

31ST INTERNATIONAL YOUNG PHYSICIST' TOURNAMENT

TÝM TALNET

**09 – Candle in water**

PRAHA 2018

# OBSAH

<b>1</b>	<b>Zadání úlohy</b>	<b>2</b>
1.1	Originální znění . . . . .	2
1.2	Překlad zadání . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Teorie</b>	<b>2</b>
3.1	Složení a hoření svíčky . . . . .	2
3.2	Působení sil na svíčku a teoretický model . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Experimentální metodika</b>	<b>6</b>
4.1	Experimentální zařízení . . . . .	6
4.2	Měřené parametry . . . . .	6
4.3	Ověření vlivu vody . . . . .	7
4.4	Měření rychlosti spalování . . . . .	8
4.5	Měření pohybu svíčky . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Výsledky</b>	<b>9</b>
5.1	Měření pro jednu svíčku . . . . .	9
5.2	Porovnání svíček mezi sebou . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Diskuse</b>	<b>14</b>
6.1	Porovnání teorie a experimentů . . . . .	14
6.2	Porovnání s literaturou . . . . .	15
6.3	Diskuse dalších podmínek . . . . .	15
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Reference</b>	<b>17</b>

# 1 ZADÁNÍ ÚLOHY

## 1.1 Originální znění

Add some weight to a candle such that it barely floats in water. As the candle burns, it may continue to float. Investigate and explain this phenomenon.

## 1.2 Překlad zadání

Zatížte svíčku tak, aby sotva plovla ve vodě. Když pak svíčka odhořívá, může se stát, že bude dál plovat. Prozkoumejte a vysvětlete tento jev.

# 2 ÚVOD

Svíčka je zdrojem světla používaným už od starověku. Princip spočívá v přeměně chemické energie vázané v tuhém palivu – nejčastěji organických sloučeninách s dlouhými uhlovodíkovými řetězci (vosky, mastné kyseliny, parafíny, nebo tuky) – na světelnou a tepelnou energii. V dnešní době se nejčastěji používají při slavnostních a jiných speciálních příležitostech – svátcích, oslavách nebo na hřbitovech. Kromě toho se může používat například k dekorativním účelům, k jednoduchému odměřování času nebo v historii také k rozechřívání pečeti vosku. [1]

Cílem úlohy Candle in Water je popsat a vysvětlit chování svíčky ponořené ve vodě. Zde je jednoduché provedení experimentu a k teoretickému vysvětlení je možné při jistém zjednodušení použít znalosti ze středoškolské fyziky. Zde jsme vycházeli převážně z Archimédova zákona, kam jsme dosazovali známé veličiny pro získání vzorce k výpočtu výsledků – chování svíčky.

Na základě takto získané teorie jsme sledovali různé parametry, zejména výšky jednotlivých objektů. Ty nám pomohly sledovat pohyb svíčky a také změny ve tvaru způsobené hořením. Zároveň jsme provedli úspěšné srovnání teoretických předpokladů a experimentálních výsledků.

# 3 TEORIE

## 3.1 Složení a hoření svíčky

Dnešní svíčky se dělají z různých organických materiálů – vyšší uhlovodíky – alkany (jiným názvem parafíny), mastné kyseliny a vosky. Jejich charakteristikou jsou nízké body tání a varu (viz Tab. 1) a dostatečná hořlavost.<sup>1</sup> [2,3,4]

