

Termodynamika kolem nás

Vypařování, var, skupenské teplo

K fázovému přechodu, kdy z vody vzniká vodní pára nebo naopak, nedochází jen při teplotě 100 stupňů Celsia, ale při jakékoli teplotě. Nechám-li na šňůře mokré prádlo, po čase je suché, protože kapalná voda v něm se proměnila v páru.

Představme si vodu a nad ní vzduch, v němž je spolu s dusíkem, kyslíkem atd. obsažena i vodní pára. Molekuly se ve vodě pohybují rychlým chaotickým pohybem a podobně se pohybují molekuly páry ve vzduchu. Občas se stane, že některá molekula se uvolní z kapaliny do plynného skupenství a občas naopak některá z plynného skupenství narazí do kapalně vody a uvízne tam. Pokud jsou události prvního typu častější než druhého, voda se vypařuje. Pokud je tomu naopak, říkáme, že pára kondenzuje. Pokud nastávají oba typy událostí statisticky stejně často, je kapalná voda v rovnováze se svojí párou a mluvíme o syté páře.

Při každé teplotě existuje určitá koncentrace (hustota) vodní páry, s níž je kapalná voda v rovnováze. Tehdy kapalně vody ani páry neubývá ani nepřibývá.

Relativní vlhkost vzduchu udává, kolik procent z hustoty syté páry má pára, která je aktuálně ve vzduchu. Při 100%-ní vlhkosti je tedy ve vzduchu sytá pára, více se jí při této teplotě do vzduchu „nevejde“. Výjimkou je přesycená (přechlazená) pára, o níž bude řeč níže.

Vypařování a kondenzace tedy může nastávat při všech teplotách. Přitom ale říkáme, že voda vře při teplotě 100 °C. Čím je tato teplota je význačná? Tím, že při ní dosahuje tlak syté páry tlaku atmosférického. Proto má pára při 100 °C už dostatečný tlak na to, aby odtlačila okolní vzduch a expandovala do něj. To se projevuje jako var, kdy vznikají např. u dna hrnce na plotně bubliny páry. Při nižší teplotě by nevznikly, protože okolní vzduch by vznikající bublinky ihned zatlačil zpět (donutil by je zkolabovat). Při 100 °C má sytá pára hustotu asi 0.6 kg/m³.

Čím vyšší je teplota, tím vyšší je tlak syté páry a naopak. Proto voda ve vysokých horách vře při výrazně nižší teplotě než 100 °C. Zde je tabulka tlaku syté páry při různých teplotách:

teplota (°C)	0.01	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	140
tlak (bar)	0.006	0.012	0.023	0.042	0.073	0.124	0.199	0.312	0.474	0.701	1.0	2.0	3.6

To, jak přesně se mění teplota fázového přechodu (např. varu) s tlakem, udává tzv. Clausius-Clapeyronova rovnice:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(V_{\text{plyn}} - V_{\text{kap}})}{l}$$

Zde l , T , V_{plyn} a V_{kap} jsou po řadě měrné teplo fázového přechodu, termodynamická teplota (tj. teplota ve stupních Celsia + 273.15) a měrné objemy plynu a kapaliny (objem 1 kg látky, tedy převrácená hodnota hustoty).

Křivka fázové rovnováhy končí tzv. kritickým bodem, kdy přestává existovat rozdíl mezi kapalinou a její párou. Pro vodu je kritická teplota 384.15 °C a kritický tlak asi 220 bar. Velmi pěkná videa ukazující chování oxidu uhličitého v blízkosti kritického bodu najdeme na youtube, např. <https://www.youtube.com/watch?v=GEr3NxsPTOA>

K tomu, aby se přeměnila kapalina na páru, je třeba dodat určité teplo – skupenské teplo vypařování. Pokud vylezeme z vany, je nám zima, protože tělo musí dodávat teplo vodě, která

nás pokrývá, aby se mohla vypařovat. Nebo se to dá říci i jinak: vodu na našem těle přednostně opouštějí ty molekuly vody, které mají větší energii, a ty méně energetické zůstávají. Tím se zbylá voda ochlazuje, od ní naše tělo a proto je nám zima.

