím teplo odevzdané chladiči při přechodu ze stavu C do stavu D . Ve výrazu (18) je znaménko minus, protože jde o práci, kterou konají na pracovní látce vnější síly. V následujícím vztahu se objevuje znaménko plus, protože je dosazeno do vzorce, v němž se odpovídající teplo odečítá. Při další úpravě se znaménko mění naposledy; upravujeme mocninu podílu v argumentu logaritmu.

Druhý termodynamický zákon



Perpetuum mobile prvního druhu

Návrhy stroje, který by soustavně konal práci bez dodání energie.



Perpetuum mobile druhého druhu

Schéma myšleného stroje, který by všechno dodané teplo beze zbytku přeměňoval na užitečnou práci.

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 ohřívatelem Q_1 přeměnil na práci W' . Rozbor Carnotova cyklu však ukázal, že k získání práce je *bezpodmínečně* nutná existence dvou lázní, ohříváče a chladiče. Tepelný motor pracující pouze s lázní jedné teploty nelze sestavit. Zřejmé je to i ze vztahu (22). Pokud by bylo $T_1 = T_2$, byla by účinnost tepelného stroje $\eta = 0$.

Pracovní látka musí *nutně* odevzdávat *nějaké* teplo Q_2' chladiči, jinak stroj nemůže fungovat. Tuto skutečnost obsahuje **druhý termodynamický zákon**, který lze vyjádřit třemi různými, ekvivaletními formulacemi. První z nich je **Thomsonova formulace 2. termodynamického zákona**:

Není možné sestavit periodicky pracující tepelný stroj, který by jen přijímal teplo od určitého tělesa (ohříváče) a vykonával stejně velkou práci.

Hypotetický stroj, který by něco takového konal, se nazývá **perpetuum mobile 2. druhu**. Takové zařízení by odebíralo teplo nějakému tělesu, a konalo stejně velkou práci. Oním tělesem by např. mohl být světový oceán. V dnešní době, kdy se často upozorňuje na tzv. globální oteplování, by bylo tím spíše vhodné odebírat teplo z oceánu a přeměňovat je na užitečnou práci. Lze spočítat, že snížením teploty světového oceánu o $0,01\text{ }^\circ\text{C}$ a přeměnou získaného tepla na práci by se pokryla současná energetická spotřeba celého lidstva na dalších 100 let. Bohužel, sestavit takový stroj „nám příroda nedovolí“. Znovu připomeňme, že příčinou není nedokonalost současné techniky, nýbrž je to nemožnost *principiální*. Pojem perpetuum mobile 2. druhu užívá **Ostwaldova formulace 2. termodynamického zákona**:

Není možné sestavit perpetuum mobile druhého druhu.

2.1 OBRÁCENÝ CARNOTŮV CYKLUS

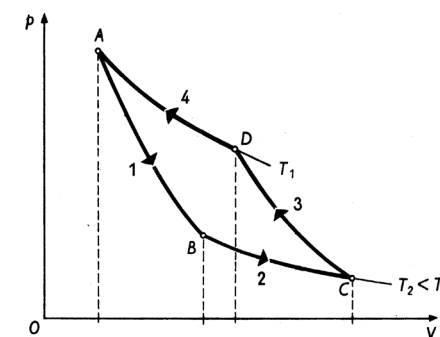
Představme si, že celý děj popsaný Carnotovým cyklem probíhá „pozpátku“. Diagram, znázorňující takový děj, bude velmi podobný OBR. 5, změni se však směr šipek, viz OBR. 7. Energetická bilance je znázorněna v OBR. 8; i zde se změnil směr šipek znázorňujících „toky energie“.

Co se děje? Stroj odebere z chladiče teplo Q_2 , ohříváči odevzdá teplo Q_1' . Chladič teplo odevzdává, ohříváči přijímá. Teplo je tedy převáděno z *chladnějšího tělesa na teplejší*. Všimněme si však šipky u práce W . Tento děj *neprobíhá samovolně*, je třeba vnějšími silami vykonat práci W ; přitom platí, že $Q_2 + W = Q_1'$.

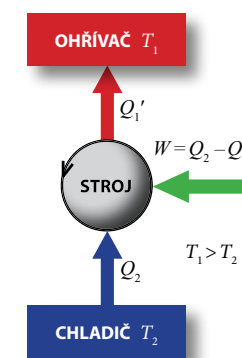
Z této úvahy vychází **Clausiova formulace 2. termodynamického zákona**:

Teplo nemůže samovolně přejít z tělesa studenějšího na těleso teplejší.

Obrácený Carnotův cyklus je pracovním cyklem **ideální chladničky** (Clausiovy chladničky). Účinnost reálných strojů využívaných k ochlazení pracovní látky je nižší. Takovými stroji jsou chladničky, klimatizace a tepelná čerpadla.



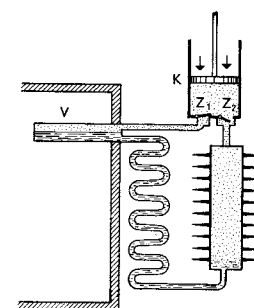
OBR. 7



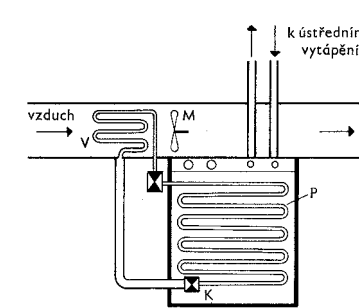
OBR. 8

2.2 CHLADICÍ STROJE & TEPELNÁ ČERPADLA

Kompresorová chladnička (OBR. 9) 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.



OBR. 9



OBR. 10

Tepelná čerpadla (OBR. 10) lze použít k vytápění budov odčerpáváním tepla venkovnímu vzduchu, vodě, zemi ve vrtu. Tepelná čerpadla jsou alternativním zdrojem obnovitelné energie. Existuje několik druhů tepelných čerpadel podle toho, jestli berou teplo z venkovního vzduchu, vody (např. ze studně) či země, a zda ji předávají užitkové vodě (pro ústřední topení, podlahové topení nebo bazén) či vzduchu ve vytápěném prostředí. Jde o tepelný stroj teoreticky pracující podle Carnotova cyklu v obráceném směru. Obrazně řečeno, kdybychom zabudovali chladničku do venkovní stěny domu tak, aby její chladič v místnosti, bude chladnička odebírat okolnímu vzduchu teploty T_2 teplo Q_2 a za přispění jisté práce W bude do domu, jehož teplota je T_1 ($T_1 > T_2$), dodávat teplo Q_1' .

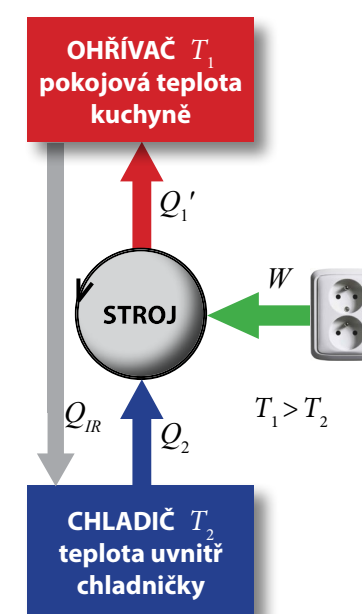


Schéma chladničky

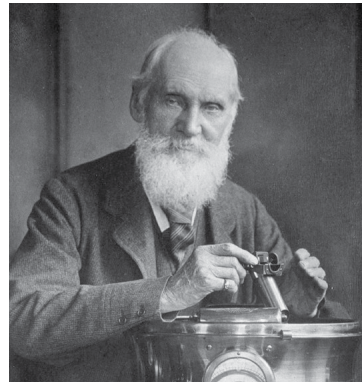
Chladnička je takový tepelný stroj, který využívá práce k čerpání tepla z chladnější lázně do teplejší, a to cyklickým vykonáváním vhodné posloupnosti dějů. Např. v domácí chladničce koná práci elektrický kompresor a přenáší teplo prostřednictvím pracovní látky (chladicího média) z prostoru pro uskladnění jídla (chladnější lázeň) do místnosti (teplejší lázeň). K tomu je třeba, aby vnější síla konala práci; v tomto případě koná práci síla elektrická (chladnička je připojena do zásuvky). Ideální chladnička pracuje dle obráceného Carnotova cyklu v OBR. 8. Reálná chladnička pracuje dle nevratného cyklu znázorněného výše; izolace prostoru chladničky není ideální, proto také přechází teplo Q_{IR} z prostoru kuchyně dovnitř chladničky.

Klimatizační zařízení a tepelná čerpadla jsou ve své podstatě chladničkami. Rozdíly jsou jen v povaze chladnější a teplejší lázně. Klimatizační zařízení čerpá teplo z místnosti (chladnější lázeň, která se má ještě více ochladit) a odevzdává ho do okolí domu (teplejší lázeň). Tepelné čerpadlo pracuje obráceně: čerpá teplo z okolí domu. Tepelná čerpadla jsou velmi úsporným a účinným vytápěcím zařízením.

Podrobnější informace jsou dostupné v rozšiřujícím dodatku R15 *Chladicí stroj a tepelné čerpadlo* k aktuálnímu vydání učebnice [MFT].

■ K OPAKOVÁNÍ

negace
implikace
ekvivalence
obměněná ekvivalence
přímý důkaz
nepřímý důkaz



William Thomson
1st Baron Kelvin

Skotsko-irský vědec, který se zabýval termodynamikou, hydrodynamikou, pružností, elektromagnetismem. Nezávisle na R. Clausiovi formuloval 2. termodynamický zákon. Zastával mechanistické pojetí přírodovědy: Každý jev je vysvětlen teprve tehdy, podaří-li se jej převést na mechaniku. Zasloužil se o položení podmořského kabelu pro telegrafické spojení Evropy s Amerikou. Záliba v jachtingu jej přivedla ke studiu vln.



Wilhelm Ostwald

Německý filosof a fyzikální chemik narozený v Rize, roku 1909 mu byla udělena Nobelova cena za chemii za práci o katalýze, chemické rovnováze a reakční rychlosti. Vedle termodynamiky (studium krystalizace) se zabýval také teorií barev.

2.3 EKVIVALENCE TŘÍ FORMULACÍ**

V předchozím textu byly vysloveny tři různé formulace 2. termodynamického zákona. Ukažme, že jsou ekvivalentní. Vedle fyzikálního důvtipu jsou k tomu třeba základní znalosti (matematické) logiky.

Ekvivalence Thomsonovy a Ostwaldovy formulace je zřejmá. Ukažme však, že

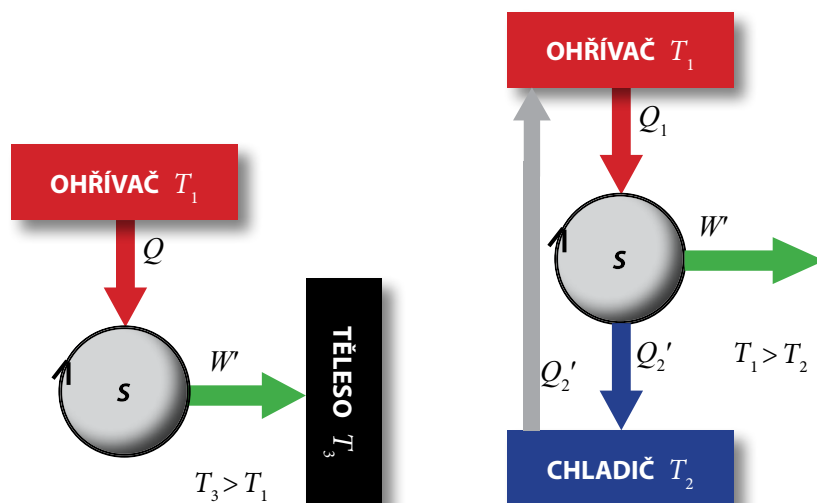
Thomsonova formulace $\Leftrightarrow$ Clausiova formulace.

Pro stručnost uijme zkratk 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 $\neg TF \Rightarrow \neg CF$ a $\neg CF \Rightarrow \neg TF$.

Důkaz tvrzení $\neg TF \Rightarrow \neg CF$. Předpokládejme, že neplatí TF , tj. že je možné sestavit 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 $W' = Q$ (viz s. 14). 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 $T_3 > T_1$; přitom soustava S konající práci se po skončení každého cyklu vrátí do svého původního stavu (OBR. 11). 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_3 . 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 , tedy 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. 12). 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. 12 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. 11

OBR. 12

2.4 TERMODYNAMICKÁ TEPLOTA

V Úvodu do molekulové fyziky a termiky jsme zavedli několik teplotních stupnic. **Stupnice empirické** byly definovány pomocí konkrétní teploměrné látky, resp. soustavy (takovou látkou, resp. soustavou je v případě Celsiovy stupnice voda; v případě Fahrenheitovy stupnice voda, salmiak a lidské tělo). **Stupnice termodynamická** byla představena několika význačnými vlastnostmi (má počátek v absolutní nule, velikost dílku stupnice odpovídá velikosti dílku Celsiovy stupnice), vlastní definici termodynamické stupnice jsme však odložili s odkazem na „budoucí teoretické úvahy o teple“.

Vhodný okamžik pro tyto úvahy právě nastal! Poznatky o účinnosti Carnotova cyklu umožňují zavést termodynamickou stupnici tak, že není závislá na nahodilé volbě látky užití v teploměru.