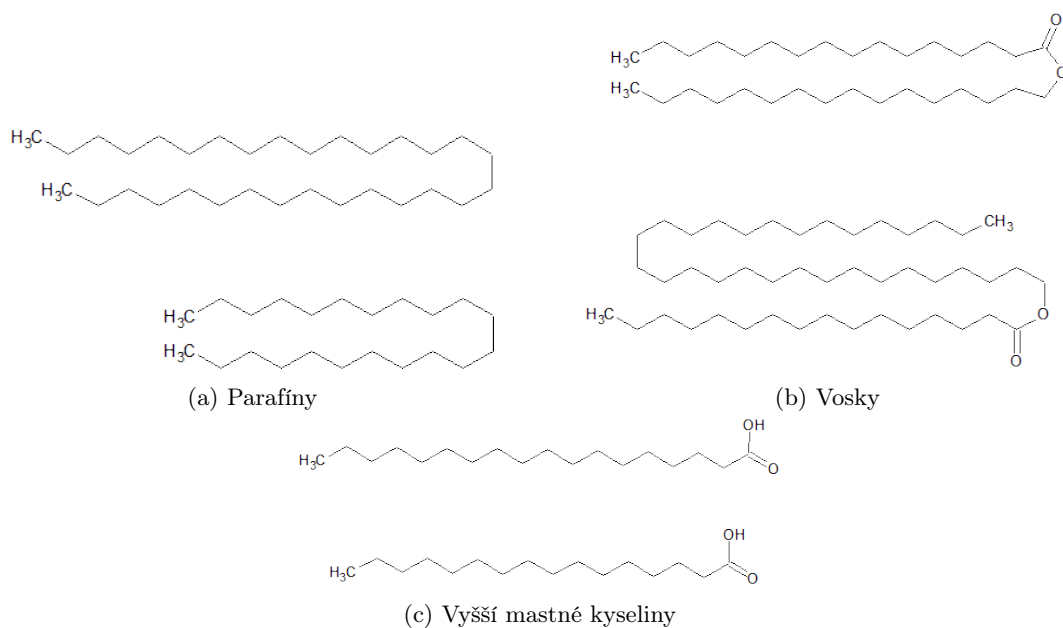
Při zapálení a následném hoření svíčky dochází nejprve k tání tuhého paliva, které se následně vypařuje. Plynné palivo poté za vyšší teploty vytvořené plamenem reaguje se vzdušným kyslíkem za přítomnosti plamene – shoří.

---

<sup>1</sup>Pro zjednodušení se budeme v dalším textu odkazovat na materiál, kterým je svíčka tvořena jako na „palivo“ nebo „vosk“. Je to z toho důvodu, že často se jedná o směs materiálů a na naše experimenty toto nemá vliv.

Tabulka 1: Příklady chemických sloučenin používané při výrobě svíček

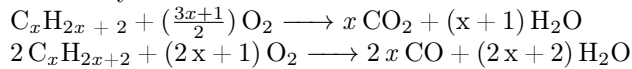
Sloučenina	V obrázku	Typ sloučeniny	Chemický vzorec	Bod tání	Bod varu
hentriakontan [5]	1a nahoře	alkan	$C_{31}H_{64}$	67,9	458
dokosan [6]	1a dole	alkan	$C_{22}H_{46}$	42	370
cetyl-palmitát [7]	1b nahoře	vosk	$C_{15}H_{31}COOC_{16}H_{33}$	55	360
myricyl-palmitát [8]	1b dole	vosk	$C_{15}H_{31}COOC_{30}H_{61}$	63	645,5
kyselina stearová [9]	1c nahoře	mastná kyselina	$C_{17}H_{35}COOH$	70,1	362
kyselina palmitová [9]	1c dole	mastná kyselina	$C_{15}H_{31}COOH$	61,82	353,8



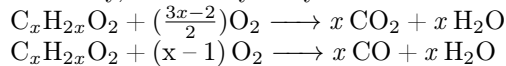
Obrázek 1: Příklady látek používaných při výrobě svíček

Pro popis hoření paliva můžeme použít následující chemické rovnice. [2] Vždy horní platí pro dokonalé spalování – je přítomno dostačující množství kyslíku, vzniká oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ . Spodní pak pro nedokonalé – při nižším množství kyslíku vzniká také určité množství oxidu uhelnatého  $\text{CO}$ . Z těchto rovnic plyne, že i po shoření paliva vznikají pouze plynné látky, které nepůsobí silou na svíčku.

Alkany:



Vosky, mastné kyseliny:



Tyto reakce jsou silně exotermické. Jako příklad může posloužit reakce hoření kyseliny palmitové, jejíž standardní spalná entalpie je  $\Delta H_{sp}^\circ = 9977,84 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$  [7]

Pro kapalnou fázi, která se vytvoří v průběhu hoření, můžeme říci, že v dostatečně dlouhém čase dojde k dynamické rovnováze, tj. hmotnost nově roztátého materiálu je rovno hmotnosti vypařeného – celkové množství materiálu v kapalně fázi zůstává po dosažení tohoto stavu konstantní. [10]

Dle literatury [10] závisí průměr vnitřního válce také na okolním prostředí – zdali se jedná o část na vzduchu nebo ponořenou ve vodě. Voda ochlazuje vnější vrstvy paliva a odebírá jim teplo. Tím snižuje teplo dodané této části, což znamená, že tato část není schopna roztát. Tento jev jsme teoreticky více nepopisovali z důvodu složitosti a ponechali jsme jej pouze k experimentálnímu zpracování, aniž by to narušilo celistvost úlohy.