Změna vnitřní energie při vyvření vody

O kolik se zvětší vnitřní energie vody při přeměně jednoho kilogramu kapalně vody v páru při 100°C ? Měrné skupenské teplo vypařování je 2.25 MJ/kg , proto by se zdálo, že je to právě 2.25 MJ . Ve skutečnosti ale o méně. Část dodaného tepla se totiž použije na práci, kterou voda vykoná při odtlačování okolního vzduchu. Tato práce je rovna součinu atmosférického tlaku (asi 10^5 Pa) objemu 1 kg páry při 100°C (asi 1.7 m^3), tedy 0.17 MJ . Přírůstek vnitřní energie tedy bude jen $2.25 - 0.17 = 2.08 \text{ MJ}$.

Pokus s pivní plechovkou

V plechovce od piva je trocha vody. Zahříváme ji nad plamenem, necháme vodu chvíli vřít, pak plechovku ponoříme otvorem do kbelíku s vodou. Plechovka se zdrcne. Co se stalo? Vodní pára v plechovce se prudce ochladila o vodu v kbelu, zkondenzovala, tím v plechovce klesl tlak a atmosférický tlak ji rozmačkal. Pokus lze provádět např. i s velkým barelem, je to pak velmi působivé.



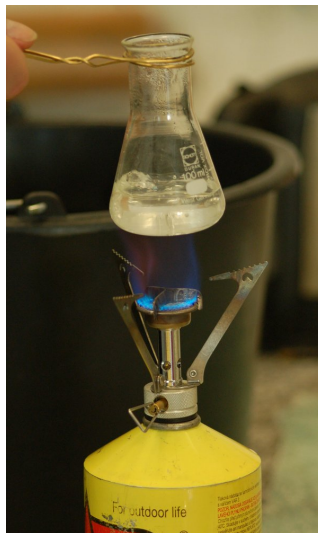
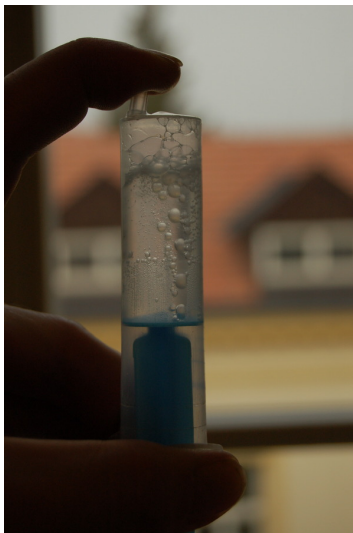
Obrázek 1: Pokus s pivní plechovkou.

Var vody ve stříkačce

Do injekční stříkačky (např. 20 ml) nabereme asi polovinu vody tak, abychom přitom nenabrali vzduch. Ucpeme otvor (např. nasliněným prstem) a píst vysuneme ještě více (jde to těžko kvůli atmosférickému tlaku). Vidíme, že voda začíná vřít, přestože je studená, viz obr. 2 a). To proto, že při sníženém tlaku je teplota varu nižší. Někdy plyn, který se uvolňuje, je spíše rozpuštěný vzduch než voda, proto je lepší pokus dělat s čerstvě převařenou vodou.

Voda přivedená k varu studenou vodou

Vaříme vodu v baňce viz obr. 2 vpravo. Baňku odstavíme z ohně a zacpeme zátkou. Jestliže ji polijeme vroucí vodou, voda v baňce nevře. Polijeme-li ji studenou vodou, vřít začne. Proč?



Obrázek 2: Var vody ve stříkačce a var vody v baňce.