Ze vztahů (8) a (21) pro účinnost Carnotova cyklu vyplývá

$$1 - \frac{Q'_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (25)$$

po vyrušení čísla 1:

$$\frac{Q'_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (26)$$

z toho vyjádříme teplotu T_1

$$T_1 = \frac{Q_1}{Q'_2} T_2. \quad (27)$$

Interpretujeme výsledek (27). Na tomto základu je postaveno teoreticky bezvadné zavedení termodynamické teploty. Termodynamická teplota T_1 je dána podílem dvou tepel Q_1, Q'_2 vyměněných ideálním tepelným motorem, a nezávisí tak na konkrétní látce. K úplnosti stačí zvolit vhodný stav charakterizovaný teplotou T_2 a přiřadit mu libovolnou, ale vhodně zvolenou číselnou hodnotu na teplotní stupnici. Volba padla na trojný bod vody, kterému mu byla přidělena teplota $T_2 = 273,16 \text{ K}$, a to proto, aby díl nově definované stupnice měl stejnou velikost jako díl běžně užívané stupnice Celsiovy. Proto platí:

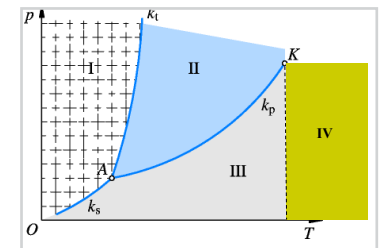
Kelvin je 1/273,16 díl termodynamické teploty trojného bodu vody.

V průběhu dalších desetiletí se ukázalo, že praktická realizace jednotky naráží na problémy. Přesná teplota trojného bodu až příliš závisí na chemické čistotě a izotopovém složení použité vody. Navíc je technicky obtížné tuto definici používat při velmi nízkých teplotách blízkých absolutní nule. Proto je od roku 2019 **kelvin** definován novým způsobem pomocí Boltzmannovy konstanty:

Kelvin, značka „K“, je jednotka termodynamické teploty v SI. Je definována fixací číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty, aby byla rovna $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$, je-li vyjádřena jednotkou $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$, rovnou $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, kde kilogram, metr a sekunda jsou definovány pomocí h , c a Δf_{Cs} .

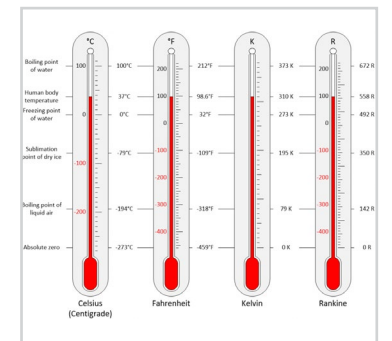
■ K OPAKOVÁNÍ

empirické teplotní stupnice
termodynamická teplotní stupnice
Boltzmannova konstanta
trojný bod



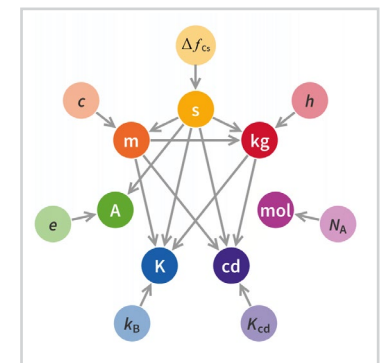
Fázový diagram

Trojný bod je v diagramu označen A.



Porovnání teplotních stupnic

Zleva stupnice Celsiova, Fahrenheitova, termodynamická Kelvinova a termodynamická Rankinova. **Rankinova stupnice*** vychází z týchž úvah jako stupnice termodynamická Kelvinova, velikost dílu je však zvolena tak, aby odpovídala velikosti dílu Fahrenheitovy stupnice.



Vztahy mezi základními jednotkami nového systému SI a přírodními konstantami

Každé ze sedmi základních jednotek odpovídá hodnota jedné fyzikální konstanty. Ampér ani mol v nové definici nevyužívají definici kilogramu. Nově na kilogramu závisí kelvin.

Entropie

3.1 VRATNÝ A NEVRATNÝ DĚJ

Představme si, že pořídíme videozáznam nějakého fyzikálního děje a promítneme jej pozpátku. V některých případech nepozorujeme významný rozdíl oproti původnímu záznamu (Brownův pohyb, pohyb planet), v jiných zhlédneme „děje“ odporující zkušenosti (míč ležící na zemi se vznese do výšky, střepy se spojí a vytvoří hrnek). I na základě zkušenosti lze tedy rozlišit dva typy dějů:

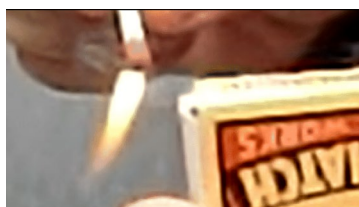
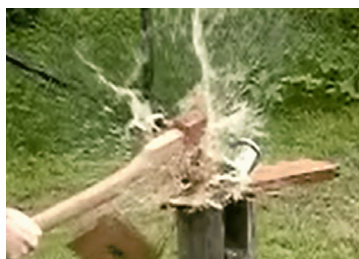
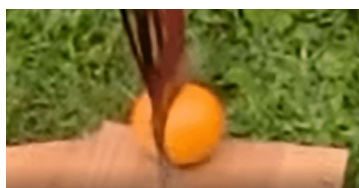
Vratný (reversibilní) děj může probíhat v obou směrech, přičemž soustava přejde při obráceném ději všemi stavy jako při přímém ději, avšak v obráceném pořadí.

Nevratný (ireversibilní) děj je každý děj, který není vratný. Např. při tření se všechna práce přemění na teplo, ale opačný děj (všechno teplo se přemění na práci) možný není. Dále jsme při studiu 2. termodynamického zákona 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 pohyblivého tělesa po vodorovné podložce vlivem tření, zastavení kola rotujícího na hřídeli, pád nepružného tělesa na podložku, expanze plynu do vyčerpané nádoby apod.

Představme si nyní několik všednodenních situací:

- (1) Za chladného dne držíme v rukou horký hrnek čaje. Dříve než z něj začneme pít, ohřívá prochládlé ruce. Teplo přechází z horkého hrnku do studených rukou. — Pravděpodobně nikdo nezažil děj opačný, kdy teplo přechází ze studených rukou do horkého čaje; ruce se přitom ochladí a teplota čaje se ještě zvýší. Přitom by ale takový děj *nebyl v rozporu* se zákonem zachování energie.
- (2) Koule plastelíny spadne volným pádem z výšky 1 m na zem. Nárazem se mírně zahřeje. — Patrně nikdo nepozoroval, že by se koule poté opět ochladila, její vnitřní energie by se přeměnila na energii potenciální a koule by vystoupila do původní výšky. Ani takový děj by nebyl v rozporu se zákonem zachování energie.
- (3) Nafukovací balonek je naplněný heliem. Pokud otvor balonku není uzavřen, helium uteče z balonku a rozptýlí se po místnosti. — Nikdo nezaznamenal, že by se jednotlivé atomy helia shlukly a vrátily zpátky do balonku. Do třetice dodejme, že ani takový děj by neporušil zákon zachování energie.

Nevratnost většiny termodynamických dějů je natolik běžná, že ji pokládáme za samozřejmou. Kdyby snad takové děje *samovolně* proběhly v „nesprávném“ směru, byli bychom tím naprosto šokováni. Ale žádný z těchto „nesprávně probíhajících“ dějů by nenarušoval zákon zachování energie. Změny energie v uzavřeném systému tedy *neukazují* směr nevratných dějů. Tento směr je dán jinou změnou, kterou budeme studovat – *změnou entropie*.



Nevratné děje

Na fotografiích jsou nevratné děje zachycené studenty Gymnasia F. X. Šaldy během seminářů užitím vysokorychlostní kamery.

3.2 ENTROPIE: FENOMENOLOGICKÝ PŘÍSTUP

V předchozích úvahách byly použity pojmy vratný a nevratný děj. Nyní zavedeme veličinu **entropie**, pomocí níž lze tyto dva typy dějů v uzavřených soustavách rozlišit. Uvažujme nejprve o vratném ději.

Účinnost kruhového děje je dána obecně vztahem (8):

$$\eta = \frac{Q_1 - Q'_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q'_2}{Q_1}. \quad (31)$$

Účinnost **vratného (reversibilního) Carnotova cyklu** ideálního tepelného motoru je určena vztahem (22):

$$\eta_{rev} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (32)$$

Položme pravé strany obou vztahů do rovnosti. Číslo 1 se vyruší a dostáváme

$$\frac{Q'_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (33)$$

odtud jednoduchou úpravou dostaneme rovnost

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q'_2}{T_2} \Rightarrow \frac{Q'_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} = 0 \quad (34)$$

Definujme 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 (34) platí:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q'_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} = 0. \quad (35)$$

To vše bylo odvozeno pro vratný děj. Formulujme závěr:

Při vratném ději je změna entropie nulová; entropie je konstantní.

Účinnost **nevratného děje** η_{ir} je menší než účinnost vratného děje η_{rev} . Protože podle obecného vztahu (8) je $\eta_{ir} = 1 - Q'_2/Q_1$ a protože podle (22) je $\eta_{rev} = 1 - T_2/T_1$, platí

$$\eta_{ir} < \eta_{rev} \Rightarrow 1 - \frac{Q'_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (36)$$

Od obou stran nerovnosti odečteme 1, nerovnost vynásobíme (-1) a upravíme (všechny uvedené veličiny jsou nezáporné), postupně dostaneme

$$\frac{Q'_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_1}{T_1} < \frac{Q'_2}{T_2} \Rightarrow \frac{Q'_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} > 0. \quad (37)$$

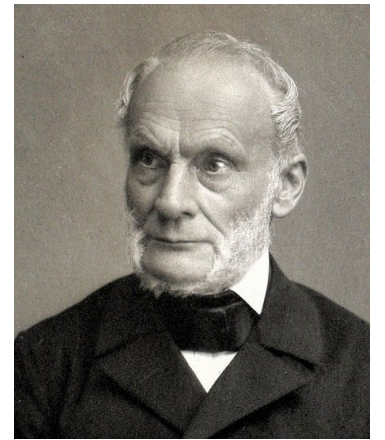
Pro rozdíl entropií pak získáme

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{Q'_2}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} > 0. \quad (38)$$

Při nevratném ději je přírůstek entropie kladný; entropie roste.

Entropie uzavřené soustavy je tedy konstantní (při vratném ději), nebo rostoucí (při nevratném ději). Entropie uzavřené soustavy nikdy neklesá. Vyjádřeno nerovností:

$$\Delta S \geq 0. \quad (39)$$



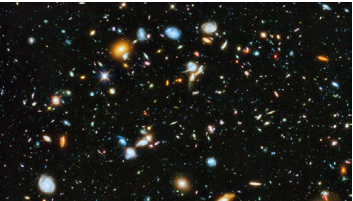
Rudolf Julius E. Clausius

Německý fyzik a matematik, který je považován za zakladatele termodynamiky. Jeho nejslavnější práce *Über die bewegende Kraft der Wärme* byla publikována v roce 1850 a pojednávala o mechanické teorii tepla. Na základě prací Jouleových a Carnotových přeformuloval dva zákony termodynamiky, aby překonal zjištěné rozpory. Clausius zavedl fyzikální veličinu, která je mírou nevratnosti jednosměrné produkce tepla: „Dávám přednost tomu, přejímat názvy významných vědeckých veličin ze starých jazyků, protože pak mohou být stejná ve všech živých jazycích. Navrhuji tudíž nazývat entropií tělesa veličinu S podle řeckých slov $\epsilon\nu$ a $\tau\rho\omicron\pi\eta$.“ Slovo $\epsilon\nu$ znamená řecky *v, uvnitř*, slovo η $\tau\rho\omicron\pi\eta$ *obrat, návrat, změna, střídání* či *slunovrat*. O nové veličině pak napsal: „Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.“

Termodynamický a statistický přístup k termice

Již v úvodu studia molekulové fyziky a termiky jsme uvedli, že je možný dvojí přístup: **termodynamický** neboli fenomenologický, který příslušné jevy zkoumá „zvenku“, popisuje jednotlivé stavy soustavy pomocí stavových veličin a hledá zákony pro přechody mezi nimi, a **statistický**, který vychází od zákonitostí, které platí pro jednotlivou částici, a zpracovává je statisticky pro ohromný soubor částic.

Entropii lze také definovat oběma způsoby: 1) termodynamicky použitím pojmu teploty a tepla, které systém získá nebo ztratí; 2) mikroskopicky počítáním možností, jak mohou být uspořádány atomy nebo molekuly tvořící soustavu. Postupně zde naznačíme oba přístupy.



Entropie a energie

Entropie se od energie liší tím, že pro ni neplatí zákon zachování. Energie uzavřeného systému se zachovává; zůstává stále konstantní. Při nevratných dějích však entropie uzavřeného systému stále roste.



Entropie jako míra neuspořádanosti soustavy

Entropie popisuje míru neuspořádanosti soustavy. Entropie neuklizené místnosti je větší než entropie místnosti uspořádané, entropie hromady cihel je větší než entropie budovy postavené z cihel.

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, zaplevelená zahrádka – tak si představujeme neuspořádanost, špatnou organizaci. Z našeho hlediska je tedy entropie mírou dezorganizovanosti a neuspořádanosti. Platí:



Zároveň však víme, že každá soustava se snaží dospět do stavu rovnováhy, tedy do neuspořádaného stavu, do chaosu. Tento stav je nejpravděpodobnější. V takovém stavu je potom entropie *maximální*. O tom podrobněji v následující kapitole.

Obecná definice entropie.* Definice entropie byla v tomto učebním textu zjednodušena pro poněkud speciální případ vratného přenosu tepla při konstantní teplotě T . V obecném případě se změna entropie při libovolné vratné změně soustavy z rovnovážného stavu $\mathcal{A}$ do jiného rovnovážného stavu $\mathcal{B}$ definuje užitím integrálu vztahem

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{dQ}{T}.$$

(35')

3.3 PRAVDĚPODOBNOST NEPRAVDĚPODOBNEHO

Žáci sedí v učebně fyziky. Molekuly plynů tvořící vzduch se v ní neustále neuspořádaně pohybují. Patrně nikdy nikdo nepozoroval, že by se při svém neustálém neuspořádaném pohybu *všechny* molekuly přemístily jen do levé poloviny učebny a v pravé polovině učebny by tak vzniklo vakuum. Zákon zachování energie ani pravidla popisující ideální plyn ale něco takového „nezakazují“. Proč tuto situaci „obvykle“ nepozorujeme?

