19. Teplota, teplo, první zákon termodynamiky

Témata přednášky:

Teplota a nultý zákon termodynamiky

Teploměry a teplotní stupnice

Tepelná roztažnost

Teplota a teplo

Měrné teplo

Skupenské teplo

Teplo, práce a první zákon termodynamiky

Mechanismy přenosu tepla

19
Teplota a teplo

Na sluníčku se obvykle více zahřívá předmět s černým povrchem než se světlým. To platí i pro obleky beduínů v Sinaiské poušti: černé obleky se zahřívají více než bílé. Proč je ale tedy beduínové nosí? Nesnižuje to automaticky jejich šanci na přežití v drsném prostředí žhavé pouště?

19.1 TERMODYNAMIKA

V této kapitole opustíme mechaniku a začneme se věnovat novému oboru — termodynamice. Mechanika se zabývá mechanickou energií systémů a řídí se Newtonovými zákony. Termodynamika se zabývá **vnitřní energií** systémů — „tepelnou energií“ — a řídí se novými zákony, se kterými se seznámíme v následujících třech kapitolách.

Centrálním pojmem termodynamiky je **teplota**. Toto slovo je nám důvěrně známé: od narození rozeznáme horké a studené, takže o přesnějším významu teploty zpravidla ani neuvažujeme. Ale náš „smysl pro teplotu“ není ve skutečnosti vždycky věrohodný. Tak například za studeného zimního dne se nám zdá železné zábradlí na dotyk mnohem studenější než dřevěné, třebaže mají obojí stejnou teplotu. Tento rozdíl v našem vnímání pochází z toho, že železo odebírá energii z našeho prstu rychleji než dřevo. V dalším zavedeme teplotu objektivně, aniž bychom se spoléhali na své subjektivní pocity.

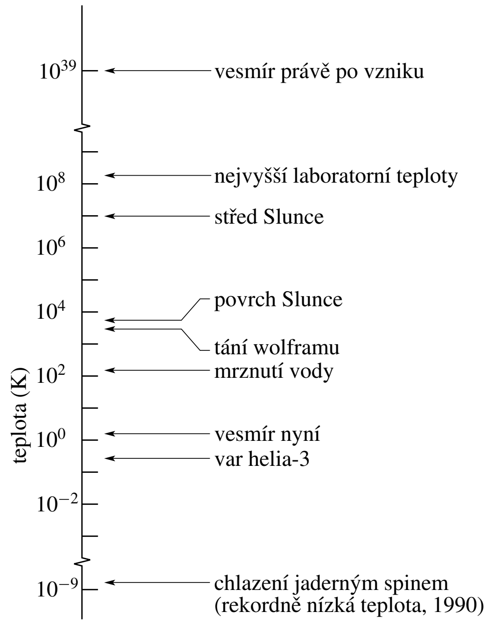
Teplota je jednou ze sedmi základních veličin SI. Fyzikové ji měří v jednotkách zvaných **kelvin**. Ačkoliv teplota těles, jak se zdá, může být libovolně* vysoká, existuje jistá dolní hranice, zvaná **absolutní nula**; ta byla vzata jako nula v Kelvinově stupnici. Pokojová teplota je kolem 290 kelvinů, tedy 290 K. Obr. 19.1 ukazuje široké rozmezí, v němž mohou být stanoveny teploty.

Když Vesmír před nějakými 10 až 20 miliardami let vznikal, byla jeho teplota kolem 10^{39} K. Vesmír se rozpínal a tím chladnul; jeho současná průměrná teplota je kolem 3 K. Nám na Zemi je o něco tepleji, protože naštěstí žijeme poblíž hvězdy. Bez našeho Slunce bychom měli také jen teplotu 3 K (a nejspíš bychom ani neexistovali).

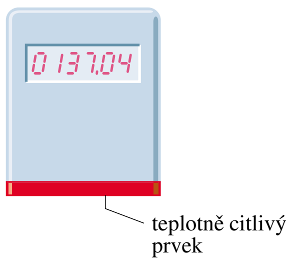
19.2 NULTÝ ZÁKON TERMODYNAMIKY

Vlastnosti různých předmětů se mění, měníme-li jejich teplotu — třeba přenesením z chladničky do teplé pece. Např.: s rostoucí teplotou se objem kapalin zvětšuje, kovová tyčka se roztahuje, elektrický odpor drátu roste, stejně tak roste tlak plynu uzavřeného v nádobě. Kteroukoli z těchto vlastností můžeme použít jako základ přístroje, který nám pomůže zavést pojem teploty.

Obr. 19.2 ukazuje takový přístroj. Každý vynalézavý inženýr by ho mohl navrhnout a postavit na základě kterékoliv z výše uvedených vlastností. Přístroj je vybaven číslicovým displejem a má následující vlastnost: začnete-li ho zahřívat (třeba Bunsenovým kahanem), zobrazované číslo se začne zvětšovat; uložíte-li ho do mrazáku, číslo začne klesat. Přístroj není nijak kalibrován a jeho číselný údaj nemá (prozatím) žádný fyzikální význam. Zařízení bychom pojmenovali **termoskop**, tedy indikátor teploty, ale zatím nikoli **termometr**, tj. měřič teploty, **teploměr***.



Obr. 19.1 Některé teploty na Kelvinově stupnici. Teplota $T = 0$ odpovídá $10^{-\infty}$ a v našem logaritmickém měřítku proto nemůže být vynesena.

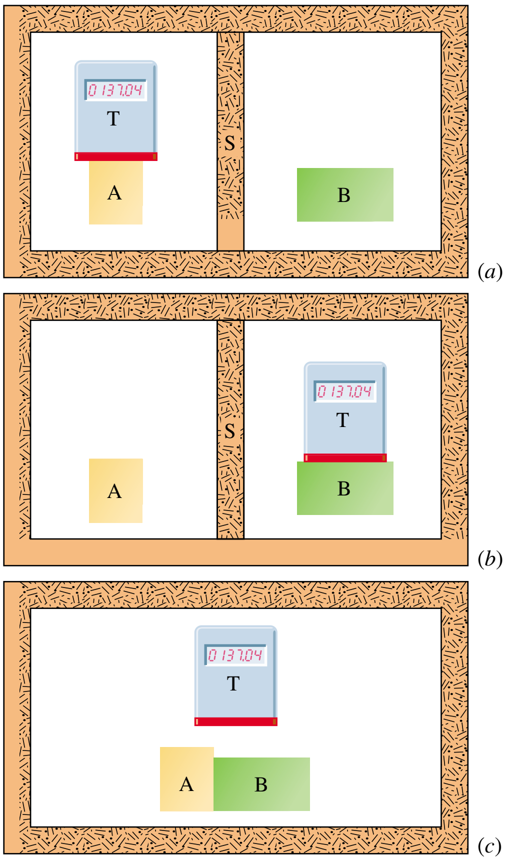


Obr. 19.2 Termoskop. Číselný údaj roste, když zařízení zahříváme, a klesá, když ho chladíme. Teplotně citlivým prvkem by mohla být např. cívečka drátu, jehož elektrický odpor měříme a zobrazujeme.

Předpokládejme, že podle obr. 19.3a dáme termoskop (budeme ho nazývat tělesem T) do těsného styku s jiným tělesem (těleso A). Celý systém je uzavřen v silnostěnné izolující krabici. Čísla na displeji se mění, až se ustálí na hodnotě „137,04“ a dále zůstávají stejná. Předpokládáme přitom, že po jisté době dosáhne každá měřitelná vlastnost těles T a A, tedy i teplota, jisté pevné, neproměnné hodnoty. Potom prohlásíme, že obě tělesa jsou navzájem

* Nepřiměřenou změnou teploty se může ovšem konkrétní těleso podstatně změnit, např. tato kniha zahřátím na 1 000 °C nebo meloun ochlazením na −50 °C.

* Místo „teploměr“ bychom měli správně říkat „teplotoměr“. Ale tuto historicky danou nedůslednost už asi nikdy nikdo nenapraví.



Obr. 19.3 (a) Těleso T (termoskop) a těleso A jsou v tepelné rovnováze. (Těleso S je teplotně izolující stěna.) (b) Tělesa T a B jsou také v tepelné rovnováze s tímtéž údajem termoskopu. (c) Je-li pravda (a) i (b), pak nultý zákon termodynamiky tvrdí, že i tělesa A a B budou navzájem v tepelné rovnováze.

v **tepelné rovnováze**, tzn. mají tutéž teplotu. A třebaže číselný údaj tělesa T nebyl nijak kalibrován, použijeme ho k jednoznačnému očíslování: obě tělesa mají tutéž **teplotu** $T = 137{,}04$.

Předpokládejme, že poté uvedeme těleso T do kontaktu s tělesem B (obr. 19.3b) a zjistíme, že obě tělesa budou v tepelné rovnováze při tomtéž údaji termoskopu. Tělesa T a B tedy budou mít také tutéž teplotu. Budou také tělesa A a B navzájem v tepelné rovnováze, uvedeme-li je do kontaktu podle obr. 19.3c? Experiment potvrzuje, že tomu tak skutečně je.

Experimentální fakta z obr. 19.3 jsou shrnuta do **nultého zákona termodynamiky**:

Je-li každé z těles A i B v tepelné rovnováze se třetím tělesem T, budou v tepelné rovnováze také tělesa A a B navzájem. K očíslování stavů tepelné rovnováhy stačí jediný spojitě proměnný parametr — teplota.

Pro úplnost bychom měli ještě dodat: „Každé těleso, které se samo nachází v tepelné rovnováze, má vlastnost zvanou **teplota**. Jsou-li dvě tělesa navzájem v tepelné rovnováze, mají stejné teploty. Také obráceně, mají-li tělesa stejnou teplotu*, budou po uvedení do kontaktu v tepelné rovnováze.“ Nyní můžeme náš termoskop (třetí těleso T) přejmenovat na teploměr a být si jisti, že jeho údaj má fyzikální smysl. Zbývá ho už jenom vhodně kalibrovat.

Nultý zákon používáme v laboratoři stále. Chceme-li zjistit, zda kapaliny ve dvou nádobách mají tutéž teplotu, změříme teploměrem teplotu každé z nich. Nemusíme je uvést do kontaktu a zkoumat, zda budou nebo nebudou navzájem v tepelné rovnováze.

Nultý zákon, který je vlastně dodatečnou logickou myšlenkou, byl formulován až ve třicátých letech tohoto století, tedy dávno po objevu a očíslování prvního a druhého zákona. Pojem teploty je však pro oba tyto zákony natolik klíčový, že bylo záhodno tento zákon, který činí pojem teploty smysluplným, očíslovat nižším číslem. Proto ho nazýváme nultým zákonem.

19.3 MĚŘENÍ TEPLOTY

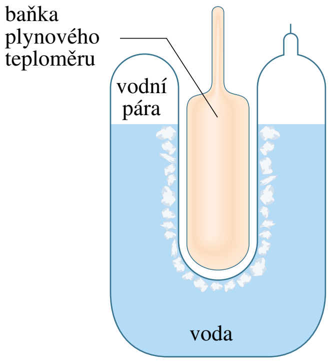
Podívejme se, jak definujeme a měříme teplotu v Kelvinově stupnici. Jinými slovy — podívejme se, jak kalibrovat náš termoskop, aby se stal teploměrem.

Trojný bod vody

Pro nastavení teplotní stupnice vybereme nějaký reprodukovatelný teplotní jev a přiřadíme — zcela libovolně — nějakou číselnou hodnotu jemu i jeho okolí, které je s ním v tepelné rovnováze. Vybereme tedy *standardní pevný bod* a přiřadíme mu jistou teplotu (**teplotu standardního bodu**). Dlouhou dobu byla užívána Celsiova stupnice stanovená tak, že teplotě tání ledu byla přiřazena hodnota 0 °C a teplotě varu vody 100 °C (obojí za obvyklého atmosférického tlaku). Při přesnějším přístupu k měření teplot je zvolena jediná teplota, daná **trojným bodem vody**.

Kapalná voda, pevný led a vodní pára (tj. plynná voda) mohou spolu být v tepelné rovnováze při jediné teplotě a tlaku. Obr. 19.4 ukazuje aparaturu, v níž může být trojný bod vody získán v laboratoři. Podle mezinárodní dohody trojnému bodu vody přiřazujeme hodnotu 273,16 K jakožto standardní teplotu pevného bodu pro kalibraci teploměrů. (Číselná hodnota 273,16 byla zvolena právě proto, aby se nově definovaný **kelvin** K co nejlépe shodoval s dosavadním Celsiovým stupněm C° ve smyslu setiny rozdílu teplot

* K úplnému popisu teploty stačí *jediné* číslo. To by nestačilo např. pro popis chuti nebo barvy.



Obr. 19.4 Buňka pro trojný bod vody, v níž jsou v tepelné rovnováze led, kapalná voda a vodní pára. Podle mezinárodní dohody je stanovena teplota této směsi jako 273,16 K. Baňka plynového teploměru je na obrázku vsunuta do dutiny buňky.

tání ledu a varu vody. Je tedy

$$T_3 = 273{,}16\,\mathrm{K} \quad \text{(teplota trojného bodu)}, \qquad (19.1)$$

kde index 3 nám připomíná, že jde o trojný bod. Tato dohoda také určuje velikost Kelvinova stupně jako 1/273,16 rozdílu mezi absolutní nulou a teplotou trojného bodu vody.

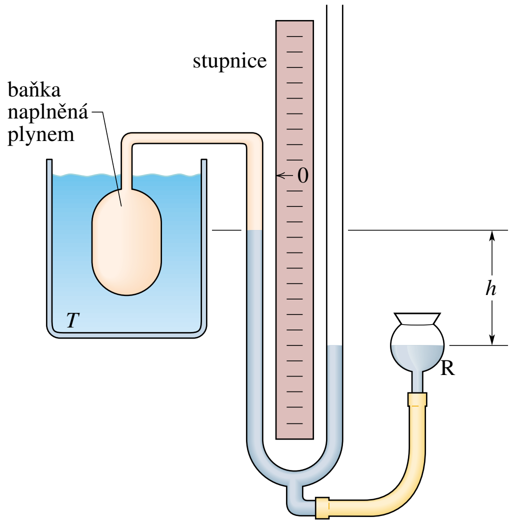
Všimněme si, že u Kelvinovy teploty neužíváme značky stupně. Je tedy 300 K (nikoli 300 °K) a čteme to „300 kelvinů“ a nikoli „300 stupňů Kelvina“. Můžeme též používat obvyklých předpon pro jednotky, takže 0,003 5 K je 3,5 mK. V nomenklatuře nečiníme rozdíl mezi Kelvinovou teplotou a teplotním rozdílem. Můžeme tedy psát „bod varu síry je 717,8 K“ a „teplota této vodní lázně stoupla o 8,5 K“.

Plynový teploměr s konstantním objemem

Až doposud jsme se podrobněji nezabývali konkrétní fyzikální vlastností závislou na teplotě, na níž bychom založili s mezinárodním souhlasem náš teploměr. Co máme zvolit — délku kovové tyčky, elektrický odpor drátu, tlak vykazovaný plynem v nádobě nebo něco jiného? Volba je podstatná, protože různé volby vedou při zvolené teplotě trojného bodu k různým teplotám jiných jevů, např. k různé teplotě varu vody. Z důvodů, které vyplynou dále, je standardní teploměr, vůči němuž by měly být všechny ostatní teploměry kalibrovány, založen na tlaku, který vykazuje plyn uzavřený v pevném objemu.

Obr. 19.5 ukazuje takový **plynový teploměr (s konstantním objemem)**. Sestává z plynem naplněné baňky vyrobené ze skla, taveného křemene nebo platiny (v závislosti na teplotním rozmezí, v němž hodláme teploměr používat). Ta je spojena hadičkou se rtuťovým manometrem. Zvedáním a snižováním zásobníku rtuti R můžeme udržovat hladinu rtuti v levé trubici ve stálé poloze, a tím zajistit, že objem uzavřeného plynu zůstává stejný. Teplotu libovolného tělesa v tepelném kontaktu s baňkou definujeme jako

$$T = Cp, \qquad (19.2)$$



Obr. 19.5 Plynový teploměr s konstantním objemem, jehož baňka je ponořena do lázně o teplotě T, která má být změřena.

kde p je tlak, kterým působí plyn, a C je konstanta. Tlak p spočítáme ze vztahu

$$p = p_0 - \varrho g h, \qquad (19.3)$$

kde p_0 je okolní atmosférický tlak, ϱ je hustota rtuti v manometru a h je změřený rozdíl výšek hladin rtuti v obou ramenech trubice.

Je-li baňka plynového teploměru vnořena do buňky pro trojný bod, tak jako na obr. 19.4, máme

$$T_3 = Cp_3, \qquad (19.4)$$

kde p_3 je tlak změřený v těchto podmínkách. Vyloučením C z rov. (19.2) a rov. (19.4) dostáváme

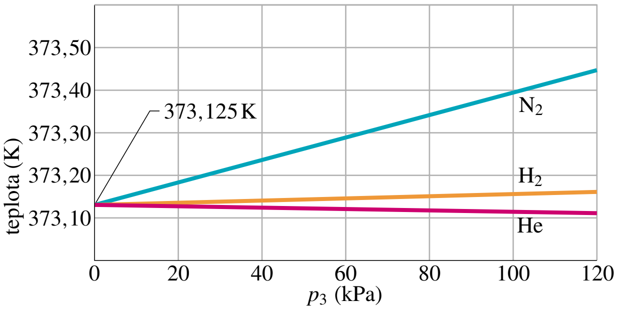
$$T = T_3\left(\frac{p}{p_3}\right) = (273{,}16\,\mathrm{K})\left(\frac{p}{p_3}\right) \quad \text{(prozatím)}. \qquad (19.5)$$

Rov. (19.5) ještě není naší konečnou definicí teploty měřené plynovým teploměrem. Neřekli jsme totiž nic o tom, jaký plyn (ani kolik plynu) se nachází v baňce teploměru. Kdybychom užili náš teploměr pro měření teploty varu vody, zjistili bychom, že různé plyny dávají poněkud různé hodnoty naměřené teploty. Jestliže bychom však používali menšího a menšího množství plynu v baňce (jeho množství měříme např. hmotností m), zjistili bychom, že by se výsledky dobře blížily jisté hodnotě, nezávisle na tom, jaký plyn jsme použili. Obr. 19.6 ukazuje tuto uspokojivou shodu.*

* Pro tlak použijeme jednotek zavedených v kap. 15.3. Jednotkou pro tlak v SI je newton na čtverečný metr, nazývaný pascal (Pa). Pascal souvisí s ostatními běžnými jednotkami tlaku vztahy 1 atm = = 101 325 Pa = 760 torr = 14,7 lb/in^2.

Můžeme tedy psát, jakožto konečný návod na měření teploty plynovým teploměrem,

$$T = (273{,}16\,\mathrm{K})\left(\lim_{m\to 0}\frac{p}{p_3}\right). \tag{19.6}$$



Obr. 19.6 Teploty vypočtené podle rov. (19.5) pro plynový teploměr s baňkou umístěnou ve vařící se vodě. V baňce byly použity různé plyny při různých hustotách (což dává různé hodnoty p_3.) Všimněte si, že pro tlak klesající k nule se všechny hodnoty blíží téže limitě: 373,125 K.

Podle toho budeme měřit neznámou teplotu následovně. Naplníme baňku teploměru libovolným množstvím *libovolného* plynu (například dusíku); jeho hmotnost budiž m. Změříme tlak p_3 (použitím buňky pro trojný bod) a tlak p odpovídající měřené teplotě. Vypočteme podíl p/p_3. Pak opakujeme obě měření s menším množstvím plynu a opět vypočteme tento podíl. V tomto postupu pokračujeme s menším a menším množstvím plynu v baňce, až budeme moci extrapolovat hodnotu p/p_3, kterou bychom dostali, kdyby už nebyl skoro žádný plyn v baňce. Vypočteme teplotu T dosazením této extrapolované hodnoty do rov. (19.6). (Teplota takto měřená se nazývá **ideální plynová teplota**.)

Má-li být teplota opravdu základní fyzikální veličinou, použitou v termodynamických zákonech, je žádoucí*, aby byla její definice nezávislá na nějakých konkrétních materiálových vlastnostech. Nebylo by vhodné např. mít veličinu tak základní, jako je teplota, závislou na roztažnosti rtuti, elektrickém odporu platiny nebo jiné takové vlastnosti. Vybereme zatím plynový teploměr jako náš standardní přístroj právě proto, že nezahrnuje žádné speciální materiálové vlastnosti při své činnosti. Použijeme-li *libovolný* plyn — dostaneme tentýž výsledek. Definitivní upřesnění provedeme v čl. 21.7.

* Je to vítané, není to však absolutně nutné. Vždyť i tak základní jednotka jako kilogram je dosud definována jako hmotnost konkrétního odlitku jisté konkrétní slitiny.

PŘÍKLAD 19.1

Baňka plynového teploměru je naplněna dusíkem o tlaku 120 kPa. Jakou prozatímní hodnotu (obr. 19.6) by udal teploměr pro bod varu vody a jaká je chyba této hodnoty?

ŘEŠENÍ: V obr. 19.6 ukazuje křivka pro dusík, že prozatímní bod varu vody by byl kolem 373,44 K. Skutečná teplota (nalezená extrapolací na obr. 19.6) je 373,125 K. Použití prozatímní teploty by vedlo k chybě 0,315 K neboli 315 mK.

