

Řešení úlohy č. 1 – Paprsky chladu

Žádné paprsky chladu samozřejmě neexistují. Abychom vysvětlili ochlazení teploměru, půjdeme na problém poněkud zeširoka.

Jistě víte, že na Měsíci teplota velice kolísá podle toho, je-li právě den či noc. V noci, která na Měsíci trvá kolem 14 dní, teplota klesne až na mínus ??? stupňů Celsia. To znamená, že povrch Měsíce musí odevzdávat teplo svému okolí. Protože se to neděje vedením (na Měsíci není atmosféra a pod povrch se teplo také neodvádí), musí se povrch Měsíce tepla zbavovat vyzařováním. Skutečně, je známo, že všechna tělesa vyzařují do prostoru kolem sebe energii ve formě elektromagnetického záření, a to tím více, čím vyšší je jejich teplota. Dokonce i stěna ve vašem pokoji vyzařuje velké množství elektromagnetického záření – každý metr čtvereční téměř 100 wattů. Skutečnost, že se tím stěna neochlazuje, je dána tím, že na ni zpětně dopadá záření ostatních stěn i předmětů v pokoji, které jí zase energii dodává, takže se oba efekt vzájemně vyruší a stěna se neochlazuje ani neohřívá.

A tím se dostáváme k našemu teploměru. Nejdříve si představme, že v ohnisku druhého zrcadla je kámen o stejné teplotě, jakou má místnost. Je jistě zřejmé, že teploměr ukáže teplotu vzduchu v místnosti. Jestliže ale nyní odstraníme kámen a místo něj umístíme do ohniska druhého zrcadla plamen svíčky, začne na teploměr dopadat více záření než předtím, protože svíčka září více než kámen, a část záření svíčky se postupně odráží od obou zrcadel a dopadá na teploměr. Teploměr se tedy bude zahřívat, dokud nenastane rovnováha mezi energií, kterou pohlcuje, a energií, kterou vyzařuje. Po čase tedy bude ukazovat vyšší teplotu, než je teplota vzduchu v místnosti. Pokud naopak umístíme do ohniska druhého zrcadla místo kamene kus ledu, bude na teploměr nyní dopadat méně záření než v případě kamene, protože led je chladný a vyzařuje méně než kámen. Proto se teploměr ochladí až na teplotu, při níž opět nastane rovnováha mezi vyzařovanou a pohlcovanou energií, a po chvíli tedy ukáže nižší teplotu než je teplota vzduchu v místnosti.

Řešení úlohy č. 2 – Chladič

Srovnajme chladicí proces pro oba typy použití chladiče – stejnosměrný a protisměrný.

1) Stejnosměrný chladič. Jestliže chlazené i chladicí kapaliny přitéká stejné množství, můžeme si představit, že v chladiči jsou ve vzájemném tepelném kontaktu stále stejné částičky chlazené a chladicí látky. Během cesty z jednoho konce chladiče na druhý se teploty postupně vyrovnávají a jestliže je chladič velmi dlouhý, dojde nakonec k ustálení obou teplot na hodnotě, která je rovna aritmetickému průměru počátečních teplot chlazené i chladicí kapaliny, podobně jako když necháme v tepelném kontaktu stejná množství téže látky o různých teplotách.

2) Protisměrný chladič. Z názoru je celkem zřejmé, že je-li chladič velmi dlouhý, ochladí se chlazená kapalina až na vstupní teplotu chladicí kapaliny a naopak, chladicí kapalina se ohřeje na původní teplotu chlazené kapaliny. Zkusme nyní tuto hypotézu zdůvodnit fyzikální úvahou.

Nejdříve je třeba si uvědomit, že teplo, které odevzdá chlazená látka, je stejné jako teplo,



Obrázek 1: Označení vstupních a výstupních teplot kapalin u protisměrného chladiče

keré přijme chladicí látka. Protože obě látky jsou stejné a přitéká jich za stejný čas stejné množství, bude i změna teploty chlazené a chladicí látky po průchodu chladičem stejná (samozřejmě s opačným znaménkem). Označíme-li T_1 a T_1' vstupní, resp. výstupní teplotu chlazené kapaliny a podobně T_2 a T_2' vstupní, resp. výstupní teplotu chladicí kapaliny (viz obrázek 1), platí tedy $T_1 - T_1' = T_2' - T_2$. Z této rovnice ovšem plyne, že $T_1 - T_2' = T_1' - T_2$, tj. rozdíl teplot obou kapalin na jednom konci chladiče je stejný jako na druhém konci. Tuto úvahu, kterou jsme provedli pro celý chladič, je ovšem možné provést i pro libovolnou část chladiče. Proto je rozdíl teplot obou kapalin stejný nejen na obou koncích chladiče, ale i po celé jeho délce. Označme tento rozdíl jako h .

