

Sadi Carnot a jeho přínos k rozvoji termodynamiky

ALEŠ LACINA

Přírodovědecká fakulta MU, Brno

Před dvěma sty lety — 1. června 1796 — se v Paříži narodil Nicolas Léonard Sadi Carnot. Jeho jméno znají nejen fyzikové, chemici a technici, ale setkává se s ním — v rámci elementární informace o tepelných strojích — i každý student gymnázia. Znalost Carnotova díla už ovšem tak rozšířená není, přestože jeho důsledky a aplikace ovlivňují život prakticky každého člověka.

Sadi Carnot byl velkým synem velkého otce: Lazare Nicolas Marguerite Carnot (1753-1823) proslul sice především jako skvělý vojenský odborník (je považován za strůjce vojenských úspěchů Velké francouzské revoluce i prvních vítězství Napoleonových), byl však rovněž uznávaným matematikem, dobře znal mechaniku a zabýval se i jejími technickými aplikacemi. Vzhledem ke svým čestným postojům střídal v politicky nestabilní Francii přelomu osmnáctého a devatenáctého století vysoké státní funkce s vyhnanstvím, v němž nakonec také zemřel [1].



Obrázek 1: Sadi Carnot

Na jeho přání vstoupil Sadi po ukončení lycea na École Polytechnique — školu, jejímž původním posláním byla výchova techniků pro armádu, která se však záhy stala střediskem a lůň francouzské matematiky a fyziky. Jako učitelé zde působili například Joseph Louis Lagrange, Pierre Simon de Laplace, Jean Baptiste Joseph Fourier, Claude Louis

RÉFLEXIONS
SUR LA
PUISSANCE MOTRICE
DU FEU
ET
SUR LES MACHINES

PROPRES A DÉVELOPPER CETTE PUISSANCE,

PAR S. CARNOT,

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE.

A PARIS,
CHEZ BACHELIER, LIBRAIRE,
QUAI DES AUGUSTINS, N° 55.

1824.



Obrázek 2: Titulní strana *Réflexions*.

Berthollet, André Marie Ampère a Pierre Louis Dulong. Jejími studenty kromě mladšího Carnota byli Augustin Louis Cauchy, Gaspard Gustave de Coriolis, Siméon Denis Poisson, Joseph Louis Gay-Lussac, Augustin Jean Fresnel, Jean Baptiste Biot, Benoit Paul Émile Clapeyron a další. Carnot toto skvělé učiliště absolvoval roku 1814 a potom působil několik let jako ženijní důstojník. Po řadě peripetií souvisejících s bouřlivým politickým vývojem ve Francii se ale nechal roku 1821 penzionovat a vrátil se do Paříže, aby se věnoval fyzice a dalším studiím, zejména politické ekonomie. Technický zájem jej vedl v této době k častým návštěvám továren a dílen, během nichž získal dobrou představu o jejich provozu a strojním vybavení [2],[4].

V roce 1824 Sadi Carnot vydal svoji jedinou práci — útlou knížku *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance (Úvahy o hybné síle ohně a strojích vhodných k jejímu vyvolání)* [3]. Jejím hlavním záměrem bylo upozornit co nejširší — především však technickou — veřejnost na možnosti, které skýtá parní stroj pro zvýšení životní úrovně ve Francii. Tomuto cíli je podřízena i forma a uspořádání knihy: stoosmnáct nevelkých stránek hladkého textu, jen místy doplněného poznámkami pod čarou, v nichž jsou podrobněji rozvíjena — ovšem opět převážně slovními formulacemi — matematická vyjádření fyzikálně-technických úvah.

Stat' začíná vpdstatě národohospodářským úvodem, v němž je podrobně popsán vý-

znam parního stroje a jeho blahodárný vliv na ekonomiku tehdy průmyslově nejvyspělejší země, Anglie — dávného nepřítel a trvalého rivala Francie. Carnot vzdává hold anglickým technikům, kteří dovedli parní stroj téměř k dokonalosti, současně však konstatuje, že tohoto úspěchu bylo dosaženo čistě empirickou cestou vroubenou mnoha zkouškami a omyly, bez hlubšího teoretického porozumění principům jeho činnosti. Podobně jako sami konstruktéři si klade řadu prakticky nanejvýš důležitých otázek: především, zda vůbec, do jaké míry a jak může být toto zařízení ještě zlepšeno. Svoje úvahy vedoucí k nalezení odpovědí na tyto otázky však, na rozdíl od jiných, nespojuje s žádným konkrétním strojem, ale argumentuje zcela obecně. Zdůrazňuje, že "úplné řešení problému získání hybné síly z tepla nezbytně vyžaduje studovat jej nezávisle na jakémkoli určitém mechanismu a jakékoli určité pracovní látce, formulovat postup tak, aby platil nejen pro parní, ale pro jakýkoli myslitelný tepelný stroj". V tomto ohledu — v obecnosti přístupu k problematice tepelných strojů — nemá Sadi Carnot žádného předchůdce; jeho dedukce bezesporu patří mezi nejskvělejší a nejoriginálnější výkony vědeckého myšlení devatenáctého století [5].