Ochlazením páry došlo k její kondenzaci, tím klesl tlak v baňce a voda začala opět vřít, přestože již měla nižší teplotu než $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vodní kladívko

Je to U-trubice částečně naplněná vodou a na obou koncích zazátkovaná, z níž byl odstraněn vzduch a zbylý prostor tedy zabírá sytá vodní pára při poměrně malém tlaku (oproti atmosférickému). Pára velmi ochotně mění svůj objem, protože snadno vzniká z vody nebo naopak kondenzuje, proto se vodní těleso v trubici překvapivě snadno posouvá, při nárazu na zátku se velmi rychle zastaví a vydá klepavý zvuk.

K něčemu podobnému dochází u rychle se pohybujících těles ve vodě. Tak například na zadní hraně lodního šroubu, který při svém pohybu „prořízne“ vodu, se vytvoří místa se silně sníženým tlakem, v podstatě vakuum. Díky tomu voda v těchto místech začne vřít a vytvářejí se bublinky páry. Při opětovném nárůstu tlaku tyto bublinky velice rychle kolabují, zanikají a voda plnící ze všech stran bublinku se „srazí“. Tím vzniknou velmi silné tlakové rázy, které mohou vyvolat erozi lodního šroubu. Tento jev se nazývá kavitace. V Technickém muzeu v Brně (v přízemí) jsou krásné ukázky šroubů postižených kavitací.

Zamlžená láhev

PET láhev, ve které je trocha lihu nebo vody, natlakujeme pumpičkou na kolo. Když na láhev sáhneme, cítíme, jak je teplá, protože při adiabatickém stlačování vzduchu došlo k jeho zahřátí. Chvilí počkáme, až láhev opět vychladne, a poté tlak uvolníme odšroubováním zátky. Dojde k opačnému ději, vzduch expanduje, tím se ochladí, páry uvnitř láhve se přesytí a částečně zkondenzují do drobných kapiček mlhy, viz obr. 3 vlevo.

Stirlingův motor

Stirlingův motor je pozoruhodné zařízení, které dokáže tepelnou energii částečně měnit na mechanickou práci. Hlavní části tvoří přeháněcí pístek a pracovní membrána. Motor umístíme



Obrázek 3: Zamlžená láhev a Stirlingův motor.

na nádobu (např. hrnek) s horkou vodou, viz obr. 3 vpravo. Přeháněcí pístek (v našem případě z molitanu) střídavě přehání vzduch do horní a dolní části nádoby. Díky tomu se vzduch střídavě ohřívá od horké páry z hrnku a ochlazuje od horního červeného plechu, čímž se střídavě stoupá a klesá jeho tlak. Vzduch tak tlačí na pracovní membránku s měnící se silou, takže po určitou chvíli je membránka vytlačována ven z válce (když má vzduch uvnitř větší tlak než okolní atmosféra) a chvíli je do něj vtlačována (když má vzduch uvnitř menší tlak než okolní atmosféra). Pohyb membránky se převádí na pohyb hřídele s vrtulkou a rovněž se jím pohání přeháněcí pístek.

Karteziánek

Karteziánka jsme si v Zajímavé fyzice představili ve formě injekční stříkačky, která je zatížena šroubem a obsahuje trochu vzduchu tak, aby ve vodě plovla, viz obr. 4 vlevo. Jestliže nyní láhev stlačíme, karteziánek klesá ke dnu, viz obr. 4 vpravo. Jestliže stlačování uvolníme, karteziánek opět stoupá. Proč?

Tím, že jsme v láhvi zvýšili tlak, stlačil se i vzduch v karteziánkovi. Tento vzduch zmenšil objem a do karteziánky se dostalo trochu více vody. Tím se zvýšila jeho hmotnost a hydrostatická vztlaková síla jej už nedokázala nadnášet. Proto klesl ke dnu.