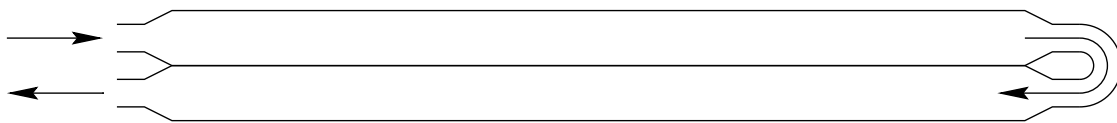
Dále je zřejmé, že teplotní spád¹ každé z obou látek je přímo úměrný rozdílu h teplot kapalin v daném místě (rychlost předávání tepla je vždy úměrná teplotnímu rozdílu). A protože je tento rozdíl stejný po celé délce chladiče, bude zřejmě teplota v obou kapalinách lineární funkcí vzdálenosti od konce chladiče.

Je-li nyní chladič velmi dlouhý, musí být teplotní spád v obou látkách velmi malý, protože na celé délce chladiče činí teplotní rozdíl $T_1 - T_1'$, popřípadě $T_2 - T_2'$. To znamená, že velmi malé bude i h , tedy u velmi dlouhého chladiče budou mít chlazená i chladicí látka v daném místě chladiče téměř stejnou teplotu. To ovšem znamená, že chlazená kapalina bude z chladiče vystupovat ochlazená téměř na teplotu chladicí látky a naopak, chladicí látka se v chladiči ohřeje až skoro na vstupní teplotu chlazené látky. Dojde tedy k jakési výměně teplot obou látek.

Vidíme tedy, že u dlouhého chladiče je ochlazení při protisměrném způsobu dvakrát silnější než při stejnosměrném způsobu. Při něm se totiž chlazená látka ochladí téměř až na vstupní teplotu chladicí látky, zatímco při stejnosměrném způsobu se ochladí pouze na průměrnou teplotu obou látek. Porovnáme-li oba způsoby použití chladiče, je zřejmé, že mnohem výhodnější je protisměrný způsob. A skutečně, v průmyslu i v chemické laboratoři se téměř výhradně používá protisměrný způsob chlazení.

Na závěr si zkusme představit následující situaci (viz obrázek 2): velmi dlouhým chladičem necháme protékat dostatečně dlouho proti sobě stejná množství vody o různých teplotách. Jak jsme viděli, po jisté době se ustaví rovnováha, při níž bude $T_1' \approx T_2$ a $T_2' \approx T_1$. Jestliže nyní propojíme na konci výstup chlazené kapaliny a vstup chladicí kapaliny, nic významného se nestane, protože i předtím měla chladicí kapalina před vstupem

¹teplotní spád je rychlost změny teploty dané kapaliny podél chladiče, má tedy rozměr kelvin/metr a je vlastně derivací teploty podél x -ové souřadnice – viz obrázek 1



Obrázek 2: Propojení vstupu a výstupu chladiče

do chladiče teplotu téměř rovnou výstupní teplotě chlazené kapaliny. Nyní však máme fascinující situaci: do chladiče čerpáme horkou kapalinu, ta se pohybuje k pravému konci chladiče, cestou se ochlazuje až na teplotu T_2 , na konci se otočí, vrací se zpět, přitom se opět ohřívá, až se vrátí na začátek chladiče znovu horká. Kapalina se tedy jaksi bez námahy ochladila a zase ohřála. Samozřejmě nastanou určité ztráty, které by časem vedly k tomu, že by teplota v celém chladiči byla stejná a rovna T_1 . Proto k tomu, aby zmíněný proces probíhal neustále, bude třeba na konci chladiče vodu nepatrně ochlazovat. Pokud bude $T_2 > T_1$, můžeme uvedený postup použít naopak na krátkodobé ohřátí kapaliny na vysokou teplotu s minimálními energetickými nároky. Toho se využívá například při výrobě trvanlivého UHT mléka. Jinou aplikaci uvedeného principu nacházíme v přírodě: mnozí vodní ptáci žijící v chladných mořích (např. tučňáci) nebo i kytovci mají v končetinách jakési tepelné výměníky, ve kterých se žíly a tepny vzájemně těsně obmykají. Například u ptáků se teplá krev o teplotě kolem 40°C přitékající ze srdce ochlazuje od chladné krve vracející se z končetiny na teplotu pouhých několika stupňů nad nulou (tato teplota postačuje na výživu blanité nohy ptáka). Ochlazená krev neodevzdá vodě tolik tepla, jako kdyby byla teplá, takže tepelné ztráty se radikálně zmenší. Studená krev vracející se z nohy se pak opět ohřeje od krve jdoucí ze srdce do nohy, takže do srdce znovu přichází teplá krev.

