

## Hrátky s neneutronovskými kapalinami

RENATA HOLUBOVÁ

Přírodovědecká fakulta UP Olomouc

### Abstrakt

Studium viskózních kapalin je předmětem reologie a do obsahu školské fyziky není zařazeno. Žákům je prezentováno několik experimentů většinou jen se škrobovou suspenzí, které si také mohou prohlédnout na celé řadě nahrávek na youtube. V dnešním příspěvku bych chtěla představit dva experimenty, které by mohly jednoduchým způsobem přiblížit problematiku ne-newtonovských kapalin a které jsou také můstkem k fraktální geometrii ve fyzice. První z experimentů je realizován pomocí konzistometru, druhý pomocí Hele-Shawovy buňky.

### Konzistivita

*Konzistivita* či *konzistence* označuje vlastnost kapaliny, která popisuje tečení. Tečení kapaliny je vyvoláno gravitačním působením Země. Kvalitativně bývá konzistivita označována termínem lepivost, máslovitost. Žáci znají pojem *viskozita* – to je fyzikální vlastnost tekutiny, která popisuje velikost odporové síly vůči tečení materiálu. Vzájemná souvislost obou termínů je využívána pro popis konzistence v rámci kontroly kvality látek či při aplikaci materiálů v technické praxi. Viskozitu měříme pomocí viskozimetrů, konzistivitu pomocí konzistometru. Konzistivita či konzistence závisí na viskozitě jednotlivých složek materiálu, povrchu pigmentů (v případě barviv a barev) apod. Viskozita souvisí se střížným napětím. Pro odvození pojmu viskozita lze použít jednoduchý model kapaliny, kterou si představíme složenou z jednotlivých vrstev, které se při tečení po sobě posouvají. Velikost tečné síly, která je potřebná k tomu, aby se vrstvy po sobě pohybovaly, charakterizuje viskozitu kapaliny. Viskozita je charakteristika pohybující se kapaliny, lze ji vyjádřit jako poměr tečného napětí a smykové rychlosti (Newtonův zákon viskozity). Pro danou teplotu je viskozita dané látky konstantní – tzv. newtonovské kapaliny.

Na rozdíl od newtonovských kapalin, viskozita většiny tzv. neneutronovských kapalin není konstantní, ale její hodnota závisí na tečném napětí i na smykové rychlosti. Pokud tečné napětí roste a viskozita klesá, jsou tyto kapaliny označovány jako *pseudoplastické*, pokud viskozita roste s rostoucím tečným napětím, nazýváme tyto kapaliny *dilatantní*. Pro danou hodnotu napětí viskozita klesá s časem (thixotropie) nebo roste (rheopexie). Řada materiálů vykazuje mezní hodnotu napětí pro to, aby začala téci (plasticita). Do této skupiny látek patří např. gely, tělová mléka, zubní pasty.

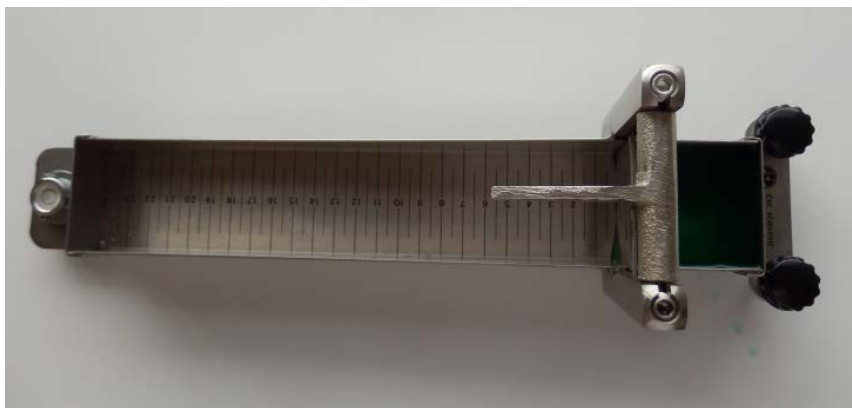
Viskozita ovlivňuje konzistivitu, neexistuje však přímý převodní vztah mezi viskozitou a konzistivitou. Pro mnohé technické aplikace zjišťování kvality produktů, např. barev, v kosmetice, v potravinářství – kečupy, hořčice apod., je srovnávací měření konzistivity rychlejší, levnější a jednodušší než měření viskozity, popř. dalších reologických vlastností, které je třeba provádět na drahých viskozimetrech či reometrech.

