

Krev jako ne-newtonovská kapalina ve fyzice a kriminalistice

RENATA HOLUBOVÁ

Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, Olomouc

O tom, jak motivovat žáky ve výuce fyziky, bylo napsáno již velké množství publikací. Velmi často využíváme mezipředmětových vztahů popř. příkladů z každodenního života, kde jsou poznatky z fyziky či chemie aplikovány. Zajímavou problematikou z pohledu žáka se jeví využití mezipředmětových vztahů mezi fyzikou a biologií. Méně obvyklé je využití mezipředmětových vztahů mezi fyzikou a vědním oborem kriminalistika. Pokud sledujeme akční filmy a kriminální seriály, mnoho scén ilustrujících rychlé odhalení pachatele u nás vyvolává úsměv na rtech. Je ale nesporné to, že kriminalistika využívá nejmodernějších poznatků řady přírodních věd, lékařství a techniky, a málokdy si uvědomujeme, že úspěšnost v odhalování pachatelů trestních činů je úzce spjata s vědeckým a technickým pokrokem. V dalším textu bude prezentována ukázka využití poznatků fyziky kapalin v kriminalistice, konkrétně v kriminalistické biologii.

Základní pojmy fyziky ne-newtonovských kapalin

Ne-newtonovské kapaliny tvoří velkou skupinu látek, které se chovají odlišně ve srovnání s newtonovskými kapalinami či kapalinou ideální. Newtonovské kapaliny se během laminárního proudění řídí Newtonovým zákonem, který popisuje závislost mezi tečným napětím a gradientem rychlosti kapaliny. Tato závislost je lineární. Můžeme ji vyjádřit vztahem

$$\tau_{xy} = -\eta \frac{du_x}{dy},$$

kde τ_{xy} je tečné napětí, η je dynamická viskozita a $\frac{du_x}{dy}$ je gradient rychlosti. Dynamická viskozita je v tomto případě materiálovou konstantou, která závisí jen na teplotě kapaliny.

Pokud je rychlost deformace funkcí času a neplatí Newtonův zákon pro viskozitu kapalin, jedná se o kapaliny ne-newtonovské. Obecně platí, že pokud $\frac{du_x}{dy} \leq 100 \text{ s}^{-1}$, začnou se významně projevovat vlastnosti ne-newtonovské kapaliny. Popis těchto kapalin je možný prostřednictvím tzv. reologických

veličin. U těchto kapalin závisí jejich chování mimo jiné na vzájemné interakci molekul, které kapalinu tvoří. Příklady ne-newtonovských kapalin najdeme v každodenním životě, jsou to např. laky, ropa, tekuté mýdlo, kečup atd. Ne-newtonovské kapaliny se rozdělují podle různých kritérií do skupin

1. *Zobecněné ne-newtonovské kapaliny*

- binghamské – tečou až od určitého napětí (suspenze křídý či vápna)
- pseudoplastické – viskozita klesá s rychlostí deformace (kečup)
- dilatantní kapaliny – viskozita roste s rychlostí deformace (škrobové suspenze)

2. *Viskoelastické kapaliny* – charakteristické je že tečou, ale zároveň si do určité míry „pamatují“ tvar; po odstranění napětí se částečně vrátí do původního tvaru (sliny leopardí žáby, polymery)



Obr. 1 Leopardí žába

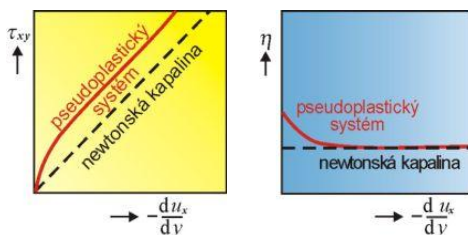
(<https://www.matfyz.cz/clanky/818-aktualita-z-fyziky-zabi-jazyk-jako-inspirace-pro-rove-technologie>)

3. *Kapaliny časově závislé* – chování závisí na době působení napětí

- tixotropní – s dobou působení napětí viskozita klesá (nátěrové hmoty, laky, krémy, pasty)
- reopexní – s dobou působení napětí viskozita roste (suspenze sádry ve vodě).

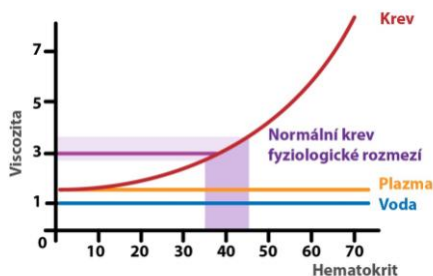
V kriminalistické biologii je důležitou kapalinou krev. Z fyzikálního hlediska můžeme krev zařadit do skupiny ne-newtonovských pseudoplastických kapalin. Při rostoucím smykovém napětí viskozita klesá, při pohybu kapaliny se

její částice orientují ve směru pohybu. Z tokové křivky plyne, že kapaliny tečou již při minimálním napětí.