Těžištěm *Réflexions* je detailní rozbor činnosti tepelných strojů. Carnot jej založil na tehdy ještě převládající představě o teple jako nezníčitelném fluidu — kaloriku, jehož koncentrace v látce roste s její teplotou. Rozšířený názor, že tato zařízení konají práci díky rozpínání kalorika v zahřátých látkách však již nesdílel a nahradil jej zcela novou ideou, podle níž vznik hybné síly není podmíněn jen samou existencí tepla, ale jeho transportem z horkého tělesa na chladné. Hybnou sílu tepla při tom přirovnával k hybné síle vody: právě tak, jako pád jistého množství vody s určité výšky může konat práci otáčením vodního kola, aniž by se nějaká voda ztrácela, může — podle Sadiho Carnota — přenos jistého množství tepla (kalorika) podél určitého teplotního rozdílu konat práci při expanzi látky, aniž by se nějaké teplo ztrácelo.

Na tomto místě je stěžejí možné nepřipomenout, že podrobnou analýzu "strojů, které nepřijímají pohyb z tepla, ale jejichž motorem je síla lidí nebo zvířat, vodopád či proud vzduchu" provedl Sadiho otec Lazare [6], [7], při čemž také stanovil řadu konkrétních podmínek pro optimální činnost těchto zařízení. Carnot mladší práce svého otce samozřejmě znal a nechal se jimi, jak naznačuje už sama analogie voda — teplo, inspirovat. Vytvoření teorie tepelných strojů, které si předsevzal, však bylo úkolem nadmíru obtížným. Zatímco totiž výhradně mechanické stroje "lze studovat do nejmenších detailů s použitím mechanické teorie" (Newtonovy mechaniky), "úplnou teorii tepelných strojů budeme mít až tehdy, když budou zákony fyziky dostatečně rozšířeny, dostatečně zobecněny, abychom předem znali všechny výsledky určitého tepelného působení na libovolné těleso". Průkopníkem takového rozšíření se stal — při řešení uvedeného obecně formulovaného technického problému — sám Sadi Carnot [8].

Intuitivně přesvědčen, že perpetuum mobile, využívající tepelných či tepelně-mechanických jevů, je stejně nemyslitelné jako perpetuum mobile, založené jen na jevech mechanických, objevil důvtipným usuzováním, během nějž vůbec poprvé zavedl pojmy procesu, cyklického procesu a vratného procesu, vratný cyklický proces, při kterém se přenosem zadaného množství tepla z teplé lázně do chladné získá maximum hybné síly (Carnotův cyklus). Při tom ukázal, že tato extrémální vlastnost nalezeného cyklu nezávisí na fyzikální nebo chemické podstatě pracovní látky: "Hybná síla tepla nezávisí na činitelích použitých k její realizaci; její množství je určeno pouze teplotami těles, mezi nimiž se nakonec přenos tepla uskutečňuje." Dnes se toto tvrzení, označované jako Carnotův princip, zpravidla for-

muluje pomocí pojmu účinnosti: "Účinnost ideálního tepelného stroje (Carnotova stroje) nezávisí na pracovní látce, ale jen na teplotě ohříváče a chladiče." (Sám Carnot ovšem tento pojem neužíval a všeobecně známý vztah $\eta_C = \frac{W}{Q} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}}$, který mu některé učebnice přisuzují, publikoval až roku 1854 — poté, co zavedl na základě Carnotových výsledků termodynamickou teplotní stupnici T — William Thomson.) [9], [10]