19.4 CELSIOVA A FAHRENHEITOVA STUPNICE

Zatím jsme se zabývali jen Kelvinovou stupnicí, užívanou v základních vědeckých pracích. Ve většině zemí na světě se však teplota pro všeobecné, obchodní a často i pro vědecké účely měří v Celsiově stupnici. Teplotní údaj v Celsiově stupnici neboli Celsiova teplota se měří ve stupních a Celsiův stupeň je stejně velký jako kelvin. Celsiova stupnice má však počátek posunut k příhodnějším teplotám. Celsiova teplota je nyní definována vztahem

$$T_C = T - 273{,}15\,\mathrm{C}^\circ. \tag{19.7}$$

Při vyjadřování v Celsiově stupnici užíváme symbol stupně °. Navíc v této knize z praktických důvodů rozlišujeme polohu tohoto symbolu vůči písmenu. Týž symbol před písmenem C znamená *údaj*, např. 20,00 °C (stupně Celsia) neboli 293,15 K (kelviny). Tento symbol za písmenem C znamená *rozdíl údajů*, např. 3,00 C° neboli 3,00 K. Zapíšeme tedy např., že teplota přes den vzrostla o tři Celsiovy stupně 3 C° (= 3 K) na teplotu 23 °C (≐ 296 K).

Fahrenheitova stupnice používaná v USA užívá menší stupeň než Celsiova a jinou hodnotu nuly. Oba tyto rozdíly snadno zjistíte na pokojovém teploměru, který má obě stupnice. Převodní vztah mezi číselnými hodnotami těchto stupnic je

$$[T_F] = \tfrac{9}{5}[T_C] + 32, \tag{19.8}$$

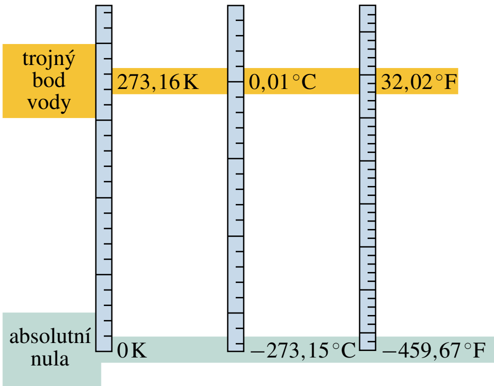
kde T_F je Fahrenheitova teplota. Převod mezi oběma stupnicemi snadno provedeme, známe-li několik odpovídajících si hodnot (jako třeba bod varu vody a bod mrazu, tj. mrznutí vody, viz tab. 19.1) a vzpomeneme-li si, že přírůstek 9 Fahrenheitových stupňů je 5 Celsiových stupňů. Obr. 19.7 porovnává Kelvinovu, Celsiovu a Fahrenheitovu stupnici.

Pro rozlišení obou stupnic užíváme písmena C a F. Tedy zápis

$$0\,^\circ\mathrm{C} = 32\,^\circ\mathrm{F}$$

znamená, že 0° na Celsiově stupnici udává tutéž teplotu jako 32° na Fahrenheitově stupnici, zatímco zápis

$$5\,\mathrm{C}^\circ = 9\,\mathrm{F}^\circ$$



Obr. 19.7 Srovnání stupnice Kelvinovy, Celsiovy a Fahrenheitovy

znamená, že teplotní rozdíl pěti Celsiových stupňů (všimněte si, že symbol stupně je *za* písmenem C, resp. F) je stejný jako teplotní rozdíl devíti Fahrenheitových stupňů.

Tabulka 19.1 **Některé význačné teploty ve °C a °F**

TEPLOTA	°C	°F
Teplota varu (vody)[a]	100	212
Tělesná teplota	37	98,6
Příjemně v pokoji	20	68
Teplota tuhnutí (vody)[a]	0	32
0 °F	≐ −18	0
Shoda stupnic	−40	−40

[a] Přesně měřeno, za tlaku 101 325 Pa je teplota varu vody v Celsiově stupnici 99,975 °C a její teplota tuhnutí 0,00 °C. Mezi těmito teplotami je tedy o něco méně než 100 C°.

PŘÍKLAD 19.2

Představte si, že listujete starými vědeckými spisy, kde se užívá teplotní stupnice Z. Voda vře při 65,0 °Z a tuhne při −14,0 °Z.

(a) Jaká změna teploty ΔT měřená touto stupnicí odpovídá změně o 53,0 F°?

ŘEŠENÍ: Abychom našli převodní faktor mezi oběma stupnicemi, použijeme teploty varu a tuhnutí vody. Na stupnici Z je rozdíl mezi nimi 65,0 °Z − (−14,0 °Z) = 79,0 Z°. Na Fahrenheitově stupnici totéž činí 212 °F − 32 °F = 180 F°. Změna o 79,0 Z° je tedy rovna změně o 180 F°. Změně o 53,0 F° tedy odpovídá

$$\Delta T = 53{,}0\,\mathrm{F}^\circ = 53{,}0\,\mathrm{F}^\circ \left(\frac{79{,}0\,\mathrm{Z}^\circ}{180\,\mathrm{F}^\circ}\right) = = 23{,}3\,\mathrm{Z}^\circ. \qquad \text{(Odpověď)}$$

(b) Jaké teplotě Fahrenheita a Celsia odpovídá teplota $T = -98{,}0\,^\circ\mathrm{Z}$?

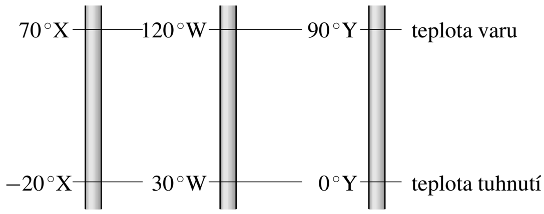
ŘEŠENÍ: Teplota tuhnutí vody je −14,0 °Z, takže rozdíl mezi ní a hledanou teplotou je 84,0 Z°. Tento rozdíl převedeme do obou stupnic:

$$\Delta T = 84{,}0\,\mathrm{Z}^\circ \left(\frac{180\,\mathrm{F}^\circ}{79{,}0\,\mathrm{Z}^\circ}\right) = 191\,\mathrm{F}^\circ = = 84{,}0\,\mathrm{Z}^\circ \left(\frac{100\,\mathrm{C}^\circ}{79{,}0\,\mathrm{Z}^\circ}\right) = 106{,}3\,\mathrm{C}^\circ.$$

Teplota T je tedy 191 F° = 106,3 C° pod teplotou tuhnutí a platí

$$T = 32{,}0\,^\circ\mathrm{F} - 191\,\mathrm{F}^\circ = -159\,^\circ\mathrm{F} = = 0\,^\circ\mathrm{C} - 106{,}3\,\mathrm{C}^\circ = -106{,}3\,^\circ\mathrm{C}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

KONTROLA 1: Na obrázku jsou tři teploměrné stupnice s vyznačenými teplotami varu a tuhnutí. (a) Uspořádejte je sestupně podle velikosti stupně. (b) Uspořádejte sestupně teploty 50 °X, 50 °Y, 50 °Z.



RADY A NÁMĚTY

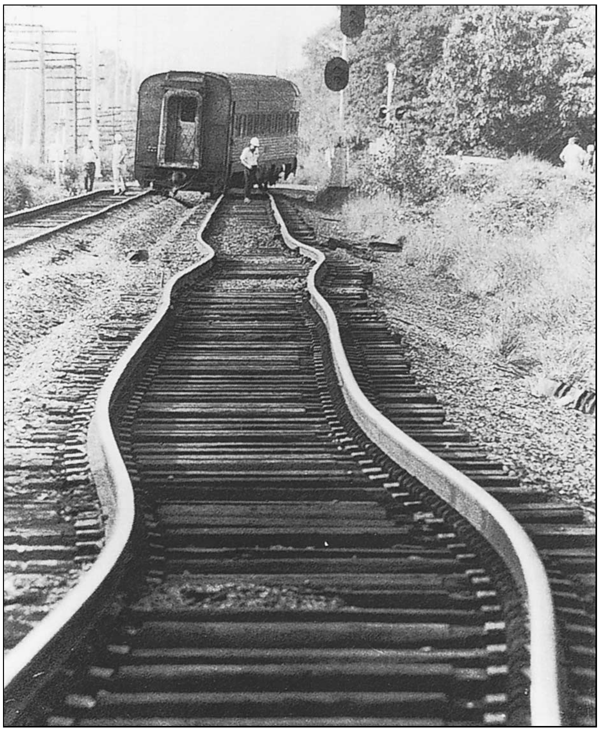
Bod 19.1: *Teplotní rozdíly*

Mezi teplotami varu a tuhnutí vody je (přibližně) 100 kelvinů neboli 100 Celsiových stupňů. Vidíme, že jakýkoliv teplotní rozdíl je v Celsiových stupních a v kelvinech vyjádřen stejným číslem (viz též rov. (19.7)). Například změna teploty o 10 K je totéž jako změna o 10 C°. Mezi varem a tuhnutím vody je 180 Fahrenheitových stupňů. Je tedy 180 F° = 100 C° a Fahrenheitův stupeň musí být 100 K/180 F°, tedy $\frac{5}{9}$ velikosti kelvina či Celsiova stupně. Odtud nebo z rov. (19.8) vidíme, že každý rozdíl teplot vyjádřený Fahrenheitovými stupni musí být $\frac{9}{5}$ z téhož rozdílu vyjádřeného v kelvinech nebo v Celsiových stupních. Např. změna teploty o 10 K je (9 F°/5 K)(10 K) neboli 18 F°.

Pozor, abychom nezaměnili *teplotu* (např. údaj v °C) a teplotní *změnu* (= teplotní *rozdíl*, údaj v C°). Teplota 10 K určitě není totéž co teplota 10 °C nebo 18 °F, ale — jak jsme viděli výše — teplotní *změna* o 10 K je totéž co změna o 10 C° nebo 18 F°.

19.5 TEPLOTNÍ ROZTAŽNOST

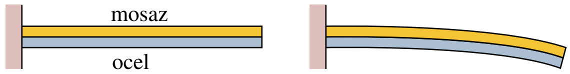
Často můžeme uvolnit kovové víčko na zavařovačce, když na víčko pustíme proud horké vody. Jak kovové víčko, tak skleněná zavařovačka se roztahují tím, že horká voda dodává energii jejich atomům. (S trochou energie navíc mohou atomy částečně překonat meziatomové síly, které je jako pružiny drží pohromadě, a tím se dostat ze své obvyklé polohy o něco dál od sebe.) Protože se však atomy kovu navzájem vzdálí více než atomy tvořící sklo, víčko se roztáhne více než sklenice a tím se uvolní.



Obr. 19.8 Železniční koleje v Asbury Park, New Jersey, zkroucené vlivem teplotní roztažnosti za velmi horkého červencového dne.

Tato **teplotní roztažnost** není vždy žádoucí, jak je zřejmé z obr. 19.8. Aby se zabránilo vybočení kolejí, umísťují se na mostech expanzní mezery pro kompenzaci roztažnosti za horkých dnů. V leteckém průmyslu se nýty a jiné podobné součásti často zchladí před zasunutím suchým ledem, aby se po rozmrznutí roztáhly a pevně držely.

Teploměry a termostaty bývají založeny na rozdílech v teplotní roztažnosti mezi dvěma kovy, tvořícími **bimetalový proužek** (obr. 19.9). Také běžný skleněný teploměr je založen na tom, že kapaliny (např. rtuť nebo alkohol) se roztahují podstatně více než sklo, z něhož je vyrobena baňka a kapilára teploměru.



Obr. 19.9 Bimetalový proužek (bimetal) je tvořen proužkem mosazi a oceli, svařenými k sobě. (a) Bimetal při referenční teplotě T_0. (b) Bimetal se ohýbá podle obrázku při teplotách vyšších než referenční. Při teplotách nižších se ohýbá na druhou stranu. Mnoho termostatů pracuje na tomto principu tak, že bimetal sepne, resp. rozepne elektrický kontakt (pece, žehličky), když teplota klesne, resp. vzroste.

Délková roztažnost

Jestliže teplota T kovové tyčky vzroste o ΔT, její délka d vzroste o hodnotu

$$\Delta d = d\alpha\Delta T, \tag{19.9}$$

kde α je na materiálu závislá konstanta zvaná **teplotní součinitel délkové roztažnosti**. Její jednotkou je K^{-1}, což je totéž jako $(C^\circ)^{-1}$. Jednotku čteme „na kelvin“ neboli „na Celsiův stupeň“. Přepíšeme-li rov. (19.9) jako

$$\alpha = \frac{\Delta d/d}{\Delta T}, \tag{19.10}$$

vidíme, že α je poměrný (relativní) přírůstek délky při jednotkové změně teploty. Ačkoliv se α mírně mění s teplotou, lze ho pro většinu praktických účelů pro daný materiál brát jako konstantní. Tab. 19.2 udává hodnoty α pro některé látky.

Tabulka 19.2 **Součinitelé délkové roztažnosti látek**[a]

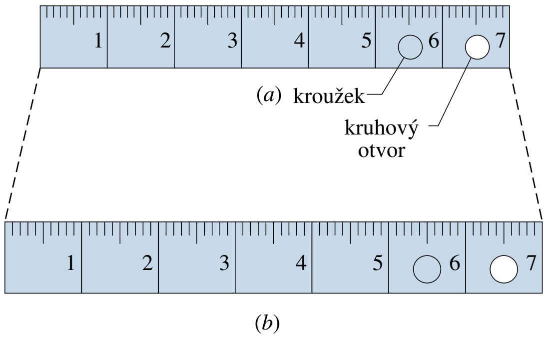
Látka	α $10^{-6}/C^\circ$	Látka	α $10^{-6}/C^\circ$
Led (při 0 °C)	51	Ocel	11
Olovo	29	Sklo (obyč.)	9
Hliník	23	Sklo (Pyrex)	3,2
Mosaz	19	Diamant	1,2
Měď	17	Invar[b]	0,7
Beton	12	Tavený křemen	0,5

[a] Kromě ledu jsou hodnoty udány pro pokojovou teplotu.
[b] Slitina invar byla navržena tak, aby měla co nejnižší součinitel roztažnosti. Slovo samo je zkratkou z lat. „invariabilis“ = angl. „invariable“ = neproměnný.

Teplotní roztažnost pevných látek je něco jako fotografické zvětšení ve všech třech rozměrech. Obr. 19.10b ukazuje (přehnaně*) roztažení ocelového pravítka při vzrůstu

* Zvětšení je zhruba tisíckrát větší, než by odpovídalo ohřátí o 100 C°.

teploty oproti stavu na obr. 19.10a. Rov. (19.9) se vztahuje na každý délkový element pravítka: na hrany, tloušťku, diagonálu, průřez vyrytého kroužku i průřez vyvrtané kruhové díry. Kdyby kroužek vyříznutý z pravítka padl těsně do otvoru při jedné teplotě, pak by stejně dobře padl i při libovolné jiné teplotě.



Obr. 19.10 Totéž ocelové pravítko při dvou teplotách. Při roztažení se mění ve stejném měřítku všechny jeho rozměry. Stupnice, čísla, tloušťka, průměr vyrytého kruhu i průměr kruhového otvoru se mění ve stejném poměru. (Pro názornost je roztažení značně přehnáno, viz pozn. pod čarou na str. 501.)

Objemová roztažnost

Vzrostou-li při zahřátí všechny rozměry tělesa, musí vzrůst i jeho objem. Pro tekutiny je objemová roztažnost jediný rozumný parametr k měření teplotní roztažnosti. Zvýší-li se teplota pevné látky nebo tekutiny objemu V o hodnotu ΔT, bude přírůstek objemu

$$\Delta V = V\beta\Delta T, \qquad (19.11)$$

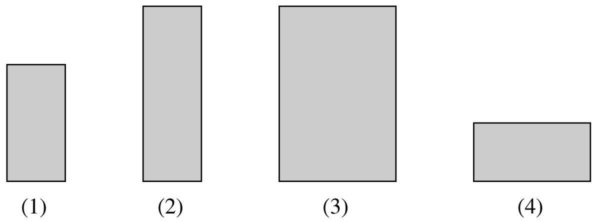
kde β je **teplotní součinitel objemové roztažnosti** materiálu. Součinitele objemové a délkové roztažnosti pevných látek jsou spojeny vztahem

$$\beta = 3\alpha. \qquad (19.12)$$

Nejběžnější kapalina — voda — se však chová jinak než ostatní kapaliny. Nad teplotou cca 4 °C se voda zahřátím roztahuje, jak bychom očekávali. Ale mezi 0 °C a 4 °C se voda s rostoucí teplotou *smršťuje*. Hustota vody prochází tedy kolem 4 °C maximem; při všech ostatních teplotách je její hustota nižší.

Toto chování vody je také důvodem, proč jezírka zamrzají shora dolů a nikoli zezdola nahoru. Když voda na hladině chladne řekněme z 10 °C k bodu mrazu, stává se hustší („těžší") než voda níže a klesá proto ke dnu. Ale pod 4 °C se dalším ochlazováním voda na povrchu stává *řidší* (*lehčí*) než spodní vrstvy a zůstává tedy na povrchu až do zamrznutí. Kdyby voda jezírka zamrzala ode dna nahoru, pak by i v běžné zimě zamrzla úplně a nemohl by v ní přetrvávat život tak, jak ho známe. Dokonce by mohl u dna zůstávat led i přes léto.

KONTROLA 2: Obrázek ukazuje čtyři pravoúhlé kovové desky o hranách d, $2d$ a $3d$. Všechny jsou z téhož materiálu a jejich teploty se mají zvýšit o tutéž hodnotu. Uspořádejte sestupně desky podle očekávaného přírůstku (a) výšky, (b) plochy.



PŘÍKLAD 19.3

Ocelový drát o teplotě 830 °C má délku $a = 130\,\mathrm{cm}$ a průměr $d = 1{,}1\,\mathrm{mm}$. Je upnut mezi dva pevné svěráky. Jaké mechanické napětí v drátu vznikne při ochlazení na 20 °C?

ŘEŠENÍ: Nejprve spočítáme, o kolik by se drát zkrátil, kdybychom ho ochladili neupnutý. Z rov. (19.9) a tab. 19.2 nalezneme, že zkrácení bude

$$\begin{aligned}\Delta a &= a\alpha\Delta T = (1{,}3\,\mathrm{m})(11\cdot10^{-6}/\,\mathrm{C}^\circ)(830\,^\circ\mathrm{C} - 20\,^\circ\mathrm{C}) = \\ &= 1{,}16\cdot10^{-2}\,\mathrm{m} = 1{,}16\,\mathrm{cm}.\end{aligned}$$

Ale drát je upnut a zkrátit se nemůže. Spočítáme proto, jaká síla by byla zapotřebí, aby drát o tuto délku protáhla. Z rov. (13.34) plyne

$$F = \frac{\Delta a E S}{a} = \frac{\Delta a E(\pi/4)d^2}{a},$$

kde E je Youngův modul pružnosti pro ocel (viz tab. 13.1) a S je velikost plochy průřezu drátu. Dosazením dostaneme

$$\begin{aligned}F &= (1{,}16\cdot10^{-2}\,\mathrm{m})(200\cdot10^{9}\,\mathrm{N/m^2})(\pi/4)\cdot \\ &\cdot\frac{(1{,}1\cdot10^{-3}\,\mathrm{m})^2}{(1{,}3\,\mathrm{m})} = 1\,700\,\mathrm{N}. \qquad \text{(Odpověď)}\end{aligned}$$

Můžete dokázat, že výsledek nezávisí na délce drátu?

Někdy se vyboulené stěny starých budov zpevňují stažením ocelovou tyčí, vedoucí skrz budovu z vnější strany jedné zdi na vnější stranu protilehlé zdi; na obou stranách procházejí deskami, za kterými jsou matky. Opraváři tyč zahřejí a utáhnou matky na obou stranách. Když tyč chladne, smršťuje se; protože je upnutá, vzniká v ní mechanické napětí, které pomáhá držet stěny proti dalšímu vyboulení.

PŘÍKLAD 19.4

Za horkého letního dne vyjíždí z Las Vegas tanker vezoucí 9 785 galonů nafty. Během cesty se ochladí a do přístavu v Paysonu vjíždí za teploty o 41 F° nižší než v Las Vegas. Tam vyloží celý náklad; kolik galonů to vlastně je? Součinitel objemové roztažnosti nafty je $9{,}5{\cdot}10^{-4}/\mathrm{C}^\circ$, součinitel délkové roztažnosti oceli, z níž jsou zhotoveny nádrže, je $11{\cdot}10^{-6}/\mathrm{C}^\circ$.

ŘEŠENÍ: Z rov. (19.11) plyne

$$\Delta V = V\beta\Delta T = \\ = (9\,785\ \mathrm{gal})(9{,}5{\cdot}10^{-4}/\mathrm{C}^\circ)(-41\ \mathrm{F}^\circ)\left(\frac{5\ \mathrm{C}^\circ}{9\ \mathrm{F}^\circ}\right) = \\ = -212\ \mathrm{gal}.$$

Dodané množství nafty je tedy

$$V_{\mathrm{dod}} = V + \Delta V = 9\,785\ \mathrm{gal} - 212\ \mathrm{gal} = \\ = 9\,573\ \mathrm{gal} \doteq 9\,600\ \mathrm{gal}.$$

Všimněte si, že teplotní roztažnost ocelové nádrže nemá vliv* na výsledek.

Otázka: Kdo zaplatí „chybějící“ množství?

