

# Fyzikální model sublimace ledu a jeho experimentální ověření

Alexander Groh, Anton Burchashkin

Fakulta Jaderná a fyzikálně inženýrská,

Břehová 7, 115 19 Praha 1

grohalex@fjfi.cvut.cz, burchant@fjfi.cvut.cz

## Abstrakt

Cílem našeho projektu bylo vytvořit fyzikální model sublimace ledu, pomocí kterého bychom byli schopni kvantitativně popsat rychlost sublimace. Dále jsme se věnovali jeho experimentálnímu ověření.

## 1 Úvod

Ve svém projektu jsme se zabývali sublimací ledu. Sublimace je děj, kdy se mění skupenství látky z pevného na plynné. Původně jsme se chtěli zabývat sublimací pevných látek obecně, zajímalo nás, zdali by bylo možné kvantitativně popsat sublimaci pevných látek v čase – časový úbytek hmotnosti, rychlost jejich sublimace. Protože v určité míře se vypařují všechny látky, chtěli jsme zjistit, jak rychle probíhá sublimace u látek, u kterých bychom intuitivně nesoudili, že se „vypařují“, ačkoliv se tak ve skutečnosti z principu děje.

Když jsme se začali blíže zajímat o tuto problematiku, zjistili jsme, že zjištění rychlosti sublimace obecné látky bude velmi obtížné. Rozhodli jsme se proto, že rychlost sublimace spočteme pro konkrétní látku a sice vodu, u které je také možné výsledek experimentálně ověřit. Nepodařilo se nám však najít vhodný vztah, který by popisoval tuto rychlost v závislosti na parametrech tlaku, teploty a povrchu. Vytvořili jsme tedy vlastní zjednodušený fyzikální model, který popisoval přesně to, co jsme chtěli.

V druhé části našeho projektu jsme naše výpočty ověřovali experimentem.

## 2 Teoretická část

Při vytváření našeho modelu jsme vycházeli z termodynamických vztahů jako je ekvipartiční teorém, maxwell-boltzmannova distribuce a další vztahy pro ideální plyn [1].

Princip našeho modelu vycházel z toho, že jsme schopní vypočítat jak velkou energii musíme dodat molekule vody, aby změnila své skupenství z pevného na plynné (sublimační teplo). Dále jsme předpokládali, že tuto energii dodá vodě molekula vzduchu. Pomocí statistické termodynamiky jsme byli schopni popsat pravděpodobnost (frekvenci) toho, jak často k takovému předání energie dojde.

Výsledný vztah vypadal takto:

$$N_{subl.} = f \cdot p \cdot S \cdot t$$

Kde  $N_{\text{subl.}}$  je rychlost sublimace (tj. počet vysublimovaných částic za jednotku času),  $f$  je frekvence srážek molekul vzduchu s povrchem ledu,  $f = \sqrt{\frac{3kT}{m_{0N_2}}}$ , zde  $k$  je bolzmannova konstanta,  $T$  je termodynamická teplota,  $m_{0N_2}$  je hmotnost molekuly dusíku,  $p_N$  je tlak dusíku (okolního vzduchu).

$P$  je koeficient pravděpodobnosti, zjištěný z maxwell-bolzmanny distribuce,  $S$  je plocha, ze které se led vypařuje a  $t$  je čas.

úplná podoba je tato:

$$N_{\text{subl.}} = \frac{\sqrt{\frac{3kT}{m_{0N_2}}}}{2p_N} \cdot S \cdot t \cdot 4\pi \int_{v_{\text{únik}}}^{\infty} \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/2kT} dv$$

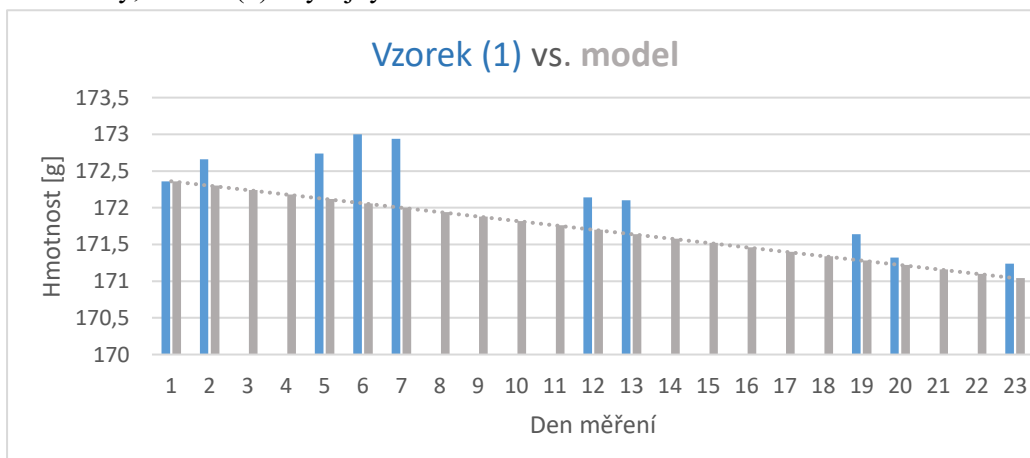
,kde  $v_{\text{únik}} = \sqrt{\frac{2Q_{0\text{subl.}}}{m_{0N_2}}}$ .  $m$  je hmotnost částice, v tomto případě molekuly dusíku.