Obr. 2 Toková křivka a závislost viskozity na smykové rychlosti
(http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/pseudoplasticita.html)

Vlastnosti krve jsou ovlivněny jejím hematokritem (podílem erytrocytů v plazmě), viz obr. 3.



Obr. 3 Závislost viskozity na hematokritu
(<http://fblt.cz/skripta/x-srdce-a-obeh-krve/2-krevni-obeh/>)

Viskozita krevní plazmy je 2 krát vyšší než viskozita vody, viskozita celé krve je průměrně 4krát větší než viskozita vody. Viskozita krve v kapilárách je vyšší než v artériích (což znamená nižší rychlost proudění krve v kapilárách).

Viskozita krve je 3,0–7,7 mPa·s, povrchové napětí krve při 37 °C je 0,058 N·m⁻¹. Pseudoplasticita krve je výraznější při diastole (smyková rychlost je v tomto případě menší).

Nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje viskozitu krve, je možnost deformace červených krvinek – jsou schopny při vysokém smykovém napětí měnit tvar z bikonkávního na tvar elipsoidu, v důsledku toho se sníží viskozita krve. Při nízkém smykovém napětí dochází k hromadění červených krvinek, skládají se na sebe, dochází ke zvýšení viskozity. Tzn., že krev vykazuje pseudoplasticitu (při stálém proudění) a viskoelasticitu (danou reformovatelností

červených krvinek při změně smykového napětí, zejména při jeho snížení a vlastnostmi cév a tkání).

U krve lze hovořit také o mezi kluzu, která závisí na hematokritu, při nízkých smykových rychlostech roste, proto pro nízký hematokrit lze mezi kluzu zanedbat.

Krev proudící ve velkých cévách velkou rychlostí lze popsat jako newtonovskou kapalinu (je to kontinuum), avšak pro krev proudící v malých cévách již tento model není možné použít. Kritérium pro to, kdy lze prostředí ještě považovat za kontinuum je tzv. Knudsenovo číslo

$$K_n = \frac{\lambda}{l},$$

kde λ je střední volná dráha molekuly a l je charakteristický rozměr. Pokud $K_n \ll 1$, potom se jedná o kontinuum.

Krev teče v důsledku tlakového gradientu, který udržuje činnost srdce. Viskozita krve se objevuje i ve vyjádření Hagen-Poiseuilleova zákona, který charakterizuje proudění kapalin a na kterém lze ukázat, jak velký vliv má průřez cévy na proudový odpor (závislost r^4)

$$Q_v = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dl}.$$

V tomto vztahu je Q_v objemový průtok kapaliny, η dynamická viskozita, r průřez trubice (cévy, kapiláry), $\frac{dp}{dl}$ gradient tlaku (změna tlaku vztažená na délku trubice).

Krev na místě činu

Krevní stopy, které nalézáme na místě činu, jsou často krevní kapky a krevní stříkance. V dalším se budeme věnovat krevním kapkám. Jaká fakta mohou kriminalisté zjistit na základě analýzy krevních kapek, uvádíme níže:

- druh a rychlost použité zbraně
- počet úderů
- zda byl pachatel pravák nebo levák
- místo, kde se nacházela oběť a její pohyb
- které rány byly jako první
- druh ran

- jak dlouho uplynulo od spáchání trestného činu
- zda smrt nastala okamžitě.

Faktory nezbytné pro vznik krevní kapky: přítomnost gravitační síly, existence síly kohezni, adheze a také existence povrchového napětí. Přítomnost všech těchto sil dá vznik krevní kapce, která dopadá na podložku z určité výšky, danou rychlostí a pod určitým úhlem.

Rychlost dopadu kapky ovlivní její vzhled, počet trnů (výstupků) a počet satelitních kapek (vedlejších stříkanců). Kapky mohou dopadat na povrch rychlostí

- vysokou ($30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) – kapky jsou menší než 1 mm, vzniká velké množství satelitních kapek (střelná poranění)
- střední ($7,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) – průměr kapky je 1–4 mm (bití, bodání)
- malou ($1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) – průměr kapky je 4–6 mm (úder tupým předmětem, např. – kladivem).

Vytváření kapek závisí také na výšce, ze které kapky padá, zda je zdroj kapek v klidu nebo se pohybuje, a zda kapka dopadá na hladký či hrubý povrch. Porovnání tvaru kapky v závislosti na výšce pádu je vidět na obr. 4.