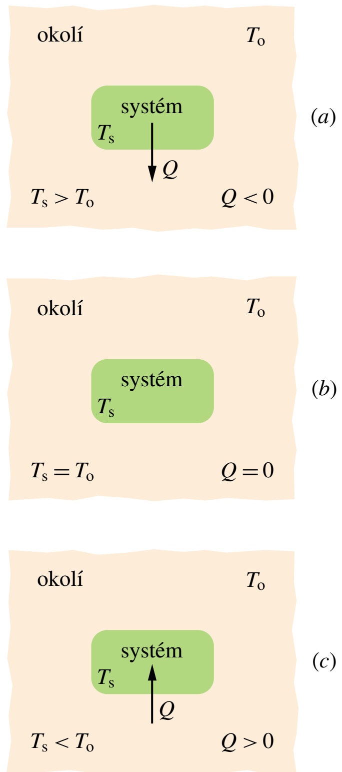
19.6 TEPLOTA A TEPLO

Vezmete-li si láhev piva z chladničky a necháte-li ji na stole, její teplota poroste — nejdřív rychle, potom volněji — až se vyrovná s teplotou místnosti (láhev i místnost budou v tepelné rovnováze). Podobně bude chladnout horký šálek kávy, zapomenutý na stole, až se jeho teplota vyrovná s teplotou místnosti.

Zobecníme tuto situaci: pivo nebo kávu označíme jako **systém** (s teplotou T_S) a příslušnou část kuchyně jako **okolí** (s teplotou T_O) tohoto systému. Zjistili jsme, že pokud T_S není rovno T_O, pak se T_S mění (i T_O se při tom může měnit) tak dlouho, dokud se teploty nevyrovnají; pak bude dosaženo tepelné rovnováhy.

Taková změna teploty je způsobena speciálním přenosem energie mezi systémem a jeho okolím. Mění se přitom **vnitřní energie**, což je souhrn potenciální a kinetické energie spojené s *náhodným* pohybem atomů, molekul a jiných mikroskopických částí zkoumaného předmětu. Přenos nastává zpravidla tím, že systém a jeho okolí mají různé teploty. Energie takto přenesená se nazývá **teplo** a značí se Q. Teplo bereme jako *kladné*, je-li dodáno do systému z okolí (někdy říkáme, že bylo teplo systémem pohlceno). Teplo je *záporné*, jestliže přešlo ze systému do jeho okolí (říkáme, že bylo teplo uvolněno, předáno, příp. vyzářeno). Nechceme-li určit směr přenosu energie, mluvíme o teplu vyměněném s okolím.

Tento přenos energie je znázorněn na obr. 19.11. V situaci na obr. 19.11a, když je $T_\mathrm{s} > T_\mathrm{o}$, přechází teplo ze systému do okolí; platí tedy $Q < 0$. Na obr. 19.11b je $T_\mathrm{s} = T_\mathrm{o}$ a teplo se nepřenáší*. Platí $Q = 0$ a teplo se ani neuvolňuje, ani nepohlcuje. Na obr. 19.11c je $T_\mathrm{s} < T_\mathrm{o}$. Teplo přechází z okolí do systému, takže $Q > 0$.



Obr. 19.11 Je-li teplota systému vyšší než teplota okolí, jako v případě (a), předává systém teplo do okolí (tj. „ztrácí teplo“) tak dlouho, až je dosaženo tepelné rovnováhy, tj. rovnosti teplot (b). Je-li teplota systému nižší než teplota okolí (jako v případě (c)), předává okolí teplo do systému (tj. systém pohlcuje teplo z okolí) tak dlouho, až je dosaženo rovnováhy.

* To je ovšem jen proto, že se nafta smrští více než tank. Kdyby se tank smrštil více (nebo realističtěji, kdybychom tankovali v mrazu a vykládali v horku), nadbytečné množství nafty by z nádrže vyteklo ven.

* Ve zcela zvláštních případech se může přenášet teplo i zde. Fázový přechod, např. tání ledu, probíhá za téže teploty obou fází, a přitom se v principu vratně přenáší teplo z okolí do tajícího ledu.

To nás vede k následující definici tepla:

Teplo je energie vyměněná mezi systémem a okolím jako důsledek teplotního rozdílu mezi nimi.

Připomeňme, že energii mezi systémem a okolím lze vyměňovat také prostřednictvím práce; to spojujeme s působením síly během přemístění v systému. Na rozdíl od teploty, tlaku a objemu *nejsou* teplo a práce vlastnostmi systému. Mají smysl jen tehdy, pokud popisují děj — výměnu energie mezi systémem a jeho okolím. Má tedy smysl např. prohlásit „Během posledních tří minut bylo přeneseno 15 J tepla z okolí do systému“ anebo „V poslední minutě jsme dodali systému 12 J práce“. Nemá však smysl prohlásit „V systému je 450 J tepla“ nebo „Systém obsahuje 385 J práce.“ Proto také odlišujeme **dějové veličiny** (jako je teplo či práce), mající smysl jen při popisu konkrétního děje probíhajícího v systému, od **stavových veličin** (jako je vnitřní energie, teplota, tlak atd.), které mají smysl při popisu konkrétního stavu systému.

Než si vědci uvědomili, že teplo je přenesená energie, měřili ho pomocí vzrůstu teploty vody. Jedna **kalorie** byla definována jako množství tepla, které zvýší teplotu 1 g vody ze 14,5 °C na 15,5 °C. V britském systému je odpovídající jednotkou **British thermal unit** (**Btu**), definovaná jako množství tepla, které zvýší teplotu 1 lb vody z 63 °F na 64 °F.

Protože teplo je (stejně jako práce) přenesená energie, rozhodlo se v roce 1948, že jednotka tepla v SI bude táž jako jednotka energie, tedy **joule**. Kalorie je nyní definována jako 4,186 0 J přesně, bez dalšího odkazu na vlastnosti vody. Mezi různými jednotkami tepla platí vztah

$$1\,\mathrm{cal} = 3{,}969\cdot 10^{-3}\,\mathrm{Btu} = 4{,}186\,\mathrm{J}. \qquad (19.13)$$

19.7 ZAHŘÍVÁNÍ PEVNÝCH LÁTEK A KAPALIN

Tepelná kapacita

Tepelná kapacita C nějakého předmětu (např. šálku na kávu nebo mramorové desky stolu) je konstanta úměrnosti mezi množstvím tepla dodaného předmětu a tím způsobenou změnou jeho teploty. Platí tedy

$$Q = C(T_\mathrm{f} - T_\mathrm{i}), \qquad (19.14)$$

kde T_i a T_f jsou počáteční a koncová teplota předmětu. Jednotkou tepelné kapacity C je energie na kelvin (neboli energie na stupeň Celsia). Tepelná kapacita C takové mramorové desky může být 1 790 cal/C°, což můžeme psát také jako 1 790 cal/K nebo 7 470 J/K.

Slovo „kapacita“ v tomto kontextu poněkud zavádí, protože podsouvá analogii s kapacitou nádrže na vodu. *Tato analogie je zavádějící.* Předmět především „neobsahuje“ žádné teplo (obsahuje energii, ale pojem teplo je spojen s dějem, s jistým *způsobem přenosu* energie). Dále, na rozdíl od nádrže není předmět omezen v přijímání tepla. Přenos tepla může probíhat bez omezení, pokud dokážeme vytvořit příslušný rozdíl teplot. (V praxi se ovšem konkrétní předmět může během dodávání tepla roztavit, vypařit nebo jinak změnit.) Prostě: tepelná kapacita neurčuje „kolik tepla se vejde do tělesa“, ale kolik tepla zvětší jeho teplotu o jednotku.

Měrná tepelná kapacita

Dva předměty z téhož materiálu, dejme tomu z mramoru, budou mít tepelné kapacity úměrné svým hmotnostem. Je proto výhodné zavést „tepelnou kapacitu na jednotku hmotnosti“ neboli **měrnou tepelnou kapacitu** c (dříve nazývanou měrné neboli specifické teplo). Nevztahuje se už ke konkrétnímu *předmětu*, ale k jeho *materiálu*. Rov. (19.14) pak získá tvar

$$Q = cm(T_\mathrm{f} - T_\mathrm{i}). \qquad (19.15)$$

Pokusem zjistíme, že zatímco tepelná kapacita výše zmíněné mramorové desky je 7 470 J/K, měrná tepelná kapacita mramoru jakožto materiálu (ať už oné desky nebo čehokoliv jiného) je 880 J/(kg·K).

Ze způsobu, jak byly původně definovány kalorie a Btu, plyne měrná tepelná kapacita vody

$$c = 1\,\mathrm{cal}/(\mathrm{g}\cdot\mathrm{C}^\circ) = 1\,\mathrm{Btu}/(\mathrm{lb}\cdot\mathrm{F}^\circ) = \\ = 4\,190\,\mathrm{J}/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}). \qquad (19.16)$$

Tab. 19.3 udává měrné tepelné kapacity některých látek za pokojové teploty. Všimněme si poměrně vysoké hodnoty pro vodu. Měrné tepelné kapacity látek závisejí poněkud na teplotě; hodnoty z tab. 19.3 můžete s rozumnou přesností používat okolo pokojové teploty.

KONTROLA 3: Jisté množství tepla Q ohřeje 1 g materiálu A o 3 C° a 1 g materiálu B o 4 C°. Který z materiálů má větší měrnou tepelnou kapacitu?

Molární tepelná kapacita

Nejvhodnější jednotkou k vyjádření množství látky je v mnoha případech *mol* (symbol mol):

$$1\,\mathrm{mol} = 6{,}02\cdot 10^{23}\ \text{elementárních jednotek}$$

Tabulka 19.3 **Měrné a molární tepelné kapacity látek za pokojové teploty**

LÁTKA	c cal·g^{-1}·K^{-1}	c J·kg^{-1}·K^{-1}	c_{mol} J·mol^{-1}·K^{-1}
Pevné prvky			
Olovo	0,030 5	128	26,5
Wolfram	0,032 1	134	24,8
Stříbro	0,056 4	236	25,5
Měď	0,092 3	386	24,5
Hliník	0,215	900	24,4
Jiné pevné látky			
Mosaz	0,092	380	
Žula	0,19	790	
Sklo	0,20	840	
Led (−10 °C)	0,530	2 220	
Kapaliny			
Rtuť	0,033	140	
Líh (ethanol)	0,58	2 430	
Mořská voda	0,93	3 900	
Voda	1,00	4 190	

zkoumané látky. Např. 1 mol hliníku je $6{,}02 \cdot 10^{23}$ atomů (za elementární jednotku kovu bereme atom), 1 mol oxidu hlinitého je $6{,}02 \cdot 10^{23}$ molekul Al_2O_3 (za elementární jednotku sloučeniny bereme její molekulu). Elementární jednotka musí být jednoznačně zadána, viz např. bod 20.1.

Je-li látkové množství vyjádřeno v molech, je tepelná kapacita vztažena na 1 mol (a ne na hmotnost 1 kg). V tom případě ji nazýváme **molární tepelná kapacita** (dříve **molární teplo**). Tab. 19.3 udává příslušné hodnoty za pokojové teploty pro některé prvky sestávající z jednotlivých atomů.

Všimněte si, že molární tepelné kapacity všech prvků uvedených v tab. 19.3 mají za pokojové teploty zhruba touž hodnotu, totiž 25 J/(mol·K). Toto zjištění nazýváme **Dulongův-Petitův zákon**. Molární tepelná kapacita *všech* pevných látek se s rostoucí teplotou blíží této hodnotě, ale některé látky jako berylium nebo uhlík jí dosahují až za podstatně vyšších teplot. Jiné látky mohou tát nebo se vypařit, dříve než potřebné teploty dosáhnou.

Porovnáváme-li dvě látky na molekulové úrovni, srovnáváme vzorky obsahující stejný počet elementárních jednotek. Skutečnost, že za dostatečně vysokých teplot mají všechny pevné látky zhruba tutéž molární tepelnou kapacitu, naznačuje, že atomy všech druhů — ať je to hliník, měď, uran nebo cokoliv jiného — přijímají teplo stejným způsobem.

Důležité upozornění

Při stanovení a používání hodnot měrné tepelné kapacity látek je nutné vědět, za jakých okolností bylo teplo vyměňováno. U pevných látek a kapalin jde zpravidla o přenos tepla za stálého *tlaku* (obvykle atmosférického). Lze si však představit i přenos tepla za udržování stálého *objemu*; tepelná roztažnost vzorku ovšem musí být kompenzována nějakým dodatečným tlakem. Toto lze pro pevné látky a kapaliny při skutečném pokusu zajistit jen obtížně; výpočtem však lze výsledné hodnoty celkem snadno odvodit z jiných veličin a ukazuje se, že pro každou pevnou látku či kapalinu se obě veličiny shodují s rozdílem nanejvýš několika procent. Jak však uvidíme, pro *plyny* má měrná tepelná kapacita za stálého tlaku zcela jinou hodnotu než za stálého objemu.

Skupenské teplo

Dodáme-li pevné látce nebo kapalině teplo, teplota látky obvykle roste, ale nemusí tomu tak být vždy. Namísto růstu teploty může látka změnit své **skupenství** (tj. pevné, kapalné nebo plynné) nebo obecněji svou **fázi** i při zachování téhož skupenství (síra krystalující v soustavě kosočtverečné na jednoklonnou při tomtéž — pevném — skupenství). Tak například led může tát a pohlcovat teplo, aniž se mění jeho teplota. Voda se vaří a pohlcuje teplo, aniž roste její teplota. Při obráceném ději (mrznutí vody či kondenzaci páry) naopak teplo ze systému odchází, aniž se mění teplota systému.

Množství tepla, které musí být vyměněno pro změnu skupenství celého množství látky, se nazývá **skupenské teplo** Q; teplo vztažené na jednotku hmotnosti, resp. na jeden mol se nazývá **měrné**, resp. **molární skupenské teplo** a značí se L, resp. L_{mol}. Jestliže tedy hmotnost m látky změní své skupenství, je příslušné přenesené množství tepla rovno

$$Q = Lm. \tag{19.17}$$

Jde-li o fázovou změnu z kapaliny na plyn (kapalině je nutno dodat teplo), mluvíme o **skupenském teplu vypařování** L_v, resp. o **skupenském teplu varu** (tj. vypařování při teplotě varu kapaliny). Pokud naopak dochází ke kapalnění plynu (plynu je nutno teplo odebrat), jedná se o **skupenské teplo kondenzace**, které je rovno skupenskému teplu vypařování. Pro vodu při 100 °C činí

$$L_v = 539\,\mathrm{cal/g} = 2\,256\,\mathrm{kJ/kg},$$
$$L_{v,mol} = 40{,}7\,\mathrm{kJ/mol}. \tag{19.18}$$

Jde-li o fázovou změnu z pevné látky na kapalinu (pevné látce je nutno dodat teplo), mluvíme o **skupenském teplu**

tání L_t. Pro vodu činí za normálních podmínek (0 °C, atmosférický tlak)

$$L_t = 79{,}5\,\text{cal/g} = 333\,\text{kJ/kg},$$
$$L_{t,\text{mol}} = 6{,}01\,\text{kJ/mol}. \qquad (19.19)$$

Skupenské teplo tuhnutí charakterizuje naopak fázovou změnu kapaliny na pevnou látku; má touž hodnotu jako skupenské teplo tání. Tab. 19.4 udává skupenská tepla některých látek. Jde-li o fázový přechod beze změny skupenství (např. různé krystalické modifikace látky), pak místo skupenského tepla mluvíme ve všech výše uvedených případech o **teplu latentním**.

PŘÍKLAD 19.5

Karamelová tyčinka má uvedenu nutriční hodnotu 350 kcal. Kolik kilowatthodin vám dodá, když ji sníte?

ŘEŠENÍ: Energie E je rovna

$$\begin{aligned} E &= (350\cdot 10^3\,\text{cal})(4{,}19\,\text{J/cal}) = \\ &= (1{,}466\cdot 10^6\,\text{J})(1\,\text{W}\cdot\text{s/J})\,\cdot \\ &\quad\cdot (1\,\text{h}/3\,600\,\text{s})(1\,\text{kW}/1\,000\,\text{W}) = \\ &= 0{,}407\,\text{kW}\cdot\text{h}. \qquad \text{(Odpověď)} \end{aligned}$$

Tato energie by stačila k tomu, aby 100 W žárovka svítila po dobu 4,1 h. Chcete-li takovou energii „vyběhat", běžte nějakých pět až šest kilometrů.

Slušná denní dávka energie je pro člověka kolem 3,5 kW·h. Je to také maximální práce, kterou je člověk schopen v jednom dni vykonat. Toto množství energie z elektrické sítě stojí u nás při sazbě N (0,91 Kč/kW·h, nepočítáme-li měsíční paušál) necelé 4 Kč.

PŘÍKLAD 19.6

(a) Kolik tepla potřebujeme dodat kusu ledu o hmotnosti $m = 720\,\text{g}$ a o teplotě −10 °C, abychom dostali vodu teploty 15 °C?

ŘEŠENÍ: K odpovědi vedou tři kroky. V prvním kroku zahřejeme led z −10 °C na teplotu tání 0 °C. Použijeme rov. (19.15) s měrnou tepelnou kapacitou ledu podle tab. 19.3. Počáteční teplota je zde $T_i = -10\,°\text{C}$, koncová $T_f = 0\,°\text{C}$. Tak najdeme

$$\begin{aligned} Q_1 &= c_{\text{led}} m (T_f - T_i) = \\ &= (2\,220\,\text{J/(kg}\cdot\text{K)})(0{,}720\,\text{kg})(0\,°\text{C} - (-10\,°\text{C})) = \\ &= 15\,984\,\text{J} \doteq 15{,}98\,\text{kJ}. \end{aligned}$$

Ve druhém kroku roztavíme všechen led o teplotě 0 °C na vodu téže teploty. Použijeme rov. (19.17) a (19.19) a dostaneme

$$Q_2 = L_t m = (333\,\text{kJ/kg})(0{,}720\,\text{kg}) \doteq 239{,}8\,\text{kJ}.$$

Ve třetím kroku zahřejeme vodu z 0 °C na 15 °C. Opět použijeme rov. (19.15), ale tentokrát s měrnou tepelnou kapacitou c_{kap} kapalné vody podle tab. 19.3. V tomto kroku je počáteční teplota $T_i = 0\,°\text{C}$ a koncová teplota $T_f = 15\,°\text{C}$. Dostaneme

$$\begin{aligned} Q_3 &= c_{\text{kap}} m (T_f - T_i) = \\ &= (4\,190\,\text{J/(kg}\cdot\text{K)})(0{,}720\,\text{kg})(15\,°\text{C} - 0\,°\text{C}) = \\ &= 45\,252\,\text{J} \doteq 45{,}25\,\text{kJ}. \end{aligned}$$

Celkové potřebné teplo Q_Σ je součtem dílčích tepel, potřebných pro jednotlivé kroky:

$$\begin{aligned} Q_\Sigma &= Q_1 + Q_2 + Q_3 = \\ &= 15{,}98\,\text{kJ} + 239{,}8\,\text{kJ} + 45{,}25\,\text{kJ} \doteq \\ &\doteq 300\,\text{kJ}. \qquad \text{(Odpověď)} \end{aligned}$$

Všimněte si, že teplo potřebné k roztání ledu je mnohem větší, než teplo potřebné ke zvýšení teploty, ať už ledu nebo vody.

(b) Jaký bude výsledný stav a teplota, dodáme-li ledu celkové teplo jen 210 kJ?

Tabulka 19.4 **Měrná skupenská tepla**

LÁTKA	TÁNÍ T/K	TÁNÍ L_t/kJ·kg^{-1}	VAR T/K	VAR L_v/kJ·kg^{-1}
Vodík	14,0	58,0	20,3	455
Kyslík	54,8	13,9	90,2	213
Rtuť	234	11,4	630	296
Voda	273	333	373	2 256
Olovo	601	23,2	2 017	858
Stříbro	1 235	105	2 323	2 336
Měď	1 356	207	2 868	4 730

ŘEŠENÍ: Z prvního kroku víme, že je potřeba 15,98 kJ pro zahřátí ledu na teplotu tání. Zbývající teplo Q_{zb} je tedy 210 kJ − 15,98 kJ neboli něco kolem 194 kJ. Z druhého kroku vidíme, že toto teplo nestačí k roztání všeho ledu. Z rov. (19.17) a (19.19) však můžeme najít hmotnost m ledu, který roztaje:

$$m = \frac{Q_{zb}}{L_t} = \frac{(194\,\mathrm{kJ})}{(333\,\mathrm{kJ/kg})} = 0{,}583\,\mathrm{kg} \doteq 580\,\mathrm{g}.$$

Hmotnost neroztálého ledu je tedy 720 g − 580 g = 140 g. Protože neroztál veškerý led, musí být teplota směsi led + + voda rovna 0 °C. Výsledný stav tedy je

580 g vody a 140 g ledu při 0 °C. (Odpověď)

PŘÍKLAD 19.7

Měděný váleček o hmotnosti $m_m = 75$ g byl v laboratorní pícce zahřát na teplotu $T = 312$ °C. Poté byl vhozen do kádinky obsahující $m_v = 220$ g vody. Tepelná kapacita kádinky je $C_k = 45$ cal/K. Počáteční teplota kádinky s vodou byla $T_i = 12$ °C. Jaká bude koncová teplota T_f válečku, vody a kádinky po dosažení tepelné rovnováhy?