Řešení úlohy č. 3 – Mizení bublin

Je jasné, že když bublina plave na hladině, je v ní plyn. Jinak by ji totiž okolní atmosférický tlak okamžitě zmáčkl do nulového objemu. Dále je jasné, že postupem času plynu ubývá, protože se bublina zmenšuje. Plyn tedy musí z bubliny odcházet někam mimo bublinu. Ale kam a kudy odchází? Pokud by v blance mezi plynem v bublině a okolním vzduchem byla malá dírka, bublina by ihned praskla. Dírkou v bublině to tedy být nemůže. Zbývá tedy jediná možnost – plyn prochází přes rozhraní plyn-voda. Aby mohl nějaký plyn takto procházet, musí být velmi dobře rozpustný ve vodě, což právě oxid uhličitý je. Plyn, původně uzavřený v bublině, se tedy rozpouští ve vodě ohraničující bublinu. Z toho, že se bubliny stoupající ze dna zvětšují, lze ale naopak usoudit, že plyn má snahu přecházet z vodního roztoku do volného (plynného) stavu. Rozdíl mezi bublinou stoupající k hladině a bublinou plovoucí na hladině je však v tom, že plovoucí bublina je shora obklopena vzduchem, zatímco stoupající bublina je obklopena jen vodou. Tenká blanka mezi plynem v bublině a okolním vzduchem je tedy zřejmě rozhodující pro únik plynu. Uvažujme, co se v této blance děje. Z jedné strany do ní proniká oxid uhličitý, který se v ní rozpouští. Protože je blanka velmi tenká, dostane se vodný roztok oxidu uhličitého (tj. kyselina uhličitá) difuzí

rychle na opačnou stranu bubliny, která hraničí se vzduchem. Ve vzduchu je koncentrace oxidu uhličitého malá, proto se rozpuštěný plyn začne uvolňovat do vzduchu a uvolní tak místo dalšímu plynu, který může z bubliny pronikat do blanky. Celkově shrnuto, dochází k tomuto třístupňovému ději:



Takto tedy dochází ke zmenšování bubin. Pro zmenšování je rozhodující, aby byl plyn rozpustný ve vodě. Pokud by byl v bublinách například vzduch, bubliny by se nezmenšovaly. Jiným vhodným plynem je například amoniak NH_3 , který je ve vodě extrémně dobře rozpustný (v litru vody se bez problému rozpustí 500 litrů amoniaku).

Řešení úlohy č. 4 – Podchlazená voda

Je známo, že při mrznutí odevzdává voda svému okolí určité teplo – tzv. skupenské teplo tání. To je zřejmé už z toho, že například voda ve kbelíku postaveném na desetistupňový mráz nezmrzne okamžitě po dosažení teploty 0°C , ale trvá to ještě nějakou dobu – právě takovou, než odevzdá okolnímu vzduchu zmíněné teplo.

Skupenské teplo se samozřejmě uvolňuje i při mrznutí podchlazené vody. Protože je ale voda podchlazená, bude se tímto teplem ohřívat, dokud nedosáhne teploty 0°C , tj. teploty rovnováhy směsi vody a ledu. V tomto okamžiku se zastaví „rychlé“ mrznutí trvající několik sekund. (Pokud vodu necháme nadále na mrazu, bude samozřejmě pokračovat „pomalé“ mrznutí, jak je obvyklé.)

Z toho, co bylo řečeno, je již celkem jasné, jak zjistit, jaká část vody zmrzne. Teplo, které voda odevzdala okolí při svém podchlazování, musí být rovno skupenskému teplu uvolněnému při mrznutí ledu. Byla-li voda původně podchlazená na teplotu $-t$, odevzdala svému okolí teplo $Q_1 = mct$, kde m je hmotnost vody a c její měrná tepelná kapacita. Na druhou stranu, označíme-li p relativní část vody, která zmrzne, a l měrné skupenské teplo tání ledu, je uvolněné skupenské teplo rovno $Q_2 = pml$. Z rovnosti obou tepel $Q_1 = Q_2$ pak dostáváme