Pokud bychom udělali tento pokus v hodně vysoké nádobě, mohlo by se stát, že by se po uvolnění tlaku karteziánek ze dna již nezvedl. To proto, že u dna by byl vzduch stlačen hydrostatickým tlakem vody. Bylo by pak potřeba vytvořit podtlak, aby se karteziánek ze dna zvedl.

Nenasytý ptáček

Skleněná baňka ve tvaru ptáčka spočívá na dvou podpěrách, viz obr. 5. Ptáčka namočíme hlavičkou do nádobky s vodou. Ptáček se napřímí, pak se kýve, postupně se sklání víc a více a pak se znovu „napije“. Děj se opakuje, dokud nevyschne voda v nádobce. Je to vlastně téměř „věčný motor“, který bere energii zdánlivě z ničeho.

Jaké je vysvětlení tohoto pozoruhodného chování ptáčka? Uvnitř ptáčka je éter nebo jiná snadno těkavá kapalina spolu se svou párou. Když ptáčkovu namočíme hlavičku do vody, hlavička



Obrázek 4: Karteziánek v lahvi před stlačením (vlevo) a po stlačení (vpravo).



Obrázek 5: Nenasytný ptáček ve volném prostoru a pod navlhčeným poklopem. Ve druhém případě velmi rychle přestane zobat, protože se voda přestane vypařovat.

se ochladí díky vypařování vody nasáklé do porézní látky hlavičku pokrývající. Tlak syté páry éteru v ní proto klesne. Tlak páry v zadečku, který má stále původní teplotu, je tedy nyní větší než tlak v hlavičce, a žene páru nahoru do hlavičky. Tím se posouvá těžiště nahoru, až se nakonec ptáček převáží a „napije“. Tím se ale vynoří spodní konec trubičky z kapaliny, která je v zadečku, kapalina z hlavičky steče dolů a děj se opakuje. Jde vlastně o tepelný stroj, který odebírá teplo z okolí v místě zadečku a většinu tohoto tepla vrací okolí v místě hlavičky. Zbytek tepla je přeměněn na práci.

Pokud bychom dali ptáčka do prostředí, ve kterém by byl s okolím v rovnováze, (např. tak, že bychom jej přiklopili navlhčeným kyblíkem, viz obr. 5 vpravo), přestal by pracovat. Po chvíli by se totiž pod zvonem vytvořilo prostředí se 100% relativní vlhkostí, voda by se z hlavičky ptáčka dále nevypařovala a celý ptáček by byl izotermický (měl by všude stejnou teplotu), díky čemuž by nemohl přeměňovat teplo na práci. V našem pokusu s navlhčeným kyblíkem k tomu došlo už asi po 10 sekundách.

Nehořlavý papír

V tomto pokusu je list obyčejného papíru přímo olizován plamenem, přesto ale nezačne hořet ani uhelnatět. Jak je to možné? Papír těsně obepíná mosazný válec (viz obr. 6), takže je s ním v dobrém tepelném kontaktu. Válec teplo, které papír získal od plamene, rychle odvádí, takže se papír nezahřeje na zápalnou teplotu a proto nehoří. Pokud bychom však pokus prováděli příliš dlouho, mohlo by se stát, že by papír vzplanul, protože by se postupně rozpálil i válec. Tento efekt zmírní držení válce šikmo (viz obr. 6), kdy je válec ochlazován vzduchem proudícím uvnitř válce díky komínovému efektu.

Podobně je možné vařit vodu v papírovém talíři, viz téma Zajímavé fyziky „Fyzika v kuchyni“.



Obrázek 6: Nehořlavý papír.

Anomálie vody

Na rozdíl od většiny kapalin voda při mrznutí zvětšuje svůj objem. Kromě toho má největší objem při 4 stupních, tedy v intervalu od 0 do 4 stupňů se při ohřívání smršťuje. Tyto dvě vlastnosti jsou tzv. anomálie vody, které mají dalekosáhlé důsledky.