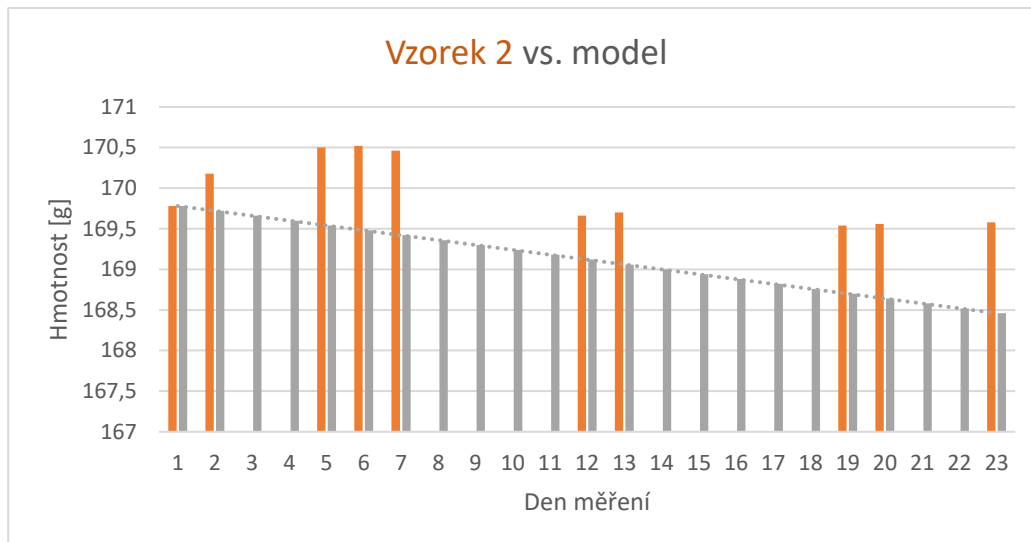
### 3 Praktická část

V experimentu jsme chtěli změřit rychlost sublimace ledu. Experiment jsme uspořádali díky vstřícnému postoji pana Svobody a osazenstva fyzikálních praktik v chladničce. Nechali jsme vodu v nádobě zmrznout, načež jsme měřili změnu hmotnosti nádoby, kterou jsme chtěli srovnat s výsledky našeho fyzikálního modelu. Data jsme získávali v průběhu dvou týdnů. Aby naše výsledky byli prokazatelnější, rozhodli jsme se, že budeme experiment dělat zároveň ve dvou nádobách, v jedné jsme led nalámali na menší kusy, aby se zvětšil povrch.

### 4 Shrnutí

Získali jsme následující data, která v grafu porovnáváme s našimi předpoklady. Vzorek (1) označuje led nalámaný, vzorek (2) obyčejný.





Je zřejmé, že byl experiment ovlivněn řadou nepřesností (otevíráním chladničky, kondenzací vody při vážení a mnohé další nedokonalosti uspořádání našeho měření), přesto jsme úbytek hmotnosti naměřili, a v obou vzorcích skutečně k úbytku hmotnosti prokazatelně došlo. Zpočátku jsme dokonce naměřili přírůstek hmotnosti, neboť se chladnička otevírala, a místnost byla používána, když jsme ale díky víkendu měli poněkud izolovanější prostředí, začali jsme měřit konečně data, která jsme očekávali. Jelikož si náš model, dělal nároky pouze na řádový popis rychlosti sublimace, nemá smysl komentovat konkrétní odchylku od našeho modelu, řádově to ovšem vypadá, že se shodují.

## Reference

- [1] Chang L. Tien a John H. Lienhardt. *Statistical Thermodynamics*  
<http://www.uh.edu/engines/StatisticalThermodynamics.pdf>
- [2] Edgar L. Andreas, *New estimates for the sublimation rate for ice on the Moon*, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103506003046>
- [3] *Maxwell–Boltzmann distribution*,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell–Boltzmann\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell–Boltzmann_distribution)