Odpověď je jednoduchá: Protože takový stav soustavy *není pravděpodobný*.

Pokusme se vše vysvětlit na analogickém, ale jednodušším příkladu. Předpokládejme např., že máme nádobu, která je přepážkou rozdělena na dvě stejné části A a B ; v části A je plyn (OBR. 13). 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; tento děj je nevratný.

Z hlediska vnitřní struktury plynu ovšem musíme uvažovat obezřetněji: Molekuly plynu se pohybují chaoticky. Proto je *v principu možné*, aby se při svém *chaotickém pohybu* samovolně vrátily pouze do části A nádoby; v části B bude opět vakuum.

Spočítejme pravděpodobnost takového děje. Běžně se říká: „to je pravděpodobné“, „to není moc pravděpodobné“. Dejme těmto rčením matematický význam užitím **klasické definice pravděpodobnosti**. V pokusu, jehož všechny možné výsledky jsou stejně pravděpodobné, je pravděpodobnost $P(\mathcal{A})$ jevu $\mathcal{A}$ rovna

$$P(\mathcal{A}) = \frac{\text{počet výsledků příznivých jevu } \mathcal{A}}{\text{počet všech možných výsledků}}.$$

(41)

Pravděpodobnost hození šestky „regulérní“ kostkou je proto $1/6$, sudého čísla $3/6 = 1/2$, prvočísla $3/6 = 1/2$.

Uvažujme postupně dle OBR. 13. Předpokládejme, že v nádobě je jen jedna molekula, $N = 1$. Ta se může nacházet buď v části A , nebo v části B . Tento „plyn“ se tedy může nacházet celkem ve dvou stavech, stav příznivý vzhledem k zadání úlohy je jediný. Proto $P(1) = 1/2 = 0,5$, tj. 50 %.

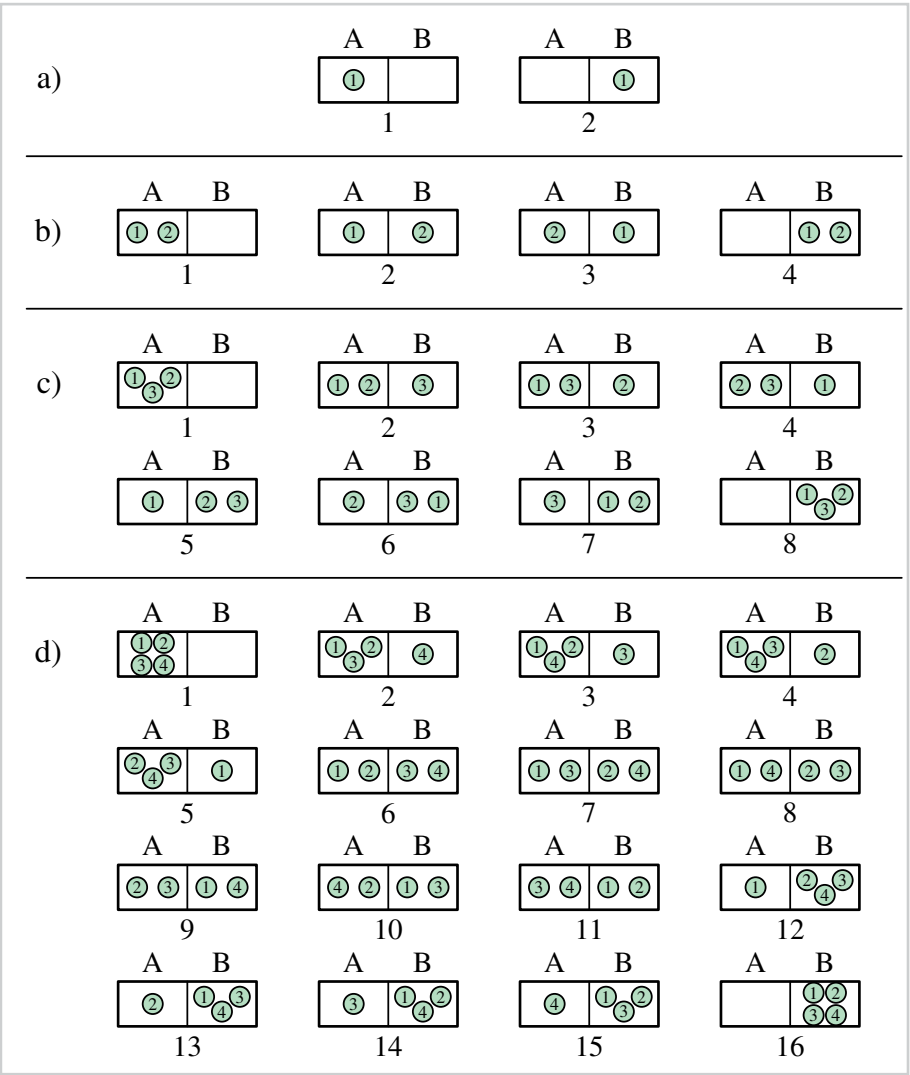
Jsou-li v nádobě dvě molekuly, $N = 2$, mohou se rozdělit do částí A a B čtyřmi způsoby. Tedy $P(2) = 1/4 = 0,25$, tj. 25 %. Podobně pro $N = 3$ dostaneme $P(3) = 1/8 = 0,125$, tj. 12,5 %.



Entropie soustavy

Všechny děje, které v přírodě probíhají samovolně, zvyšují entropii vesmíru. Pohyb molekul v „kotlině“ vodopádu je neuspořádanější a chaotičtější než jejich stav v prostoru nad vodopádem. Navíc se pádem vody část její kinetické energie přeměňuje na teplo, nejvíce neuspořádanou a degradovanou formu energie.

Na fotografii je Chrástenský vodopád pod Chrástenským vrchem nedaleko Osečné.



OBR. 13

Zapišme zjištěné pravděpodobnosti do přehledného schématu:

$N = 1$	$P = 1/2 = 1/2^1$	50,00 %
$N = 2$	$P = 1/4 = 1/2^2$	25,00 %
$N = 3$	$P = 1/8 = 1/2^3$	12,50 %
$N = 4$	$P = 1/16 = 1/2^4$	6,25 %

Teď již snadno objevíme obecné pravidlo, jímž se uváděné hodnoty řídí, i vztah pro výpočet hledané pravděpodobnosti pro libovolné N :

$$P(N) = 1/2^N.$$

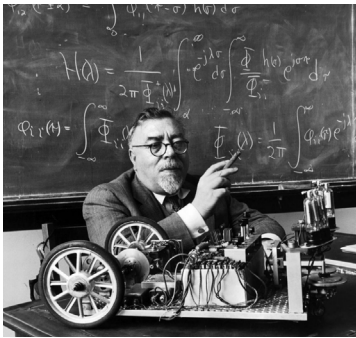
(42)

Ze vztahu je vidět, že s rostoucím N velmi rychle klesá hodnota pravděpodobnosti $P(N)$ jevu, že všechny molekuly se v důsledku tepelného pohybu nahodile shromáždí jen v části A . Pro 100 částic vychází už $P(100) = 0,8 \cdot 10^{-30}$. Ale ve skutečném plynu není částic jen sto, ale (v jednom molu) řádově 10^{23} . Číslo $2^{(10^{23})}$ zde napsat nemůžeme, má totiž 30 102 999 566 398 119 521 374 číslic!

Pravděpodobnost samovolného stlačení plynu do jedné poloviny nádoby je extrémně nízká, velmi se přibližuje nule (je však od nuly různá).



Zdůrazněme, že číslo 30 102 999 566 398 119 521 374, tedy přibližně $3 \cdot 10^{22}$, není ono hledané číslo, nýbrž jen číslo, které udává počet cifer čísla hledaného. Protože jedna normostrana má cca 2000 znaků, potřebovali bychom k jeho vytištění $1,5 \cdot 10^{19}$ stran; školní tiskárna tiskne rychlostí 1 strana/s, takže by k vytištění potřebovala $4,75 \cdot 10^{11}$ let, což je 100× více, než je předpokládané stáří Země.



Norbert Wiener

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.

Podobnější definice informace a entropie v informatickém smyslu přesahují rámec tohoto textu; poznamejme jen, že jednotkou obou „veličin“ je bit.



Ludwig Boltzmann

Rakouský fyzik, spolupozaložil statistickou mechaniku a popsal entropii jako mikroskopickou veličinu. Byl zastáncem atomistické představy, ačkoli mu oponovalo mnoho fyziků, např. Wilhelm Ostwald nebo Max Planck (který později svůj omyl poznal). Jako první použil statistickou metodu pro popis tepelného záření (Stefanův-Boltzmannův zákon vyjadřující intenzitu tepelného záření absolutně černého tělesa). Dovolnou trávil několikrát na ostrově Mali Lošinj (tehdy Lussinpiccolo), mj. obvyklém místě sportovních kursů Gymnasia F. X. Šaldy. V důsledku vleklých depresí sám ukončil svůj život při rodinné dovolené nedaleko Terstu. Je jedním z fyziků, kteří mají na svém náhrobků vytesánu rovnici, kterou objevili a která způsobila významný přelom v dějinách vědy.

Uzavřeme tyto úvahy. Jevy typu „plyn je samovolně jen v polovině nádoby“, „kámen se vznáší“, „voda teče nahoru“, nejsou zcela nemožné, ale jsou VELMI nepravděpodobné. Tyto skutečnosti lze vyjádřit poetickým – patrně překvapivým – heslem: „zázraky jsou sice možné, ale VELMI nepravděpodobné“.

3.4 ENTROPIE: STATISTICKÝ PŘÍSTUP

Ukažme, jak k pojmu entropie přistupuje statistická fyzika. Vraťme se k nádobě z OBR. 13 a zaměřme se na část d), tedy na „plyn“ o čtyřech částicích ($N = 4$). Každý jednotlivý způsob, jak rozdělit částice do dvou částí nádoby, se nazývá **mikrostav**. Pro uvažovaný systém jsme tedy našli 16 mikrostavů. Mikrostavy 2, 3, 4 a 5 mají něco společného: Ve všech těchto mikrostavech jsou v levé části nádoby tři částice, v pravé části nádoby jedna částice. Toto nazveme **makrostav** neboli **konfigurace**; počet mikrostavů tvořících daný makrostav potom nazveme **násobnost konfigurace** a označíme W . Každý makrostav je tedy vytvořen všemi navenek nerozlišitelnými mikrostavy. Sestavme nyní schéma makrostavů a mikrostavů pro zkoumanou soustavu:

Makrostav	Mikrostavy	W	P	$S/10^{23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
I	1	1	1/16	0,00
II	2, 3, 4, 5	4	4/16	1,91
III	6, 7, 8, 9, 10, 11	6	6/16	2,47
IV	12, 13, 14, 15	4	4/16	1,91
V	16	1	1/16	0,00

Základním pravidlem statistické mechaniky je předpoklad:

Každý mikrostav může nastat se stejnou pravděpodobností jako kterýkoliv jiný.

To znamená, že kdybychom vzali mnoho fotosnímků molekul náhodně rozmístěných v krabici a spočetli, kolikrát který mikrostav nastal, zjistili bychom, že každý mikrostav nastal stejně často. V každém daném okamžiku je tedy pravděpodobnost, že nalezneme molekuly v nějakém mikrostavu, rovna pravděpodobnosti, že je nalezneme v jakémkoliv jiném mikrostavu. To mj. znamená, že soustava z OBR. 13D) v průměru setrvá stejnou dobu v každém ze 16 mikrostavů.

Mikrostavy jsou stejně pravděpodobné, ale konfigurace mají různé násobnosti (sestavují totiž z různého počtu mikrostavů), proto *konfigurace nejsou stejně pravděpodobné*. Pravděpodobnost P výskytu konfigurace je dána poměrem její násobnosti k celkovému počtu mikrostavů. Konfigurace I a V, ve kterých plyn zabírá jen polovinu nádoby, jsou nejméně pravděpodobné.

Konfigurace s větší pravděpodobností výskytu mají také větší entropii. Protože násobnost je měrou pravděpodobnosti entropie, můžeme také říci, že stavy s větší násobností mají větší entropii. Platí

$$S = k \ln W, \quad (43)$$

kde k je Boltzmannova konstanta. Hodnoty entropie S vypočtené dle vztahu (43) jsou uvedeny v posledním sloupci přehledu makro/mikrostavů.

Všechny provedené úvahy shrneme:

Soustava při termodynamických dějích přechází z počátečního méně pravděpodobného stavu (s nižší entropií) do stavů pravděpodobnějších (s vyšší entropií). Nejpravděpodobnější je rovnovážný stav, a proto v něm soustava setrvává nejčastěji.

3.5 DEGRADACE ENERGIE

Při rozboru Carnotova cyklu jsme poznali, že v tepelném stroji musíme odvádět teplo při isotermické 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 jiné, „vyšší“ formy energie *degradují* na energii tepelnou. Tento jev se nazývá **degradace energie**.

Aplikujme pravidla odvozená v KAP. 3.2 na celý vesmír:

Celková entropie vesmíru se nemění, probíhá-li vratný děj.

Celková entropie vesmíru roste, probíhá-li nevratný děj.

Protože všechny *reálné* děje jsou při podrobnějším posouzení nevratné, celková entropie vesmíru soustavně roste. Vesmír se tak v čase vyvíjí pouze jedním směrem, a to směrem k vyšší entropii. Směr „toku času“ nelze otočit, v času se nelze vrátit tak, jako se můžeme vrátit v prostoru; čas je orientován jedním směrem, **šipka času** ukazuje stále týmž směrem, do budoucnosti, k maximální entropii.