Nebýt anomálií, voda v jezerech a rybnících by poměrně rychle zmrzla v celém objemu. Voda ochlazená studeným vzduchem by totiž klesala na dno, byla by nahrazena novou, teplejší vodou zespodu, až by se všechna voda ochladila na teplotu mrznutí. Pak by na hladině začal vznikat led, který by klesal ke dnu a postupně by vyplnil celé jezero.

Díky anomáliím je ale situace jiná. Principem popsaným výše se voda v jezeře ochladí na 4 °C. Od okolního vzduchu se povrchová vrstva vody ochladí až k teplotě 0 °C, ale tentokrát už neklesne na dno, protože voda o teplotě kolem 4 °C, která je níže, je těžší. Díky tomu se voda nepromíchává a ochlazuje se pouze vedením tepla, které je ve vodě nepříliš dobré. Když navíc na hladině vznikne led, také neklesá, protože je ještě lehčí než voda o teplotě 0 °C, která je kolem něj. Led proto vytvoří jen nepříliš silnou vrstvu (dokonce i v Arktidě silnou nanejvýš několik metrů). Díky tomu mohou ve vodě přežít ryby a jiní živočichové.

Anomálie mají důsledky i v geologii, například pro erozi skal a půdy. Voda zateče do mikropár ve skále, pak přijde mráz, voda zmrzne, led má větší objem než původní voda a skálu roztrhá. Podobně se rozpadnou velké hroudy po hluboké orbě, které v zimě zmrznou.



Obrázek 7: Struna zatížená závažím projde kostkou ledu, která je poté opět neporušená. Vlivem zatížení totiž led taje, přestože má teplotu o něco nižší než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a vzniklá voda nad strunou opět zmrzne.

Další důsledek je to, že při zvyšování tlaku klesá teplota tání ledu (tuhnutí vody). Je-li teplota kolem nuly, dobře se staví sněhuláci a dělají sněhové koule. Je-li naopak velký mráz, jde to špatně. Stlačíme-li totiž sníh, zvyšujeme tlak mezi sněhovými vločkami a to poněkud sníží teplotu tání. Sníh proto v místě styku vloček nataje, vzniklá voda se rozlije po okolí a opět zmrzne, čímž pevně spojí sousední vločky. Pokud je mráz, tlak na rozpuštění vody nestačí a sníh zůstává sypký. Z podobného důvodu se slévají sněhové vločky v ledovci, až vytvoří kompaktní kus ledu s minimem vzduchu.

Velmi pěkný pokus je s proříznutím ledu strunou, kdy voda nad strunou zase zamrzá, proto je nakonec kus ledu opět pevný, viz obr. 7.

To, jak se mění teplota fázového přechodu s tlakem, udává tzv. Clausius-Clapeyronova rovnice:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(V_{\text{plyn}} - T_{\text{kap}})}{l}$$

Osmóza

Jde o proces vyrovnávání koncentrací soli na dvou stranách polopropustné membrány, jestliže jí může pronikat voda, ale ne sůl. To je častá situace např. v buňkách.

Intuitivní a názorné vysvětlení tohoto jevu: pokud je na obou stranách membrány jen voda, molekuly difundují tam a zpět, oba toky se statisticky vyrovnávají a nic se neděje. Pokud je ale na jedné straně roztok soli, je zde vody méně, protože část prostoru zabírá sůl. Proto sem z druhé strany jde více vody než zpět. Vznikne tak celkový tok směrem z vody do roztoku. K obnovení rovnováhy dojde při rozdílu tlaků rovnému osmotickému tlaku, kdy přechází oběma směry stejně molekul vody. Ze strany roztoku teď přechází víc než předtím, protože je zde větší tlak – molekuly více narážejí na membránu. Osmotický tlak je takový přetlak, kdy už je voda v rovnováze s roztokem.

Osmóza hraje velmi důležitou roli při buněčných procesech, protože buněčná stěna je právě



Obrázek 8: Nasypeme-li do důlku v brambore sůl, díky osmóze se důlek po pár desítkách minut naplní vodou, která proniká buněčnými membránami z okolních buněk.

takováto polopropustná membrána.