Pro snazší orientaci při dalším použití jsme zavedli následující pojmy (viz také Obr. 2)

- **Vnitřní část** – „Miska“, kterou vytvoří plamen.
  - **K – Kapalná část** – Kapalný vosk na dně vnitřní části.
  - **D – Dutá část** – Válec vzduchu nad kapalnou částí; součást vnitřní části; zde se také nachází plamen.
- **Vn – Vnější část** – Prsteneček neroztaveného materiálu okolo vnitřní části.

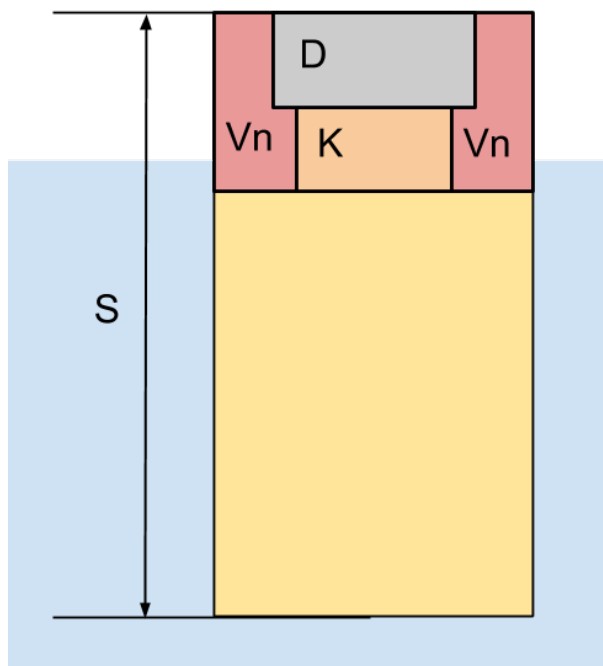
Po zapálení se vytvoří vnitřní část nejprve s malou šířkou, která se bude zvětšovat v čase až do jistého maximálního průměru kvůli snížení energetického toku – části svíčky vzdálenější od plamene než je příslušná délka nemohou přijmout dostatek tepla k tomu, aby roztály.

## 3.2 Působení sil na svíčku a teoretický model

Na svíčku ponořenou do vody působí dvě základní síly: síla tíhová a vztlaková.

Při hoření svíčky postupně ubývá hmotnost svíčky, ale celkový objem zůstává zachován díky neroztálemu prstenci. Jde o zmenšení tíhové síly při zachování velikosti síly vztlakové, což se ve výsledku projeví vystoupaním svíčky o určitou výšku, aby systém znovu nabyl mechanické rovnováhy.

Pro výpočet hmotnosti závaží je možno využít Archimédova zákona [11] a do něj dosadit příslušné veličiny a naším výsledkem je následující vzorec (1) pro výpočet hmotnosti závaží, kde  $m_z$  je hmotnost potřebného závaží,  $\rho_z$  je hustota závaží,  $m_w$ ,  $V_w$ ,  $\rho_w$  hmotnost, objem a hustota vosku a  $\rho_k$  je hustota vody.



Obrázek 2: K zavedení pojmů

$$m_z = \frac{\rho_z V_w (\rho_k - \rho_w)}{\rho_z - \rho_k} = \frac{\rho_z m_w (\rho_k - \rho_w)}{\rho_w (\rho_z - \rho_k)} \quad (1)$$

2

Pokud použijeme veličinu „rychlost hoření“ (označení  $j$ , jednotka  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ) pro hmotnost spálené svíčky, z Archimédova zákona [11] můžeme odvodit výšku, o kterou svíčka vystoupá následujícím způsobem, přičemž předpokládáme, že svíčka je dokonalý válec a rychlost hoření zůstává konstantní po celou dobu.

$$F_G = F_B$$

Vyjdeme z Archimédova zákona:

$$mg = \rho_k g V$$

$$\Delta m = \rho_k \Delta V$$

Použijeme  $j = \Delta m t$  a vyjádříme obsah válce jako  $V = \pi R^2 h$

$$jt = \rho_k \left( \frac{\pi D^2}{4} \Delta h \right) \quad (2)$$

Vyjádřením  $\Delta h$  z rovnice 2 získáme konečný vztah pro výpočet výšky  $\Delta h$  nad hladinou vody

$$\Delta h = \frac{4jt}{\pi D^2 \rho_k} \quad (3)$$

kde  $F_G$  je tíhová síla,  $F_B$  síla vztlačková,  $m$  je hmotnost svíčky,  $V$  objem svíčky – válec s průměrem  $D$  a výškou  $h$  a  $\rho_k$  je hustota kapaliny, do které je svíčka ponořena.