Roste-li však stále entropie vesmíru, znamená to, že jednou nastane okamžik, kdy bude entropie vesmíru maximální. Všechny struktury (galaxie, hvězdy, planety) budou rozloženy a z vesmíru se stane soubor chaoticky se pohybujících volných částic.

Teplo přestane proudit z jednoho místa na druhé (např. z hvězd na planety, jak je tomu dnes), protože všechna místa vesmíru budou mít stejnou teplotu; všechny energetické toky umožňující „život“ hvězd i život organismů budou zastaveny.

Vesmír bude jako „pozůstatek ohně před ránem“, jako rozhrnutá hromádka uhlíků, uhlíků dohasínajících a chladnoucích.

Tepelná smrt vesmíru není optimistický obraz; je to však možný a teoreticky podložený scénář vývoje. Existují ovšem i jiné scénáře, postavené na úvaze, zda je vesmír opravdu uzavřenou soustavou, či na jiných úvahách o vlastnostech temné hmoty. „Praktické starosti“ tento problém lidstvu nepochybně nepřinese; miliardy let před tím, než tepelná smrt vesmírů nastane, dospěje – dle dostatečně ověřených modelů – Slunce do stádia červeného obra, značně zvýší svůj zářivý výkon — a celá Země se vypaří.

A tím naposledy zvýší entropii stárnoucího vesmíru.



Hrob Ludwiga Boltzmannna

Na náhrobním kameni nahoře je uvedena rovnice (43).



Existence času jako důsledek „rozmazání“ mikrostavů?*

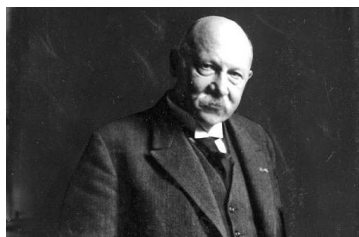
Směr šipky času je určen rostoucí entropií. Jak jsme však viděli v KAP. 3.4, větší entropii mají konfigurace s větší pravděpodobností. Pravděpodobnost výskytu určité konfigurace (neboli makrostavu) souvisí s počtem mikrostavů, které tento makrostav tvoří: např. makrostav II z OBR. 13 je tvořen 4 mikrostavy, makrostav III je tvořen 6 mikrostavy; důvodem je nerozlišitelnost jednotlivých elementárních částic. Avšak pozor: Pokud bychom jednotlivé částice byli schopni rozlišit, byly by všechny makrostavy stejně pravděpodobné (tak jako jednotlivé mikrostavy). Důsledky by byly zásadní: Pokud bychom byli schopni rozlišit jednotlivé částice mikrosvěta, měly by všechny stavy soustavy stejnou pravděpodobnost. Entropie soustavy by nerostla, zůstala by konstantní. Šipka času by nikam neukazovala. Čas by ztratil svůj směr. Čas by přestal existovat...

Carlo Rovelli říká: „Entropie existuje proto, že svět vidíme a popisujeme *rozmazaně*. Pokud bychom byli schopni pozorovat mikroskopický stav věcí, rozdíl mezi minulostí a budoucností by zcela zmizel.“ A ptá se: „Je vážně pravda, že kdybychom dokázali přesně vidět a vzít do úvahy skutečný tanec bilionů molekul, byla by budoucnost stejná jako minulost? Je možné, že o minulosti máme stejnou neznalost a nevědomost jako o budoucnosti?“

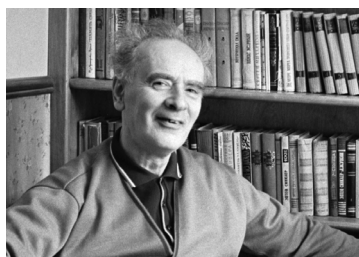
Třetí termodynamický zákon



Max Karl Ernst Ludwig Planck
Německý fyzik zabývající se termodynamikou, teorií tepelného záření, fyzikální chemií; ukázal, že při teplotě 0 K je entropie nulová.



Heike Kamerlingh Onnes
Nizozemský fyzik zkoumající vlastnosti plynů při velmi nízkých teplotách. Protože bylo známo, že elektrický odpor kovů při snižování teploty klesá, napadlo jej roku 1911 ponořit do tekutého helia rtuť a změřit její elektrický odpor. Zjistil, že elektrický odpor zcela vymizí; podobnou vlastnost objevil i u cínu, olova a některých slitin.



Лев Давидович Ландау
Sovětský fyzik narozený v Baku, který přispěl k rozvoji mnoha oblastí teoretické fyziky, významné jsou jeho objevy v oblasti supravodivosti a supratekutosti. Landau byl velice matematicky nadán; říkal o sobě, že „integrovat se naučil ve 13 letech a derivovat umí od nepaměti“. Byl žákem Nielse Bohra a učitelem řady československých fyziků.

Nultý zákon termodynamiky umožnil smysluplnou definici *teploty*. První termodynamický zákon ukázal, jak se v termodynamických dějích přeměňují formy *energie*. Druhý zákon termodynamiky ve svých důsledcích jednak umožnil měření teploty způsobem zcela nezávislým na konkrétních materiálech, jednak umožnil zavést *entropii*, přesněji řečeno *přírůstek entropie* vztahem (35). Jaká je však absolutní velikost entropie?

Počátek stupnice entropie vyplývá ze vztahu (43):

Při absolutní nule je i entropie systému nulová: Je-li $T = 0$, pak je i $S = 0$.

Důsledkem tohoto zjištění je **3. termodynamický zákon**:

Žádným postupem, ať jakkoliv idealizovaným, nelze v žádné soustavě dosáhnout snížení její teploty na hodnotu 0 K konečným počtem operací.

Ohlazování látky je tím obtížnější, čím nižší teplotu už látka má. Jak se blížíme absolutní nule, adiabatický děj se přibližuje isotermickému. Tím se ovšem ztrácí účinnost libovolné ochlazovací metody založené na střídání těchto dějů (viz obrácený Carnotův cyklus, KAP. 2.1). V současné době jsme se již přiblížili k absolutní nule až na 100 pK, dosáhnout jí nemůžeme nikdy.

4.1 FYSIKA 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.

Nízké teploty mají velký význam pro techniku. Problematice se však v našem textu nebudeme věnovat. Model ideálního plynu není vhodným přiblížením reality pro teploty blízké absolutní nule, neboť nepostihuje zkapalnění plynu.

Esej v poločasu

ENTROPIE, NIKOLIV ENERGIE OVLÁDÁ SVĚT

CARLO ROVELLI



Carlo Rovelli

Italský teoretický fyzik a spisovatel, který nyní působí převážně ve Francii. Zabývá se kvantovou gravitací, patří mezi zakladatele smyčkové kvantové gravitace. Pracuje také v oblasti hudby a filosofie vědy.

Ve škole mě učili, že svět je v pohybu díky energii. Neustále potřebujeme získávat energii, například z ropy, ze Slunce anebo z jaderných zdrojů. Díky energii fungují naše stroje, díky ní rostou stromy a my se díky ní každé ráno probouzíme plni vitality.

Ale něco se zdá být v nepořádku. Ve škole mě totiž také učili, že energie se zachovává. Nelze ji ani vytvořit ani zničit. Jestliže se však zachovává a je jí stále stejně, tak proč ji musíme pořád znova dodávat? Proč prostě nemůžeme jen používat pořád tutéž energii?

Pravdou je, že kolem nás je spousta energie, ale my ji nevyužíváme. Svět ke svému fungování tedy nepotřebuje další energii. Potřebuje nízkou entropii.

Energie (ať už mechanická, chemická, elektrická anebo potenciální) se nakonec přemění na energii tepelnou neboli teplo. Přechází na studené věci a neexistuje žádný laciný způsob, jak ji odtud dostat zpět, abychom ji mohli znova použít pro pěstování rostlin anebo k pohonu motorů. Během procesu přirozených přeměn zůstává energie stejná, ale entropie roste, a právě tohle se nedá snadno obrátit. Tak zní druhý zákon termodynamiky.

Svět tedy udržují v chodu nikoli zdroje energie, ale zdroje nízké entropie. Bez dodávání nízké entropie by se energie rozmělnila do uniformního tepla a svět by upadl do věčného spánku ve stavu tepelné rovnováhy – už by neexistoval žádný rozdíl mezi minulostí a budoucností, vůbec nic by se v něm nedělo.

Blízko naší Země naštěstí máme bohatý zdroj nízké entropie: Slunce. Slunce nám posílá fotony. Země pak vyzařuje do kosmického prostoru teplo, do černého nebe vysílá studenější fotony. Energie přijímaná Zemí je víceméně stejná jako energie, kterou Země vydává pryč. V konečném důsledku tedy žádnou přebytkovou energii nedostáváme, bilance je téměř vyrovnaná. Ale za každý horký foton, který naše planeta přijme, jich Země vyzáří deset chladnějších, protože jeden horký foton ze Slunce má stejnou energii jako deset chladných fotonů emitovaných Zemí. Horký foton *má menší entropii* než deset chladných fotonů, protože počet možných konfigurací jediného „horkého fotonu“ je menší nežli počet možných konfigurací deseti „chladných“ fotonů. Slunce je tedy pro nás neustálým a bohatým zdrojem nízké entropie.

Odkud se bere nízká entropie Slunce? Ze skutečnosti, že samo Slunce se kdysi zrodilo z entropické konfigurace, která byla ještě nižší. Prvotní oblak, z něhož se zformovala celá Sluneční soustava, měl ještě nižší entropii. A tak bychom mohli pokračovat dál a dál do minulosti, až bychom se dostali k extrémně nízké počáteční entropii vesmíru.

Velký příběh kosmu je poháněn právě růstem této entropie.

Ale nárůst entropie vesmíru není prudký; je postupný, občas si dává na čas. Například hromada dřeva může přečkat celé věky, ponecháme-



Řád času

Citovaný úryvek je z Rovelliho knihy *Řád času* (*L'ordine del tempo*, 2017); český překlad pořídil z anglického vydání *The Order of Time* Jiří Podolský, profesor MFF UK. Vydala nakladatelství Dokořán a Argo v Praze.

Knihu je nutno doporučit všem zájemcům o odpověď na otázku, co je to čas. V rozcestníku k tomto učebnímu textu najde čtenář odkazy jak na originální přednášky Carla Rovelliho, tak na českou dvojdielnou přednášku překladatele.

li ji samu o sobě. Není ve stavu s maximální entropií, protože prvky jako uhlík a vodík, z nichž se dřevo skládá, jsou zkombinovány velmi speciálním způsobem (jsou „uspořádány“). Entropie vzroste, když jsou tyto speciální kombinace atomů rozbity. To nastane třeba tehdy, když dřevo shoří: prvky se tím uvolní ze struktur tvořících dřevo a entropie prudce vzroste (hoření je ve své podstatě nevratný proces). Ale dřevo nezačne hořet samo o sobě. Dlouhou dobu zůstává ve stavu s nízkou entropií, než cosi otevře dvířka, jimiž lze projít do stavu s vyšší entropií. Hromada dřeva je v nestabilním stavu, podobně jako domeček z karet. Ale stojí, dokud nepřijde něco, co vyvolá kolaps. V případě dřeva to může být zápalka, která zažehne oheň. Oheň je proces, kterým dřevo může přejít do stavu s vyšší entropií.

Také živé bytosti jsou vytvořeny z podobně provázaných procesů. Fotosyntéza ukládá nízkou entropii ze Slunce do rostlin. Zvířata získávají nízkou entropii potravou. (Kdyby nám k životu stačila energie spíše nežli entropie, mohli bychom se namísto příštího jídla prostě jen vydat na Saharu, kde je větší teplo.) Uvnitř každé živé buňky najdeme složitý komplex chemických procesů. Tato struktura otevírá a zase uzavírá cesty, jimiž může růst nízká entropie. Molekuly fungují jako katalyzátory, které spřádají biochemické procesy. Anebo je naopak brzdí. Celá věc funguje díky růstu entropie v každém jednotlivém procesu. Není pravda, co se obvykle tvrdí, totiž že život vytváří struktury, které jsou speciálně uspořádané, které lokálně zmenšují entropii. Ve skutečnosti je to proces, který degraduje a spotřebovává nízkou entropii potravy. Je to samoorganizovaný děj vedoucí ke stále větší neuspořádanosti, o nic více ani méně nežli nacházíme ve zbytku vesmíru.

I ty nejbanálnější jevy se podřizují druhému zákonu termodynamiky. Kámen padá dolů k zemi. Proč? Často se můžeme dočíst, že proto, že se kámen snaží dostat „do stavu s nižší energií“, tedy směrem k zemi. Ale proč se kámen snaží dostat do stavu s nižší energií? Proč by měl ztrácet energii, když se energie zachovává? Správná odpověď zní, že když kámen dopadne na Zemi, zahřeje ji: jeho mechanická energie se přemění na teplo. A odtud už není cesty zpět. Kdyby neexistoval druhý zákon termodynamiky, kdyby neexistovalo teplo, kdyby neexistovalo mikroskopické hemžení bezpočtu molekul, kámen by se pořád odrážel nahoru a zase dolů, nikdy by se nezastavil, aby zůstal ležet dole na zemi.

Je to entropie, a nikoli energie, co drží kameny dole na zemi a co udržuje svět v chodu.

Veškerá evoluce kosmu je postupný proces růstu neuspořádanosti.

Parní motory

Tepelný motor je stroj, který přeměňuje část vnitřní energie paliva uvolněnou hořením na mechanickou energii prostřednictvím termodynamických dějů, kterým se podrobuje pracovní látka.

Tepelné motory můžeme zhruba rozdělit na motory parní, motory spalovací a motory reaktivní. Toto rozdělení není zcela jednoznačné, např. některé reaktivní motory obsahují jako svou část také spalovací turbíny, které řadíme mezi motory spalovací.

Vzhledem k zaměření naší školy uvedeme pro každý motor jen základní principy – technickými detaily se nezabýváme.

