

Rayleigh–Bénard convection

Marek Fürst

4. 11. 2024

Obsah

Úvod

Náznak možností teoretického popisu

Tipy pro experimentální část

Motivace

Závěr

Zadání

- ▶ **Oficiální znění:** Uniformly and gently heat the bottom of a container containing a suspension of powder in oil (e.g. mica powder in silicon oil), cell-like structures may form. Explain and investigate this phenomenon.
- ▶ **Český překlad:** Zahřejete-li rovnoměrně a jemně dno nádoby obsahující suspenzi prášku v oleji (např. prášek slídy v silikonovém oleji), mohou se objevit buňkovité struktury. Vysvětlete a prozkoumejte tento jev.

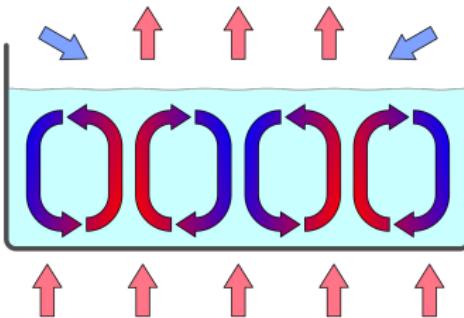


Obrázek: Takhle by to mělo vypadat, zdroj obrázku:

<https://www.youtube.com/watch?v=gSTNxS96fRg>

Co se v úloze vůbec děje?

- ▶ Dno nádoby je teplejší než hladina oleje
- ▶ Hustota oleje klesá s teplotou
- ▶ Pokud lokálně vznikne na dně oblast s mírně vyšší teplotou než okolí teplejší olej tam začne stoupat.
- ▶ Dochází ke vzniku vírovitých struktur.
- ▶ Pro vznik struktur zapotřebí nesymetrie \Rightarrow nestabilita
- ▶ Výsledné struktury stabilní respektive metastabilní
- ▶ Význam prášku - jen vizualizační



Obrázek: Schematické znázornění jevu, zdroj obrázku:

https://en.wikipedia.org/wiki/Rayleigh-Benard_convection

Co by ideálně bylo třeba počítat.

- ▶ Olej proudí v nádobě \Rightarrow (asi válcovitá?) oblast \Rightarrow je třeba popsat proudění oleje
- ▶ Při proudění dochází k tepelné konvekci - je nutné uvažovat nějakou teorii šíření tepla
- ▶ Struktury vznikají díky tomu, že hustota oleje závisí na teplotě \Rightarrow model to musí uvažovat
- ▶ Dobré přiblížení: teplota oleje na dně i na povrchu je konstantní, na dně je vyšší než na povrchu

Rovnice termální konvekce v Boussinesquově approximaci

- ▶ Potřebné rovnice termální konvekce jsou známé, ale velmi složité na řešení
- ▶ „Zjednodušení“ - Boussinesquova approximace¹

$$\operatorname{div} \mathbf{t} - \rho_0 \alpha (T - T_0) \vec{g} = \rho_0 \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \operatorname{grad} \vec{v} \right) \quad (1)$$

$$\mathbf{t} = -p \mathbf{I} + \eta \left(\operatorname{grad} \vec{v} + (\operatorname{grad} \vec{v})^T \right) \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{v} \cdot \operatorname{grad} T + \kappa \operatorname{div} \operatorname{grad} T \quad (4)$$

- ▶ Podrobný teoretický popis by vyžadoval řešení Boussinesqueových rovnic s vhodnými okrajovými podmínkami
- ▶ Nikdo asi neočekává, že se v TMF vydáte touto cestou

¹Detailedy např. v materiálech prof. Čadka z mechaniky kontinua

<https://geo.mff.cuni.cz/~oc/MK11.pdf>

Rayleighovo číslo

- ▶ Klíčový parametr úlohy
- ▶ Poměr charakteristické rychlosti proudění tepla ku difuzi tepla

$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha} \Delta T h^3 \quad (5)$$

g	tíhové zrychlení
β	koeficient termální roztažnosti
ν	kinematická viskozita
α	součinitel tepelné vodivosti
ΔT	rozdíl teplot oleje na dně a na hladině
h	výška oleje v nádobě

Tabulka: Parametry ve vzorci pro Rayleighovo číslo

- ▶ Jev se vyskytuje pro velká Ra , konkrétně² $Ra > 1708$

²[Koschmieder, E. L. (1993). Bénard Cells and Taylor Vortices
ISBN:0521-40204-2]

Co vlastně vůbec v teoretické části dělat?

- ▶ Nesnažte se řešit Boussinsqueovy rovnice
- ▶ Vyplatí se spočítat Rayleighovo číslo a srovnat s kritickou hodnotou
- ▶ Úloha není moc vhodná k teoretické práci, teoretický popis je velmi obtížný
- ▶ Napadají mě 3 možnosti co udělat:
 - ▶ Nedělat nic jen zmínit pár faktů o tom jak jev funguje a zaměřit se zejména na experimentální část.
 - ▶ Udělat nějaké velmi hrubé aproximace a zkusit udělat nějaký hrubý odhad, možná že to alespoň řádově vyjde.
 - ▶ Ukázat, že umím udělat nějaký kvantitativní výpočet na něčem jiném co s úlohou alespoň trochu souvisí. Např. by mohlo jít odhadnout ideální množství prášku.