Třebaže účinnost Carnotova stroje na pracovním médiu přímo nezávisí, z praktického hlediska, které Carnot především sledoval, je jeho volba nanejvýš důležitá. Vlastnosti pracovní látky totiž ovlivňují rozhodujícím způsobem jak konstrukci stroje, tak i teplotní rozsah, v němž může pracovat, a tím ovšem zprostředkovaně také jeho účinnost. Uvážením těchto důvodů jednoznačně preferuje média s maximální teplotní roztažností, tedy plyny. Studiu jejich vlastností věnoval Carnot více než čtvrtinu své knihy a vyvodil — jako první — řadu zajímavých výsledků, připisovaných často jiným badatelům (například spojením Boyleova–Mariotteova zákona se zákonem Gay–Lussacovým dospěl k prvnímu vyjádření stavové rovnice ideálního plynu (Clapeyron), zjistil, že rozdíl izobarické a izochorické měrné tepelné kapacity je pro všechny plyny stejný (Mayer) aj.). "Hybnou silou vyvolanou působením tepla na kapaliny a pevné látky" se již podrobněji nezabýval. Nejen proto, že je to z praktického hlediska problém podstatně méně zajímavý, ale i z toho důvodu, že "nám fyzika dosud neposkytla nezbytné údaje".

Carnot pečlivě zvažoval i přednosti a problémy, které by mohlo přinést nahrazení vodní páry jiným plynným médiem, zejména atmosférickým vzduchem. Především by tak bylo možné se vyhnout všem komplikacím souvisejícím se změnami fáze. Jeho přímé vypouštění po ukončení pracovního cyklu do okolního prostředí (výfuk), by umožnilo se obejít bez objemného chladiče, v němž byla kondenzována pára. Ještě lákavější byly vzdušné prachové směsi, případně hořlavé plyny, jejichž zahřívání by mohlo být realizováno jejich spalováním přímo v pracovním prostoru (ve válci) stroje. Tím by se stal nepotřebným i rozměrný kotel či jiný vnější ohříváč. Přestože si byl Carnot vědom mnoha úskalí této cesty, považoval ji za nadějnou a jeho úvahy v tomto směru jsou předznamenáním pozdějšího vývoje motorů s vnitřním spalováním (Lenoir 1859, zejména však Otto 1876 — zážehový motor a Diesel 1898 — vznětový motor) a jejich současného rozšíření [2]. Komentáře, jimiž kniha končí mají charakter praktických poznámek, týkajících se jak výkonu, tak spolehlivosti a bezpečnosti tepelných strojů. Zdůrazňují nejen nevyhnutelnost fyzikálně–technických kompromisů při návrzích a konstrukci těchto zařízení, ale upozorňují také na aspekty provozní a ekonomické.

Carnotovo dílo je ukázkovým příkladem toho, jak inspirativní mohou být konkrétní problémy, jsou-li reflektovány člověkem dostatečně vnímavým, všestranným, a ovšem také mimořádně nadaným. Veden touhou povznést hospodářství své země, Sadi Carnot sledoval — do té doby téměř výhradně empiricky rozvíjené — technické možnosti. A když jej bezprecedentně obecný přístup, který zvolil, záhy přivedl na hranice tehdejšího poznání, rázným způsobem je překročil: vytvořil novou fenomenologickou metodu studia tepelně–mechanických jevů, včetně formulace nezbytných nových pojmů a základních představ. Je důkazem Carnotova génia, že byl schopen se dopracovat ke správným dalekosáhlým závěrům o tepelných strojích, aniž by předpokládal možnost přeměny tepla v mechanickou práci a naopak.

Idea jejich vzájemné přeměnitelnosti (ekvivalence) se sice objevila již na počátku devatenáctého století v souvislosti s pozorováními Rumfordovými (vyvíjení tepla při vrtání

La Chaleur n'est autre chose que la puissance
 motrice ^{ou plutôt qu'équivalent de} ~~qui se change~~ ^{forme} partout où il y a destruction de P.M. ^{ou plutôt qu'équivalent de} ~~il y a~~ ^{elle se manifeste}
 En même temps production de Chaleur en quantité
 précisément proportionnelle à la q. de P.M. détruite
 réciproquement partout où il y a destruction
 de Chaleur il y a production de P.M.

on peut donc poser en thèse générale
 que la P.M. est en quantité invariable dans
 sa nature qu'elle n'est jamais à proprement
 parler ni produite, ni détruite, qu'elle qui à
 la suite elle change de forme c'est-à-d. qu'elle
 produit tantôt un quelconque mouvement, tantôt
 un autre mais qu'elle n'est jamais ni
 elle n'est jamais détruite.
 D'après quelques idées que je me suis formées
 sur la théorie de la chaleur, la production
 d'une Unité de puissance motrice nécessite la
 destruction de 2,70 unités de chaleur.