Obr. 4 Tvar kapky po dopadu:
vlevo – dopad z výšky 10 cm, vpravo – z výšky 2 m

Deformace kapky závisí také na tom, zda povrch dopadu je hladký či hrubý – viz obr 5.

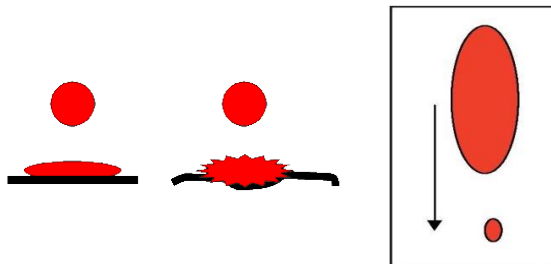
Počet trnů u kapky lze vypočítat pomocí vztahu

$$N = 1,14\sqrt{W_e},$$

kde W_e je Weberovo číslo. Weberovo číslo je dáno jako

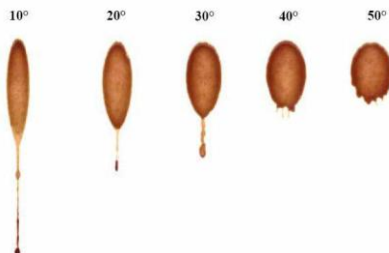
$$W_e = \frac{\rho dv^2}{\sigma},$$

kde d je průměr kapky, $\rho = 1,06 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ je hustota krve, v je rychlost dopadu. Velikost kapky a její protažení je funkcí objemu a výšky pádu, tj. i rychlosti.



Obr. 5 Kapka na hladkém povrchu (vlevo) a drsném povrchu, např. koberec (vpravo) a protažení kapky při pádu
(http://www.crimescene-forensics.com/Crime_Scene_Forensics/Bloodstains.html)

Tvar kapky je výrazně ovlivněn úhlem dopadu – čím je úhel dopadu menší, tím je kapka protáhlejší. Kolmý dopad dá vznik kruhové kapky, pokud je úhel dopadu asi 10° je kapka několikrát delší než širší.



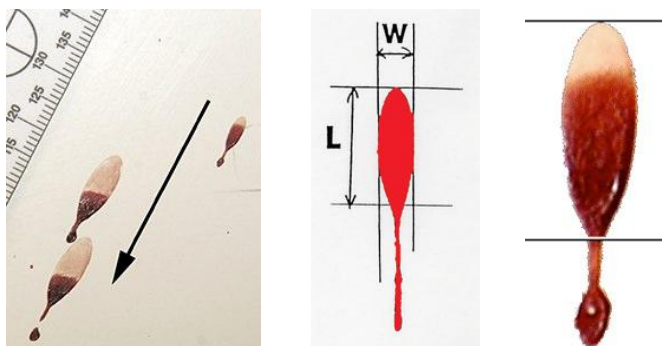
Obr. 6 Tvar kapky v závislosti na úhlu dopadu
(<http://misshalligan.weebly.com/6-serology.html>)

Úhel dopadu lze určit velmi jednoduše podle vztahu

$$\sin \alpha = \frac{\text{šířka } (W)}{\text{délka } (L)}$$




a tedy úhel dopadu

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{\text{šířka } (W)}{\text{délka } (L)}$$



Obr. 7 Stanovení úhlu dopadu kapky

Kapky, které dopadnou na povrch, časem vysychají. Vysychání probíhá podobně jako např. u kávy a podobných kapalin, které je popsáno jako tzv. *coffee ring effect*. Na obr. 8 je zobrazeno vysychání kapky v závislosti na počátečním objemu.

		
50 μl	100 μl	150 μl
10 mm	12 mm	13 mm

Obr. 8 Vysychání kapky

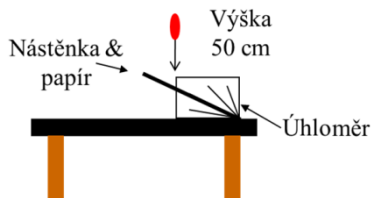
Aktivity pro žáky

Ve třídě lze tuto problematiku aplikovat ve výuce fyziky, biologie, matematiky, výpočetní techniky při motivaci žáků s využitím mezipředmětových vztahů. Teorie popsaná výše může být základem pro vlastní aktivní práci žáků. Ve školní třídě lze aktivity realizovat pomocí umělé krve (zakoupené např. v divadelních potřebách) nebo krve vyrobené pomocí medu (glycerolu), barviva, vody. Návodů na výrobu umělé krve lze nalézt na internetu. Návrhy experimentálních prací:

Vytváření kapek – kapky necháme dopadat na různé druhy podkladu a měníme následující parametry: výšku pádu, objem kapky, zdroj je v klidu nebo v pohybu (žák drží v ruce kapátko a pohybuje se podél papírového pásu nataženého na zemi).