Historicky prvním tepelným motorem je parní stroj. Zatímco parní stroj má už jen historický význam, jiná skupina parních motorů – parní turbíny – je nepostradatelná.

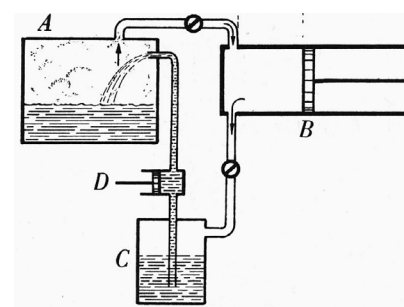
5.1 PARNÍ STROJ*

Historický přehled.* Parní stroj je nejstarší tepelný motor.

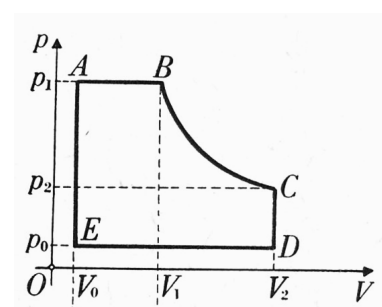
Mezníky vývoje:

- 1689 DENIS PAPIN, THOMAS SAVERY – první, neúspěšné 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 – čtená vylepšení parního stroje (proto bývá někdy pokládán za „vynálezce“ parního stroje).

Parní stroj je tepelný motor s vnějším spalováním – ke spalování dochází mimo motor, v kotli. Schéma parního stroje je v OBR. 21: A – kotel, B – válec, C – chladič, D – pumpa.



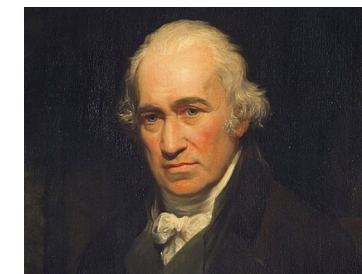
OBR. 21



OBR. 22

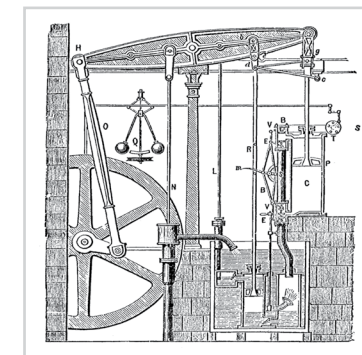
Ideální cyklus parního stroje je znázorněn v OBR. 22. Idealizované předpoklady: nedochází ke ztrátám únikem tepla vedením nebo zářením, nedochází ke tření, pracovní látka neuniká ven.

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



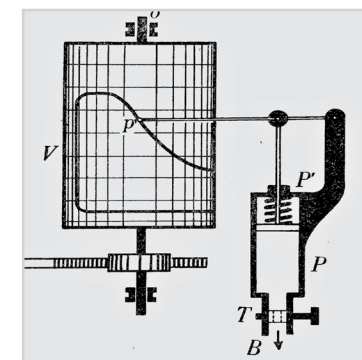
James Watt

Skotský vynálezce, mechanik, fyzik a matematik. Jeho vylepšení parního stroje se stalo jedním z předpokladů průmyslové revoluce. Později vynalezl ještě výkonnější dvojčinný parní stroj. Po Wattovi je v SI pojmenována jednotka výkonu – watt.



Parní stroj firmy Boulton & Watt

Písmenem Q je označen Wattův odstředivý regulátor (jeho model je vystaven v učebně fyziky Gymnasia F. X. Šaldy).



Indikátor

Zaznamenával reálný cyklus parního stroje při experimentálním ověření.



Lokomotiva 498.1

Špičková parní lokomotiva československé produkce. Stroj 498.106 je držitelem rychlostního rekordu československých parních lokomotiv, kterého dosáhl na zkušebním okruhu v Cerhonicích dne 27. srpna 1964 hodnotou 162 km/h. Tato lokomotiva je zachována v depozitáři Národního technického muzea v Chomutově.



Škoda Sentinel

Parní nákladní automobil, vyráběný ve Škodových závodech v letech 1924–1935. Jednalo se o vozy podle licence anglické firmy The Sentinel Waggon Works Ltd. Vůz byl vybaven stojatým parním kotlem a dvouválcovým parním strojem o výkonu 52 kW. Spaloval koks, uhlí, dřevěné uhlí, popř. i dřevo. Nejvhodnějším palivem byl koks.



Jaderná elektrárna Temelín
Odkrytý nízkotlaký díl turbíny.



Jaderná elektrárna Temelín
Pohled na díly 1000MW parní turbíny v Jaderné elektrárně Temelín během montáže.

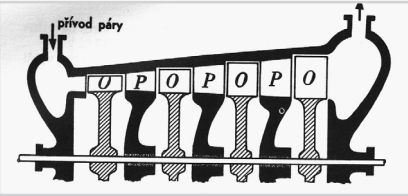
ke ztrátám. Práce vykonaná během jednoho cyklu je dána obsahem plochy uvnitř diagramu. Pracovní cyklus lze rozložit na pět dějů:

	E	Píst umístěn tak, že objem V_0 prostoru ve válci je minimální; uvnitř je tlak rovný tlaku vnějšího vzduchu p_0 .	
I	$E \rightarrow A$	Pára vniká z kotle do válce, píst se ještě nepohybuje, tlak páry vzroste na tlak p_1 , který je v kotli.	isochorický
II	$A \rightarrow B$	Pára se rozpíná, píst se pohybuje, přitom je válec stále spojen s kotlem – proto je ve válci stále tlak p_1 , který je v kotli.	isobarický
	B	Přívod páry se zastaví šoupátkem.	
III	$B \rightarrow C$	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.	
IV	$C \rightarrow D$	Válec je otevřen do vnějšího prostoru, proto tlak klesá na hodnotu vnějšího tlaku p_0 , píst se zatím nevrací.	isochorický
V	$D \rightarrow E$	Píst poháněný setrvačnickem vytlačí páru z válce, objem se sníží na V_0 , kruhový děj se uzavírá.	isobarický

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, pracovní látka se znovu využije.
Dvojčinné motory – pracovní prostor je po obou stranách pístu.
Účinnost. Horní hranice účinnosti dle Carnotova cyklu: teplota ohřívače 197 °C, chladiče 30 °C, proto $\eta_{id} = 35 \%$. Reálná účinnost: cca 16 %.

5.2 PARNÍ TURBÍNA

Parní turbíny se užívají i v dnešní době (např. v tepelných či v jaderných elektrárnách, v jaderných ponorkách). 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 (pára má rychlost 900–1500 m/s); konstrukční možnosti jsou omezeny pevností kola. Po průchodu oběžným kolem má pára velkou energii, kterou by byla škoda nevyužít, takže se pára soustavou rozváděcích lopatek (rozváděcí kolo) vede do dalšího oběžného kola. Na jedné ose upevněno několik oběžných kol O a rozváděcích kol P (OBR. 23). Počet dvojic oběžných a rozváděcích kol udává stupeň turbíny. Podobně jako v případě parních strojů se rozeznávají turbíny výfukové a kondenzační.



OBR. 23

Výhody parní turbíny oproti parnímu stroji:

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

Spalovací motory

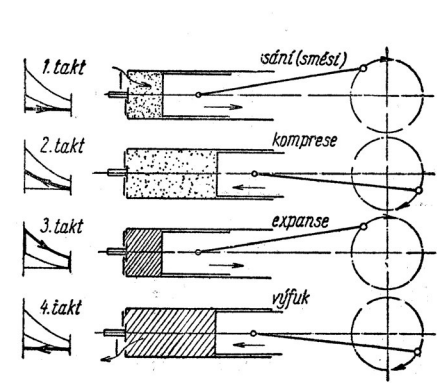
Spalovací motory jsou motory s vnitřním spalováním – ke spalování paliv nedochází v kotli, ale přímo v motoru; tepelná energie paliva se mění na energii mechanickou. Zplodiny hoření se stávají složkami pracovní látky. **Zápalná směs** je směs jemně rozptýleného kapalného paliva (i jeho par) nebo plynného paliva a vzduchu. Zápalná směs se připravuje buď vně motoru (v karburátoru, vstřikováním paliva do sací trouby nebo ve směšovači), nebo přímo v motoru (vysokotlakým vstřikováním paliva do pracovního prostoru motoru).
Pístové motory – spalování probíhá ve válci motoru, translační pohyb pístu je (zpravidla) převáděn klikovým hřídelem na pohyb rotační.
Lopátkové motory – spalování probíhá v komoře, spaliny jsou vedeny na lopatky turbíny.

6.1 PÍSTOVÉ MOTORY

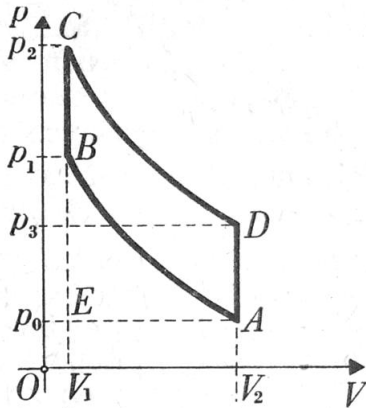
Základní princip pístových motorů: Ve válci je zapálena výbušná směs, zplodiny hoření tlačí na píst, pohybují jím, konají práci.
Dělení pístových spalovacích motorů:
■ podle typu: zážehový (výbušný, Ottův) motor, vznětový (stálotlakový, Dieselův) motor;
■ podle počtu zdvihů na jeden cyklus: významné jsou čtyřdobé motory a dvoudobé motory.

Zážehový (výbušný, Ottův) čtyřdobý motor

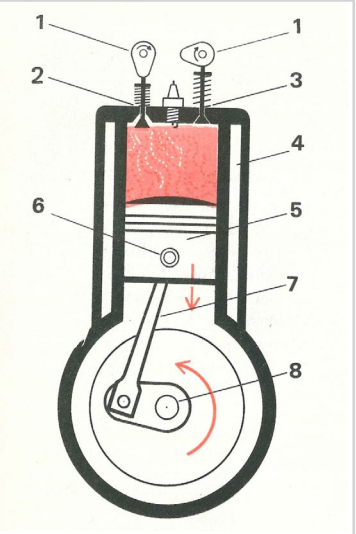
Pracovní cyklus motoru je v OBR. 24, 25, 26. Účinnost závisí zejména na užitém adiabatickém ději, práce vykonaná při tomto ději je dána především kompresním poměrem. Při velkém kompresním poměru však hrozí nebezpečí samovznícení paliva („klepání motoru“).
Ideální účinnost cca 55 %, realita cca 30 %.
Užití: zejména osobní automobily, motocykly, starší či menší letadla, motorové čluny, některé zahradní stroje a ruční nářadí.



OBR. 24



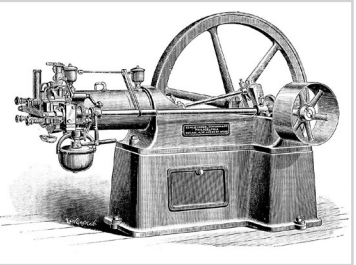
OBR. 25



Přeměna posuvného pohybu pístu na otáčivý pohyb klikového hřídele
1 – vačky, 2 – sací ventil, 3 – výfukový ventil, 4 – blok válců, 5 – píst, 6 – pístní čep, 7 – ojnice, 8 – klikový hřídel

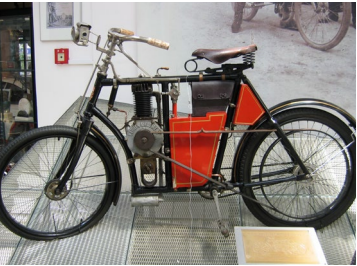


Nicolaus Otto
V roce 1876 vyrobil čtyřtákní motor se zvýšeným kompresním poměrem a nechal si jej patentovat. V roce 1884 zdokonalil elektrické zapalování pro své motory. Do té doby byly motory stacionárními stroji, vzhledem k používání plynu a potřebě zapalení směsí plamenem.

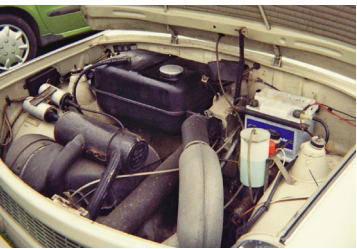




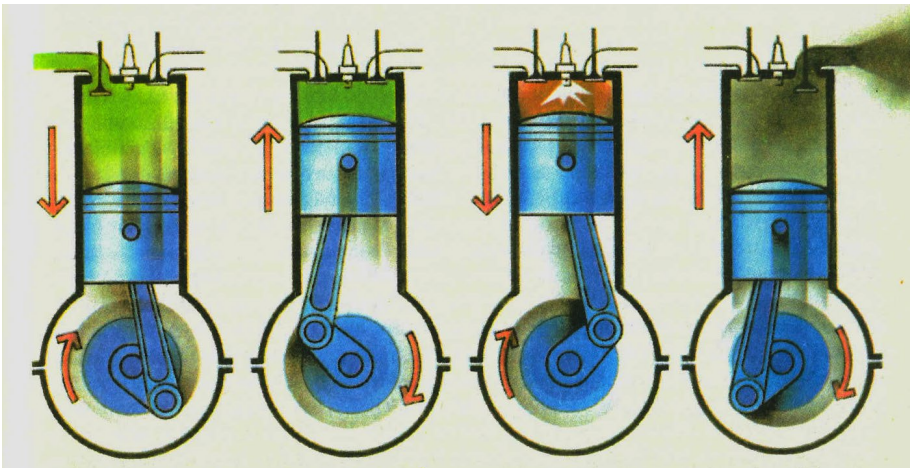
NW Präsident
První sériově vyráběný automobil na území dnešní České republiky i tehdejšího Rakouska-Uherska, jeden z prvních automobilů na světě vůbec. Výrobce Nesselsdorfer Wagenbau-Fabriks-Gesellschaft A.G., pozdější Tatra Kopřivnice. Agregát: dvouválcový řadový ležatý motor Benz o objemu 2,714 l a výkonu přibližně 5 kW. Palivová nádrž o objemu 23 l byla umístěna pod předními sedadly.