Une machine qui produirait 20 unités de
 P.M. par kilos de Charbon devant consommer
 $\frac{20 \cdot 2,70}{1000}$ de la chaleur développée par la
 combustion, $\frac{20 \cdot 2,70}{1000} = \frac{5}{1000}$ unités d'à-d. moins de $\frac{1}{100}$

Obrázek 3: Ukázka rukopisu.

dělových hlavní) a Davyho (tání dvou kousků ledu vyvolané jejich vzájemným třením), v přesvědčení se však změnila až na základě řady přesných kvantitativních experimentů a úvah provedených v jeho čtyřicátých letech (Mayer, Joule, Helmholtz) [11], [12]. Z principu ekvivalence plyne, že práce, kterou tepelný stroj v průběhu cyklu vykoná je rovna teplu, jež během něj spotřebuje. Takové tvrzení však odporuje představě, že konání práce tepelným strojem je důsledkem transportu *neměnného* množství tepla od teplejšího tělesa k chladnějšímu, kterou Carnot použil při vyvození svého principu. Tento zjevný rozpor odstranil roku 1850 Rudolf Emanuel Clausius (1822 — 1888), když ukázal, že s ekvivalencí tepla a práce není neslučitelný Carnotův princip sám, ale právě jen výchozí předpoklad o zachování celkového množství tepla [13]. Carnotovy hlavní závěry, stejně jako pojmy, které zavedl, a většina argumentů, jichž použil, však zůstaly nedotčeny. Na Clausiově spojení principu ekvivalence s Carnotovým principem byla vybudována současná metoda makroskopického studia nejen činnosti tepelných strojů, ale všech procesů probíhajících v látkách — fenomenologická termodynamika. Výsledky Carnotovy průkopnické práce tedy nejen stimulovaly vznik nové vědní disciplíny, ale staly se nedílnou součástí jejích základů. Podle hlavních axiomů termodynamiky — prvního a druhého zákona termodynamiky — které vznikly vhodným přeformulováním obou principů, se práce při cyklických dějích koná vždy tak, že je v ni přeměněna jen část tepla odebraného látkou od teplejšího rezervoáru, zatímco jeho zbytek musí být odevzdán nějakému chladnějšímu tělesu.

Oč impozantnějším dojmem působí Carnotovo dílo, o to smutnější byl jeho lidský úděl. Přestože svoji knihu vydal (vlastním nákladem) v prestižním pařížském vědeckém nakladatelství, zůstala během jeho života prakticky nečtena. O důvodech se lze jen dohadovat. Vědeckou obec zřejmě odradil Carnotův způsob vyjadřování zdůrazňující především technické aplikace, takže zcela přehlédla hluboký fyzikální obsah jeho stati. Nezáměr technické veřejnosti byl způsoben s největší pravděpodobností tím, že parní stroje se v té době používaly ve Francii zatím jen minimálně. Koncem roku 1826 se nechal zklamaný Carnot reaktivovat a působil jako technik ve venkovských posádkách. Po necelých dvou letech opustil armádu definitivně a vrátil se do Paříže ke svým výzkumům, ale žádnou další vědeckou práci již nepublikoval. V roce 1832 prodělal spálu, poté zápal mozkových blan a oslaben těmito vážnými onemocněními zemřel v Paříži 18. srpna téhož roku během epidemie cholery. Jeho veškeré písemnosti i další movitý majetek byly podle tehdejších hygienických zvyklostí spáleny.

Carnotovu nepovšimnutou knihu objevil Benoît Paul Émile Clapeyron (1799 — 1864), jenž absolvoval École Polytechnique několik let po něm. Roku 1834 převedl její — převážně slovní — formulace do matematického jazyka (mj. při tom poprvé znázornil Carnotův cyklus p-V diagramem, který doprovodil i příslušnými výpočty pro ideální plyn) [14]. Až o dalších více než deset let později se s Carnotovým dílem — právě prostřednictvím tohoto Clapeyronova výkladu — seznámili Rudolf Clausius a William Thomson, rozpoznali jeho význam a využili je při vybudování termodynamiky [11], [15]. Tento způsob předávání Carnotova vědeckého odkazu způsobil mnohá zkreslení, kdy řada jeho výsledků je připisována jiným a některé pozdější formulace jeho myšlenek, pocházející od jeho následovníků, zase naopak jemu.