Co vůbec měřit?

- ▶ Jaká veličina dobře popisuje pozorované obrazce? Jak ho kvantifikovat?
- ▶ V jakém smyslu jsou jsou obrazce reprodukovatelné? Nemá smysl měřit něco co v každém experimentu vyjde jinak.
- ▶ Zkoumáte nestabilitu. Vznik obrazců patrně souvisí s fluktuacemi nebo s drobnými nesymetriemi vaší aparatury - to nedokážete kontrolovat.
- ▶ Experimenty lišící se jen parametry, které nedokážete kontrolovat (např. drobné nesymetrie zahřívání se mění při pootočení nádoby s olejem), musíte považovat za identické.



Obrázek: typické struktury, zdroj obrázku: <https://www.youtube.com/watch?v=72tV6LDPE5I>

Co vůbec měřit?

- ▶ Obrazce pravděpodobně vznikají v důsledku fluktuací nebo drobných nesymetrií vaší aparatury, očekávám proto, že obrazec se bude lišit experiment od experimentu.
- ▶ Potřebujete najít vhodnou veličinu, která bude stejná při opakování identického experimentu.
- ▶ Vhodnou veličinou by možná (neručím za to) mohl být charakteristický rozměr struktur nebo typická rychlosť proudění oleje na hladině nebo typická plocha buňky.



Obrázek: typické struktury, zdroj obrázku: <https://www.youtube.com/watch?v=72tV6LDPE5I>

Parametry vašeho oleje

- ▶ Je dobré vědět o oleji který používáte více než to co uvádí výrobce.
- ▶ Které parametry oleje jsou relevantní pro zkoumaný jev? (Tip: mohly by to být ty na nichž závisí Rayleighovo číslo)
- ▶ Mohlo by být zajímavé zkoušet více olejů a zkoumat závislost parametrů struktur na parametrech oleje.

Parametry konkrétního experimentu

- ▶ Výška oleje v nádobě, tvar a velikost nádoby, rozdíl teplot dno hladina ...
- ▶ Budou se vám asi snáze měnit než parametry oleje.
- ▶ Opět zkoumat závislost parametrů struktur na parametrech konkrétního experimentu.

Můj demonstrační experiment

- ▶ Řepkový olej a mouka, zahříváno horkou vodou
- ▶ Velmi citlivé na přesnost položení misky
- ▶ Při nepřesném položení vznikala jedna velká struktura, výrazná nesymetrie spojená s kraji misky



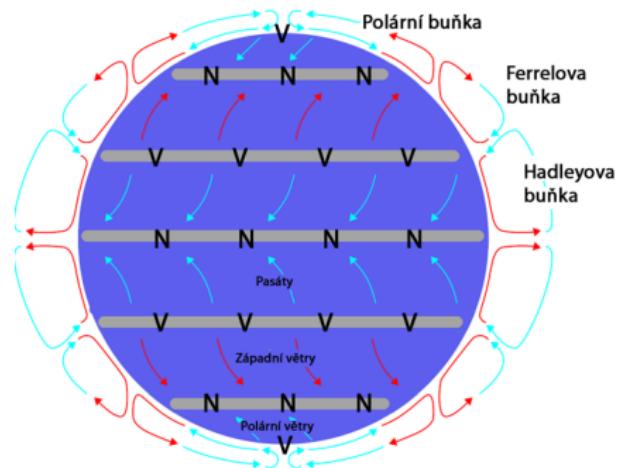
Obrázek: Pozorované struktury



Obrázek: Foto aparatury

Cirkulace atmosféry

- ▶ Na podobném principu jako Rayleigh Bénardova konvekce funguje cirkulace atmosféry
- ▶ Rozdíly např. vliv Coriolisovy síly, nerovnoměrná teplota povrchu země...



Obrázek: Cirkulace atmosféry, zdroj obrázku: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/vseobecna-cirkulace-atmosfery/>

Kam dál?

- ▶ Reference kit https://kit.ilyam.org/FDD_2025_IYPT_Reference_kit.pdf
- ▶ google scholar klíčová slova Rayleigh Benard convection
- ▶ konzultant úlohy <furstmarek@seznam.cz>
- ▶ nebo někde jinde

Co s úlohou?

- ▶ Úloha není moc vhodná k teoretické práci ⇒ více experimentovat
- ▶ Rozmyslet si, co má smysl měřit, jak kvantifikovat pozorovaný obrazec
- ▶ Měřit dobře definované tj. reprodukovatelné veličiny
- ▶ Identifikovat relevantní parametry a zkoumat závislost struktur na nich
- ▶ Nebo úlohu zadat soupeřům? (i pro oponování je ale dobré si něco vyzkoušet)

Děkuji za pozornost



Obrázek: Rayleigh-Bénardova konvekce, zdroj obrázku:
<https://www.youtube.com/watch?v=gSTNxS96fRg>