ŘEŠENÍ: Náš systém budou tvořit *voda, kádinka a měděný váleček*. Systém nevymění s okolím žádné teplo, takže algebraický součet celkového přesunu tepla uvnitř systému musí být roven nule. Jde o tři přesuny:

$$\begin{aligned} \text{pro vodu:}\quad & Q_v = m_v c_v (T_f - T_i); \\ \text{pro kádinku:}\quad & Q_k = C_k (T_f - T_i); \\ \text{pro měď:}\quad & Q_m = m_m c_m (T_f - T). \end{aligned}$$

Teplotní rozdíl je ve všech výrazech zapsán jako rozdíl koncové teploty (T_f) a počáteční teploty (T_i pro vodu a kádinku, T pro váleček). Značíme to takto, i když víme, že Q_v a Q_k budou kladná (protože teplo přejde do původně chladné vody a kádinky), zatímco Q_m bude záporné (protože teplo odejde z původně horkého měděného válečku). Takto můžeme totiž napsat

$$Q_v + Q_k + Q_m = 0. \tag{19.20}$$

Po dosazení za výrazy pro přenos tepla z rov. (19.20) dostaneme

$$m_v c_v (T_f - T_i) + C_k (T_f - T_i) + \\ + m_m c_m (T_f - T) = 0. \tag{19.21}$$

V rov. (19.21) se vyskytují teploty pouze v rozdílech. Protože rozdíly teplot ve stupních Celsia a v kelvinech jsou stejné, můžeme užít v rovnicích kterékoliv z jednotek. Rov. (19.21) můžeme vyřešit pro T_f a dostaneme

$$T_f = \frac{m_m c_m T + C_k T_i + m_v c_v T_i}{m_m c_m + C_k + m_v c_v}.$$

Čitatel je při použití Celsiovy stupnice roven

$$\begin{aligned} &(75\,\mathrm{g})(0{,}092\,\mathrm{cal/(g{\cdot}K)})(312\,°\mathrm{C}) + (45\,\mathrm{cal/K})(12\,°\mathrm{C}) + \\ &\quad + (220\,\mathrm{g})(1{,}00\,\mathrm{cal/(g{\cdot}K)})(12\,°\mathrm{C}) = \\ &= 5\,332{,}8\,\mathrm{cal} \end{aligned}$$

a jmenovatel je

$$\begin{aligned} &(220\,\mathrm{g})(1{,}00\,\mathrm{cal/(g{\cdot}K)}) + 45\,\mathrm{cal/K} + \\ &\quad + (75\,\mathrm{g})(0{,}092\,\mathrm{cal/(g{\cdot}K)}) = \\ &= 271{,}9\,\mathrm{cal/C°}. \end{aligned}$$

Odtud získáme

$$T_f = \frac{(5\,332{,}8\,\mathrm{cal})}{(271{,}9\,\mathrm{cal/C°})} = 19{,}6\,°\mathrm{C} \doteq 20\,°\mathrm{C}. \quad \text{(Odpověď)}$$

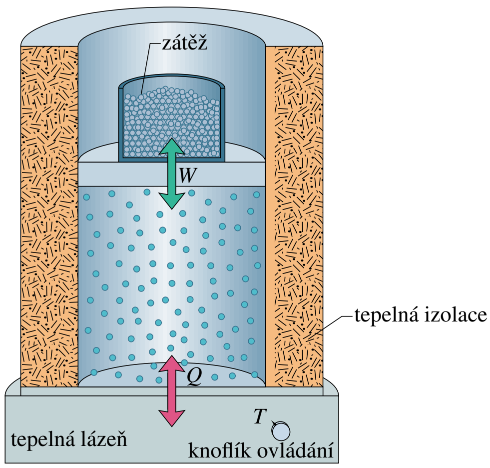
Z uvedených hodnot můžeme najít

$$Q_v \doteq 1\,670\,\mathrm{cal}, \qquad Q_k \doteq 342\,\mathrm{cal}, \qquad Q_m \doteq -2\,020\,\mathrm{cal}.$$

Algebraický součet těchto tří přenesených tepel je až na zaokrouhlovací chyby opravdu roven nule, v souladu s požadavkem rov. (19.20).

19.8 PODROBNĚJŠÍ POHLED NA TEPLO A PRÁCI

Nyní se podíváme podrobněji, jak se přenáší teplo a práce mezi systémem a jeho okolím. Uvažujme jako systém plyn ve válci s pohyblivým pístem podle obr. 19.12. Síla působící na píst zdola nahoru, způsobená tlakem plynu, je v rovno-



Obr. 19.12 Plyn je uzavřen ve válci s pohyblivým pístem. Teplo Q může být vyměněno s okolím (tj. dodáno nebo odebráno) ovládáním teploty T tepelné lázně knoflíkem ovládání. Práci W lze konat nebo dodávat zvedáním nebo snižováním pístu.

váze s tíhovou silou, způsobenou váhou pístu a zátěže — misky s olověnými broky. Stěny z válce jsou z izolačního materiálu a zabrání jakékoli výměně tepla s okolím. Dno válce spočívá na rezervoáru tepelné energie, **tepelné lázni** (třebas na horké plotně), jehož teplotu T můžeme řídit knoflíkem.

Systém, tj. plyn, vychází z *počátečního stavu* $\mathscr{S}_\mathrm{i}$, popsaného tlakem p_i, objemem V_i a teplotou T_i. Systém chceme převést do *koncového stavu* $\mathscr{S}_\mathrm{f}$, popsaného tlakem p_f, objemem V_f a teplotou T_f. Děj popisující tento přechod nazýváme **termodynamický děj**, příp. **termodynamický proces**. Během tohoto děje dochází k výměně tepla: teplo může přecházet z lázně do systému (kladné teplo), anebo naopak ze systému do lázně (záporné teplo). Systém také může konat práci: může zvedat píst (kladná práce) anebo píst klesá (záporná práce). Budeme předpokládat, že všechny změny probíhají natolik zvolna, že systém je v každém okamžiku prakticky v tepelné rovnováze (tj., že každá část systému je v tepelné rovnováze s ostatními částmi).

Uberme nyní nepatrně zátěže z pístu na obr. 19.12. Tím umožníme plynu nadzdvihnout silou $\boldsymbol{F}$ píst se zbývající zátěží o infinitezimální posunutí d$\boldsymbol{s}$ proti shora působící síle. Vzhledem k tomu, že posunutí je malé, můžeme předpokládat, že během něho zůstává síla $\boldsymbol{F}$ stejná. Její velikost je $F = pS$, kde p je tlak plynu a S plocha pístu. Diferenciál práce dW vykonané plynem během posunutí je

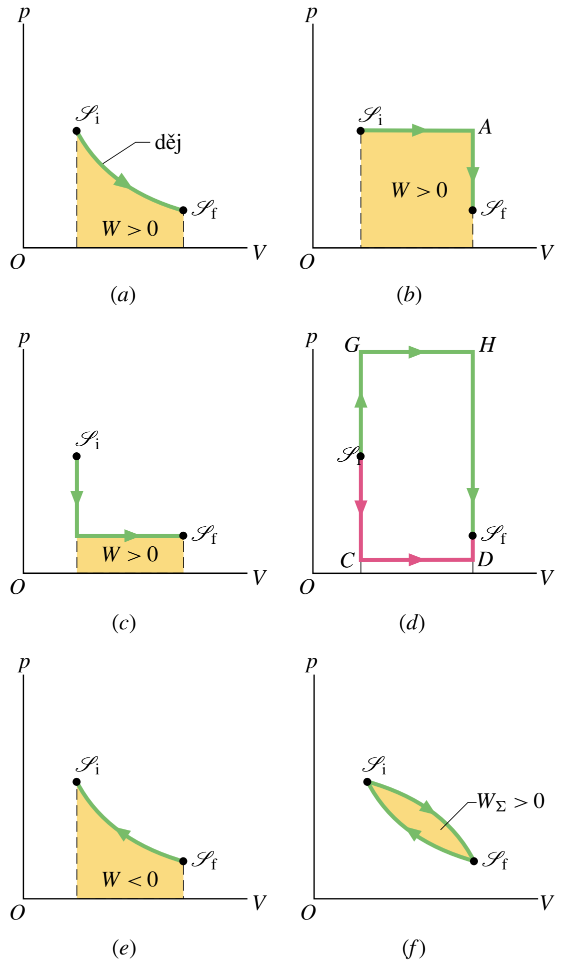
$$\begin{aligned} \mathrm{d}W &= \boldsymbol{F}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{s} = (pS)(\mathrm{d}s) = p(S\,\mathrm{d}s) = \\ &= p\,\mathrm{d}V, \end{aligned} \tag{19.22}$$

kde dV je infinitezimální změna objemu plynu daná posuvem pístu. Ubereme-li zátěže natolik, aby se plyn roztáhl z objemu V_i na V_f, bude celková práce vykonaná plynem rovna

$$W = \int_{\mathscr{S}_\mathrm{i}}^{\mathscr{S}_\mathrm{f}} \mathrm{d}W = \int_{V_\mathrm{i}}^{V_\mathrm{f}} p\,\mathrm{d}V. \tag{19.23}$$

Během změny objemu plynu se může měnit také tlak a teplota. Chceme-li tedy vypočítat integrál v rov. (19.23), musíme vědět, jak se mění tlak plynu v závislosti na jeho objemu pro konkrétní děj, vedoucí od počátečního stavu $\mathscr{S}_\mathrm{i}$ do stavu koncového $\mathscr{S}_\mathrm{f}$.

Je mnoho možných způsobů, jak přejít od počátečního do koncového stavu. Několik z nich je zobrazeno na obr. 19.13 formou tzv. p-V **diagramu,** kde je vynesena závislost tlaku p plynu na jeho objemu V. Jeden způsob je na obr. 19.13a. Křivka ukazuje, že během zvětšování objemu plynu jeho tlak klesá. Integrál z obr. 19.13a, který určuje práci W vykonanou plynem, je dán vybarvenou plochou pod křivkou mezi body $\mathscr{S}_\mathrm{i}$ a $\mathscr{S}_\mathrm{f}$. Bez ohledu na to, jak



Obr. 19.13 (a) Systém na obr. 19.12 přechází z *počátečního stavu* $\mathscr{S}_\mathrm{i}$ do *koncového stavu* $\mathscr{S}_\mathrm{f}$ prostřednictvím *termodynamického děje*. Plocha označená W představuje práci *vykonanou systémem* během tohoto děje. Je kladná, protože během děje se zvětšuje objem. (b) Jiný děj pro přechod mezi týmiž stavy; práce je nyní větší než v (a). (c) Další děj, konající menší (kladnou) práci. (d) Práce může být libovolně malá (cesta $\mathscr{S}_\mathrm{i}$–C–D–$\mathscr{S}_\mathrm{f}$) nebo velká ($\mathscr{S}_\mathrm{i}$–G–H–$\mathscr{S}_\mathrm{f}$). (e) Zmenšíme-li objem (nějakou vnější silou), bude práce *vykonaná systémem* záporná. (f) Úhrnná práce vykonaná systémem během (uzavřeného) cyklického děje je vyjádřena uzavřenou plochou. Je to rozdíl mezi plochami pod oběma křivkami tvořícími cyklus.

jsme zajistili přechod plynu právě podél uvedené křivky, můžeme si být jisti, že vykonaná práce bude kladná, protože plyn bude zvětšovat svůj objem tím, že bude tlačit píst vzhůru.

Jiný způsob, jak se dostat ze stavu $\mathscr{S}_\mathrm{i}$ do $\mathscr{S}_\mathrm{f}$, je na obr. 19.13b; tady provedeme změnu ve dvou krocích — nejprve ze stavu $\mathscr{S}_\mathrm{i}$ do A, poté ze stavu A do $\mathscr{S}_\mathrm{f}$.

Krok $\mathscr{S}_\mathrm{i}$–A provedeme za konstantního tlaku; to znamená, že ponecháme všechny broky, které zatěžují píst na obr. 19.12. Plyn donutíme ke zvětšení objemu z V_i do V_f tím, že pootočíme regulační knoflík a zvýšíme tím teplotu na nějakou vyšší hodnotu T_A. Během tohoto děje koná rozpínající se plyn kladnou práci (tím, že zvedá zatížený píst) a teplo přechází z tepelné lázně do systému (jako důsledek libovolně malého rozdílu teplot, který způsobíme zvýšením teploty lázně). Toto teplo je kladné, protože přechází do systému.

Krok A–$\mathscr{S}_\mathrm{f}$ děje z obr. 19.13b probíhá za stálého objemu; musíme tedy píst upevnit, aby se nepohnul. Poté snížíme knoflíkem teplotu natolik, aby tlak klesl z p_A na p_f. Během tohoto procesu ztrácí systém teplo, které přejde do lázně.

Práce W vykonaná při celém ději $\mathscr{S}_\mathrm{i}$–A–$\mathscr{S}_\mathrm{f}$ je kladná a je konána pouze během kroku $\mathscr{S}_\mathrm{i}$–A; je znázorněna vybarvenou plochou pod křivkou. Přenos tepla probíhá v obou krocích $\mathscr{S}_\mathrm{i}$–A, A–$\mathscr{S}_\mathrm{f}$, celkové přenesené teplo je Q.

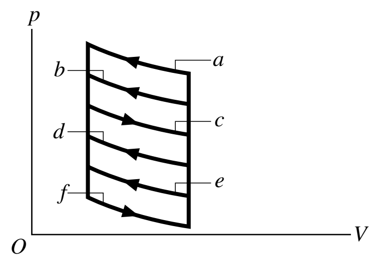
Obr. 19.13c představuje děj, při kterém probíhají oba dříve zmíněné kroky v obráceném pořadí. Práce W je nyní menší než na obr. 19.13b a rovněž je menší pohlcené teplo. Obr. 19.13d naznačuje, že práci vykonanou plynem lze učinit, jakou si přejeme — libovolně malou (podle cesty typu $\mathscr{S}_\mathrm{i}$–C–D–$\mathscr{S}_\mathrm{f}$) nebo libovolně velkou ($\mathscr{S}_\mathrm{i}$–G–H–$\mathscr{S}_\mathrm{f}$).

Závěr: z počátečního stavu do koncového můžeme přejít nekonečně mnoha ději. Můžeme, ale nemusíme vyměňovat teplo a pro různé děje budou přenesená tepla Q i vykonané práce W různé. Říkáme, že teplo i práce jsou **dějové veličiny**, tedy veličiny závislé na tom, jakou cestou probíhá konkrétní děj. (Všechny ostatní fyzikální veličiny, které jsme poznali, jako energie, poloha, rychlost, jsou stavové, tedy veličiny závislé jen na okamžitém stavu soustavy.)

Obr. 19.13e ukazuje příklad, kdy systém koná zápornou práci: vnější síla stlačuje plyn a zmenšuje jeho objem, jak ukazuje šipka. Absolutní hodnota práce je i nyní rovna vybarvené ploše pod křivkou, ale protože je plyn *stlačován*, práce jím konaná je záporná.

Obr. 19.13f ukazuje **cyklický děj**, v němž systém přechází ze stavu $\mathscr{S}_\mathrm{i}$ do stavu $\mathscr{S}_\mathrm{f}$ a poté zpátky do $\mathscr{S}_\mathrm{i}$. Úhrnná práce vykonaná systémem během cyklu je algebraickým součtem kladné práce vykonané během rozepnutí plynu a záporné práce během jeho stlačení. Na obr. 19.13f je celková práce W_Σ kladná, protože plocha pod křivkou zobrazující rozepnutí (od $\mathscr{S}_\mathrm{i}$ do $\mathscr{S}_\mathrm{f}$) je větší než plocha pod křivkou zobrazující stlačení (od $\mathscr{S}_\mathrm{f}$ do $\mathscr{S}_\mathrm{i}$).

KONTROLA 4: p-V diagram ukazuje šest křivek (spojených svislicemi), zobrazujících děje, které může konat plyn. Které dvojice z nich by mohly být částí cyklického děje, v němž by práce vykonaná plynem byla maximální kladná?



19.9 PRVNÍ ZÁKON TERMODYNAMIKY

Zjistili jsme, že při přechodu ze zadaného počátečního stavu $\mathscr{S}_\mathrm{i}$ do zadaného koncového stavu $\mathscr{S}_\mathrm{f}$ závisí jak vykonaná práce W, tak i vyměněné teplo Q na povaze procesu. Při pokusech však zjistíme překvapující věc. *Rozdíl $Q - W$ zůstává týž pro všechny děje.* Tento rozdíl závisí výhradně na počátečním a koncovém stavu a vůbec nezávisí na tom, jak se systém mezi nimi vyvíjí. Všechny ostatní kombinace Q a W včetně samotného W, samotného Q, $Q + W$, $Q - 2W$ apod. jsou *dějové veličiny* — jenom veličina $Q - W$ nikoliv.

Veličina $Q - W$ musí tedy představovat změnu nějaké vnitřní vlastnosti systému. Tuto vlastnost nazýváme **vnitřní energie** U a píšeme

$$\Delta U = U_\mathrm{f} - U_\mathrm{i} = \\ = Q - W \quad \text{(1. zákon).} \tag{19.24}$$

Rov. (19.24) vyjadřuje **první zákon termodynamiky**. Probíhá-li v systému jen infinitezimální* změna, můžeme psát první zákon ve tvaru

$$\mathrm{d}U = \mathrm{d}Q - \mathrm{d}W \quad \text{(1. zákon).} \tag{19.25}$$

Vnitřní energie U systému vzroste, dodá-li mu okolí teplo Q a klesne, vykoná-li systém práci W.

V kap. 8 jsme diskutovali princip zachování energie v izolovaném systému, tj. v systému, který nevyměňuje žádnou energii s okolím: nevydává ji, ani nepřijímá. První zákon termodynamiky rozšiřuje tento princip na systémy, které *nejsou* izolované. V takových případech může energie přecházet *do* systému nebo vycházet *z něj*

* Na rozdíl od $\mathrm{d}U$ veličiny $\mathrm{d}Q$ a $\mathrm{d}W$ nejsou úplné diferenciály. To znamená, že neexistují žádné stavové funkce typu $Q(p, V)$ a $W(p, V)$, závisející jen na okamžitém stavu (p, V) systému. Veličina $\mathrm{d}Q$, resp. $\mathrm{d}W$ se nazývá **neúplný diferenciál**. Zpravidla se značí $đQ$, $đW$ anebo δQ, δW. My je zde odlišovat nebudeme. Pro naše účely stačí, budeme-li s nimi zacházet jako s infinitezimálním přenosem energie.

jako práce W anebo teplo Q. V naší formulaci prvního zákona termodynamiky předpokládáme, že se nemění kinetická ani potenciální energie systému jako celku, že tedy $\Delta E_k = \Delta E_p = 0$.

V předchozích kapitolách termín *práce* a symbol W znamenaly vždy práci *dodanou systému* (v souladu s většinou novější literatury). Ale počínaje rov. (19.22) a v průběhu dalších dvou kapitol o termodynamice se soustředíme na práci *konanou systémem*, takovým, jako je plyn na obr. 19.12.

Práce *vykonaná systémem* má vždy opačné znaménko než práce *dodaná systému*. Přepíšeme-li tedy rov. (19.24) pro práci W_{dod} dodanou systému, dostaneme $\Delta U = Q + W_{dod}$. Tím je řečeno, že vnitřní energie systému roste, pokud systém pohlcuje teplo nebo se dodává kladná práce systému. Obráceně, vnitřní energie klesá, ztrácí-li systém teplo nebo je-li systému dodávána záporná práce (tj. koná-li systém práci).

19.10 ZVLÁŠTNÍ PŘÍPADY PRVNÍHO ZÁKONA TERMODYNAMIKY

V tomto článku se zaměříme na čtyři různé termodynamické děje, v nichž je vždy systém podroben nějakým omezením. Přitom uvidíme důsledky, plynoucí z použití prvního zákona termodynamiky na tyto děje.

1. ***Adiabatický děj.*** Adiabatický děj je takový, při němž se *nevyměňuje žádné teplo* mezi systémem a okolím. Bývá to proto, že je systém velmi dobře izolován, nebo že děj probíhá tak rychle, že výměna nestačí proběhnout. Dosazením $Q = 0$ do prvního zákona (rov. (19.24)) získáme

$$\Delta U = -W \quad \text{(adiabatický děj).} \qquad (19.26)$$

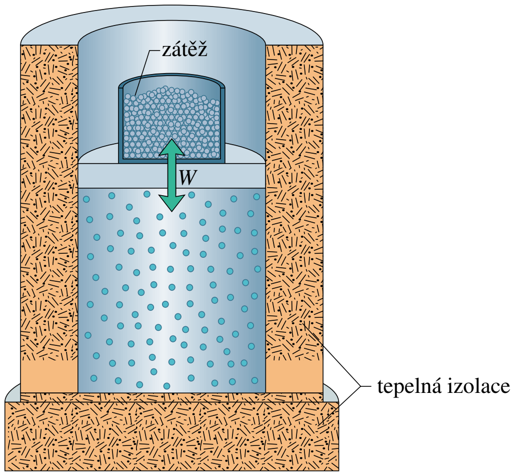
To znamená, že pokud systém *koná práci* (tj. je-li $W > 0$), pak jeho vnitřní energie poklesne o množství vykonané práce.

Obr. 19.14 ukazuje idealizovaný adiabatický děj. Teplo nemůže ani ze systému, ani do něj díky tepelné izolaci. Jediný způsob přenosu energie mezi systémem a okolím je tedy pomocí práce. Zmenšíme-li zátěž pístu a necháme-li plyn roztáhnout, je práce konaná systémem (plynem) kladná a vnitřní energie plynu klesá. Jestliže naopak přidáme zátěže a stlačíme tím plyn, je práce vykonaná systémem záporná a vnitřní energie plynu vzroste.

2. ***Izochorický děj.*** Při tomto ději se nemění objem systému (plynu), takže systém nekoná práci. Dosazením $W = 0$ do prvního zákona (rov. (19.24)) dostaneme

$$\Delta U = Q \quad \text{(izochorický děj).} \qquad (19.27)$$

Dodáváme-li do systému teplo ($Q > 0$), roste jeho vnitřní energie. Obráceně, jestliže odebíráme teplo ze systému ($Q < 0$), vnitřní energie systému klesá.



Obr. 19.14 Adiabatické rozepnutí provedeme pozvolným ubíráním zátěže z pístu. Naopak přidáváním zátěže můžeme proces kdykoli obrátit.