Ve stavitelství využíváme výsledků měření konzistivity např. cementu, betonu, vzhledem k tomu, jaký má konzistivita vztah ke zpracování (tj. změně povrchového napětí a hustoty vlivem teploty). Co je důležité – absolutní standard měření konzistivity neexistuje.

Většina měření v technické praxi stejně jako i naše měření je realizováno na tzv. Bostwickově konzistometru. Pro školskou praxi lze využít konzistometru ke srovnání kvality různých značek kečupů, hořčice, tekutých mýdel apod. Potravinové řetězce tyto testy provádějí pravidelně.

### **Konzistometr**

Konzistometr (obr. 1) je vyroben z nerezové oceli. Skládá se ze zásobníku, dvířek ovládaných pružinou s velkou tuhostí a kolejnice s vyrytou stupnicí, jejíž dělení je po 0,5 centimetru. Potřebné množství kapaliny pro měření je 75 ml. Po naplnění zásobníku zkoumanou kapalinou jsou dvířka otevřena úderem na západku a kapalinu necháme vytékat po dobu 30 sekund. Odměříme vzdálenost, do které „dotekla“ kapalina během těchto 30 sekund. Tento postup je doporučený výrobcem konzistometru, firmou CSC Scientific Company, Inc.



Obr. 1. Bostwickův konzistometr – pohled shora (se stupnicí)



Obr. 2. Bostwickův konzistometr – pohled z boku

### **Průběh měření**

Průběh měření je patrný na obrázcích. Vzorek kapaliny byl nalit do zásobníku. Úderem na západku byl zásobník otevřen a kapalina začala vytékat. Sledovali jsme uraženou vzdálenost na vyryté stupnici konzistometru.



Obr. 3. Měření konzistivity koupelové pěny

Na obr. 3 je zobrazeno měření konzistivity pěny do koupele – teplota vzorku byla 28 °C, doba měření 15 s.

Uražená vzdálenost pro daný čas uvedená v centimetrech je hledaná konzistence (tzv. Bostwickova hodnota). Pro to, aby kapalina stékala pouze vlivem vlastní tíhy, je třeba, aby kolejnice byla ve vodorovné poloze. K vyrovnání slouží adjustační šrouby. Měření všech vzorků musí být prováděno za konstantní teploty. Při výměně vzorku je třeba konzistometr vyčistit a vysušit. Standardy pro měření jednotlivých kapalin si vytváří každá laboratoř svoje vlastní.

### **Hele-Shawova buňka**

Hele-Shawova buňka je jednoduchá pomůcka pojmenovaná po inženýrovi Henry Selby-Hele-Shawovi (1854-1941). Studoval v Bristolu, pracoval jako inženýr a přednášející matematiky na University College v Bristolu. V roce 1904 založil College of Engineering při Transvaalském technickém institutu. Je autorem mnoha patentů, např. měření rychlosti větru, třecí spojky apod. Hele-Shawova buňka má sloužit k vytváření fraktálových struktur pomocí jednoduchých pomůcek.

Fraktály nejsou obsahem výuky matematiky ani fyziky na střední škole. Ale žáci na ně narazí při brouzdání internetem či v různých jiných souvislostech. Nejsou to totiž žádné nereálné modely. V přírodě najdeme mnoho příkladů fraktálů – mořské pobřeží, hranice států, břehy řek, kapradiny, květák, atd. Charakter fraktálů mají atmosférické děje, turbulence v kapalinách, biologické systémy, vývoj cen akcií a mnoho dalších jevů.

Fraktály jsou nekonečně členité útvary, jejichž geometrický motiv se opakuje v základním tělese až do nekonečna. Nekonečno je nutné chápat jen matematicky, jelikož ve fyzikálním světě vždy existují hranice, za kterými opakování končí.