<sup>2</sup>Detailní odvození tohoto vzorce je v příloze na konci textu.

Z rovnice 3, kterou později použijeme pro srovnání s experimenty, plyne, že výška, o kterou svíčka vystoupá v čase, závisí na poloměru svíčky a rychlosti hoření. Jako kapalinu máme podle zadání použít vodu, tedy její hustotu můžeme použít jako konstantu.

Pokud se zaměříme na konkrétní svíčku s konstantním poloměrem, jde o lineární závislost na čase.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ METODIKA

### 4.1 Experimentální zařízení

Jev jsme pozorovali a měřili na bílých parafínových svíčkách stejného materiálu. Změřený průměr všech svíček je  $R = (4,5 \pm 0,1)$  cm. Pro výšku svíčky jsme použili 7 cm, 6 cm a 5 cm, které jsme získali zkrácením původní svíčky (7,5 cm) a zahlazením horní plochy na vodorovnou za účelem zajistit opakovatelnost experimentu. Jako závaží jsme použili železné hřebíky zabodnuté do podstavy svíčky do hloubky nejvýše 1 cm, abychom zajistili vzpřímenou polohu svíčky, ale zároveň abychom nenarušili experiment tím, že by hřebíky pronikly až k plameni. Potřebnou hmotnost jsme pak upravili přidáním magnetů. Parametry použitých svíček a závaží jsou shrnuty v Tabulce 1.

výška [cm]	hmotnost materiálu [g]	hmotnost závaží [g]
$(7,0 \pm 0,1)$	$(95 \pm 2)$	$(26,4 \pm 0,5)$
$(6,0 \pm 0,1)$	$(82 \pm 2)$	$(22,4 \pm 0,5)$
$(5,0 \pm 0,1)$	$(69 \pm 1)$	$(18,5 \pm 0,3)$

Tabulka 2: My caption

Celkem jsme prováděli tři druhy experimentů:

1. Samotná svíčka bez závaží, obklopená vzduchem
2. Svíčka zcela obklopená vodou v průběhu celého experimentu. Tohoto stavu jsme docílili použitím závaží o hmotnosti výrazně vyšší, než vyžadovaná dle zadání a následně jsme dolili takové množství vody, aby hladina vody byla přesně na úrovni horní hrany svíčky. Ve výsledku tedy i při hoření není snížení hmotnosti dostačující k tomu, aby překonalo tíhu závaží a zůstává při dně.
3. Experiment popsán v zadání. Svíčka je zatížena závažím o hmotnosti takové, aby horní hrana splývala a hladinou vody a dole nebyla podepřena – plove těsně na hladině. Tomuto odpovídají fotografie (obr. 3)

### 4.2 Měřené parametry

V průběhu experimentu jsme měřili následující veličiny (shrnuté v Obr. 4):

$h_I$  – Hloubku vnitřní části

$\Delta h$  – Výšku okraje svíčky nad hladinou (dále jen „výška nad hladinou“)

$h_M$  – Hloubku kapalně části

$D_{in}$  – Průměr kapalně části

$D_{ex}$  – Průměr duté části

$h_u$  – Výšku ponořené části svíčky.

K těmto jsme pak ještě přidali další parametry, změřené na začátku (resp. na konci) experimentu:  
 $m_0$  – počáteční hmotnost svíčky (pouze paliva)



(a) Pohled šikmo shora

(b) Pohled z boku

Obrázek 3: Fotografie experimentální aparatury

- $m_1$  – koncová hmotnost svíčky (pouze paliva)
- $m_t$  – hmotnost použitého závaží
- $h_0$  – počáteční výška svíčky (pouze paliva)
- $h_1$  – koncová výška svíčky (pouze paliva)
- $R_0$  – poloměr svíčky