3. ***Cyklický děj.*** Při tomto ději se systém po případné výměně tepla a práce nakonec vrátí do výchozího stavu. V takovém případě se žádná vnitřní vlastnost systému — tedy ani jeho vnitřní energie — nemůže po proběhnutí cyklu změnit. Dosazením $\Delta U = 0$ do prvního zákona (rov. (19.24)) dostaneme

$$Q = W \quad \text{(cyklický děj).} \qquad (19.28)$$

Celková práce vykonaná během děje je tedy přesně rovna celkovému dodanému teplu; vnitřní energie systému zůstává nezměněna. Cyklický děj se na p-V diagramu zobrazí uzavřenou smyčkou (např. obr. 19.13f). Tento děj budeme podrobně probírat v kap. 21.

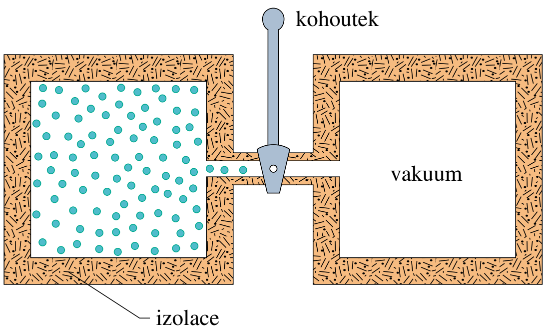
4. ***Volná expanze.**** V tomto adiabatickém ději nekoná systém žádnou práci, ani mu není žádná práce dodána. Je tedy $Q = W = 0$ a z prvního zákona plyne

$$\Delta U = 0 \quad \text{(volná expanze).} \qquad (19.29)$$

Obr. 19.15 ukazuje, jak lze takovou **expanzi** (neboli rozepnutí) provést. Plyn, který je v tepelné rovnováze, je původně uzavřen kohoutkem v jedné polovině tepelně izolované dvojité nádoby; ze druhé poloviny je vyčerpán vzduch.

* Tento děj se někdy nazývá „**expanze do vakua**“, což není nejšťastnější název. Vakuum totiž v ději není podstatné (a stejně prvním doušekem plynu přestává vlastně být vakuem). Podstatné je, že se nepředává do okolí ani práce, ani teplo.

Poté otevřeme kohoutek a plyn volně přechází, až vyplní obě poloviny nádoby. Díky izolaci nevymění systém s okolím žádné teplo. Rovněž se nevykoná žádná práce; není zde žádný píst, který by předával do okolí práci. Ideální plyn (jehož vnitřní energie závisí jen na teplotě) tedy při volné expanzi *nezmění svou teplotu*: $\Delta T_{\mathrm{id}} = 0$, neboli $T_{\mathrm{i}} = T_{\mathrm{f}}$.



Obr. 19.15 Počáteční stav před volnou expanzí. Po otevření kohoutku plyn postupně vyplní obě nádoby a přejde do rovnovážného stavu.

Volná expanze se liší od všech dosud probraných dějů tím, že nemůže být provedena vratně. Systém je v libovolném okamžiku expanze v nerovnováze, jeho tlak v různých místech je různý. Ačkoli tedy můžeme vynést do p-V diagramu počáteční a koncový stav, nemůžeme v něm vystihnout průběh děje.

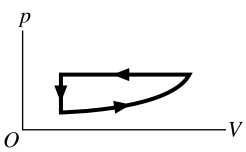
Tab. 19.5 podává přehled právě probraných dějů.

Tabulka 19.5 **První zákon termodynamiky pro čtyři speciální děje**

Zákon: $\Delta U = Q - W$ (rov. (19.24)).

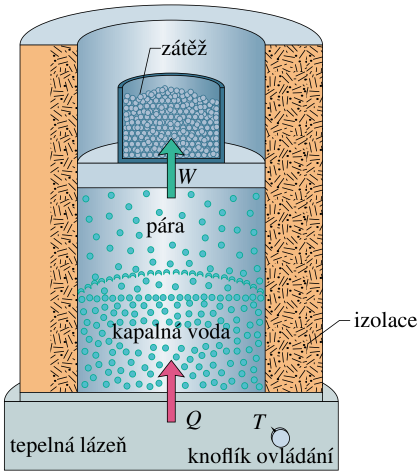
DĚJ	CHARAKTERISTIKA	DŮSLEDEK
Adiabatický děj	$Q = 0$	$\Delta U = -W$
Izochorický děj	$\Delta V = 0$	$W = 0,\ \Delta U = Q$
Cyklický děj	$\mathscr{S}_{\mathrm{i}} = \mathscr{S}_{\mathrm{f}}$	$\Delta U = 0,\ Q = W$
Volná expanze	$Q = W = 0$	$\Delta U = 0$

KONTROLA 5: Uvažujme jeden úplný cyklus děje znázorněného níže na p-V diagramu. Jsou veličiny (a) ΔU pro plyn, (b) úhrnné teplo Q dodané plynu kladné, záporné, nebo rovny nule?



PŘÍKLAD 19.8

Vyvařme za obvyklého tlaku 1,00 kg vody 100 °C teplé na páru téže teploty. Objem se přitom změní z počáteční hodnoty $1{,}00\cdot10^{-3}\,\mathrm{m}^3$ pro samotnou kapalinu na $1{,}671\,\mathrm{m}^3$ pro samotnou páru (obr. 19.16).



Obr. 19.16 Příklad 19.8. Vaříme vodu za stálého tlaku. Z tepelné lázně dodáváme teplo, dokud se kapalná voda všechna nepromění v páru. Vznikající plyn koná práci tím, že zvedá zatížený píst.

(a) Jakou práci systém přitom vykoná?

ŘEŠENÍ: Práce je dána rov. (19.23). Protože je během varu tlak konstantní ($1{,}01\cdot10^5$ Pa), můžeme vytknout p před integrál a dostaneme

$$W = \int_{V_{\mathrm{i}}}^{V_{\mathrm{f}}} p\,\mathrm{d}V = p\int_{V_{\mathrm{i}}}^{V_{\mathrm{f}}} \mathrm{d}V = p(V_{\mathrm{f}} - V_{\mathrm{i}}) =$$
$$= (1{,}01\cdot10^5\,\mathrm{Pa})(1{,}671\,\mathrm{m}^3 - 1{,}00\cdot10^{-3}\,\mathrm{m}^3) =$$
$$= 1{,}69\cdot10^5\,\mathrm{J} = 169\,\mathrm{kJ}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

Výsledek je kladný, což znamená, že systém *koná práci* na své okolí tím, že zvedá zatížený píst na obr. 19.16.

(b) Kolik tepla je nutno systému dodat během děje?

ŘEŠENÍ: Protože se zde nemění teplota, ale jen fáze, použijeme rov. (19.17) a (19.18):

$$Q = L_{\mathrm{v}}m = (2\,260\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}})(1{,}00\,\mathrm{kg}) =$$
$$= 2\,260\,\mathrm{kJ}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

Výsledek je kladný, což znamená, že teplo bylo systému *dodáno*.

(c) Jak se změní během varu vnitřní energie systému?

ŘEŠENÍ: Odpověď najdeme podle prvního zákona (rovnice (19.24)):

$$\Delta U = Q - W = 2\,260\,\mathrm{kJ} - 169\,\mathrm{kJ} \doteq$$
$$\doteq 2\,090\,\mathrm{kJ} = 2{,}09\,\mathrm{MJ}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

Tato veličina je kladná, což znamená, že během varu vnitřní energie systému roste. Tato energie připadá na vzájemné oddělení molekul H_2O, které se v kapalném stavu navzájem silně přitahují.

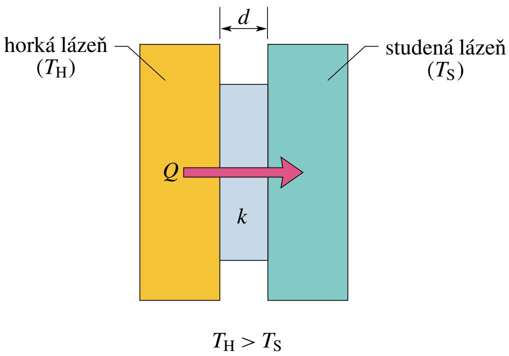
Vidíme, že při varu vody připadá kolem 7,5 % (tj. 169 kJ/2 260 kJ) dodaného tepla na práci vykonanou rozepnutím proti atmosférickému tlaku. Zbytek jde na zvýšení vnitřní energie systému.

19.11 MECHANISMY PŘENOSU TEPLA

Již jsme se zabývali přenosem tepla mezi systémem a jeho okolím, ale dosud jsme nepopsali, jak takový přenos probíhá. Jsou tři mechanismy přenosu: vedení, proudění a záření.

Vedení

Ponecháte-li pohrabáč v ohni delší dobu, bude i jeho držadlo horké. Energie se přenáší z ohně do držadla **vedením** podél celého pohrabáče. Amplitudy kmitů atomů a elektronů tvořících kov výrazně vzrostou v ohni díky vysoké teplotě okolí. Nárůst amplitud kmitání a s ním spojená energie se šíří podél pohrabáče od atomu k atomu prostřednictvím srážek sousedních atomů. Touto cestou se oblast zvýšené teploty rozšiřuje po pohrabáči až k držadlu.



Obr. 19.17 Vedení tepla. Teplo se přenáší z lázně s vyšší teplotou T_H k lázni s nižší teplotou T_S prostřednictvím desky o tloušťce d a tepelné vodivosti k.

Uvažujme desku o průřezu S a tloušťce d, jejíž stěny jsou udržovány na nepříliš rozdílných teplotách T_H a T_S tepelnými lázněmi (horkou a studenou) podle obr. 19.17. Označme Q teplo, které je přeneseno deskou za dobu t od horké stěny ke studené. Pokus nám ukáže, že **tepelný tok** H (množství tepla za jednotku času) je dán vztahem

$$H = \frac{Q}{t} = kS\frac{T_H - T_S}{d}, \qquad (19.30)$$

kde veličina k, nazývaná **součinitel tepelné vodivosti,** je konstanta charakteristická pro materiál desky. Dobrý vodič tepla má vysokou hodnotu k a naopak. Tab. 19.6 udává součinitele tepelné vodivosti některých běžných kovů, plynů a stavebních materiálů.

Tepelný odpor R

Máte-li zájem udržet si v domě teplo nebo udržet na výletě pivo dobře vychlazené, budou vás více zajímat materiály se špatnou tepelnou vodivostí než s dobrou. Proto byla do inženýrské praxe zavedena koncepce **tepelného odporu** R. Tepelný odpor desky o tloušťce d je definován jako

$$R = \frac{d}{k}. \qquad (19.31)$$

Čím nižší je tedy tepelná vodivost materiálu desky, tím větší je její tepelný odpor (angl. „R-value“). Všimněte si, že R je veličina typická pro desku určité tloušťky, nikoli pro materiál. Obvykle užívanou jednotkou pro R (která se ani ve Spojených státech raději neuvádí) je čtverečná stopa krát stupeň Fahrenheita krát hodina na Britskou tepelnou jednotku ($ft^2 \cdot F^\circ \cdot h/Btu$). (Teď už také víte, proč je tak utajená.)

Tabulka 19.6 **Součinitelé tepelné vodivosti**[a]

	$\frac{k}{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$		$\frac{k}{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$
Kovy		*Stavební materiály*	
Nerez ocel	14	Molitan	0,024
Olovo	35	Čedičová vlna	0,043
Hliník	235	Skelná vata	0,048
Měď	401	Dřevo (borovice)	0,11
Stříbro	428	Okenní sklo	1,0
Plyny			
Suchý vzduch	0,026		
Helium	0,15		
Vodík	0,18		

[a] Tepelné vodivosti závisejí mírně na teplotě. Uvedené hodnoty platí pro pokojovou teplotu.

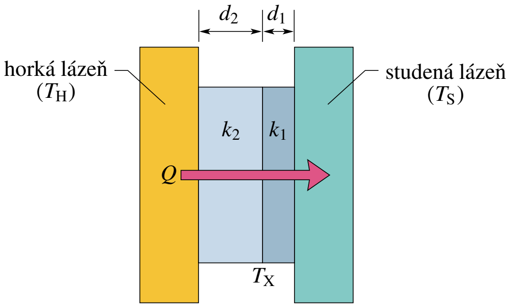
Kombinací rov. (19.30) a (19.31) dostaneme

$$H = S\frac{T_H - T_S}{R}, \qquad (19.32)$$

což nám umožní počítat tok tepla deskou, je-li znám její tepelný odpor, plocha a rozdíl teplot mezi jejími stěnami.

Vedení tepla složenou deskou

Obr. 19.18 ukazuje složenou desku, sestávající ze dvou vrstev z různých materiálů o tloušťkách d_1 a d_2 s různými součiniteli tepelné vodivosti k_1 a k_2. Teploty vnějších povrchů desky označme T_H a T_S, velikost jejich plochy S. V dalším odvodíme výraz pro rychlost přenosu tepla (neboli tok tepla) deskou za předpokladu, že přenos je **ustálený,** neboli že jde o **stacionární děj.** Při takovém ději zůstávají teplota a tok tepla v libovolném místě desky stejné a nemění se s časem.



Obr. 19.18 Teplo se přenáší stálou rychlostí deskou složenou ze dvou různých materiálů v různé tloušťce a s různou tepelnou vodivostí. Ustálenou teplotu na rozhraní obou materiálů označíme T_X.

V ustálené situaci jsou tepelné toky oběma vrstvami stejné. To je totéž, jako kdybychom řekli, že teplo přivedené jednou vrstvou za jistou dobu k rozhraní je stejné jako teplo druhou vrstvou za stejnou dobu odvedené. Pokud by to nebyla pravda, musela by se teplota desky měnit a deska by nebyla v ustáleném stavu. Označíme-li T_X teplotu rozhraní mezi oběma vrstvami, můžeme s použitím rov. (19.30) vyjádřit

$$H = \frac{k_2 S(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{X})}{d_2} = \frac{k_1 S(T_\mathrm{X} - T_\mathrm{S})}{d_1}. \qquad (19.33)$$

Vyřešením rov. (19.33) pro T_X dostaneme po snadné úpravě

$$T_\mathrm{X} = \frac{k_1 d_2 T_\mathrm{S} + k_2 d_1 T_\mathrm{H}}{k_1 d_2 + k_2 d_1}. \qquad (19.34)$$

Dosazením tohoto výrazu pro T_X do rov. (19.33) získáme

$$H = \frac{S(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{S})}{d_1/k_1 + d_2/k_2}. \qquad (19.35)$$

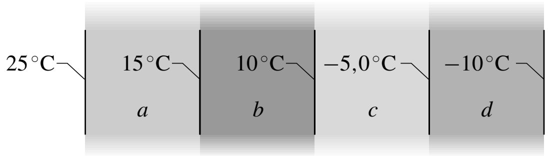
Rov. (19.31) nám připomene, že $d/k = R$.

Rov. (19.35) můžeme rozšířit na libovolný počet n vrstev různých materiálů vytvářejících desku:

$$H = \frac{S(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{S})}{\sum(d/k)} = \frac{S(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{S})}{\sum R}. \qquad (19.36)$$

Suma ve jmenovateli zlomku říká, že odpory $R = d/k$ všech vrstev se sčítají.

KONTROLA 6: Obrázek ukazuje ustálené teploty na površích a rozhraních uvnitř desky složené ze čtyř vrstev stejné tloušťky z různých materiálů. Uspořádejte materiály sestupně podle jejich tepelné vodivosti.



Proudění

Pozorujeme-li plamen svíce nebo zápalky, vidíme přenos tepla vzhůru **prouděním**. Takový přenos tepla nastává tehdy, když tekutina (jako je vzduch nebo voda) je ve styku s předmětem vyšší teploty. Teplota tekutiny ve styku s tímto předmětem roste a tekutina (ve většině případů) se roztahuje, čímž její hustota klesá. Protože se tím stává lehčí než okolní chladná tekutina, začne ohřátá tekutina vlivem vztlaku stoupat vzhůru. Část chladnější tekutiny se dostane na její místo a tam se zahřeje; proces může pokračovat.

Fotbaloví fanoušci v záři hořící hranice. Ohřátý vzduch a horké plyny z ohně stoupají vzhůru, chladný vzduch z okolí proudí dolů, k základům hranice.

Obr. 19.19 Barevný termogram prozrazuje výkon, s jakým se vyzařuje energie z domů na ulici. Výkony jsou vyznačeny barvami, od nejvyššího k nejnižšímu: bílá, červená, fialová, modrá, černá. Můžeme rovnou říci, kde jsou stěny izolované, kde jsou na oknech těžké záclony a kde je teplejší vzduch u stropu v poschodí.

Proudění je součástí mnoha přírodních dějů. Proudění v atmosféře hraje základní úlohu při vytváření globálního klimatu i denních změn počasí. Piloti kluzáků a ptáci vyhledávají stoupající vzdušné proudy, které je vynesou vzhůru. Obrovský přenos energie v oceánech probíhá rovněž mechanismem proudění. A energie z termonukleárních dějů v nitru Slunce se dostává na povrch obrovskými proudy hmot, v nichž žhavá tekutina (plazma) proudí zvnitřku na povrch a je nahrazována chladnější, klesající dolů pod povrch.

Záření

Třetí způsob přenosu tepla mezi předmětem a jeho okolím je **přenos tepla zářením,** někdy též **sáláním,** prostřednictvím elektromagnetických vln. (Viditelné světlo je rovněž jistý druh elektromagnetických vln.) V takovém případě často mluvíme o **tepelném záření,** abychom ho odlišili od elektromagnetických *signálů* (jako např. televizní vysílání) nebo od radioaktivního záření (energie a částice vyzařované atomovými jádry). Stojíme-li na poledním slunci, zahříváme se tím, že pohlcujeme tepelné záření od Slunce. Pro přenos tepla zářením není potřeba žádné hmotné prostředí.

Výkon P_r vyzařujícího předmětu (tj. rychlost, s jakou vyzařuje energii prostřednictvím elektromagnetických vln) závisí na velikosti jeho povrchu S a na teplotě T v kelvinech a je dán **Stefanovým-Boltzmannovým zákonem**

$$P_r = \sigma\varepsilon S T^4, \qquad (19.37)$$

kde $\sigma = 5{,}670\,3\cdot10^{-8}\,\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-4}}$ se nazývá **Stefanova-Boltzmannova konstanta** po Josefu Stefanovi, který v roce 1879 objevil experimentálně rov. (19.37), a Ludwigu Boltzmannovi, který ji krátce nato odvodil teoreticky. Symbol ε označuje **emisivitu** povrchu předmětu a nabývá hodnot mezi 0 a 1 podle složení a provedení povrchu. Předmět s největší emisivitou rovnou 1,0 nazýváme **černý zářič** neboli **černé těleso;** je to teoretický model. Poznamenejme opět, že teplota T v rov. (19.37) musí být zadána v kelvinech, takže při teplotě absolutní nuly k tepelnému záření nedochází. Všimněme si však také, že každý předmět s teplotou vyšší než 0 K — včetně lidí — tepelně vyzařuje (obr. 19.19).

Výkon P_a, s jakým předmět absorbuje energii formou tepelného záření z jiného zdroje (o teplotě T_o v kelvinech), je

$$P_a = \sigma\varepsilon S T_o^4. \qquad (19.38)$$

Emisivita ε je táž jako v rov. (19.37). Ideální případ, černé těleso s $\varepsilon = 1$, by pohlcovalo všechnu dopadající energii (aniž by odrazem nebo rozptylem předávalo část dopadající energie svému okolí).

Předmět teploty T vyzařuje energii do svého okolí a současně energii z okolí přijímá. Neuvažujeme-li přínos záření odraženého, je úhrnný výkon P_Σ dodaný tepelným zářením roven

$$P_\Sigma = P_a - P_r = \sigma\varepsilon S(T_o^4 - T^4). \qquad (19.39)$$

Emisivita černého oblečení je větší než bílého; proto podle rov. (19.39) bude černý oblek pohlcovat více energie ze slunečního záření ($T_o \approx 6\,000$ K) než bílý, takže bude mít i vyšší teplotu. Výzkumy ukázaly, že v horké poušti může být černý plášť beduínů až o 6 C° teplejší než stejný v bílé barvě. Proč by tedy měl nosit černý plášť ten, kdo chce zabránit přehřátí a přežít v drsné poušti?

Odpověď spočívá v tom, že černý plášť, který je sám teplejší než stejný plášť bílé barvy, opravdu zahřívá vzduch pod sebou více. Tento teplejší vzduch stoupá rychleji a odchází ven porézní látkou, zatímco vnější vzduch je zezdola vtahován pod plášť (obr. 19.20). Černá látka tedy podporuje cirkulaci vzduchu pod pláštěm a brání beduínům v přehřátí více než bílé pláště ostatních. Stálý vánek proudící pod pláštěm podél těla je beduínovi příjemnější.

Obr. 19.20 Proudění vzduchu vzhůru pod teplejším černým pláštěm je mnohem mohutnější, než pod chladnějším bílým. (Podle „Why Do Bedouins Wear Black Robes in Hot Deserts?“ (Proč nosí beduíni v horké poušti černé šaty?), A. Shkolnik, C. R. Taylor, V. Finch a A. Borut, *Nature*, Vol. 283, 24. January, 1980, pp. 373–374.)

PŘÍKLAD 19.9

Složená deska (obr. 19.18) o ploše $S = 26\,\mathrm{ft}^2$ je vyrobena z vrstvy 2,0 in pěnového čediče (vrstva 1,0 in má tepelný odpor 3,3) a z 0,75 in borovice vejmutovky (1,0 in má tepelný odpor 1,3). Teplotní rozdíl mezi stěnami desky je 65 F°. Jak rychle probíhá tepelná výměna deskou?