Fraktály dělíme na:

*Soběpodobné* – většinou jen čisté matematické struktury, se kterými se lze setkat jen při matematických konstrukcích. Jejich charakteristickým znakem je, že se v nich opakuje původní originální motiv mateřského tělesa. Kterýkoliv výsek je přesnou kopií původního tělesa.

*Soběpříbuzné* – útvary, se kterými se setkáváme každý den, aniž bychom si uvědomovali, že to jsou fraktály. Jsou to například mraky, lesy, hory, vodní hladina, obyčejný květák, ale dokonce i takové objekty, jako je obličej apod. Pro ně je charakteristické, že kterýkoliv výsek je sice “blízký”, není ale přesnou kopií původního tělesa. Není tedy sobě “podobný”, ale jen “příbuzný”.

### **Využití Hele-Shawovy buňky**

Předmětem zkoumání je chování dvou různě viskózních kapalin, pokud vtlačíme méně viskózní kapalinu do viskóznější či naopak. Vtlačíme-li kapalinu o vyšší viskozitě do kapaliny s viskozitou menší, vznikne hladké rozhraní mezi oběma kapalinami. Kapalina o vyšší viskozitě jako by odtlačila kapalinu méně viskózní. Pokud vtlačíme méně viskózní kapalinu do kapaliny o větší viskozitě, vznikají viskózní kanály (vět-

ve, prsty). Každá větev se dále rozvíjí a vzniká spleť kanálů. Vznikne tak model viskózního větvení (viscous fingering model). Hranice mezi oběma kapalinami je hydrodynamicky nestabilní. Podíváme-li se na vznikající obrazec, potom každý malý výřez je podobný celkové struktuře obrazce – obrázek je soběpodobný, jedná se o fraktál. To, jak obrázek vypadá, závisí na viskozitě použitých kapalin. Dvourozměrný model vzniku těchto obrazců lze realizovat právě pomocí Hele-Shawovy buňky. Tato buňka je tvořena dvěma průhlednými deskami ze skla nebo plexiskla, které jsou položeny na sebe. Kapalinu vtlačíme mezi tyto dvě desky a získáme tak dvourozměrný model fraktálů.

