

# Var studené vody

S. Sorger, G. Alterkawi\*

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1

sorgesar@fjfi.cvut.cz, \*Gadir14@seznam.cz

## Abstrakt

Původním cílem experimentu bylo vyrobit podtlakovou komoru a v ní přivést k varu studenou vodu. Experiment se po propůjčení vakuové kostky změnil v popis chování vody při postupném snižování tlaku.

## 1 Úvod

Je obecně známo, že bod varu (stejně jako bod tání) látky není závislý jen na teplotě, ale i na jejím tlaku. Toto se pokusíme v experimentu dokázat.

## 2 Teorie

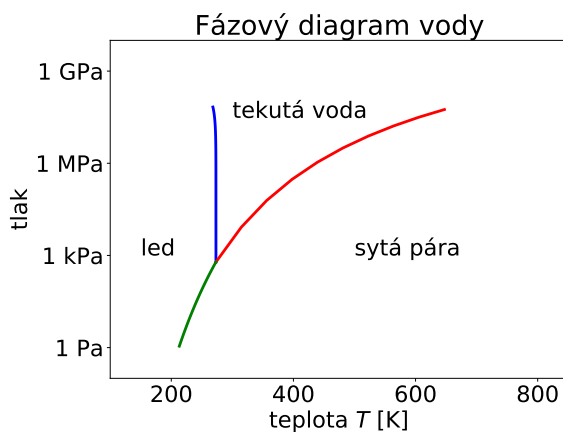
### 2.1 Vakuum

Za vakuum, nebo česky také vzduchoprázdno, se ve fyzice označuje prostor s velmi malou hustotou částic. Jeho atmosférický tlak se oproti 100 000 Pa v naší nadmořské výšce blíží nule.

V každodenním životě se s jeho využitím setkáme například ve vysavačích, u trvanlivě balených potravin, dále se využívá při destilaci ropy nebo v mikroskopech.

### 2.2 Fázové diagramy a bod varu

Fázové diagramy zachycují skupenství látek v závislosti na jejich tlaku a teplotě (říká se jim proto taky p-t diagramy). Díky aproximaci křivek z naměřených hodnot lze vyčíst i očekávané chování látek v těžko naměřitelných podmínkách.



Obr. 1: Fázový diagram vody

Na diagramu vody (obr. 1) můžeme vidět tři křivky: křivku tání (modrá), oddělující pevné skupenství od kapalného. Křivku vypařování (červená), která odděluje kapalné skupenství od syté páry a sublimační křivku (zelená), přes kterou voda přechází z pevného skupenství rovnou do plynného.

Pokles teploty vypařovací křivky, která přechází v křivku sublimační, s klesajícím tlakem je způsobena vlastnostmi varu. Var znamená vypařování látky v celém jejím objemu, ne jen na povrchu. Je tedy třeba, aby se v látce vytvořily bubliny páry. Ty se tvoří tehdy, když tlak uvnitř nich je stejně velký, jako vnější tlak kolem (většinou tedy nad) látkou. Čím nižší je tlak kolem kapaliny, tím snáze se bubliny vytváří i při nižších teplotách a je tedy možné dosáhnout v nich varu.

### 2.3 Skupenská tepla

Chceme-li změnit skupenství nějaké látky, musíme k tomu dané látce dodat či ubrat určité množství energie. Množství této energie lze vypočítat z rovnic o změně skupenství tepla.

Rovnice 1 a 3 popisují energii potřebnou pro vypaření (respektive roztání) látky hmotnosti  $m$  při změně teploty  $\Delta t = t_{koncová} - t_{počáteční}$ .

Rovnice 2 vyjadřuje energii pro pokles (či nárůst) teploty bez změny skupenství.

Konstanty  $m_c, l_v, l_t$  nazýváme měrná tepelná kapacita ( $m_c$ ) a měrné skupenské teplo vypařování ( $l_v$ ) respektive