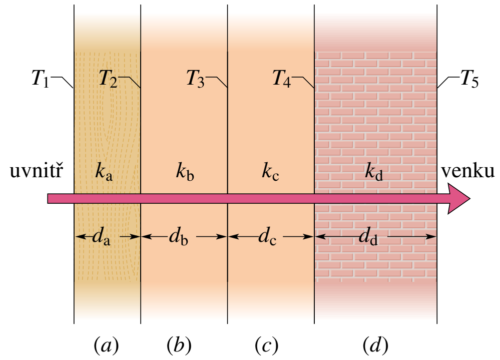
ŘEŠENÍ: Tepelný odpor dvoupalcové vrstvy čedičové pěny činí $3{,}3 \cdot 2{,}0\,\mathrm{ft}^2 \cdot {}^\circ\mathrm{F{\cdot}h/Btu}$. U tříčtvrtěpalcové dřevěné desky činí $1{,}3 \cdot 0{,}75\,\mathrm{ft}^2 \cdot {}^\circ\mathrm{F{\cdot}h/Btu}$ neboli $0{,}98\,\mathrm{ft}^2 \cdot {}^\circ\mathrm{F{\cdot}h/Btu}$. Složená deska má tedy tepelný odpor $(6{,}6 + 0{,}98)\,\mathrm{ft}^2 \cdot {}^\circ\mathrm{F{\cdot}h/Btu}$ neboli $7{,}58\,\mathrm{ft}^2 \cdot \mathrm{F}^\circ{\cdot}\mathrm{h/Btu}$. Dosazením do rov. (19.36) dostaneme

$$H = \frac{S(T_\mathrm{H} - T_\mathrm{S})}{\sum R} = \frac{(26\,\mathrm{ft}^2)(65\,\mathrm{F}^\circ)}{(7{,}58\,\mathrm{ft}^2 \cdot \mathrm{F}^\circ{\cdot}\mathrm{h/Btu})} =$$
$$= 223\,\mathrm{Btu/h} \doteq 220\,\mathrm{Btu/h} = 65\,\mathrm{W}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

Při tomto rozdílu teplot se každou deskou stále přenáší tepelný výkon 65 W.

PŘÍKLAD 19.10

Na obr. 19.21 je průřez stěnou z borovice o tloušťce d_a a cihlovou stěnou o tloušťce $d_\mathrm{d} = 2{,}0d_\mathrm{a}$. Mezi nimi jsou dvě vrstvy z neznámého materiálu téže tloušťky i tepelné vodivosti. Tepelná vodivost borového dřeva je k_a a cihel $k_\mathrm{d} = 5{,}0k_\mathrm{a}$. Velikost plochy stěny S není známa. Vedení tepla zdí se ustálilo; na rozhraních známe jen teploty $T_1 = 25\,^\circ\mathrm{C}$, $T_2 = 20\,^\circ\mathrm{C}$ a $T_5 = -10\,^\circ\mathrm{C}$.



Obr. 19.21 Příklad 19.10. Stěnou ze čtyř vrstev prochází ustálený tok tepla.

(a) Jaká je teplota rozhraní T_4?

ŘEŠENÍ: Teplotu T_4 nemůžeme najít jednoduše dosazením do rov. (19.30) vrstvu po vrstvě od borového dřeva doprava, protože neznáme parametry mezivrstev. Protože však nastal ustálený stav, musí být rychlost přenosu tepla H_a borovým dřevem rovna rychlosti H_d přenosu tepla cihlovou stěnou. Z rov. (19.30) a podle obr. 19.21 můžeme tyto veličiny zapsat ve tvaru

$$H_\mathrm{a} = k_\mathrm{a} S \frac{T_1 - T_2}{d_\mathrm{a}} \quad \text{a} \quad H_\mathrm{d} = k_\mathrm{d} S \frac{T_4 - T_5}{d_\mathrm{d}}.$$

Položíme $H_\mathrm{a} = H_\mathrm{d}$ a vyjádříme T_4:

$$T_4 = \frac{k_\mathrm{a} d_\mathrm{d}}{k_\mathrm{d} d_\mathrm{a}}(T_1 - T_2) + T_5.$$

Po dosazení $d_\mathrm{d} = 2{,}0d_\mathrm{a}$, $k_\mathrm{d} = 5{,}0k_\mathrm{a}$ a známých teplot dostaneme

$$T_4 = \frac{k_\mathrm{a}(2{,}0d_\mathrm{a})}{(5{,}0k_\mathrm{a})d_\mathrm{a}}(25\,^\circ\mathrm{C} - 20\,^\circ\mathrm{C}) + (-10\,^\circ\mathrm{C}) =$$
$$= -8{,}0\,^\circ\mathrm{C}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

(b) Jaká je teplota na rozhraní T_3?

ŘEŠENÍ: Když nyní známe T_4, můžeme najít T_3, třebaže o mezivrstvě toho víme málo. (Mezi námi, nyní už byste mohli uhádnout odpověď.) Protože je tok tepla ustálený, je rychlost přenosu tepla H_b vrstvou *b* stejná jako rychlost H_c stěnou *c*. Potom z rov. (19.30) dostaneme

$$k_\mathrm{b} S \frac{T_2 - T_3}{d_\mathrm{b}} = k_\mathrm{c} S \frac{T_3 - T_4}{d_\mathrm{c}}.$$

Protože tepelné vodivosti k_b a k_c obou vrstev jsou stejné a jejich tloušťky také, máme

$$T_2 - T_3 = T_3 - T_4,$$

odkud dostáváme

$$T_3 = \frac{T_2 + T_4}{2} = \frac{20\,^\circ\mathrm{C} + (-8{,}0\,^\circ\mathrm{C})}{2} =$$
$$= 6{,}0\,^\circ\mathrm{C}. \qquad \text{(Odpověď)}$$

Protože obě mezivrstvy mají stejnou tepelnou vodivost i tloušťku, je zřejmé, že bod uprostřed mezi nimi bude mít střední hodnotu teploty, tj. střední hodnotu teplot vnějších povrchů těchto mezivrstev.

PŘÍKLAD 19.11

Na cestě poušti by přišel vhod kousek ledu. Bohužel však teplota vzduchu klesá každou noc jen na 6,0 °C a voda nezmrzne. Protože však za jasné, bezměsíčné noci působí nebe díky albedu jako černé těleso o teplotě $T_n = -23\,°C$, mohli bychom snad vyrobit led tak, že bychom nechali tenkou vrstvičku vody vyzářit energii vůči nebi. Nejprve bychom tepelně izolovali nádrž od země špatně tepelně vodivým materiálem, třeba pěnovou gumou anebo slámou. Pak bychom po povrchu nádrže rozlili do tenké vrstvičky trošku vody o hmotnosti $m = 4{,}5\,g$, s povrchem $S = 9{,}0\,cm^2$, hloubkou $d = 5\,mm$, emisivitou $\varepsilon = 0{,}90$ a počáteční teplotou 6,0 °C. Za jak dlouho by voda vyzařováním zmrzla? Může zmrznout za jednu noc?

ŘEŠENÍ: Má-li voda zmrznout důsledkem tepelného vyzařování, musí nejprve její teplota poklesnout z 279 K = 6,0 °C na bod mrazu 273 K. Z rov. (19.15) a z tab. 19.3 zjistíme, že odebrané teplo musí být

$$\begin{aligned}Q_1 &= cm(T_f - T_i) = \\ &= (4\,190\,J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1})(4{,}5{\cdot}10^{-3}\,kg)(273\,K - 279\,K) = \\ &= -113\,J.\end{aligned}$$

Tato energie musí být vyzářena proto, aby teplota vody klesla na bod mrazu.

Další energie Q_2 musí být vyzářena pro fázový přechod, aby voda zmrzla. Z rov. (19.17) a (19.19) nalezneme (nezapomeneme doplnit záporné znaménko, protože energie odchází z vody ven)

$$\begin{aligned}Q_2 &= -mL_t = -(4{,}5{\cdot}10^{-3}\,kg)(3{,}33{\cdot}10^5\,J{\cdot}kg^{-1}) = \\ &= -1\,499\,J.\end{aligned}$$

Celkové teplo, které musí voda vyzářit, je tedy

$$Q = Q_1 + Q_2 = -113\,J - 1\,499\,J = -1\,612\,J.$$

Voda však bude nejen vyzařovat energii do nebe, ale také pohlcovat energii vyzařovanou nebem. Výsledná rychlost tepelné výměny je dána rov. (19.39). Čas t potřebný k vyzáření energie Q je roven

$$t = \frac{Q}{P_\Sigma} = \frac{Q}{\sigma \varepsilon S(T_n^4 - T^4)}. \qquad (19.40)$$

Ačkoliv během chladnutí teplota vody lehce klesá, můžeme pro odhad nahradit hodnotu T teplotou mrznutí vody, 273 K. Pro $T_n = 250\,K$ je jmenovatel výrazu (19.40) roven

$$\begin{aligned}&(5{,}67{\cdot}10^{-8}\,W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-4})(0{,}90)(9{,}0{\cdot}10^{-4}\,m^2)\,\cdot \\ &\cdot((250\,K)^4 - (273\,K)^4) = -7{,}57{\cdot}10^{-2}\,J{\cdot}s^{-1}\end{aligned}$$

a rov. (19.40) nám dává

$$t = \frac{(-1\,612\,J)}{(-7{,}57{\cdot}10^{-2}\,J{\cdot}s^{-1})} = 2{,}13{\cdot}10^4\,s = 5{,}9\,h. \quad \text{(Odpověď)}$$

Protože doba t je kratší než jedna noc, je možné tímto způsobem vodu zmrazit. V některých částech světa používali lidé tuto techniku dávno před elektrickými chladničkami.

PŘEHLED & SHRNUTÍ

Teplota, teploměry

Teplota je jednou ze základních veličin SI. Vychází z našeho pocitu tepla a zimy. Měříme ji teploměrem, obsahujícím teploměrnou látku s vhodnou vlastností (jako délka sloupce kapaliny či tlak plynu), která se pravidelně mění, když se teploměr zahřeje nebo ochladí.

Nultý zákon termodynamiky

Dostane-li se teploměr a nějaký jiný předmět do vzájemného kontaktu, dojde po určité době k tepelné rovnováze. Údaj teploměru lze brát jako teplotu tohoto předmětu. Tento postup umožňuje konzistentní a užitečná měření teploty díky *nultému zákonu termodynamiky*: je-li každé z těles A a B v tepelné rovnováze se třetím tělesem C (teploměrem), budou i A a B v tepelné rovnováze navzájem.

Plynová teplota

V systému SI měříme teplotu v kelvinech. V nich je definována teplota *trojného bodu vody* hodnotou 273,16 K. Ostatní teploty jsou z ní odvozeny. Mohou být přibližně měřeny *plynovým teploměrem s konstantním objemem*, v němž je tlak plynu podle definice úměrný jeho teplotě. Různé plyny dávají shodné výsledky jen při velmi nízkých hustotách, proto se definuje *plynová teplota* výrazem

$$T = (273{,}16\,K)\left(\lim_{m\to 0} \frac{p}{p_3}\right). \qquad (19.6)$$

Zde je T teplota v kelvinech, p_3 je tlak plynu při 273,16 K, p tlak plynu při měřené teplotě a m je hmotnost plynu v teploměru.

Celsiova a Fahrenheitova stupnice

Celsiova teplota (tj. údaj teploty v Celsiově stupnici) je definována vztahem

$$T_C = T - 273{,}15°, \qquad (19.7)$$

číselný údaj Fahrenheitovy teploty vztahem

$$[T_F] = \tfrac{9}{5}[T_C] + 32°. \qquad (19.8)$$

Teplotní roztažnost

Všechny předměty mění svou délku s teplotou. Při změně teploty o ΔT je změna Δd lineárního rozměru d dána výrazem

$$\Delta d = d\alpha\Delta T, \qquad (19.9)$$

kde α je *teplotní součinitel délkové roztažnosti*. Změna objemu ΔV pro objem V látky je rovna

$$\Delta V = V\beta\Delta T, \qquad (19.11)$$

kde $\beta = 3\alpha$ je *teplotní součinitel objemové roztažnosti* materiálu.

Teplo

Teplo Q je energie přenesená mezi systémem a jeho okolím při teplotním rozdílu mezi nimi. V SI ho měříme v joulech (J). Další jednotky jsou např. kalorie (cal) nebo Britská teplotní jednotka (Btu), kde

$$1\,\text{cal} = 3{,}969\cdot 10^{-3}\,\text{Btu} = 4{,}186\,\text{J}. \qquad (19.13)$$

Tepelná kapacita, měrná a molární tepelná kapacita

Teplo Q dodané tělesu zvýší jeho teplotu o $T_f - T_i$. Souvislost vyjadřujeme vztahem

$$Q = C(T_f - T_i), \qquad (19.14)$$

kde C je *tepelná kapacita* tělesa. Má-li těleso hmotnost m, pak

$$Q = cm(T_f - T_i), \qquad (19.15)$$

kde c je *měrná tepelná kapacita* materiálu, z něhož je těleso vyrobeno. *Molární tepelná kapacita* materiálu je jeho tepelná kapacita vztažená na jeden mol neboli $6{,}02\cdot 10^{23}$ elementárních jednotek materiálu.

Skupenské a latentní teplo

Teplo, které dodáme materiálu při teplotě jeho fázového přechodu, může změnit jeho skupenství, např. z pevného do kapalného nebo z kapalného do plynného. Může také změnit jeho fázi beze změny skupenství, např. změnit síru kosočtverečnou na jednoklonnou. Teplo na jednotku hmotnosti potřebné k takové změně se nazývá *skupenské*, příp. *latentní* teplo L. Platí

$$Q = Lm. \qquad (19.17)$$

Nejčastěji se setkáme se *skupenským teplem vypařování*, resp. *kondenzace*, což je množství energie na jednotku hmotnosti, které musíme dodat, resp. odebrat, abychom přeměnili kapalinu na plyn, resp. plyn na kapalinu. Skupenské teplo vypařování při teplotě varu kapaliny nazýváme *skupenské teplo varu*. *Skupenské teplo tání*, resp. *tuhnutí* je množství energie na jednotku hmotnosti, které musíme dodat, abychom roztavili pevnou látku, resp. které musíme odebrat, aby kapalina ztuhla.

Práce spojená se změnou objemu

Plyn může vyměňovat svou energii s okolím tím, že koná práci. Práce W *vykonaná plynem*, když se roztahuje nebo smršťuje z počátečního objemu V_i do koncového V_f, je rovna

$$W = \int_{\mathscr{S}_i}^{\mathscr{S}_f} dW = \int_{V_i}^{V_f} p\,dV. \qquad (19.23)$$

Integrace je nutná, protože tlak p plynu se během změny jeho objemu zpravidla mění.

První zákon termodynamiky

Zákon zachování energie pro termodynamické děje je vyjádřen *prvním zákonem termodynamiky*, který má tvar

$$\Delta U = U_f - U_i = Q - W \quad \text{(první zákon)}, \qquad (19.24)$$

popř. v diferenciálním tvaru

$$dU = dQ - dW \quad \text{(první zákon)}. \qquad (19.25)$$

U je vnitřní energie tělesa, která závisí jen na jeho stavu (teplotě, tlaku a objemu). Q je teplo vyměněné mezi systémem a jeho okolím. Bereme ho kladné, pokud systému teplo dodáváme, a záporné, pokud systému teplo odebíráme. W je práce *vykonaná systémem*. Bereme ji kladnou,* pokud systém práci koná (pokud se roztahuje proti síle způsobené okolím), a zápornou, pokud systému práci dodáváme (pokud se pod vlivem vnější síly smršťuje). Jak Q, tak i W závisí na ději (jsou to *dějové veličiny*). Naproti tomu ΔU závisí jen na počátečním a koncovém stavu; na průběhu děje nezávisí.

Aplikace prvního zákona

První zákon termodynamiky lze použít též v následujících speciálních případech:

$$\begin{aligned}
\text{adiabatický děj } Q = 0&: \quad Q = 0,\ \Delta U = -W,\\
\text{izochorický děj } \Delta V = 0&: \quad W = 0,\ \Delta U = Q,\\
\text{cyklický děj } \mathscr{S}_i = \mathscr{S}_f&: \quad \Delta U = 0,\ Q = W,\\
\text{volná expanze}&: \quad Q = W = \Delta U = 0.
\end{aligned}$$

* V moderní odborné literatuře se obvykle bere jako kladná ta energie, kterou systému dodáváme. Znaménko práce vykonané systémem je pak záporné.

Přenos tepla

Výkon H, kterým se teplo přenáší *vedením* skrz desku, jejíž stěny jsou udržovány na teplotách T_H a T_S, je

$$H = \frac{Q}{t} = kS\frac{T_H - T_S}{d}, \tag{19.30}$$

kde S, resp. d jsou plocha, resp. tloušťka desky a k je součinitel tepelné vodivosti materiálu desky.

K *proudění* dochází, pokud teplotní rozdíl způsobí přenos tepla pohybem tekutiny. *Záření* je přenos tepla vyzařováním elektromagnetické energie. Výkon P_r, jímž těleso vyzařuje energii prostřednictvím tepelného záření, je roven

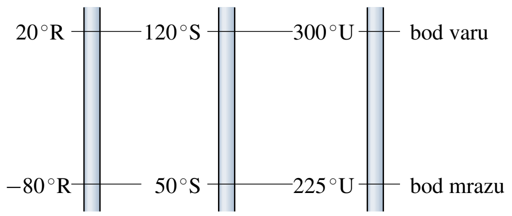
$$P_r = \sigma \varepsilon S T^4, \tag{19.37}$$

kde $\sigma = 5{,}670\,3 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, ε je emisivita povrchu předmětu, S je jeho povrch a T je povrchová teplota (v kelvinech). Výkon P_a, jímž těleso pohlcuje energii tepelného záření ze svého okolí, je při konstantní teplotě okolí T_o (v kelvinech) roven

$$P_a = \sigma \varepsilon S T_o^4. \tag{19.38}$$

OTÁZKY

1. Na obr. 19.22 jsou tři teplotní stupnice s vyznačenými teplotami tání a varu vody. Uspořádejte je sestupně podle velikosti změny o 25 R°, 25 S° a 25 U°.



Obr. 19.22 Otázka 1

2. Tyčka původně pokojové teploty je zahřívána a ochlazována v šesti krocích. Její jednotlivá prodloužení, vyjádřená ve vhodných jednotkách, jsou postupně +7, +5, +3, −4, −6 a −4. (a) Je výsledná teplota tyčky stejná s původní teplotou, vyšší, anebo nižší? (b) Našla by se taková posloupnost kroků, aby po některém z nich měla tyčka opět pokojovou teplotu?

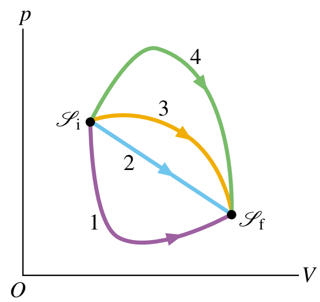
3. Tabulka udává počáteční délku d, změnu teploty ΔT a změnu délky Δd čtyř tyček. Uspořádejte sestupně tyčky podle jejich součinitelů teplotní roztažnosti.

Tyčka	d/m	ΔT/C°	Δd/m
a	2	10	$4 \cdot 10^{-4}$
b	1	20	$4 \cdot 10^{-4}$
c	2	10	$8 \cdot 10^{-4}$
d	4	5	$4 \cdot 10^{-4}$

4. Uspořádejte sestupně Celsiovu, Kelvinovu a Fahrenheitovu stupnici teplot podle tepla, které je potřeba dodat 1 g vody, aby jeho teplota vzrostla o 1 stupeň příslušné stupnice.

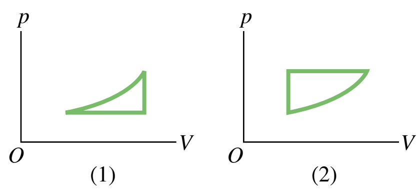
5. Materiály A, B a C jsou pevné látky při teplotě tání. Materiál A potřebuje 200 J pro roztavení 4 kg. Materiál B potřebuje 300 J pro roztavení 5 kg a materiál C 300 J pro roztavení 6 kg. Uspořádejte je sestupně podle jejich měrných skupenských tepel tání.

6. Obr. 19.23 ukazuje čtyři cesty na p-V diagramu, podél kterých lze převést plyn ze stavu $\mathscr{S}_i$ do stavu $\mathscr{S}_f$. Uspořádejte je sestupně podle (a) změny ΔU, (b) práce plynem vykonané, (c) velikosti vyměněného tepla Q.



Obr. 19.23 Otázka 6

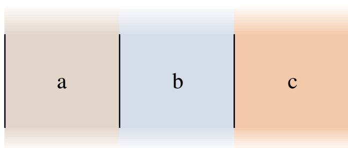
7. Obr. 19.24 ukazuje dva uzavřené cykly na p-V diagramu pro plyn. Tři části cyklu (1) mají stejné délky a tvary jako odpovídající části v cyklu (2). Má být cyklus orientován kladně (tj. proti směru otáčení hodinových ručiček), nebo záporně, má-li být kladná (a) celková práce W vykonaná plynem, (b) celkové teplo předané z plynu do okolí? Odpovězte pro oba cykly.



Obr. 19.24 Otázky 7 a 8

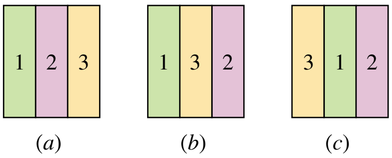
8. Pro který z cyklů na obr. 19.24 je při záporné orientaci (a) větší W, (b) větší Q?

9. Obr. 19.25 ukazuje desku složenou ze tří různých vrstev téže tloušťky, z různých materiálů a, b a c, s tepelnými vodivostmi $k_b > k_a > k_c$. Prochází jimi ustálený nenulový tepelný tok. Uspořádejte sestupně materiály podle teplotního úbytku na deskách.