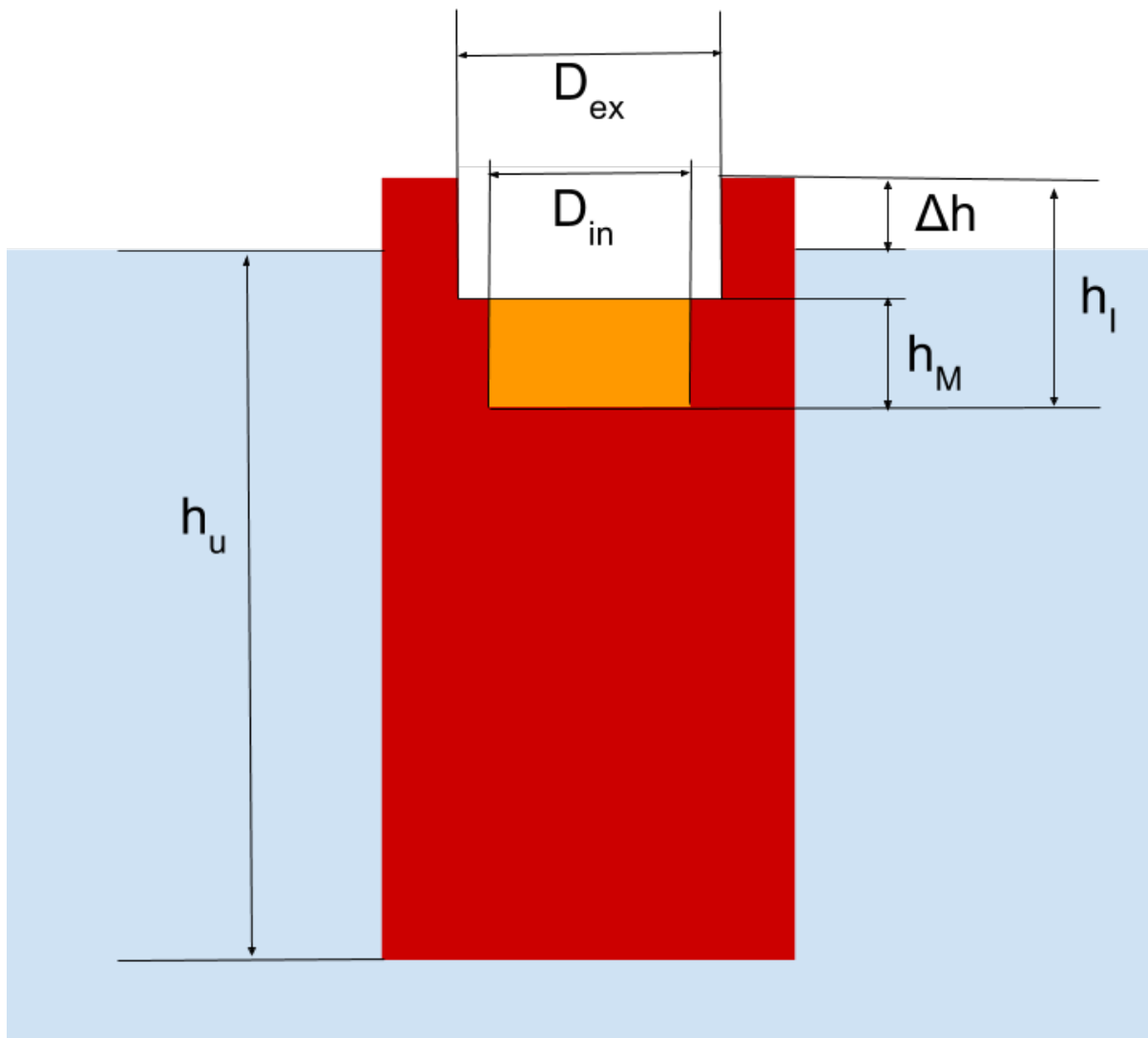
Všechna měření jsme prováděli pomocí posuvného měřidla.

### 4.3 Ověření vlivu vody

Podle příslušného odstavce v teorii jsme ověřili vliv vody na poloměr vnitřní části. K tomuto bylo využito experimentálního nastavení popsaného v bodech 1 a 2 části 4.1. Výsledky jsou shrnuty v grafu na obr. 5. Vidíme, že pro svíčku položenou volně na vzduchu je měřený průměr větší i v rámci odchylek. toto se následně promítá i do hlavního experimentu samotného, i přestože průměr části ve vzduchu není zcela stejný. Je to způsobeno malou vzdáleností od vody (v našem experimentu pouze několik milimetrů) – stále je tedy v menší míře schopna ochlazovat i část vosku ve vzduchu. Toto ještě bude diskutováno u korespondujících výsledků.

Na druhou stranu musíme konstatovat, že v čase  $t \leq 120$  min se nám již nepodařilo změřit průměr kapalně části u svíčky ve vzduchu – hranice přesáhla okraj svíčky a vosk stekl po stěně, měření tedy již není od tohoto momentu relevantní. I toto ovšem zohledníme a uplatníme při diskusi výsledků.