$$p = \frac{ct}{l}.$$

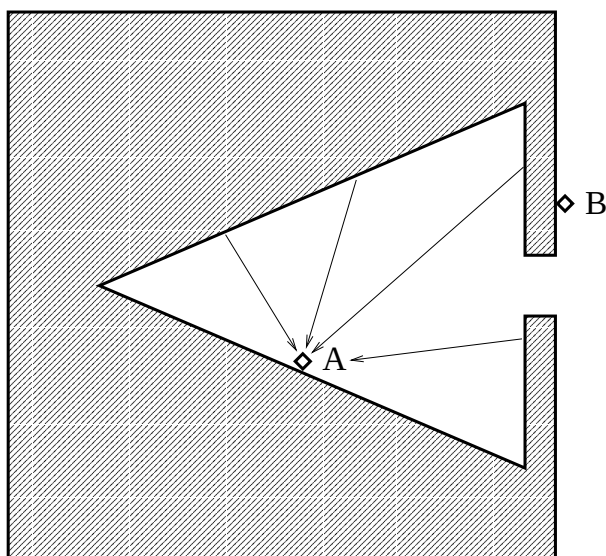
Pro vodu podchlazenou na -5°C je $t = 5^\circ\text{C}$ a $p = ???$. To znamená, že byla-li voda původně ochlazená na -5°C , přemění se ??? procent její hmotnosti na led.

Řešení prémiové úlohy – Záření světlych a tmavých těles

Dopadá-li na povrch našeho tělesa světlo z okolí, odrazí jeho povrch část tohoto světla i do našeho oka a my vnímáme těleso jako více či méně světlé, tj. nikoli černé. Světlo, které dopadá z okolí do dutiny vyhloubené v tělese, se ale naproti tomu mnohonásobnými odrazy uvnitř zeslabí natolik, že z dutiny do našeho oka přichází pouze nepatrný zlomek tohoto

světla. Proto se nám dutina jeví tmavá, téměř černá, a tedy i temnější než povrch tělesa. Tato situace nastává, pokud ve světle vycházejícím z tělesa převažuje odražená složka nad složkou vzniklou vlastním zářením. Pokud ale těleso zahřejeme natolik, že začne převažovat vlastní záření, situace se zcela změní.

Uvažujme tedy, co se stane, zahřejeme-li naše těleso na několik set stupňů Celsia a umístíme-li je do tmavé místnosti. Tehdy na jeho povrch nedopadá žádné světlo z okolí, proto veškeré světlo z povrchu tělesa vycházející pochází z vlastního vyzařování tělesa. Jak vypadá situace v dutině? Protože jsme předpokládali, teplota stěn dutiny je stejná jako teplota povrchu tělesa mimo dutinu, bude vlastní vyzařování stěn dutiny stejně silné jako vyzařování povrchu tělesa. Na rozdíl od povrchu tělesa, který není zvenčí osvětlen, je však každá ploška stěny dutiny osvětlena světlem vycházejícím z protější stěny dutiny (viz obr. 3). Část tohoto světla se odrazí, takže celkově je světlo vycházející ze stěny dutiny právě o toto odražené světlo silnější než světlo vycházející z povrchu tělesa. Proto se nám i dutina v tomto případě jeví jasnější (světlejší) než povrch tělesa.



Obrázek 3: Na rozdíl od povrchu tělesa (bod B) je každý element stěny dutiny (bod A) osvětlen zářícími okolními stěnami. Protože se část tohoto dopadajícího světla odrazí, vychází z bodu A více světla než z bodu B a dutina se nám tedy jeví jasnější než povrch.

K velice zajímavým výsledkům termodynamiky patří, že uvedené chování dutiny a povrchu tělesa lze zobecnit. To znamená, že pokud máme dvě tělesa (označme je 1 a 2) a těleso 1 je za normálních podmínek tmavší než těleso 2, bude po zahřátí na vysokou teplotu těleso 1 zářit více než těleso 2 (v našem případě odpovídá tělesu 1 dutina). Tato skutečnost je zcela obecná a nezávisí např. na chemickém složení obou těles. Těleso, které neodráží žádné světlo z toho, co na ně dopadá, nazýváme dokonale černým tělesem².

²V běžném životě černým tělesem naopak rozumíme těleso, ze kterého nevychází žádné světlo. Rozdíl mezi oběma významy slova „černý“ není zanedbatelný. Tak například platnost přísloví „Potmě černá kočka

Z toho, co bylo řečeno, je zřejmé, že dokonale černé těleso vydává po zahřátí na vysokou teplotu více světla než jiná, ne zcela černá tělesa. S tím souvisí i definice kandely jako svítivosti určité plochy černého tělesa jisté teploty.

černá“ je vázána na běžnou, nikoli fyzikální definici slova černý.