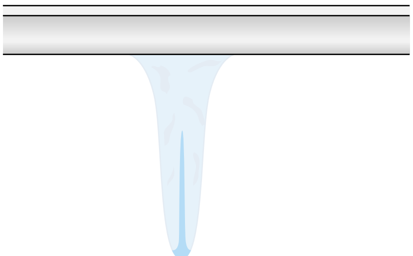
Obr. 19.25 Otázka 9

10. Obr. 19.26 ukazuje tři různá uspořádání materiálů 1, 2 a 3 tvořících stěnu. Jejich tepelné vodivosti jsou $k_1 > k_2 > k_3$. Levá strana stěny je o 20 C° teplejší než pravá. Uspořádejte stěny sestupně podle (a) toku energie stěnou, (b) teplotního úbytku na vrstvě 1.



Obr. 19.26 Otázka 10

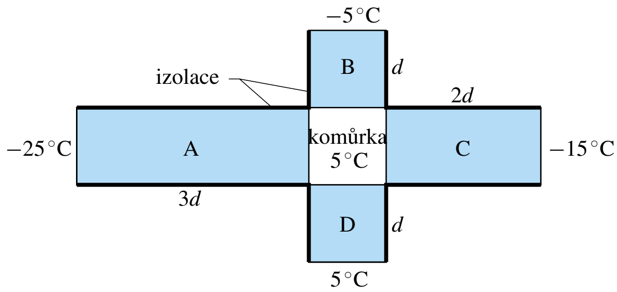
11. Když rampouch roste, je jeho vnější povrch pokryt tenkou vrstvičkou tekuté vody, která zvolna stéká dolů, aby vytvořila kapku visící na špičce (obr. 19.27). Každá kapka vytváří tenkou



Obr. 19.27 Otázka 11

trubičku kapalné vody, která se rozšiřuje vzhůru po rampouchu k jeho *kořenu* (nahoře). Protože voda na vršku této trubičky neustále tuhne, uvolňuje se energie. Odvádí se tato energie radiálně ledem ven, dolů vodou do visící kapky, nebo nahoru do kořenu? (Předpokládejme, že teplota vzduchu je pod 0 °C.)

12. Obr. 19.28 ukazuje vodorovný řez (pohled shora) čtvercovou komůrkou vytvořenou podle obrázku silnými stěnami. Stěny jsou z téhož materiálu a mají tutéž čelnou plochu. Jejich tloušťky jsou podle obrázku d, $2d$ a $3d$ a jsou podél dokonale izolovány. Čela vytvářející komůrku jsou udržována na teplotě 5 °C a tepelný tok stěnami je ustálený. Uspořádejte sestupně stěny podle velikosti tepelného toku v nich.



Obr. 19.28 Otázka 12

13. Představte si, že držíte v prstech dřevěnou a kovovou kostku o *téže* teplotě. Pokud vás kostky studí, zdá se kov chladnější než dřevo. Pokud vás kostky hřejí, zdá se zase kov teplejší než dřevo. Při jaké teplotě budete vnímat kov i dřevo jako stejně teplé?

14. Několik pevných předmětů z téhož materiálu je udržováno při teplotě 300 K v okolí, které má teplotu 350 K. Je to krychle o hraně délky r, koule o poloměru r a polokoule o poloměru r. Uspořádejte sestupně předměty podle tepelných ztrát z předmětu do okolí (tj. podle výkonu záření).

15. Následující dvojice hodnot udávají v různých situacích teploty předmětu a jeho okolí: (1) 300 K a 350 K; (2) 350 K a 400 K; (3) 400 K a 450 K. Uspořádejte sestupně bez počítání uvedené situace podle tepelných ztrát (tj. výkonu při přenosu tepla) P_n.

CVIČENÍ & ÚLOHY

ODST. 19.3 Měření teploty

1C. Fyzikové a astronomové často určují teplotu předmětu tím, že měří, jak závisí intenzita elektromagnetického záření vyzařovaného předmětem na vlnové délce záření. Vlnová délka λ_{max}, při které je záření nejintenzivnější, souvisí s teplotou T předmětu v kelvinech vztahem

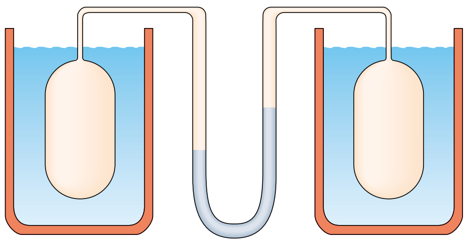
$$\lambda_{max} T = 0{,}289\,8\ \mathrm{cm{\cdot}K}.$$

V roce 1965 bylo objeveno, že ze všech stran Vesmíru přichází mikrovlnné záření s maximem pro $\lambda_{max} = 0{,}107$ cm. Jaké teplotě to odpovídá? Toto **reliktní záření** vykládáme tím, že jde o tepelné záření Vesmíru, zbývající z doby před cca 15 miliardami let, kdy Vesmír vznikl.

2C. Plyn má teplotu 373,15 K při varu vody. Jaký je limitní poměr jeho tlaku při této teplotě k tlaku při trojném bodu vody, konáme-li sérii pokusů za stálého objemu, ale se stále menším množstvím plynu?

3Ú. Byly zkonstruovány dva plynové teploměry s konstantním objemem, jeden s dusíkem, druhý s vodíkem. Každý obsahuje tolik plynu, aby jeho tlak byl $p_3 = 80$ kPa. Jaký je rozdíl mezi tlaky v teploměrech, umístíme-li je do lázně s vařící vodou? Který plyn má vyšší tlak?

4Ú. Speciální plynový teploměr má podle obr. 19.29 dvě baňky s plynem; každá je ve vodní lázni. Rozdíl tlaků měříme rtuťovým manometrem podle obrázku. Speciální zařízení (není na



Obr. 19.29 Úloha 4

obrázku) udržuje stálý objem plynu v obou baňkách. Mají-li obě baňky teploty trojného bodu vody, nevykazuje teploměr žádný rozdíl tlaků. Má-li jedna baňka teplotu trojného bodu vody a druhá baňka teplotu varu vody, je rozdíl tlaků 120 torr. Má-li konečně jedna baňka teplotu trojného bodu vody a druhá jistou neznámou teplotu, je rozdíl tlaků 90,0 torr. Jaká je teplota druhé baňky?

ODST. 19.4 Celsiova a Fahrenheitova stupnice

5C. Při jaké teplotě ukazuje Fahrenheitova stupnice (a) dvakrát větší číselnou hodnotu, (b) poloviční hodnotu oproti stupnici Celsiově?

6C. Doktor vám řekl, že máte teplotu 310 K nad absolutní nulou. Je to důvod k obavám? Vysvětlete svou odpověď.

7C. (a) V roce 1964 byla v sibiřské vesnici Ojmjakonu naměřena teplota −71 °C. Jaká by to byla teplota ve stupních Fahrenheita? (b) Nejvyšší oficiálně zaznamenaná teplota ve vnitrozemí USA byla 134 °F v Údolí smrti (Death Valley) v Kalifornii. Kolik by to bylo ve stupních Celsia?

8C. (a) Teplota na povrchu Slunce je kolem 6 000 K. Vyjádřete ji ve stupních Fahrenheita. (b) Vyjádřete normální tělesnou teplotu 36,5 °C ve stupních Fahrenheita. (c) Ve vnitrozemí USA byla oficiálně zaznamenána nejnižší teplota −70 °F v Rogers Pass v Montaně. Vyjádřete tento údaj ve stupních Celsia. (d) Vyjádřete teplotu varu kyslíku za normálního tlaku −183 °C, ve Fahrenheitově stupnici. (e) Při jaké Fahrenheitově teplotě by vám bylo v místnosti příliš teplo?

9C. Při jakých teplotách se shodují číselné údaje na stupnicích (a) Fahrenheita a Celsia (ověřte si výsledek v tab. 19.1), (b) Fahrenheita a Kelvina, (c) Celsia a Kelvina?

10Ú. Při teplotní stupnici X se voda vaří při −53,5 °X a tuhne při −170 °X. Jaká teplota v této stupnici odpovídá 340 K?

11Ú. Z každodenního pozorování víme, že horké i studené předměty chladnou nebo se zahřívají až na teplotu svého okolí. Není-li teplotní rozdíl $\Delta T = T_p - T_o$ předmětu a jeho okolí co do velikosti značný, je změna teploty zhruba úměrná rozdílu teplot, tedy

$$\frac{d\Delta T}{dt} = -A\Delta T,$$

kde A = konst. (**Newtonův zákon vedení tepla**). Znaménko v rovnici je záporné, protože ΔT klesá s časem, je-li ΔT kladné, a roste, je-li ΔT záporné. (a) Na jakých faktorech závisí A? Jakou má fyzikální jednotku? (b) Jestliže je v okamžiku $T = 0$ teplotní rozdíl ΔT_0, pak v čase t platí

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-At}.$$

Dokažte to.

12Ú. Domácí topení jednou vypadlo, když byla venku teplota 7,0 °C. V důsledku tohoto výpadku klesla uvnitř teplota během 1,0 h z 22 °C na 18 °C. Majitelka domku topení opravila a vylepšila tepelnou izolaci (zateplila dům). Poté shledala, že při příštím výpadku topení za stejného počasí trvalo dvakrát déle, než teplota klesla z 22 °C na 18 °C. Jaký je poměr konstant A z úlohy 11 v Newtonově zákonu vedení tepla před zateplením a po zateplení?

ODST. 19.5 Teplotní roztažnost

13C. Ocelová tyčka má délku přesně 20 cm při 30 °C. Kolikrát delší je při 50 °C?

14C. Hliníkový stožár je 33 m vysoký. O kolik se prodlouží, stoupne-li teplota o 15 °C?

15C. Pyrexové zrcadlo v dalekohledu observatoře na Mt. Palomar má průměr 200 in. Teplota se tam mění mezi −10 °C a 50 °C. Jaká je největší změna průměru zrcadla?

16C. Kruhový otvor v hliníkové desce má průměr 2,725 cm při 0,000 °C. Jaký má průměr, když se deska zahřeje na 100,0 °C?

17C. Tyč z lehké slitiny má délku 10,000 cm při 20,000 °C; délka vzroste na 10,015 cm při bodu varu vody. (a) Jakou má tyč délku při teplotě tání ledu? (b) Při jaké teplotě má tyč délku 10,009 cm?

18C. (a) Jaký je součinitel délkové teplotní roztažnosti hliníku ve stupních Fahrenheita? (b) Použijte tohoto výsledku k výpočtu změny délky hliníkové tyčky 20 ft dlouhé po zahřátí ze 40 °F na 95 °F. (Výsledek uveďte ve ft.)

19C. Krátce po vzniku Země zvýšilo teplo uvolněné při radioaktivním rozpadu průměrnou vnitřní teplotu z 300 K na 3 000 K; zhruba tato teplota setrvává dosud. Předpokládáme-li průměrný součinitel teplotní objemové roztažnosti $3{,}0 \cdot 10^{-5}\,K^{-1}$, o kolik se zvětšil poloměr Země od jejího vzniku?

20C. Stanfordský lineární urychlovač obsahuje stovky mosazných disků těsně uložených v ocelové trubici, která je rovněž těsně objímá. Systém byl sestaven z disků ochlazených suchým ledem (při −57,00 °C), aby je bylo možno do ocelové trubice uložit. Je-li při 43,00 °C průměr disku 80,00 mm, jaký byl jeho průměr v suchém ledu?

21C. Skleněné okno má při teplotě 10 °C rozměr přesně 20 cm × × 30 cm. O kolik vzroste jeho plocha při teplotě 40 °C?

22C. Při 20 °C má mosazná krychle hranu délky 30 cm. O kolik vzroste její povrch po zahřátí z 20 °C na 75 °C?

23C. Jak se změní objem hliníkové koule s původním poloměrem 10 cm při zahřátí z 0,0 °C na 100 °C?

24C. Jaký je objem olověné koule při 30 °C, je-li její objem při 60 °C roven 50 cm^3?

25C. O kolik se zvětší objem hliníkové krychle o hraně 5 cm, zahřejeme-li ji z 10,0 °C na 60,0 °C?

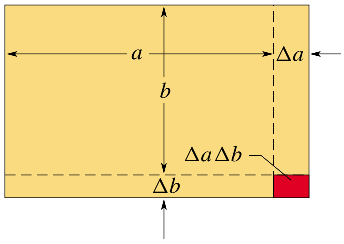
26C. Hliníkový kelímek s objemem 100 cm^3 je naplněn glycerinem při 22 °C. Kolik glycerinu přeteče ven (pokud vůbec přeteče), zahřeje-li se kelímek i s glycerinem na 28 °C? (Součinitel objemové roztažnosti glycerinu je $5{,}1 \cdot 10^{-4}$/ C°.)

27C. Ocelová tyčka je při 25 °C zakotvena na obou koncích a poté chlazena. Při jaké teplotě se přetrhne? Použijte tab. 13.1.

28Ú. Při 20 °C je tyčka přesně 20,05 cm dlouhá podle ocelového pravítka. Pravítko i tyčku umístíme v pícce při 270 °C; tam bude tyčka měřit podle pravítka 20,11 cm. Jaký je součinitel teplotní roztažnosti materiálu tyčky?

29Ú. Ocelová tyčka má průměr 3,000 cm při 25 °C. Mosazný prstenec má vnitřní průměr 2,992 cm při 25 °C. Při jaké společné teplotě můžeme právě nasadit prstenec na tyč?

30Ú. Obsah S pravoúhlé desky je ab. Teplotní součinitel délkové roztažnosti je α. Po zahřátí o ΔT se strana a prodlouží o Δa a strana b o Δb (obr. 19.30). Ukažte, že při zanedbání malé veličiny $\Delta a \Delta b/ab$ je $\Delta S = 2\alpha S \Delta T$.



Obr. 19.30 Úloha 30

31Ú. Hustota je hmotnost dělená objemem. Hmotnost na teplotě nezávisí, ale závisí-li na teplotě objem V, závisí na ní i hustota ϱ. Ukažte, že malá změna hustoty $\Delta\varrho$ souvisí se změnou teploty ΔT vztahem

$$\Delta\varrho = -\beta\varrho\Delta T,$$

kde β je součinitel teplotní objemové roztažnosti. Vysvětlete záporné znaménko.

32Ú. Když se teplota kovového válce zvýší z 0,0 °C na 100 °C, zvětší se jeho délka o 0,23 %. (a) Jak se změní jeho hustota? (b) O který kov se jedná?

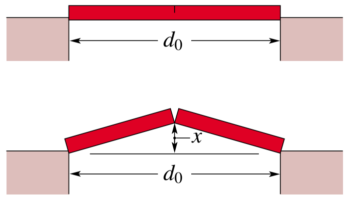
33Ú. Dokažte, že když se teplota kapaliny v barometru změní o ΔT při konstantním tlaku, tak se sloupec prodlouží o hodnotu $\Delta h = \beta h \Delta T$, kde β je součinitel teplotní objemové roztažnosti. Roztažnost skla zanedbejte.

34Ú. Když teplota měděné desetikoruny vzroste o 100 C°, její průměr vzroste o 0,18 %. Vypočtěte na dvě desetinná místa v procentech: (a) změnu obsahu povrchu, (b) změnu tloušťky, (c) změnu objemu, (d) změnu hmotnosti. (e) Vypočtěte součinitel teplotní délkové roztažnosti.

35Ú. Hodiny s mosazným kyvadlem jdou přesně při 20 °C. Vypočtěte sekundový rozdíl, který vznikne za hodinu při teplotě 0,0 °C.

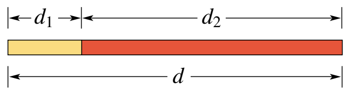
36Ú. Tyč s puklinou je upevněna ve svěráku puklinou nahoru podle obr. 19.31. Při zahřátí o 32 C° se zdvihne o x. Vypočítejte x, je-li délka tyče $d = 3{,}77$ m a součinitel teplotní délkové roztažnosti je $25 \cdot 10^{-6}$/ C°.

37Ú. Složená tyč délky $d = d_1 + d_2$ sestává z tyče o délce d_1 vyrobené z materiálu 1, připojené k tyči o délce d_2 z materiálu 2 (obr. 19.32). (a) Dokažte, že součinitel teplotní délkové roztažnosti je roven $\alpha = (\alpha_1 d_1 + \alpha_2 d_2)/d$. (b) Použijte ocel a mosaz



Obr. 19.31 Úloha 36

a spočtěte d_1, d_2, víte-li, že $d = 52{,}4$ cm a součinitel teplotní délkové roztažnosti $\alpha = 13{,}0 \cdot 10^{-6}$/ C°.



Obr. 19.32 Úloha 37

ODST. 19.7 Zahřívání pevných látek a kapalin

38C. Je možné rozpustit led třením dvou ledových kostek o sebe? Kolik práce (v joulech) musíme vykonat pro rozpuštění 1,00 g ledu?

39C. Materiál hmotnosti 30,0 g má molární hmotnost 50 g/mol. Po dodání tepla 314 J se teplota zvýší z 25,0 °C na 45,0 °C. (a) Jaká je měrná tepelná kapacita tohoto materiálu? (b) Kolik molekul obsahuje? (c) Jaká je molární tepelná kapacita?

40C. V ekologickém domě skladují sluneční energii v nádobách naplněných vodou. Pro udržení teploty 22,0 °C po období pěti chladných dní je potřeba $1{,}00 \cdot 10^6$ kcal. Voda v nádobách má teplotu 50,0 °C a její hustota je $1{,}00 \cdot 10^3$ kg·m^{-3}. Kolik vody je zapotřebí?

41C. Svérázný dietolog doporučuje svým pacientům, kteří chtějí zhubnout, aby pili ledovou vodu. Jeho teorie je založena na tom, že tělo musí spálit značné množství energie k ohřátí vody (0,00 °C) na tělesnou teplotu (37,0 °C). Kolik litrů ledové vody je zapotřebí ke spálení 454 g (jedné libry) tuku? Při spálení tohoto množství tuku vytvoří tělo 3 500 kcal. Proč není dobré následovat jeho rady?

42C. Ledovce představují veliké nebezpečí pro lodě plující severním Atlantikem. Lodní trasy vedoucí tímto územím představují asi 30 % celkové dráhy lodí. Ledovce je možné zničit pomocí min, bomb a torpédování nebo je možné je rozpustit. Jaké teplo je zapotřebí k rozpuštění 10 % ledovce o hmotnosti 200 000 tun?

43C. Voda v nádobě má hmotnost 260 g. Její teplota je 0 °C. Kolik vody zůstane nezmrzlé, když odebereme teplo 50,2 kJ?

44C. Vypočítejte, kolik tepla je zapotřebí k úplnému roztavení kusu stříbra o hmotnosti 130 g a o teplotě 15 °C.

45C. Místnost je osvětlena čtyřmi stowattovými žárovkami. (100 W je příkon elektrické energie; ta se přemění na teplo a světlo.) 90 % energie se přemění na teplo. Kolik tepla se vyzáří do místnosti za jednu hodinu?

46C. Jaké množství másla s energetickou hodnotou 6 000 cal/g musí sníst muž vážící 72 kg, který chce vystoupit na Mount Everest? Mt. Everest je vysoký 8 850 m n. m. Uvažujte, že vychází z výšky 4 425 m n. m.

47C. Energetický příjem atleta je 4 000 kcal denně. Kdyby uvolňoval energii plynule po celý den, jak by dopadlo srovnání jeho energetického výdaje se stowattovou žárovkou? (Údaj získáte ve cvič. 45.)

48C. Představme si, že bychom dovedli přeměnit teplo, které jsme spotřebovali k zahřátí vody o hmotnosti m z teploty 68 °F na teplotu 78 °F, na její kinetickou energii. Jak rychle by se voda pohybovala? Anebo realističtěji: Jak rychle by se musela pohybovat nádoba s vodou teploty 68 °F, aby jejím zabrzděním (provedeným tak šikovně, aby se vně vody nic neohřálo) stoupla teplota vody na 78 °F?

49C. Při vrtání do kostky mědi o hmotnosti $m = 1{,}60\,\mathrm{lb}$ pracujeme s příkonem 0,400 HP („kůň") po dobu 2,00 min. (a) Jaká energie (teplo v jednotkách Btu) vzniká? (b) Jaký je přírůstek teploty mědi, pokud se na teplo přemění 75 % energie? ($1\,\mathrm{ft{\cdot}lb} = 1{,}285{\cdot}10^{-3}\,\mathrm{Btu}$)

50C. Závaží o hmotnosti 6,00 kg padá z výšky 50,0 m. Prostřednictvím lanka roztáčí vrtulku, která je ponořena v 0,600 kg vody. Teplota vody je 15,0 °C. O kolik C° se nanejvýš voda zahřeje?

51C. Jedna možnost, jak za chladné zimní noci udržet v garáži rozumnou teplotu, je dát do ní nádobu s vodou. Je-li hmotnost vody 125 kg a je-li její počáteční teplota 20 °C, vypočtěte: (a) Jaká energie se uvolní do okolního prostředí při zamrznutí veškeré vody? (b) Jaká byla nejmenší (rovnovážná) teplota v garáži, než všechna voda v nádobě zamrzla?

52C. Malý elektrický ponorný vařič ohřál 100 g vody na šálek kávy. Výkon vařiče je 200 W. Vypočítejte, jak dlouho trvalo ohřátí vody z 23 °C na teplotu varu. Tepelné ztráty zanedbejte.

53C. Malá dodávka o hmotnosti 2 200 kg jede po dálnici rychlostí 105 km/h za hodinu. (a) Kdyby šlo využít všechnu její kinetickou energii k přeměně vody o teplotě 100 °C na páru, kolik vody by se vypařilo? (b) Kdybychom měli za tuto energii zaplatit elektrárně při ceně 0,91 Kč/kW·h (sazba N), kolik by to stálo? Odhadněte odpověď před výpočtem.