Výpočet počtu trnů kapky – srovnání teoretické hodnoty s reálnou kapkou.

Stanovení úhlu dopadu kapky – vytvoříme několik kapek, které necháme dopadat pod různým úhlem na podložku. Velikost úhlu dopadu ověříme výpočtem z rozměrů kapky na podložce.

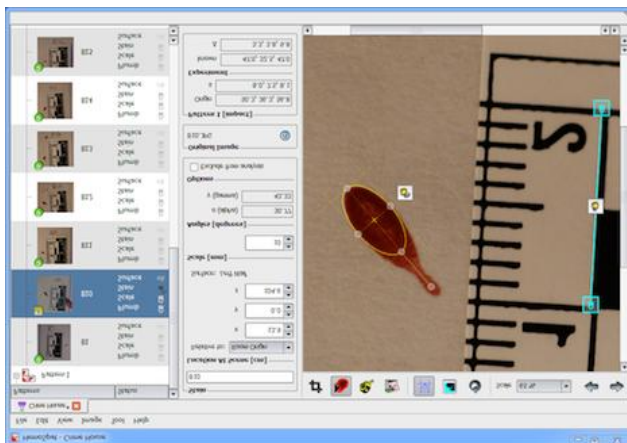


Obr. 9 Stanovení úhlu dopadu kapky

Studium procesu vysychání kapky – vytvoříme kapky na různém povrchu a sledujeme proces jejich vysychání. Během experimentu měníme vnější podmínky - teplotu prostředí, vlhkost, osvětlení apod. Proces dokumentujeme řadou fotografií. Vhodné jako domácí dlouhodobý pokus.

Práce se softwarem Hemospat – demo verze softwaru je k dispozici volně na internetu. Je to program, který slouží k analýze krevních stop.

Dle přístrojového vybavení lze měřit také viskozitu „krve“ a její povrchové napětí.



Obr. 10 Stránka z programu Hemospat

Závěr

Uvedené téma představuje využití mezipředmětových vztahů mezi biologií (krev, krevní oběh, srdce, fyzikou (mechanika kapalin), výpočetní technikou (práce s programem Hemospat) a matematikou (goniometrické funkce) a ukázkou využití poznatků těchto věd v praktickém životě (kriminalistice). Vzhledem k tomu, že se jedná o téma aktuální, může tato aktivita přispět k motivaci žáků v přírodovědných předmětech. Vybrané aktivity je možné uplatnit v badatelsky orientované výuce či jako soubor aktivit v rámci projektových dnů.

Literatura

- [1] Březina, M., Laupy, M. Makovec, P.: *Stopy a srovnávací materiály pro biologickou expertizu* (2). Odborná sdělení Kriminalistického ústavu Praha, 1994, č. 2, s. 1-16.
- [2] Coufalík, M.: *Viřivé čerpadlo jako možná srdeční náhrada*. Diplomová práce. VUT FSI Brno, 2017.
- [3] Holubová, R.: *Modul kriminalistika*. VUP Olomouc, 2014.
- [4] Makovec, P., Němec, J.: *Hematologická a molekulárně genetická zkoumání v kriminalisticko-expertizní činnosti*. Kriminalistika, 2005, č. 4, s. 276-284.
- [5] Ramsthaler, F. et al: Drying properties of bloodstains on common indoor surfaces. *Int J Legal Med*, 126, s. 739-746, 2012. DOI 10.1007/s00414-012-0734-2
- [6] Straus, J. a kol.: *Kriminalistická technika*. 2., rozšíř. vydání Plzeň: Vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, 2008, s. 78-110.
- [7] Straus, J. a kol.: *Kriminalistika*. Kriminalistická technika pro kurz kriminalistických expertů. 2., upravené vydání. Praha: PA ČR, KÚ Praha, 2006.
- [8] Suchánek, J. a kol.: *Základy kriminalistické techniky*. Praha: IVV FMV, 1991.
- [9] Suchánek, J.: *Kriminalistická biologie*. Praha: Vysoká škola SNB, 1978.
- [10] <http://www.bloodspatter.com/analyze-a-case>
- [11] <http://sciencespot.net/>
- [12] <https://hemospat.com/demo/>
- [13] www.teacherweb.com/WA/.../Kriebel/Blood_Splatter-Primer.ppt
- [14] http://www.crimescene-forensics.com/Crime_Scene_Forensics/Bloodstains.html