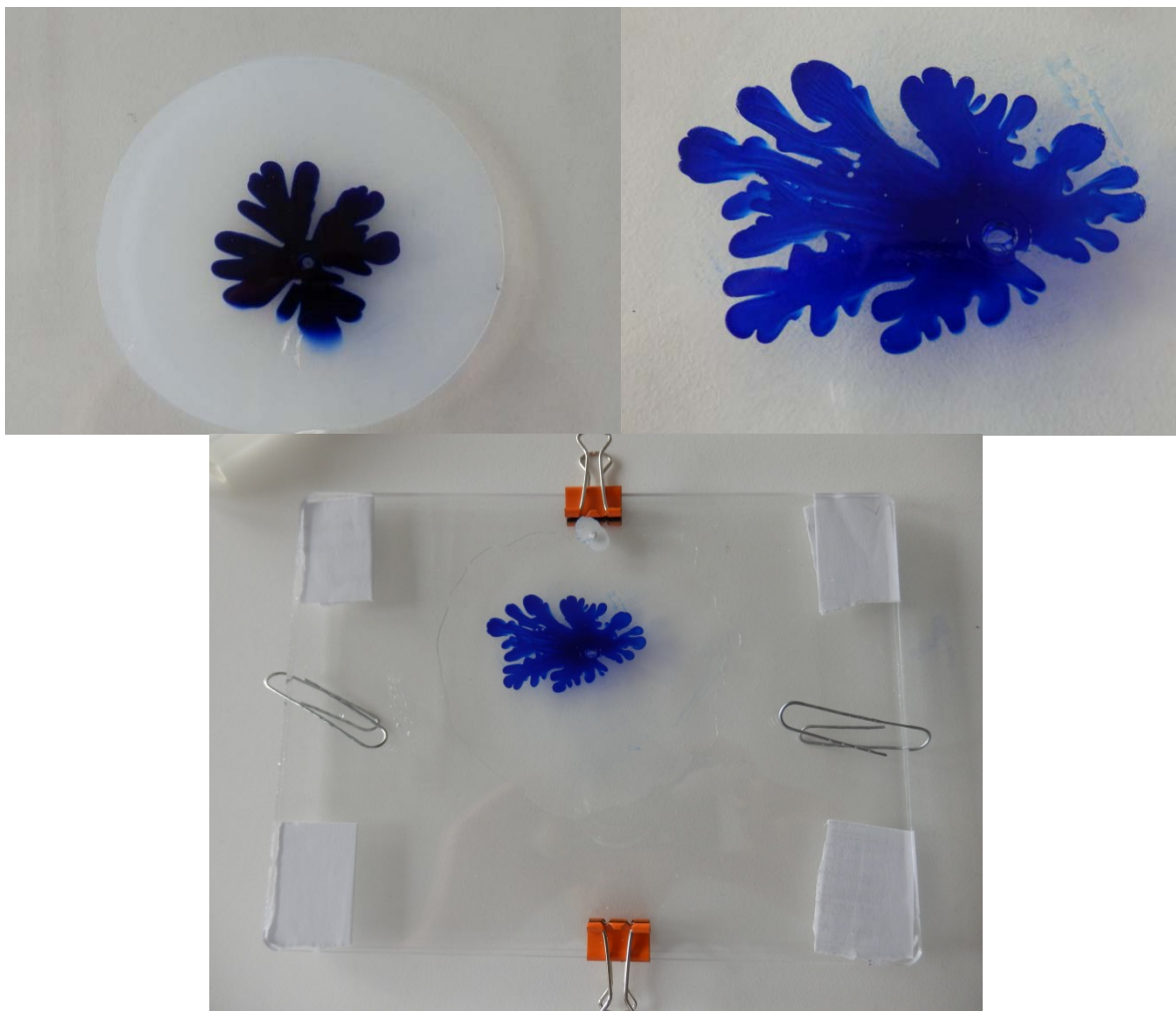
### **Příprava Hele-Shawovy buňky**

Připravíme si dvě skleněné desky o velikosti asi 40×40 cm. Do jedné z desek uprostřed vyvrtáme malý otvor, kterým budeme mezi desky vtlačet kapalinu. Skleněnou desku položíme na rovný podklad, do rohů dáme tenké opěrky pro horní desku. Obě desky k sobě přitlačíme např. čtyřmi svorkami podle obrázku.



Obr. 4. Hele-Shawova buňka

Pomocí injekční stříkačky vtlačíme mezi desku první kapalinu (olej, tekuté mýdlo, glycerol). Postupujeme opatrně, aby nevznikly bubliny. Poté další injekční stříkačkou vtlačíme otvorem mezi desky druhou kapalinu (např. obarvenou vodu, inkoust). Při výměně injekčních stříkaček se snažíme zamezit pronikání vzduchu do štěrbiny. Dbáme na to, abychom vstříkávání druhé kapaliny ukončili ještě předtím, než tato dosáhne okraje desky, jinak se vytvoří kanály, kterými začne kapalina vytékat z prostoru mezi deskami. Vytvoření obrazce je částečně reverzibilní – pokud pístem injekční stříkačky pohybujeme zpět, kapalinu nasajeme a kanály se zaplní původní kapalinou. Při oddalování desek od sebe (po ukončení experimentu) vznikají v důsledku pronikání vzduchu do kapaliny další zajímavé útvary.



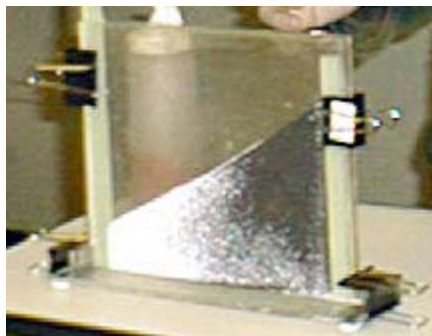
Obr. 5. Obrazce fraktálů vytvořené použitím tekutého mýdla a inkoustu