Pokus s nasypanou solí v důlku v brambore – po nějaké době se v důlku objeví jezírko slané vody, protože voda byla vysáta z brambory skrze buněčné stěny, viz obr. 8.

Přísátou pijavici je dobré posolit, pak se rychle pustí. Sůl z ní totiž osmoticky vysává vodu, což je jí krajně nepříjemné.

Červené krvinky popraskají, pokud se ke kapce krve přidá čistá voda, protože ji osmoticky nasají. Pokud k nim přidáme slanou vodu, smrští se a vytvoří jakési „hvězdičky“. I proto je tak důležité, aby tělo udržovalo stálou koncentraci soli v krvi a ve tkáních. Fyziologický roztok je v osmotické rovnováze s většinou tkání.

Metastabilní stavy

Metastabilní stav nějaké látky je takový stav, při kterém je látka v jiném skupenství, než by při dané teplotě a tlaku měla být. Např. přehřátá voda má při atmosférickém tlaku vyšší teplotu než $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesto nevěre (mluvíme o přehřáté vodě), nebo má teplotu nižší než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a přesto nemrzne (mluvíme o přechlazené, popř. podchlazené vodě).

Například když ohříváme vodu v mikrovlnné troubě až k varu, může se stát, že má třeba $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ a ještě nevěre. Stačí pak ale např. otřes při vytahování vody z trouby a voda začne prudce vřít a může nám i vyprsknout do obličeje. Chemici dávají do baňky, v níž varí nějakou kapalinu, skleněné kuličky, aby var probíhal poklidně a nikoli bouřlivě a nevyzpytatelně.

S podchlazenou vodou můžeme udělat velmi pěkný pokus: Čistou vodu necháme v PET lahvi stát venku v mírném mrazu (ideálně kolem $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pokud máme štěstí, i po několika hodinách je voda stále kapalná a nemrzne, přestože se ochladila na teplotu okolí. Když potom láhev otevřeme a hodíme do ní malý kousek ledu nebo sněhovou vločku, voda v láhvi začne mrznout, tvoříc přitom nádherné ledové monokrystaly ve tvaru destiček o tloušťce zlomku milimetru a ploše mnoha centimetrů čtverečních. Krystaly rostou od zmíněného kousku ledu a postupně vyplní celou láhev. Mezi destičkami však zůstává poměrně značné množství kapalné vody. Nevšedním zážitkem je pak pozorovat růst krystalů o rychlosti několik milimetrů za sekundu. Jiná možnost, jak vodu přivést ke zmrznutí, je lahvi silně zatřást, popř. ji hodit na zem. V takovém případě je zmrznutí okamžité, v lahvi se vytvoří ledová tříšť. K pokusu se

nejlépe hodí balená voda v originálních PET lahvích. Je dobré, když láhev stojí, nikoli leží.

Voda při tomto procesu ale nezmrzne všechna. To je způsobeno tím, že voda při mrznutí odevzdává vodu svému okolí 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 podchlazena, bude se tímto teplem ohřívat, dokud nedosáhne teploty 0°C , tj. teploty rovnováhy směsi vody a ledu. V tomto okamžiku se „rychlé“ mrznutí zastaví. Lze spočítat, kolik hmotnostních procent vody zmrzne, jestliže před vhozením sněhové vločky měla teplotu -5°C a po skončení růstu krystalů má teplotu 0°C . Byla-li voda původně podchlazena 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 $p = 0,06$. To znamená, že byla-li voda původně ochlazená na -5°C , přemění se zmrzne asi 6 procent její hmotnosti v led, zbytek zůstane tekutý.

Na podobném principu fungují i plastové sáčky naplněné kapalinou, uvnitř kterých je plíšek a které se prodávají v outdoorových obchodech. Když plíškem „lupneme“, kapalina ztuhne a sáček se zahřeje – opět díky skupenskému teplu tuhnutí.