Obr. 2: první verze pokusu

tání ( $l_t$ ). Tyto konstanty jsou pro danou látku charakteristické. Pro vodu platí  $c_v \doteq 4.8 \text{ KJ} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $l_v = 2\,510 \text{ KJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$ ,  $l_t = 334 \text{ KJ} \cdot \text{Kg}^{-1}$

$$Q_1 = mc_v(\Delta t) + ml_v \quad (1)$$

$$O_2 = mc_v(\Delta t) \quad (2)$$

$$O_3 = mc_v(\Delta t) + ml_t \quad (3)$$

### 3 Praktická část

#### 3.1 Příprava experimentu

Jak bylo zmíněno v abstraktu, původně jsme měly ambici sami vyrobit podtlakovou komorou. Idea byla otočit těsnění na pístu pumpičky na kolo, díky čemuž by místo vytlačování vzduchu, vzduch nasávala. To se sice povedlo, ale záhy jsme zjistily, že větší problém bude sestavit celý přístroj, jelikož je poměrně náročné nějakou nádobu vzduchotěsně izolovat. Kdyby se nám povedlo překonat tuto překážku, od úspěchu by nás stále dělilo vytvoření dostatečně nízkého tlaku pomocí pumpičky. Tento pokus byl tedy pouze slepou uličkou, na jejímž konci jsou rozbitá pumpička a zavařovací sklenice (obr. 2).

Rozhodly jsme se proto zvolit jiný postup s profesionálnější aparaturou - takzvanou vakuovou kostkou. Kostku je před experimentem potřeba řádně utěsnit, napojit na kompresor, který z ní bude vzduch vysávat, a měřicí přístroj. Dále je důležité nezapomenout připojit ventil, aby se po dokončení experimentu mohl tlak v kostce zase zvýšit. V opačném případě by mohlo dojít k poškození aparatury. Kostka připravená k provedení experimentu je kobrazena na obrázku 3.

#### 3.2 Otestování aparatury

Než jsme se pustily do experimentu s varem vody, bylo potřeba se ujistit, že se nám povedlo kostku správně utěsnit



Obr. 3: Vakuová kostka připravená k experimentu

a správně na ni napojit všechny součástky. Testovací pokus proto proběhl s balónkem, který se při snižování okolního tlaku - dle našich předpokladů - nafoukl. K tomu došlo z toho důvodu, že poměr tlaků v zavázaném balónku vzduchu jej obklopujícím se zvětšoval. Vzduch uvnitř balónku proto tlačil na jeho stěny a nutil ho se rozpínat.

### 3.3 Experiment

Samotný experiment proběhl z časových důvodů pouze dvakrát, ale v obou měření jsme nezaznamenaly žádný významný rozdíl. Vložily jsme nádobu s malým množstvím vody a vnořeným teploměrem do vakuové kostky, kterou jsme zavřely a začaly z ní vysávat vzduch. Bohužel jsme na zaznamenávání stavu vody a aktuální teploty a tlaku neměly nic lepšího, než manuální sledování a zapisování.

## 4 Výsledky měření

Při pozorování změny stavu vody jsme odečetly aktuální teplotu a tlak. Měření je tedy zatěžkáno poměrně velkou chybou, která by šla potlačit větším množstvím snímačů nebo automatizací měření. I tak se nám ale povedlo pozorovat, že při klesajícím tlaku voda začala nejprve vřít i při pokojové teplotě ( $21^{\circ}\text{C}$ ). Načež teplota začala klesat. Při poklesu teploty na přibližně  $15^{\circ}\text{C}$  a tlaku na přibližně setinu standardního atmosférického tlaku, kontinuální var vody, jak jej známe z kuchyňských hrnců, přestal. Dále bylo možné - za stále klesajícího tlaku i teploty - pozorovat občasné nárazové záchvěvy varu. Krátce po dosažení  $0^{\circ}\text{C}$  rázem zmrznul povrch kapaliny, od kterého postupně začal mrznout i zbývající objem. Z tabulky naměřených hodnot (1) jsme sestrojily do fázového diagramu orientační křivku, po které se voda pohybovala (obr. 4).

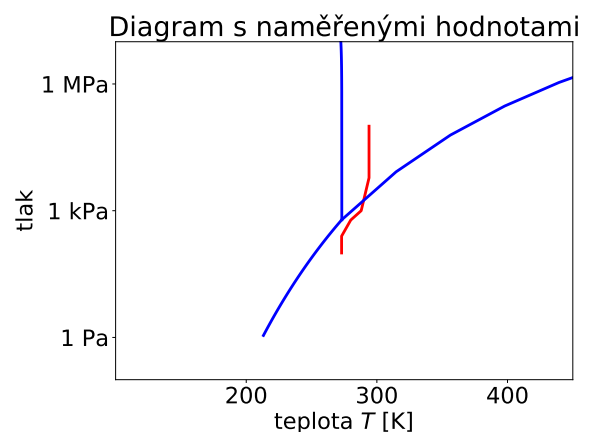
přibližná teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Přibližný tlak [ $\text{Pa}$ ]	Stav vody	komentář
21	100 000	Normální voda	
21	6 000	První bublinky	pokles teploty
15	1 000	Kontinuální var přestal	Pokračují občasné záchvěvy vody var připomínající
7	600	záchvěvy přestaly	klesání teploty pokračuje
0	250	Zmrznutí povrchu (rázem)	
0	100	mrznutí celé kapaliny	