## Diskuse

Žáci porovnávají obrazce, které vznikají při použití kapalin o různé viskozitě (viskozitu kapalin vyhledají v Tabulkách). V pokročilém kursu fyziky lze nastínit i kvantifikaci experimentu a určit dimenzi fraktálu. Můžeme přitom využít vzájemného vztahu mezi hmotností  $M$ , tj. počtu částic či pixelů obrázku fraktálu na ploše o „velikosti  $R$ “ (poloměr kruhu) a dimenze  $D$ , kdy platí, že  $M \sim RD$ . Počítáme velikost  $R$  výřezu obrazce vzhledem k hmotnosti dané plochy (počtu pixelů v obrázku) v logaritmickém měřítku. Dimenzi lze takto určit jako  $D = \frac{\log M}{\log(\frac{1}{R})}$ . Dimenze fraktálu vzniklého z olivového oleje a vody je např. 1,82. Dimenzi fraktálu lze studovat také v souvislosti s disipací energie – energie potřebná pro odtlačení viskózní kapaliny kapalinou o menší viskozitě by byla větší než je energie potřebná při vzniku těchto kanálků.

Hele-Shawovu buňku lze použít i pro zkoumání granulovaných látek (písky, cukr apod.). V tomto případě buňku postavíme do svislé polohy, mezera mezi oběma des-

kami bude o něco větší a zkoumaný materiál sypeme podél jednoho okraje buňky mezi obě skla. Porovnááme úhel sklonu nasypaného materiálu.



Obr. 6. Měření charakteristiky granulovaných látek  
(převzato ze stránek SEED [www.slb.com/seed](http://www.slb.com/seed))

## Závěr

Uvedené experimenty mohou být využity v rámci výuky fyziky na středních školách. Experimenty mohou být zařazeny v učivu proudění tekutin, Brownův pohyb, změny skupenství látek, změny stavu materiálu (magnetismus), či v technických aplikacích, např. při těžbě ropy. Nevyžadují nákladné technické vybavení. Konzistometr lze zakoupit popř. vyrobit svépomocí, Hele-Shawova buňka je vyrobena ze dvou kusů skla či plexiskla. Experimenty mají zejména motivační charakter, ale mohou být rozpracovány i v rámci seminárních či ročníkových prací.

Práce vznikla za podpory projektu OPVK Moduly jako prostředek integrace moderní fyziky a chemie, No. CZ.1.07/2.2.00/28.0182.

## Literatura

- [1] Schlichting, H.J.: Fraktales Wachstum. Physik in der Schule 31(1993), 113-117.
- [2] Pittman, R.: Fractal Patterns in a Hele-Shaw Cell. MathInScience.Info.  
Dostupné on-line:  
[http://www.mathinscience.info/public/chem\\_reac\\_frac/fracpatterns\\_Hele\\_Shaw.htm](http://www.mathinscience.info/public/chem_reac_frac/fracpatterns_Hele_Shaw.htm).
- [3] McCarthy, K.L., Sacher, R., Garvey, T.C.: Relationship between rheological behavior and Bostwick measurement during manufacture of ketchup. Journal of Texture Studies, [Vol 39, Issue 5](#), 480–495, 2008
- [4] <http://www.ksr.tul.cz/fraktaly/geometrie.html>
- [5] [http://projekty.osu.cz/okapousu/prezentace/fraktaly\\_a\\_jejich\\_vyuziti.pdf](http://projekty.osu.cz/okapousu/prezentace/fraktaly_a_jejich_vyuziti.pdf)
- [6] Science Kit & Boreal Laboratories, <http://www.sciencekit.com/>
- [7] Guerino, E. et al.: Glycerol & Nematic Liquid Crystal in a Hele-Shaw Cell: Electric Field Effects. NJIT, Department of Mathematical Sciences, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA  
Dostupné online:  
[http://www.gracesguide.co.uk/index.php?title=Henry\\_Selby\\_Hele-Shaw&printable=yes](http://www.gracesguide.co.uk/index.php?title=Henry_Selby_Hele-Shaw&printable=yes)
- [8] <http://www.cscscientific.com/> (Ranowsky, A. – CSC, mailing list)