I když se zdá, že na tomto místě příběh končí, pronikavost Carnotova ducha se měla projevit ještě jednou. Roku 1878 připravil jeho mladší bratr Lazare Hippolyte Carnot (1801 — 1888) nové vydání *Réflexions* [16], jež doplnil svými vzpomínkami na Sadiho a

několika fragmenty, které se přece jen zachovaly z jeho písemných poznámek [17]. Z nich vyplývá, že již někdy před rokem 1832 (tedy nejméně deset let před pracemi Mayerovými, Jouleovými a Helmholtzovými) dospěl Sadi Carnot k závěru, že jeho výchozí předpoklad o zachování tepla byl chybný, když si zaznamenal: "Tepla je prostě hybná síla nebo spíše pohyb, který změnil svoji formu... Je to pohyb částic těles. Kdekoliv se ztrácí hybná síla, vzniká současně teplo, jehož množství je přesně úměrné množství ztracené hybné síly" a naopak. "Hybná síla je co do množství v přírodě neměnná... mění se její forma... ale nikdy ji nelze zničit." Carnot se neomezil jenom na úvahy o podstatě tepla, ale dokonce navrhl i experimenty, které by měly prokázat ekvivalenci tepla a práce. Žádný z nich ovšem zřejmě neprovedl. V zápiscích se zachoval, bohužel bez jakéhokoli podpůrného argumentu, i odhad mechanického ekvivalentu tepla — 3.6 J/cal, který se příliš neliší od jeho skutečné hodnoty. Změnu svého názoru na podstatu tepla Carnot komentuje slovy: "Jestliže hypotéza nestačí dál vysvětlovat jevy, měla by se opustit. To je případ hypotézy, která považuje teplo za látku, za subtilní kapalinu."

Nemá smysl spekulovat, jakých závěrů by se mohl Carnot ještě dopracovat, kdyby žil déle. Ani poznámky z jeho pozůstalosti už po padesáti letech nic nového nepřinesly. Nepublikované výsledky do pokladnice poznání lidstva nepřispívají, na druhé straně však i ony svědčí o způsobilosti svého autora. Sadi Carnot byl badatel, který si v každém směru zaslouží uznání a úctu.

Reference

- [1] Ottův slovník naučný, 5. díl. J. Otto, Praha 1892.
- [2] Wilson S. S.: Sadi Carnot. Sci. Am. 245, August (1981) 134.
- [3] Carnot S.: Réflexions sur la puissance du feu et sur les machines propres à développer cette puissance. Bachelier, Paris 1824. (Anglický překlad lze nalézt např. v [4].)
- [4] Mendoza E. (ed.): Reflections on the Motive Power of fire by Sadi Carnot and other papers on the Second Law of Thermodynamics by É. Clapeyron and R. Clausius. Dover Publications, Inc., New York 1960.
- [5] Gel'fer Ja. M.: Istorija i metodologija termodinamiki i statičeskoj fiziki. Vysšaja škola, Moskva 1969, 1973.
- [6] Carnot L.: Essai sur les machines en général. Paris 1783.
- [7] Carnot L.: Principes fondamentaux de l'équilibre et du mouvement. Paris 1803.
- [8] Klein M. J.: Carnot's Contribution to Thermodynamics. Physics Today 27, August (1974) 23. (Český překlad: Čs. čas. fyz. A26 (1976) 395.)
- [9] Cropper W. H.: Carnot's function: Origins of the thermodynamics concept of temperature. Am. J. Phys. 55 (1987) 120.

- [10] Cardwell G. S. L.: From Watt to Clausius. The rise of thermodynamics in early industrial age. Cornell University Press, Ithaca, New York 1971.
- [11] Zajac R.: Vznik a vývin termodynamiky. Ve: II. zborník letnej školy dejín fyziky (red. Chrapan J. a kol.). FVS JSMF, VVTŠ, Liptovský Mikuláš 1985.
- [12] Spielberg N., Anderson B. D.: Seven Ideas that Shook the Universe. John Wiley & Sons, Inc., New York 1995.
- [13] Clausius R.: Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesätze, welche sich daraus für Wärmelehre selbst ableiten lassen. Ann. Phys. Chem. 79 (1850) 368, 500. (Anglický překlad je otištěn v [4]).
- [14] Clapeyron B. P. É.: Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur. Journal de l'École Polytechnique XIV (1834) 153. (Anglický překlad – viz [4].)
- [15] Kričevskij I. R.: Ponjatija i osnovy termodinamiki. GChI, Moskva 1962.
- [16] Carnot S.: Réflexions sur la puissance motrice du feu. Gauthier-Villars, Paris 1878.
- [17] Výběr z těchto fragmentů je otištěn v [4].