Tab. 1: Tabulka naměřených hodnot

Díky snižování tlaku v kostce se voda na dostala do podmínek, za kterých má kapalné skupenství (2.2), došlo tedy k jejímu varu. Za komentář ovšem stojí pokles teploty a zmrznutí kapaliny.

Jak je popsáno v kapitole [Skupenská tepla](#), pro přeměnu skupenství je potřeba energie. Tím, že voda začala vřít, spotřebovala skupenskou energii, a to následně vedlo k odebrání tepla (energie) vodě - tedy ochlazení. Měrné skupenské teplo varu je mnohonásobně větší, než měrné skupenské teplo tání. Vypařování i malého množství vody proto ubere systému dostatek energie, pro pokles teploty i následné zamrznutí a další pokles teploty ledu. Pro výpočet finální teploty ledu by bylo třeba přesně znát hmotnost vypařené vody (protože úbytek energie je závislý na hmotnosti přeměněné látky - viz 1), což při tak malém množství vody je téměř nemožné zjistit.

Dopustily jsme se také chyby při volbě měřicího rozsahu teploměru. Námí zvolený přístroj neměřil teplotu nižší, než  $0^{\circ}\text{C}$ . Nevíme tedy, při jaké teplotě ledu experiment skončil. Tento fakt je i důvodem toho, proč se na grafu 4 červená křivka průběhu experimentu i v jeho závěru pohybuje v části syté páry a nepřekročí sublimační křivku.



Obr. 4: p-t diagram vody s naměřenými hodnotami

## 5 Shrnutí

Začátek experimentu probíhal dle našich předpokladů a voda opravdu začala vřít. Zprvu jsme ovšem byly překvapené, co se v experimentu dělo dál, ale po hlubším zamýšlení jsme dospěly k fyzikálnímu vysvětlení nastalého děje. Kdyby nám přesun energie a snížení teploty vody došel dřív, bývaly bychom jistě zvolily vhodnější teploměr. Při opětovném opakování pokusu by bylo nutné se zamyslet nad exaktnějším odečítáním teploty a tlaku.

## Poděkování

Velké poděkování patří ing. Vojtěchu Svobodovi, CSc. za zapůjčení aparatury, konzultaci, dohled nad experimentem a neustálé velké zapálení pro věc. Také Martinu Firešovi, který vložil nemálo energie do pomoci s pokusem o výrobu dostatečně kvalitní vakuové pumpičky, i když od začátku sám moc nevěřil tomu, že to v domácích podmínkách bude možné.

## Reference

- [1] The Editors of Encyclopaedia Britannica. *Vacuum*,  
<https://www.britannica.com/science/vacuum-physics>
- [2] S. Mašková, *Kráska fázových diagramů - jak je sestavit a číst*,  
[http://uchp.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/Kalsem\\_2017\\_Maskova.pdf](http://uchp.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/Kalsem_2017_Maskova.pdf)
- [3] J. Leitner, *Konstrukce a interpretace fázových diagramů*,  
[http://uchp.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/Leitner\\_KS2010.pdf](http://uchp.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/Leitner_KS2010.pdf)
- [4] Topinfo s.r.o., *Základy fyziky vlhkého vzduch přehledně a srozumitelně*,  
<https://www.estav.cz/cz/1311.zaklady-fyziky-vlhkeho-vzduchu-prehledne-a-srozumitelne>
- [5] *Kurz fyziky pro DS, kapitola 8.3, skupenská tepla. Praha: MFF UK, 2019*,  
[physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/molekul/8\\_3](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/8_3)
- [6] T. Mansoor, *i-python notebook reconstruction of the water phase diagram*,  
<http://marohn-public.site44.com/Marohn-20180418-005000-Phase-Diagram.html>