Laurin & Klement Typ 1
První motocykl vyrobený na území bývalého Rakouska-Uherska (1899). Tento stroj vyšel z dílny mladoboleslavského výrobce jízdních kol, motocyklů a automobilů Laurin & Klement; byl vybaven vzduchem chlazeným jednoválcovým motorem o objemu 184 cm³.



Trabant 601
Dvoudobý vzduchem chlazený motor a nádrž vozu Trabant 601. Trabant je jedna ze značek automobilů vyráběných v minulosti automobilkou Sachsenring v saském městě Zwickau. Model 601 s dvoutaktním motorem a karosérií z duroplastu se stal jedním ze symbolů NDR.

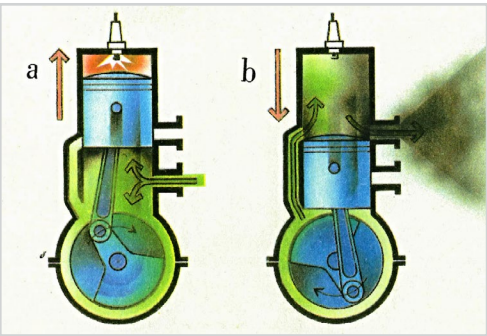


OBR. 26

I.	sání	$E \rightarrow A$	Nasává se výbušná směs (vzduch a páry benzínu, zemní plyn, propan-butan), roste objem, stále atmosférický tlak	isobarický
II	komprese	$A \rightarrow B$	Směs stlačena pístem, roste tlak, klesá objem.	adiabatický
III	exploze	$B \rightarrow C$	Zapálení směsi svíčkou, okamžité zvýšení teploty a tlaku.	isochorický
	expanze	$C \rightarrow D$	Expanze, koná se práce, klesá teplota.	adiabatický
IV	výfuk	$D \rightarrow A$	Ve stavu D se otevře výfukový ventil, část spalin unikne, klesne tlak, objem konstantní.	isochorický
		$A \rightarrow E$	Zbytek spalin vytlačen pístem, cyklus je uzavřen (což ale striktně vzato není pravda – protože v každém cyklu se užívá jiné plynné těleso).	isobarický

Dvoudobý zážehový motor

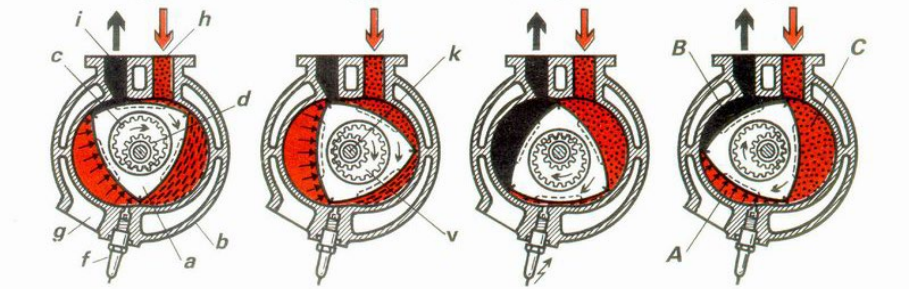
Pracovní oběh proběhne během jedné otáčky klikového hřídele, **doba pracovní** se střídá s **dobou nepracovní**. Během stlačování plynu nad pístem (obr. 27a) se nasává palivová směs (s přídavkem oleje) do prostoru pod pístem. Během doby pracovní (obr. 27b) se vytlačují spálené plyny výfukem ven a současně se palivová směs přepouští kanálem z prostoru pod pístem do prostoru nad pístem. Motor má (zpravidla) jednodušší konstrukci než motor čtyřdobý (ventily jsou často nahrazeny šoupátky), má menší hmotnost, avšak také nižší účinnost – a je hlučnější. Užití: mopedy, skútry, malé motocykly, výjimečně osobní automobily, některé zahradní stroje a ruční nářadí (např. křovinořezy).



OBR. 27

Wankelův motor

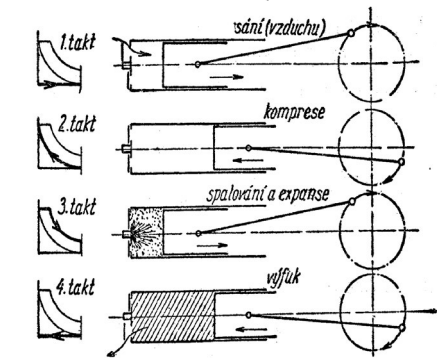
Pístový spalovací motor s krouživým pohybem (OBR. 28). Hlavní části: a – rotační píst, b – pevná pístní skříň, c – vnitřní ozubení pístu, d – ozubené kolo pevně spojené se stěnou skříně, f – svíčka, g – vodní chlazení pístní skříně, h – sací kanál, i – výfukový kanál, k – hřídel motoru, v – vnitřek pístu. Pracuje se čtyřdobým tepelným oběhem, který však probíhá v různých fázích současně ve třech pracovních prostorech motoru (OBR. 28: A expanze, B výfuk, C sání). Celý oběh proběhne za jednu otočku hřídele jako ve dvoudobém spalovacím motoru. Výhodou motoru je klidný chod bez vibrací, malé rozměry i hmotnost. Odpadají všechny rozvodové mechanismy; píst sám koná rotační pohyb. Nevýhodou motoru je obtížné utěsnění čel pístu a ztížený odvod tepla z pístu. Wankelovým motorem jsou osazeny některé vozy značek Mazda a Lada.



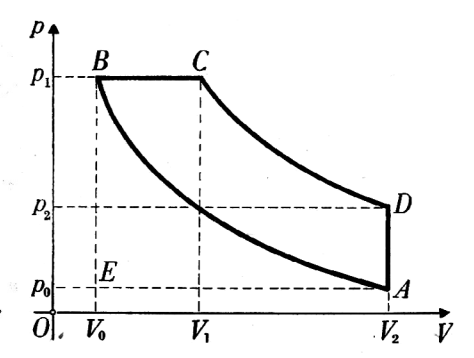
OBR. 28

Vznětový (stálotlakový, Dieselův) motor

Pracovní cyklus motoru je znázorněn v OBR. 29, 30.



OBR. 29



OBR. 30

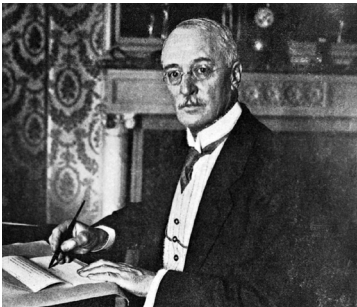
I	sání	$E \rightarrow A$	Nasává se (pouze) vzduch, roste objem, ve válci stále atmosférický tlak.	isobarický
II	komprese	$A \rightarrow B$	Vzduch stlačen pístem asi na 1/5 původního objemu, roste tlak.	adiabatický
III	exploze	$B \rightarrow C$	Do stlačeného vzduchu se vstříkne palivo (nafta, petrolej), v rozžhaveném vzduchu hoří při stálém tlaku, stoupá teplota a objem.	isobarický
	expanze	$C \rightarrow D$	Expanze, koná se práce.	adiabatický



Felix Wankel



Mazda RX 5
Vůz osazený Wankelovým motorem (dobové foto).



Rudolf Diesel
Konstrukce původního Diesela motoru se od konstrukce současných vznětových motorů zásadně odlišovala, proto je označení „Dieselův motor“ pro dnešní motory nevhodné, je však (mezinárodně) vžit.



Tatra 148
Československý nákladní automobil. Pohonnou jednotkou byl vznětový, vzduchem chlazený, do „V“ uspořádaný osmiválcový motor. Celkem se vyrobilo 113 647 těchto automobilů. Z tohoto počtu bylo 63 700 automobilů exportováno do 43 států.



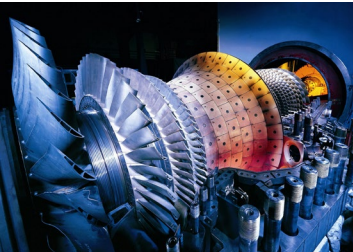
Motorový vůz řady 810

Vozy jsou poháněny hnacím soustrojím umístěným pod podlahou a sestávajícím mj. z nepřepřehnaného vznětového motoru LIAZ ML 634 a automatické hydromechanické převodovky Praga 2M70, které byly převzaty z autobusů Karosa ŠM 11.



Lokomotiva řady 751

Dieseletektrická lokomotiva vyráběná pražskou ČKD, slangově zvaná *Zamračená* či *Bardotka*. Trvalá tažná síla lokomotivy je 120 kN, maximální 220 kN. Pohání ji čtyřdobý vznětový šestiválcový motor přepínaný turbodmychadlem, jehož turbína je poháněna výfukovými plyny. Přenos výkonu je elektrický: Motor pohání dynamo, které vyrábí stejnosměrný proud, jímž jsou napájeny čtyři elektromotory umístěné po dvou v podvozcích lokomotivy.



Spalovací turbína

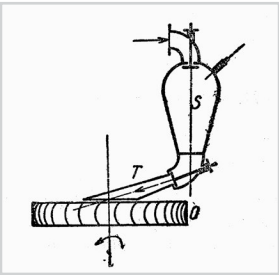
Spalovací turbína Siemens, součást paroplynové elektrárny.

IV	výfuk	$D \rightarrow A$	Otevře se výfukový ventil, část spalin unikne, klesne tlak, objem zůstává konstantní.	isochorický
		$A \rightarrow E$	Zbytek spalin vytlačen pístem.	isobarický

Výhody tohoto motoru: vyšší kompresní poměr, lepší využití paliva, nedochází k samovznícení.
Ideální účinnost: 63 %.
Užití: nákladní automobily, osobní automobily, stavební stroje, lodě, diesellové lokomotivy, lokotraktory, motorové vozy.

6.2 LOPATKOVÉ SPALOVACÍ MOTORY

Spalovací turbína je tepelný stroj s vnitřním spalováním, jehož pracovní látkou jsou spaliny vzniklé spalováním paliva ve spalovací komoře S. Palivo je spalováno za pomoci stlačeného vzduchu připraveného kompresorem. Spaliny při průchodu turbínou odevzdávají lopatkám O turbíny kinetickou energii (OBR. 31). Teploty plynů v turbínách jsou až 900 °C, odstředivá zrychlení až 10⁵× větší než normální tíhové zrychlení. Spalovací turbíny jsou součástí některých proudových motorů (viz KAP. 7.1). Samostatně se používají k pohonu některých lodí, některých lokomotiv, některých bojových vozidel a k pohonu elektrických generátorů v paroplynových elektrárnách.



OBR. 31

Paroplynová elektrárna

Výroba elektřiny v paroplynovém cyklu je snahou o maximálně účinnou výrobu elektřiny, což je zajištěno součinností dvou tepelných oběhů, parního a plynového. Chemicky vázaná energie plynu se po jeho spálení využije nejprve v plynové turbíně a následně ve spalinovém kotli k výrobě páry, kterou je poháněna parní turbína. Elektrická energie se získává jak z generátoru poháněného plynovou, tak z generátoru poháněného parní turbínou. Tepelný oběh plynové turbíny se skládá z komprese vstupního vzduchu, jeho smísení s palivem, které shoří, a následné expanze spalin v plynové turbíně. Oběh je uzavřen výstupem spalin přes spalinový výměník. Tepelný oběh parní turbíny se skládá z ohřevu tlakové vody na teplotu varu, vypařování, přehřátí páry na pracovní teplotu a následné expanze páry v parní turbíně. Oběh je uzavřen kondenzací páry na vodu.

Reaktivní motory

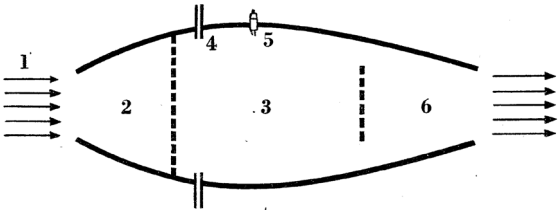
Reaktivní motory využívají reakční sílu (3. Newtonův zákon – zákon akce a reakce) při výtoku spalin plynů tryskou (proto také: **tryskové motory**); k pohybu dochází v důsledku platnosti zákona zachování hybnosti. Reaktivní motory se dělí na proudové a raketové podle toho, zda potřebují k provozu atmosférický vzduch.

7.1 PROUDOVÉ MOTORY

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

Náporový motor

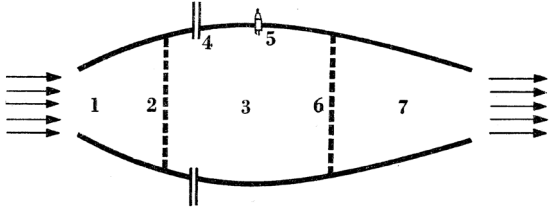
Konstrukčně nejjednodušší proudový motor (OBR. 32). Vzduch vchází vstupním otvorem 1 do difusoru 2. Zde ztrácí kinetickou energii, takže roste tlak. Ve spalovací komoře 3 se vstříkne palivo 4 a zapálí svíčkou 5. (Později – při vyšší teplotě – se palivo vzněcuje už samo.) Stlačení se děje nápořem vzduchu (odtud název motoru); motor musí mít dostatečnou rychlost. Nestartuje sám, nýbrž pomocí startovacích raket. Hospodárné při nadzvukových rychlostech; použito v různých pokusných konstrukcích.