54C. Měděný kotlík o hmotnosti 150 g obsahuje 220 g vody o teplotě 20,0 °C. Vhodíme do ní velmi horký 300 g vážící měděný váleček. Voda začne vřít a 5 g se vypaří. Konečná teplota soustavy je 100 °C. (a) Jaké množství tepla voda přijala? (b) Kolik tepla přijal kotlík? (c) Jaká byla původní teplota válečku?

55Ú. Kovová nádoba o hmotnosti 3,6 kg obsahuje 14 kg vody. Je do ní vhozen váleček z téhož kovu o hmotnosti 1,8 kg a teplotě 180 °C. Vypočítejte měrnou tepelnou kapacitu kovu, víte-li, že teplota nádoby i vody byla na počátku 16,0 °C a konečná teplota soustavy je 18,0 °C.

56Ú. Teploměr o hmotnosti 0,055 0 kg s měrnou tepelnou kapacitou $0{,}837\,\mathrm{kJ{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}}$ ukazoval 15 °C. Byl celý ponořen do 0,300 kg vody. Teplota se ustálila na 44,4 °C. Jaká byla teplota vody před měřením?

57Ú. Jak dlouho bude trvat ohřátí 40 gal vody ze 70 °F na 100 °F ohřívačem o výkonu $2{,}0{\cdot}10^5\,\mathrm{Btu/h}$?

58Ú. Atlet se rozhodl shodit na váze fyzickým cvičením. (a) Kolikrát musí zvednout závaží o hmotnosti 80 kg do výšky 1 m, aby spálil 1 lb tuku (ekvivalent 3 500 kcal)? (b) Jak dlouho mu bude trvat, než shodí 1 lb, zvedá-li závaží jednou za dvě sekundy?

59Ú. Osobní auto jedoucí rychlostí 90 km/h o hmotnosti 1 500 kg náhle zabrzdilo na dráze 80 m. Kolik energie se přeměnilo na zahřátí brzd?

60Ú. Kuchařovi se rozbila kamna. Rozhodl se proto uvařit vodu na kávu pro svou ženu tak, že bude třepat termoskou s vodou. Předpokládejme, že v termosce je 500 cm^3 vody o teplotě 20 °C. Při každém otočení spadne voda z výšky 30 cm. Kuchař otočí termosku třicetkrát za minutu. Jak dlouho bude trvat, než se voda začne vařit? Teplotní ztráty zanedbejte.

61Ú. Kostka ledu o teplotě 0 °C a o hmotnosti 50,0 kg klouzala s počáteční rychlostí $5{,}38\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$. Zastavila se po 28,3 metrech. Kolik ledu roztálo při tření? Počítejte, jako by se všechno teplo při tření přeneslo jen do ledu.

62Ú. Měrná tepelná kapacita látky se mění s teplotou podle vztahu: $c = 0{,}20 + 0{,}14T + 0{,}023T^2$. (Teplota je ve stupních Celsia a c je v $\mathrm{cal{\cdot}g^{-1}{\cdot}K^{-1}}$.) Vypočítejte teplo, které je potřeba k zahřátí 2 g látky z teploty 5 °C na 15 °C.

63Ú. V solárním ohřívači vody se využívá sluneční energie. Na střeše prochází sluneční záření průhledným krytem a prohřívá v trubkách kolektoru vodu, která je pak čerpána do zásobníku. Účinnost tohoto zařízení je 20 % (tj. 80 % dopadající sluneční energie se pro naše účely nepodaří využít). Jaká plocha je potřeba k zahřátí 200 l vody z teploty 20 °C na 40 °C za 1,0 h? Intenzita slunečního záření je $700\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}}$.

64Ú. V termosce je 130 cm^3 kávy o teplotě 80 °C. Vhodíme do ní 12,0 g ledu o teplotě 0 °C. O kolik stupňů se káva ochladí, když led roztaje? (Z hlediska termiky není podstatný rozdíl mezi kávou a čistou vodou.)

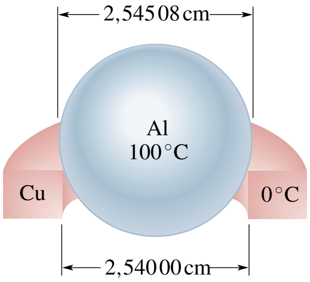
65Ú. Kolik g páry o teplotě 100 °C je zapotřebí přivést do termosky ke kusu ledu o hmotnosti 150 g a teplotě 0 °C, aby vznikla voda teploty 50 °C?

66Ú. Student si chladí čaj tak, že smíchá 500 g horkého čaje se stejným množstvím ledu o teplotě 0 °C. Počáteční teplota čaje byla: (a) 90 °C, (b) 70 °C. Jaká bude výsledná teplota nápoje?

67Ú. Do 200 g vody byly vhozeny (a) dvě, (b) jedna padesátigramová kostka ledu. Počáteční teplota vody byla 25 °C, ledu −15 °C. Jaká bude konečná teplota nápoje? Tepelnou kapacitu sklenice zanedbejte.

68Ú. Mějme 20,0 g měděný prstýnek o vnitřním průměru 2,540 00 cm o teplotě 0,000 °C a hliníkovou kuličku o průměru 2,545 08 cm o teplotě 100,0 °C. Kulička leží na prstýnku podle obr. 19.33. Po vzájemném vyrovnání teplot zapadne kulička přesně do prstýnku. Jaká je její hmotnost? Tepelnou výměnu s okolím zanedbejte.

69Ú. **Průtokový kalorimetr** je zařízení sloužící k měření měrných tepelných kapacit protékajících kapalin. Porovnává rozdíl mezi přítokovou a výtokovou teplotou kapaliny, kterou zahřívá vnitřní spirálou o známém výkonu. Při měření měla kapalina



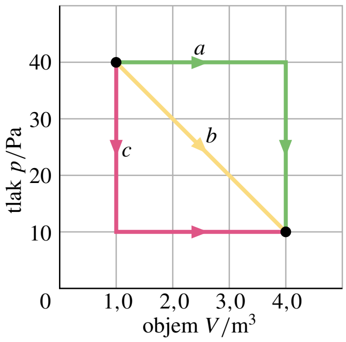
Obr. 19.33 Úloha 68

hustotu 0,85 g/cm^3 a objemový průtok 8,0 cm^3/s. Výkon spirály uvnitř kalorimetru byl 250 W. Rozdíl mezi teplotou přítoku a výtoku byl 15 C°. Jaká byla měrná tepelná kapacita kapaliny?

70Ú. V kalorimetru ohříváme látku elektrickou spirálou stálým výkonem a měříme teplotu látky T jako funkci času t. (a) Ukažte, jak můžeme ze znalosti $T = T(t)$ vyjádřit závislost teplotní kapacity látky na teplotě. (b) Předpokládejme, že by v jistém teplotním rozmezí byla teplota úměrná t^3. Jak by závisela teplotní kapacita na teplotě?

ODST. 19.10 Zvláštní případy prvního zákona termodynamiky

71C. Při rozpínání plynu z objemu 1,0 m^3 do objemu 4,0 m^3 klesá tlak z 40 Pa na 10 Pa. Jakou práci vykoná plyn, když tlak se mění s objemem třemi způsoby podle obr. 19.34?

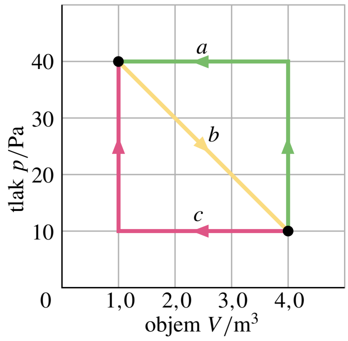


Obr. 19.34 Cvičení 71

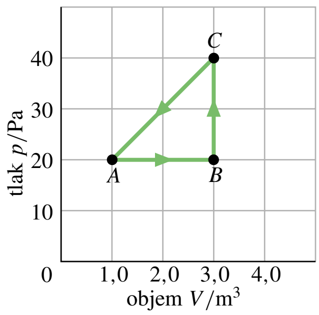
72C. Plyn se rozepne z objemu 1,0 m^3 na čtyřnásobek dle křivky b podle obr. 19.35. Potom je stlačen zpět na objem 1,0 m^3 dle křivky a nebo c. Určete práci, kterou plyn vykonal.

73C. Soustava přijala 200 J práce a odevzdala 70,0 cal. S uvážením prvního zákona termodynamiky vyjádřete hodnoty (a znaménka) (a) W, (b) Q, (c) ΔU.

74C. Termodynamický děj proběhl z výchozího stavu A do B a přes C zpátky do A podle obr. 19.36a. (a) Doplňte do tabulky znaménka + a − pro příslušné veličiny v každém z procesů. (b) Vypočítejte práci, kterou vykonala soustava během úplného cyklu A–B–C–A.



Obr. 19.35 Cvičení 72



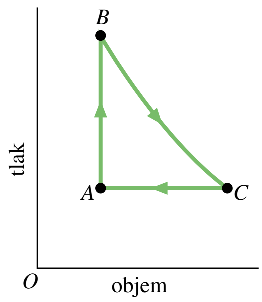
(*a*)

	Q	W	ΔE_{int}
$A \longrightarrow B$			+
$B \longrightarrow C$	+		
$C \longrightarrow A$			

(*b*)

Obr. 19.36 Cvičení 74

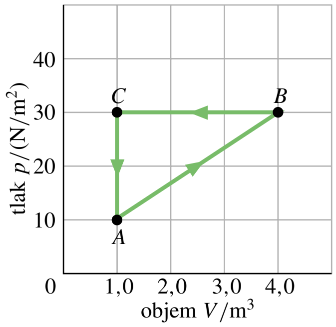
75C. Plyn vykonal cyklus podle obr. 19.37. Vypočítejte teplo dodané plynu během děje C–A, když $Q_{A-B} = 20{,}0$ J je teplo dodané během děje A–B, děj B–C je adiabatický a úhrnná práce plynem vykonaná během cyklu je 15,0 J.



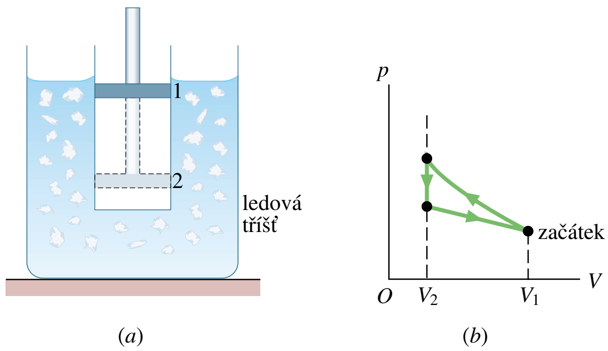
Obr. 19.37 Cvičení 75

76C. Plyn vykonal cyklus podle obr. 19.38. Vypočítejte úhrnné teplo dodané plynu během jednoho cyklu.

77Ú. Na obr. 19.39a je válec obsahující plyn, který je uzavřen pohyblivým pístem. Válec je vložen do ledové tříště. Píst je *velmi rychle* stlačen z horní polohy 1 do dolní 2 a držen, dokud se teplota plynu nevyrovná s teplotou tříště. Potom je *pomalu* vytažen zpět do polohy 1. Obr. 19.39b ukazuje p-V diagram tohoto děje. Jakou práci plyn přijme, jestliže v průběhu cyklu roztaje 100 g ledu?

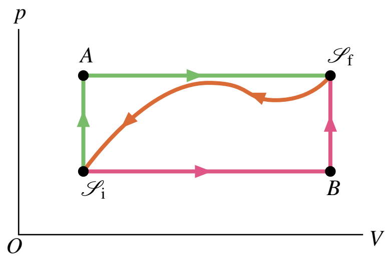


Obr. 19.38 Cvičení 76



Obr. 19.39 Úloha 77

78Ú. Soustava během děje $\mathscr{S}_i$–A–$\mathscr{S}_f$ podle obr. 19.40 přijala teplo $Q = 50\,\mathrm{cal}$ a vykonala práci $W = 20\,\mathrm{cal}$. Během děje $\mathscr{S}_i$–B–$\mathscr{S}_f$ přijala teplo $Q = 36\,\mathrm{cal}$. (a) Jaká je vykonaná práce během děje $\mathscr{S}_i$–B–$\mathscr{S}_f$? (b) Jaké teplo přijme soustava během děje popsaného křivkou $\mathscr{S}_f$–$\mathscr{S}_i$, jestliže je vykonaná práce $W = -13\,\mathrm{cal}$? (c) Jaká je vnitřní energie U_f, jestliže je $U_i = 10\,\mathrm{cal}$? (d) Jak velké je teplo přijaté během dějů $\mathscr{S}_i$–B a B–$\mathscr{S}_f$, je-li $U_B = 22\,\mathrm{cal}$?



Obr. 19.40 Úloha 78

ODST. 19.11 Mechanismy přenosu tepla

79C. Průměrná hustota tepelného toku zemským povrchem v Severní Americe je $54{,}0\,\mathrm{mW\cdot m^{-2}}$. Průměrná tepelná vodivost skály je $2{,}50\,\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$. Má-li povrch teplotu $10{,}0\,°\mathrm{C}$, jaká by měla být teplota v hloubce $35{,}0\,\mathrm{km}$? (Ve skutečnosti je teplota spoluvytvářena rozpadem radioaktivních prvků v zemské kůře. To však zde zanedbejte.)

80C. Strop rodinného domku v chladném klimatu by měl mít tepelný odpor $R = 30$ (dle americké normy). Jak tlustá by měla být izolace (a) z polyuretanové pěny, (b) ze stříbra?

81C. Tepelná vodivost skla (Pyrex) je $2{,}9\cdot10^{-3}\,\mathrm{cal/(cm\cdot C°\cdot s)}$ při $0\,°\mathrm{C}$. (a) Převeďte tuto hodnotu jednak do jednotek SI, jednak do $\mathrm{Btu/(ft\cdot F°\cdot h)}$. (b) Jaký je tepelný odpor R skleněné destičky o tloušťce 0,25 in?

82C. (a) Vypočítejte tepelný tok oblečením lyžaře v ustáleném stavu, víte-li, že povrch lidského těla je asi $1{,}8\,\mathrm{m^2}$ a vrstva oblečení je $1{,}0\,\mathrm{cm}$ tlustá. Povrchová teplota kůže je $33\,°\mathrm{C}$, teplota povrchu obleku $1{,}0\,°\mathrm{C}$, tepelná vodivost oblečení je $0{,}040\,\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$. (b) Jak se změní situace, když lyžař upadne a oblečení nasákne vodou o tepelné vodivosti $0{,}60\,\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$?

83C. Uvažujte ustálený tok tepla měděnou deskou podle obr. 19.17, kde $d = 25{,}0\,\mathrm{cm}$, $S = 90{,}0\,\mathrm{cm^2}$, $T_H = 125\,°\mathrm{C}$ a $T_S = 10{,}0\,°\mathrm{C}$. Určete jeho velikost (tj. výkon při přenosu tepla destičkou).

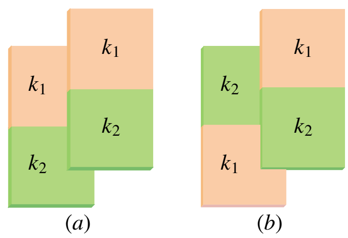
84C. Válcová měděná tyč o délce 1,2 m a obsahu příčného průřezu $4{,}8\,\mathrm{cm^2}$ je izolována proti povrchovým tepelným ztrátám. Konce tyče udržujeme v teplotním rozdílu $100\,\mathrm{C°}$, jeden je v ledové tříšti, druhý ve vroucí vodě. (a) Vypočítejte závislost teploty na vzdálenosti od konce tyče. (b) Jak rychle se bude rozpouštět ledová tříšť? (Rozvažte, jaká fyzikální jednotka nejlépe popisuje „rychlost rozpouštění ledu“.)

85C. Ukažte, že teplota T_X na rozhraní horké a studené destičky na obr. 19.18 je dána vzorcem

$$T_X = \frac{R_1 T_H + R_2 T_S}{R_1 + R_2}.$$

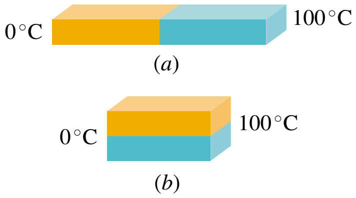
86C. Kdybyste byl (jako astronaut ve filmu Vesmírná odyssea 2001) daleko od Slunce vyslán z kosmické lodi do vesmíru bez speciální ochrany, cítil byste mráz vesmíru: sám byste vyzařoval tepelnou energii, ale nepřijímal byste téměř žádnou energii ze svého okolí. (a) Jak rychle by vám ubývala energie zářením? (b) Kolik energie byste ztratil za 30 s? Emisivitu zvolme 0,90; odhadněte ostatní data, která potřebujete k výpočtu.

87C. Čtyři čtvercové izolační desky vyrobené ze dvou různých materiálů se stejnou tloušťkou l a se stejným obsahem S by měly pokrýt plochu o obsahu $2S$. To lze udělat dvěma způsoby podle obr. 19.41. Jaké uspořádání je úspornější (a), nebo (b)?



Obr. 19.41 Cvičení 87

88Ú. Dvě stejné pravoúhlé kovové tyče jsou svařeny konci k sobě podle obr. 19.42a. Protéká jimi ustálený tok tepla 10 J za dvě minuty. Za jak dlouho by prošlo 10 J tepla stejnými tyčemi, ale svařenými po délce, podle obr. 19.42b?



Obr. 19.42
Úloha 88

89Ú. Vypočítejte tepelný tok dveřmi, které jsou 2,0 m vysoké a 0,75 m široké. (a) Dveře tvoří panel z hliníku tlustý 1,5 mm, pokrytý ze 75 % panelem ze skla 3,0 mm tlustého. (b) Dveře jsou z bílé borovice a jsou 2,5 cm tlusté. Předpokládejte rozdíl vnitřní a vnější teploty 33 C°. Vliv rámu zanedbejte.

90Ú. Velká válcová cisterna na vodu má železné dno o průměru 1,7 m a 5,2 mm tlusté. Voda je ohřívána plynovým hořákem tak, že se udržuje teplotní rozdíl 2,3 C° mezi volnou hladinou a dnem cisterny. Kolik tepla projde dnem za 5,0 min? (Železo má tepelnou vodivost 67 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.)

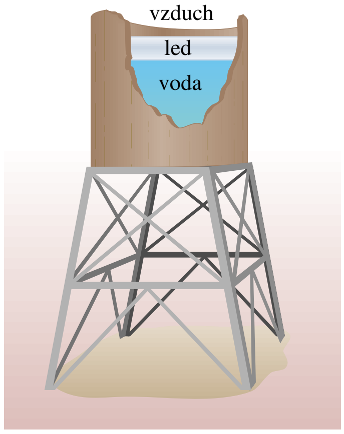
91Ú. (a) Jaké jsou tepelné ztráty okenního skla 3,0 mm tlustého, je-li vnější teplota −20 °F a vnitřní +72 °F? (Výsledek uveďte v jednotkách SI.) (b) Venkovní okno se skládá ze dvou skleněných tabulí téže tloušťky. Mezi tabulemi skla je vzduchová vrstva tloušťky 7,5 cm. Jaké budou tepelné ztráty, uvažujeme-li pouze ztráty vedením tepla?

92Ú. Koule o poloměru 0,500 metru a teplotě 27,0 °C má emisivitu 0,850 a je v prostředí o teplotě 77,0 °C. (a) Jaký tepelný výkon vyzařuje? (b) Jaký výkon pohlcuje? (c) Jaký je úhrnný vyzařovaný výkon koule?

93Ú. Krychle s délkou hrany $6{,}0 \cdot 10^{-6}$ m, s emisivitou 0,75 a s teplotou −100 °C se nachází v prostředí o teplotě −150 °C. Jaký tepelný výkon vyměňuje s okolím?

94Ú. Válec o poloměru $r_1 = 2{,}5$ cm a délce $h_1 = 5{,}0$ cm má emisivitu 0,85 a teplotu 30 °C. Je zavěšen v prostředí o teplotě 50 °C. (a) Jaký má zářivý výkon P_1? (b) Na jaký výkon P_2 klesne, zmenšíme-li poloměr válce na $r_2 = 0{,}50$ cm? (c) Jaký je poměr P_2/P_1?

95Ú. Nádrž s vodou byla ponechána venku v mrazivém počasí. Vytvořila se vrstva ledu silná 5,0 cm (obr. 19.43). Vzduch nad ledem měl teplotu −10 °C. Vypočítejte rychlost nárůstu dalšího ledu na spodku ledové vrstvy (v centimetrech za hodinu). Tepelná vodivost ledu je 0,004 0 cal/(s·cm·C°) a hustota ledu je 0,92 g/cm^3. Předpokládejte, že nádrž dokonale izoluje.



Obr. 19.43 Úloha 95

96Ú. Na mělkém rybníku se vytvořil led. Teplota vzduchu nad ním je stálá, −5,0 °C. Rybník je (včetně ledu) hluboký 1,4 m, teplota na jeho dně se udržuje 4,0 °C. Vypočítejte, jak silný je led. Tepelná vodivost ledu je 0,40 cal/(m·C°·s), vody 0,12 cal/(m·C°·s).

97Ú. Tři kovové tyče — měděná, hliníková a mosazná — jsou sesazeny v tomto pořadí za sebou. Všechny jsou 6,00 cm dlouhé a v průměru mají 1,00 cm. Konec měděné, resp. mosazné tyče je udržován na teplotě varu vody, resp. tání ledu. Jaká teplota se ustálí na spoji mezi hliníkovou a mosaznou tyčí? A mezi hliníkovou a měděnou tyčí? Tepelná vodivost mosazi je 109 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.