Vysvětlit skutečnost, že voda vydrží v kapalném skupenství i nad bodem varu, není zcela jednoduché. Hlavní roli zde hraje povrchové napětí – se vznikem první bublinky páry je spojen vznik rozhraní voda – pára a tedy i povrchová energie. Povrchové napětí se snaží zabránit vzniku takového rozhraní je energeticky nevýhodné, aby vznikly malé bublinky. Pokud jsou ale v kapalině nebo na stěně nádoby nějaké mechanické nečistoty, na nich bublinky vzniknou mnohem snáze. Proto je pro vznik metastabilního stavu nutná vysoká čistota kapaliny, a to nikoli ve smyslu absence rozpuštěných látek, ale absence mechanických nečistot.

Podobně pro kondenzaci přechlazené páry je nutná přítomnost tzv. kondenzačních jader. Dokud se v Londýně topilo uhlím, z nějž se uvolňuje částice kouře, byly tam často mlhy, protože na částicích pára kondenzovala. Od doby, kdy se topí zemním plynem, který popílek neprodukuje, jsou ale mlhy méně časté, protože chybějí kondenzační jádra.

Máme-li natlakovanou láhev koly (Kofola, Coca-cola apod.) a otevřeme ji, zasyčí to, ale kola z láhve nevyteče; rozpuštěný oxid uhličitý se jen pomalu uvolňuje u stěn ve formě bublin. Pokud budeme mít stejně natlakovanou láhev burčáku a otevřeme ji, vznikne gejzír. To proto, že na mechanických nečistotách v burčáku (hlavně kvasinky) začnou vznikat bublinky, kdežto v kole takové nečistoty nejsou a bubliny tedy vznikají jen neochotně.

Chladič

Představme si tunu vody o teplotě 0°C , kterou jsme pro snazší rozlišení nabarvili namodro a tunu vody o teplotě 100°C zbarvenou červeně. Je možné jen tím, že obě vody přivedeme do vzájemného tepelného kontaktu (ne nutně všechnu najednou, ale i po částech), ohřát modrou vodu na teplotu vyšší 50°C a červenou vodu naopak ochladit na teplotu nižší než 50°C ? Je to možné, použijeme-li protisměrný chladič, viz obr. 9. Pokud bychom vodu obou barev poslali chladičem stejným směrem, v nejlepším případě bychom dosáhli vyrovnání teplot. Pokud je ale pošleme proti sobě, mohou se teploty téměř vyměnit. To sice skoro odporuje zdravému rozumu a zdánlivě i 2. větě termodynamické, ale ve skutečnosti to žádným fyzikálním zákonům neodporuje.



Obrázek 9: Chladíč.

Ta podobným principu pracují tepelné výměníky hojně používané v průmyslu. Potřebujeme-li ohřát např. mléko na několik sekund na $135\text{ }^{\circ}\text{C}$, bylo by naprosto nevhodné ho ohřívat např. elektricky nebo plynem a poté opět zchlazovat např. tepelným čerpadlem („ledničkou“). Místo toho necháme mléko v tepelném výměníku ohřát od již ohřátého mléka, které tím naopak zchladíme.

Také nohy vodních ptáků nebo ploutve kytovců mají propletené tepny s žilami. Teplá krev ze srdce se nejprve ochladí od chladné krve vracející se z končetiny a když se pak sama vrací, znovu se ohřeje. Tak se minimalizují ztráty tepla; končetině samotné stačí k vyživování i chladná krev.

Na stejném principu pracuje i tzv. rekuperace u nízkoenergetických domů. Při větrání se chladný vzduch zvenčí ohřívá od teplého vzduchu zevnitř, který se naopak dostává ven. Podobně lze recyklovat i teplo z teplé odpadní vody (např. odtékající z pračky nebo sprchy).