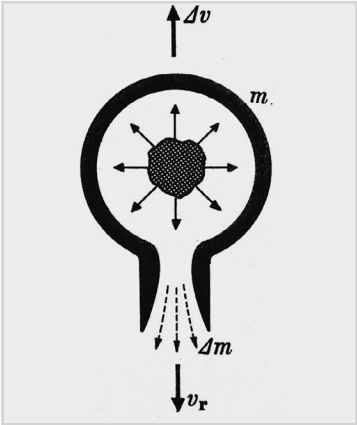
OBR. 32

Pulsační motor

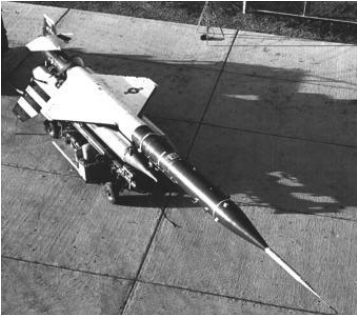
Pulsační proudové motory (OBR. 33) nepracují plynule, ale přerušovaně – pulsují. Vzduch a palivo jsou dodávány v časových intervalech, ohraničených samočinným otevíráním a uzavíráním vstupního otvoru 1 pružnými žaluziemi. Motor se startuje přivedením proudu vzduchu na vstup k žaluziím. Žaluzie 2 se tlakem vzduchu odtlačí a proud vzduchu ve spalovací komoře 3 strhne a rozpráší palivo přiváděné do trysky 4. Po zapálení směsi paliva



OBR. 33



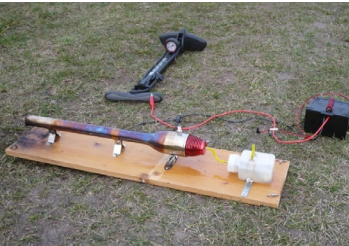
Princip reaktivních motorů
Zhlédněte animace a videa připojená v rozcestníku.



AQM-60 Kingfisher
Střela armády Spojených států amerických vybavená nápořovým motorem.



Fieseler Fi 103
V-1 (z něm. *Vergeltungswaffe*, odvetná zbraň), typové označení Fieseler Fi 103, byla německá letounová střela poháněná pulsačním motorem a řízená jednoduchým autopilotem. Používal ji Wehrmacht během druhé světové války. Byla to první hromadně používaná střela s plochou dráhou letu na světě. Frekvence pulsů motorů těchto střel byla 45 Hz.



Pulsační motor

Malý pulsační motor určený k pohonu leteckých modelů.



P15B-300

Turbokompresorový reaktivní motor. Jednohřídelový motor s pětistupňovým axiálním (oso-
vým) kompresorem, spalovací komorou smíšené konstrukce a jednostupňovou axiální tur-
bínou. Za motorem je ještě roz-
měrná komora přidavného spa-
lování, výstupní tryska motoru je
třípolohová. Motor R-15 poháněl
sovětskou nadzvukovou stíhač-
ku MiG-25.



Motor CFM56

Dvouproudový motor, který po-
hání letouny Boeing 737, Airbus
A320 a další.



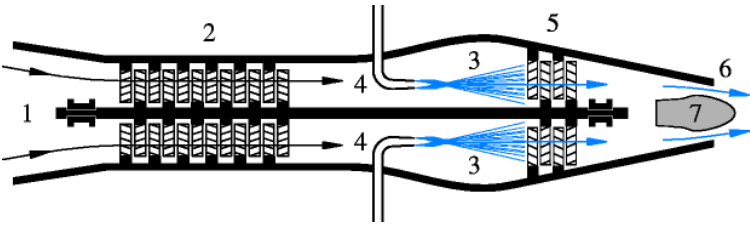
Let US Airways 1549

Nouzové přistání letounu A320
na hladině řeky Hudson poté, co
výkon obou motorů klesl v dů-
sledku nasátí bernešek velkých
(*Branta canadensis*) do motorů.

svíčkou 5 se vzduchem zvýšený tlak spalin přitlačí žaluzie na opěrnou mříž. Spaliny unikají tryskou a uvádějí motor do pohybu. Při poklesu tlaku ve spalovací komoře odtlačí nápor vzduchu před motorem žaluzie, vzduch vstupuje do spalovací komory, strhává a rozprašuje palivo a celý pulsační cyklus se opakuje. Z popisu je zřejmé, že k nastartování motoru je třeba vyvolat nápor vzduchu ve vstupu do motoru. Pulsační motory vznikly nejprve pro pohon rotoru prvních vrtulníků, známé je použití v německých válečných létajících střelách V-1, dnes jsou používány amatéry pro pohon některých dálkově řízených modelů.

Turbokompresorový motor

Tento motor (OBR. 34) má kompresor, sloužící ke stlačení nasávaného vzduchu, a plynovou turbínu, která kompresor pohání. Vzduch vnikající předním otvorem motoru 1 je stlačován kompresorem 2; tlak a teplota vzduchu při tom stoupá. Stlačený vzduch jde do spalovací komory 3, kde v průběhu spalování dále roste jeho teplota. Spaliny procházejí rozvodovým zařízením plynové turbíny 5 na oběžné kolo, které roztáčí kompresor, motor opouští výtakovou tryskou 6.

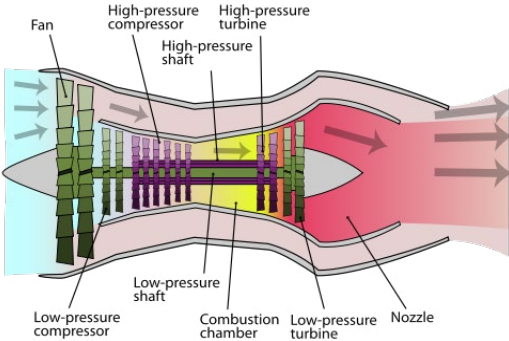


OBR. 34

Tah motoru může být vyvozen buď pouze expanzí spalin v trysce – čistě proudové motory –, nebo expanzí spalin v trysce a tahem vrtule – turbovrtulové motory, popř. motory turbohřídelové užívané k pohonu vrtulníků.

Dvouproudový (turbodmychadlový) motor

Turbodmychadlový motor (OBR. 35) je letecký motor, který pracuje na podobném principu jako turbokompresorový motor. Navíc obsahuje dmychadlo a nízkotlaký kompresor, poháněné další turbínou. Část plynu z dmyhadla proudí přímo do motoru, zbytek do obtokového kanálu. Ve výstupní trysce se oba proudy smísí; tím je zvyšován tah a účinnost spalování. Motory jsou méně hlučné a mají nižší spotřebu, v současnosti se používají téměř ve všech proudových dopravních letadlech i v letounech vojenských.



OBR. 35

Proudové motory se vedle letadel a střel používají také v experimentálních vozidlech (viz Thrust SSC na s. 13), reaktivních saních apod.

7.2 RAKETOVÉ MOTORY

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

Raketové motory prvního druhu

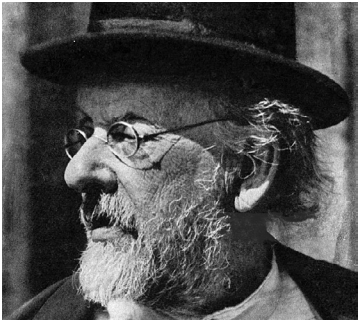
Pevné, práškové palivo (zpravidla střelný prach slisovaný do tvaru dutého válce) je smíšeno s okysličovadlem. Při provozu vznikají vysoké tlaky, doba hoření je krátká, lze ji jen těžko regulovat. Motor nelze zastavit. Využito v některých střelách (sovětské kaťuše).

Raketové motory druhého druhu

Kapalnými palivy v těchto motorech jsou: výrobky z ropy, např. parafiny, aromatické uhlovodíky, cyklické uhlovodíky, alkoholy, 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 buď přetlakem vzduchu, přiváděného do zásobníků paliva a okysličovadla ze zvláštních tlakových nádob, nebo čerpadly. Turbiny pro pohon čerpadel paliva a okysličovadla mohou být poháněny spaliny vznikajícími ve spalovací komoře motoru nebo ve zvláštních k tomu speciálně určených spalovacích komorách.

Využití raketových motorů: nosné 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 na vozidla), raketové střely ve vojenství.



Константин Эдуардович Циолковский

V roce 1903 vydal jako první na světě práci popisující teorii letu rakety (vytvořil vzorec popisující závislost mezi rychlostí rakety, její hmotností a rychlostí spalin – Ciolkovského rovnici).



Wernher von Braun

Nejprve pracoval pro nacistické Německo, kde se podílel na konstrukci rakety V-2, kterou Německo ostřelovalo Londýn. Po druhé světové válce pracoval ve Spojených státech amerických, kde zkonstruoval raketu Saturn V, která vynesla první lidi k Měsíci.



Сергей Павлович Королёв

Sovětský konstruktér raket narozený na Ukrajině. Řídil sovětský vesmírný program včetně projektů Sputnik a Vostok, stál také za prvním letem člověka do vesmíru (12. dubna 1961). K této práci jej totalitní režim povolal jako nepostradatelného odborníka ze žaláře, kam jej předtím na základě politických obvinění uvrhl.

Malý slovník pojmů

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
šipka času	arrow of time
vratný děj	reversible process
kruhový děj	thermal cycle
ohřívač	heat reservoir, hot reservoir
chladič	cooler, refrigerator, cold reservoir
Carnotův cyklus / stroj	Carnot cycle / engine
Carnotova věta	Carnot's theorem
tepelný motor	heat engine
tepelné čerpadlo	heat pump
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
náporový motor	ramjet
turbokompresorový motor	turbojet
turbovrtulový motor	turboprop
turbohřídelový motor	turboshaft

Literatura

POUŽITÁ LITERATURA

[MFT] Bartuška, K. – Svoboda, E.: *Fyzika pro gymnázia: Molekulová fyzika a termika*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2001.

[MFT'] Bartuška, K. – Svoboda, E.: *Fyzika pro gymnázia: Molekulová fyzika a termika*. 7. vyd. Praha: Prometheus, 2016.

[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.

[Wal4] Walker, J. S.: *Physics*. 4. vyd. San Francisco: Pearson Addison-Wesley, 2010.

[Hal2] Halliday, D. – Resnick, R. – Walker, J.: *Fyzika II: Mechanika, termodynamika*. 1. vyd. Praha, Brno: Vutium a Prometheus, 2000.

[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.

[Rov20] Rovelli, C.: *Řád času*. 1. vyd. Praha: Dokořán a Argo, 2020.

[Ves88] Veselá, E.: *Co nám příroda nedovolí*. 1. vyd. Praha: Panorama, 1988.

[Lau59] Laue, M. von: *Dějiny fyziky*. 1. vyd. Praha: Orbis, 1959.

[LFy] *Fyzikové*. 1. vyd. Praha: Encyklopedický dům, 1997.

[VSF] *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz*. 1. vyd. Praha: Prometheus, 2001.

[1] Vanovič, J. – Sokol, E. – Thern, L. – Vlach, B.: *Fyzika pro II. ročník střední všeobecně vzdělávací školy (pro II. a III. ročník gymnasia)*. 4. vyd. Praha: SPN, 1969.

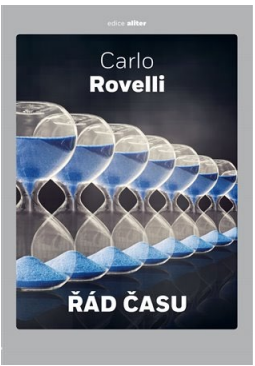
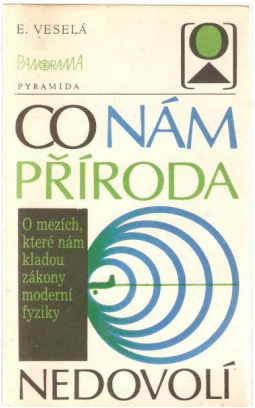
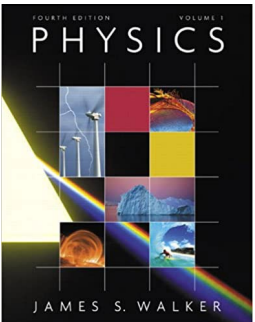
[2] Chytilová, M. – Kluvanec, D. – Žampa, K.: *Fyzika pro 8. ročník ZŠ, část A*. 1. vyd. Praha: SPN, 1983.

[3] Kolářová, R. – Chytilová, M. – Kluvanec, D. – Žampa, K.: *Fyzika pro 8. ročník ZŠ, část A*. 2. vyd. Praha: SPN & Scientia, 1993.

[4] O paroplynové energetice [online; cit. 2021-7-02]. <<https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/paroplynove-a-plynove-zdroje/informace-o-paroplynove-energetice>>

ZDROJE ČÍSLOVANÝCH OBRÁZKŮ

[MFT] 2–4, 34; [MFT'] 13; [FC2] 1, 5, 7, 9, 10; [Lep87] 11, 12; [Hla71] 21, 22, 25, 30, 32, 33; [Hor61] 24, 29, 31; [1] 23; [3] 26, 27; Wikipedia.org 35

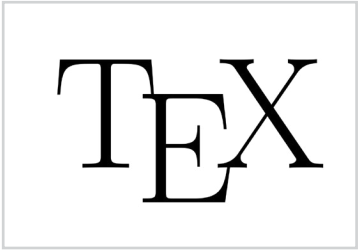


Knihy doporučené
zájemcům o širší
souvislosti tématu
studijního textu



Písmo Academica

Druhá část textu a exkursy v první části textu jsou vysazeny písmem Academica. Písmo vzniklo úpravou písma Academia, které jeho autor Josef Týfa poprvé publikoval v roce 1967. V letech 2003–2004 autor písmo ve spolupráci s Františkem Štormem upravil a ve *Storm Type Foundry* vznikla digitální verze.



Výklad v první části textu je vysazen typografickým systémem T_EX. Při tvorbě byla užita řada autorových vlastních maker. Poprvé byl užit pdf T_EX s možností barevného výstupu a dalších „efektů“ využívajících přímo kód pdf. Z technických důvodů je (zatím) použita česká varianta původních Computer Modern fontů.

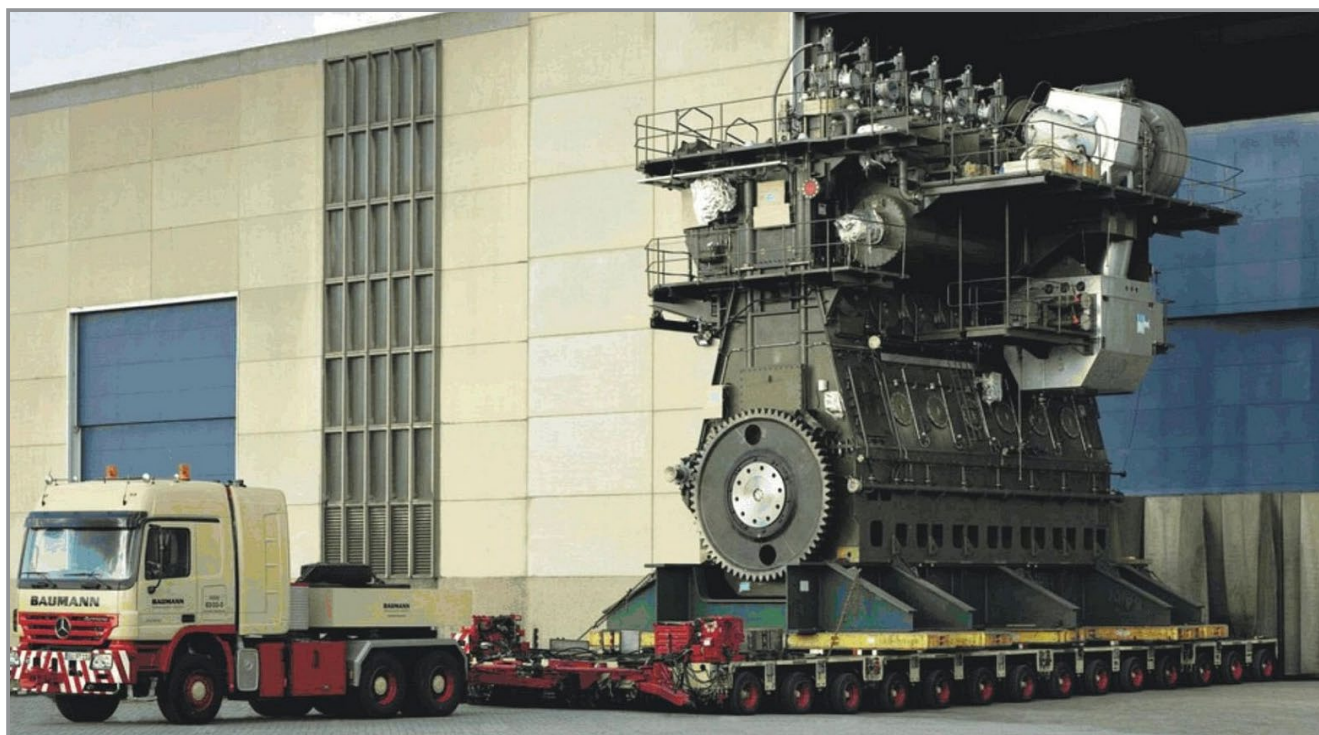
■ NA POSLEDNÍ STRANĚ
OBÁLKY

Wärtsilä RT-flex96C

Dvoudobý vznětový motor finského výrobce Wärtsilä navržený pro velké kontejnerové lodě. Největší aktuálně vyráběný pístový motor; v maximální konfiguraci je čtrnáctiválcový (výška 13,5 m, délka 26,6 m; na fotografii je jen část motoru).

ZDROJE OSTATNÍCH OBRÁZKŮ

1 <https://movies.mxdwn.com/feature/happy-2020-5-futuristic-films-to-welcome-in-the-new-year/> | **6** <https://ulesa.webgarden.cz/zalozky/ostatni-projekty/vodni-kolo-i;> https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C4%9BtrnC3%A1_turb%C3%ADna; https://cs.wikipedia.org/wiki/Vzn%C4%9Btov%C3%BD_motor; [nasa.gov;](https://www.nasa.gov/) https://www.schaeffler.de/content.schaeffler.de/en/products-and-solutions/industrial/industry_solutions/power-transmission/electric-motors/index.jsp | **7** https://cs.wikipedia.org/wiki/Svat%C3%BD_Augustin | **8** <https://www.britannica.com/biography/Gottfried-Wilhelm-Leibniz;> https://en.wikipedia.org/wiki/Riemann_sum | **9** [MFT] | **10** [https://www.walmart.com/ip/Sadi-Carnot-1796/383711020;](https://www.walmart.com/ip/Sadi-Carnot-1796/383711020) [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Sadi_Carnot_-_Reflexions_sur_la_puissance_motrice_du_feu,_1824.djvu&page=12&uselang=fr;](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Sadi_Carnot_-_Reflexions_sur_la_puissance_motrice_du_feu,_1824.djvu&page=12&uselang=fr) [https://fr.wikipedia.org/wiki/Sadi_Carnot_\(physicien\)#/media/Fichier:Carnot-engine-1824.png](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sadi_Carnot_(physicien)#/media/Fichier:Carnot-engine-1824.png) | **11** <https://www.ux1.eiu.edu/~cfadd/1360/22HeatEngines/Carnot.html> | **12** <https://www.atlasobscura.com/articles/what-is-mount-washington-co-g-railway> | **13** <https://moneyweek.com/411571/15-october-1997-britains-thrust-supersonic-car-breaks-the-sound-barrier;> <https://radioblanik.cz/aktualne/temelin-slouzi-uz-20-let;> https://www.denik.cz/z_domova/drabova-jaderne-elektrarny-v-crjsou-proti-zemetre.html | **14** [https://earthbuddies.net/perpetual-motion-machines-and-the-search-of-free-energy/;](https://earthbuddies.net/perpetual-motion-machines-and-the-search-of-free-energy/) [http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/yoon1/;](http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/yoon1/) <https://cz.pinterest.com/pin/77264949834224486/> | **16** [https://cs.wikipedia.org/wiki/William_Thomson#/media/Soubor:Sir_William_Thomson,_Baron_Kelvin,_1824_-_1907_Scientist,_resting_on_a_binnacle_and_holding_a_marine_azimuth_mirror.jpg;](https://cs.wikipedia.org/wiki/William_Thomson#/media/Soubor:Sir_William_Thomson,_Baron_Kelvin,_1824_-_1907_Scientist,_resting_on_a_binnacle_and_holding_a_marine_azimuth_mirror.jpg) <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1909/ostwald/biographical/> | **17** [https://www.clivemaxfield.com/what-the-faq-are-kelvin-and-rankine-et-al/;](https://www.clivemaxfield.com/what-the-faq-are-kelvin-and-rankine-et-al/) https://cs.wikipedia.org/wiki/Nov%C3%A9_definice_SI#/media/Soubor:Unit_relations_in_the_new_SI.svg | **18** Vítězslav Pěnička a kol. | **19** <http://www.converter.cz/fyzici/clausius.htm> | **20** [https://euanmearns.com/entropy-energy-and-order-in-the-universe/;](https://euanmearns.com/entropy-energy-and-order-in-the-universe/) <http://www.enviweb.czwww.agroweb.czwww.enviweb.cz/72991> | **22** [https://monoskop.org/Norbert_Wiener;](https://monoskop.org/Norbert_Wiener) <http://www.sciography.com/ludwig-boltzmann.htm> | **23** [https://cs.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Boltzmann;](https://cs.wikipedia.org/wiki/Ludwig_Boltzmann) <https://www.forbes.com/sites/startswithabang/2016/10/12/where-does-our-arrow-of-time-come-from/?sh=7f66d26277ff> | **24** [https://www.thefamouspeople.com/profiles/heike-kamerlingh-onnes-7598.php;](https://www.thefamouspeople.com/profiles/heike-kamerlingh-onnes-7598.php) [https://www.thoughtco.com/mach-x-planck-formulates-quantum-theory-1779191;](https://www.thoughtco.com/mach-x-planck-formulates-quantum-theory-1779191) <https://codepen.io/andreiruban/pen/vGWXNj> | **25** <https://physicsworld.com/a/carlo-rovelli-the-author-of-the-order-of-time-discusses-perhaps-the-greatest-mystery/> | **26** Dokořán & Argo, Praha | **27** [https://www.elektrina.cz/james-watt-parni-stroj;](https://www.elektrina.cz/james-watt-parni-stroj) [https://cs.wikipedia.org/wiki/James_Watt#/media/Soubor:SteamEngine_Boulton&Watt_1784.png;](https://cs.wikipedia.org/wiki/James_Watt#/media/Soubor:SteamEngine_Boulton&Watt_1784.png) [Hla 71] | **28** [https://cs.wikipedia.org/wiki/Lokomotiva_498.1#/media/Soubor:Baureihe498.1.png;](https://cs.wikipedia.org/wiki/Lokomotiva_498.1#/media/Soubor:Baureihe498.1.png) [https://veteran.auto.cz/clanek/611/skoda-sentinel-1924-1935-parni-dric;](https://veteran.auto.cz/clanek/611/skoda-sentinel-1924-1935-parni-dric) <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/jaderne-elektrarny-pro-deti/co-vsechno-v-jaderne-elektrarne-najdeme/parni-turbina/jak-je-to-velke> | **29** [2]; [https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8016276/portrait-photogravure-nikolaus-august-otto-pho-print-portrait;](https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co8016276/portrait-photogravure-nikolaus-august-otto-pho-print-portrait) https://www.wikiwand.com/cs/%C4%8Cty%C5%99dob%C3%BD_spalovac%C3%AD_motor | **30** [https://cs.wikipedia.org/wiki/NW_Pr%C3%A4sident#/media/Soubor:Prasident1.jpg;](https://cs.wikipedia.org/wiki/NW_Pr%C3%A4sident#/media/Soubor:Prasident1.jpg) [https://cs.wikipedia.org/wiki/Laurin_%26_Klement_Typ_1#/media/Soubor:Skoda-museum-mlada-boleslav-rr-120.jpg;](https://cs.wikipedia.org/wiki/Laurin_%26_Klement_Typ_1#/media/Soubor:Skoda-museum-mlada-boleslav-rr-120.jpg) <https://cs.wikipedia.org/wiki/Trabant> | **31** [https://drivezone.cz/wankeluv-motor/;](https://drivezone.cz/wankeluv-motor/) Mazda; [https://www.stoplusjednicka.cz/vynalezy-ktete-lide-nechteli-rudolf-diesel-jeho-sebevrazedny-motor;](https://www.stoplusjednicka.cz/vynalezy-ktete-lide-nechteli-rudolf-diesel-jeho-sebevrazedny-motor) <http://www.vlacky.biz/railex/eshop/-1/-4-/5/1775-TAT-RA-148-S1-oranzova-plechova-cedule-20-x-30-cm> | **32** [https://cs.wikipedia.org/wiki/Motorov%C3%BD_v%C5%AFz_810;](https://cs.wikipedia.org/wiki/Motorov%C3%BD_v%C5%AFz_810) David Švestka, [http://www.atlaslokomotiv.net/loko-751.html;](http://www.atlaslokomotiv.net/loko-751.html) <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobnizdroje/paroplynove-a-plynove-zdroje/informace-o-paroplynove-energetice> | **33** [Hla71]; [https://en.wikipedia.org/wiki/Ramjet#/media/File:Aqm-60a.jpg;](https://en.wikipedia.org/wiki/Ramjet#/media/File:Aqm-60a.jpg) https://en.wikipedia.org/wiki/V-1_flying_bomb | **34** [https://www.lmkletnany.cz/zkouska-pulzacniho-motoru-jana-dryaka;](https://www.lmkletnany.cz/zkouska-pulzacniho-motoru-jana-dryaka) [https://id.wikipedia.org/wiki/Tumansky_R-15;](https://id.wikipedia.org/wiki/Tumansky_R-15) [https://en.wikipedia.org/wiki/Turbofan#/media/File:CFM56_P1220759.jpg;](https://en.wikipedia.org/wiki/Turbofan#/media/File:CFM56_P1220759.jpg) https://cs.wikipedia.org/wiki/Let_US_Airways_1549 | **35** [https://www.wikiwand.com/sk/Konstantin_Eduardovi%C4%8D_Ciolkovskij;](https://www.wikiwand.com/sk/Konstantin_Eduardovi%C4%8D_Ciolkovskij) https://cs.wikipedia.org/wiki/Wernher_von_Braun | **40** <https://www.zmescience.com/science/biggest-most-poweful-engine-world/>



Definice kruhového děje
Ideální tepelný stroj
Carnotův cyklus
Věty Carnotovy
Druhý termodynamický zákon
Obrácený Carnotův cyklus
Chladicí stroje & tepelná čerpadla
Termodynamická teplota
Vratný a nevratný děj
Entropie: fenomenologický přístup
Pravděpodobnost nepravděpodobného
Entropie: statistický přístup
Degradace energie
Třetí termodynamický zákon
Fysika nízkých teplot
Parní stroj
Parní turbína
Pístové spalovací motory
Lopátkové spalovací motory
Reaktivní motory
Proudové motory
Raketové motory

Studijní text Gymnasia F. X. Šaldy shrnuje základní poznatky termodynamiky a statistické fyziky. Vedle standardních středoškolských témat (kruhový děj, termodynamické zákony) se pokouší o srozumitelné zavedení termodynamické teplotní stupnice, definici entropie či vysvětlení procesu degradace energie. Výklad o stavbě a funkci tepelných motorů ukazuje základní principy těchto strojů. Relativně rozsáhlé exkursy v postranních pruzích stránek usazují téma výkladu do širších fyzikálních, obecně přírodovědných či historicko-společenských souvislostí.

K tématu studijního textu je připravena sbírka úloh, pracovní listy a rozcestník s odkazy na doporučené animace a videa.

www.gfxs.cz