Obrázek 4: Schéma svíčky s označením parametrů měřených v průběhu experimentu

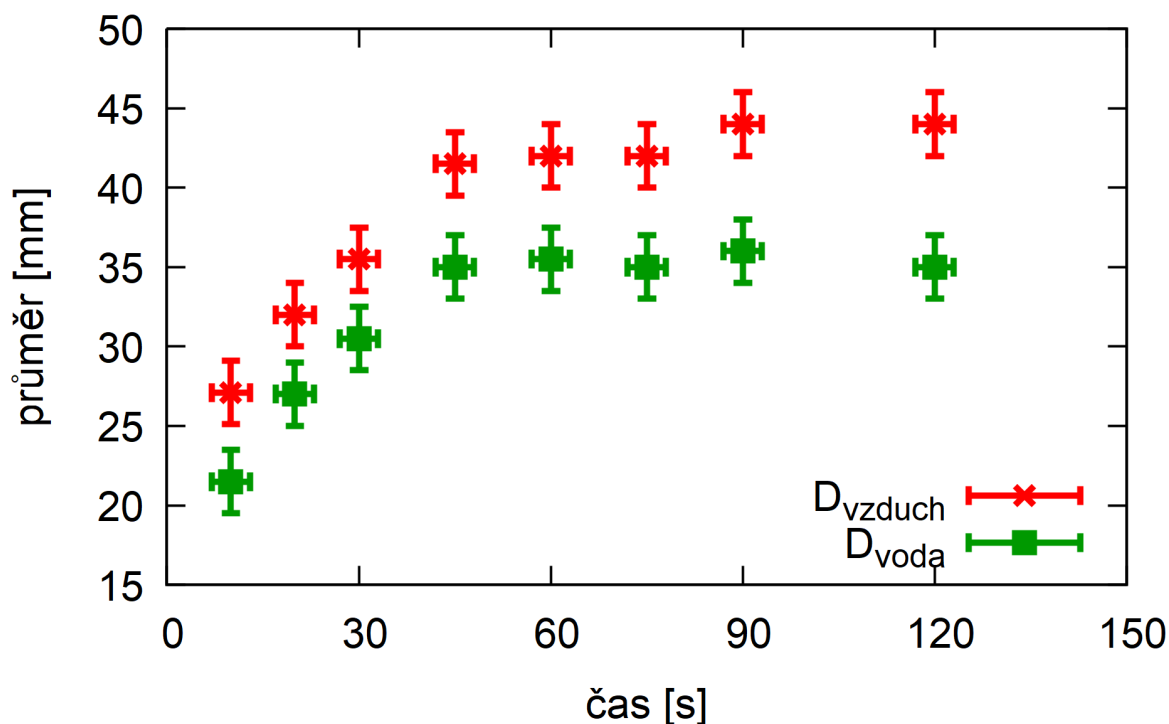
#### 4.4 Měření rychlosti spalování

Pro účely srovnání experimentu s literaturou a teoretické výpočty jsme změřili také rychlost spalování vosku, přičemž předpokládáme, že během celého experimentu bude konstantní. Lze to odůvodnit pomocí chemické reakční kinetiky – jde o nevratnou chemickou reakci pseudoprvního řádu – rychlost reakce, tedy rychlost spalování závisí pouze na koncentraci jednoho reaktantu (vosku) v prostředí [12]. Ovšem ta se v čase téměř nemění, jelikož je zde přítomen také zdroj v podobě kapalného vosku.

Přehledy rychlostí spalování jednotlivých svíček jsou zobrazeny v tabulce 3 spolu s příslušnými rozdíly hmotnosti před a po experimentu a také dobou experimentu.

#### 4.5 Měření pohybu svíčky

Pro určení závislosti na čase jsme zvolili celkový interval 4 hodiny s měřeními v časech 10, 20, 30 a 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180, 210 a 240 minut.



Obrázek 5: Vliv vody na průměr vnitřní části

Výška svíčky $h_0$ [cm]	Rozdíl hmotností $\Delta m$ [g]	Čas experimentu $ts$	Rychlost spalování $j$ [g · min <sup>-1</sup> ]
7	(7,5 ± 3)	(120 ± 5)	(0,0625 ± 0,005)
6	(13 ± 4)	(240 ± 5)	(0,055 ± 0,02)
5	(13 ± 3)	(240 ± 5)	(0,05 ± 0,01)

Tabulka 3: Hodnoty rychlostí spalování pro použité svíčky

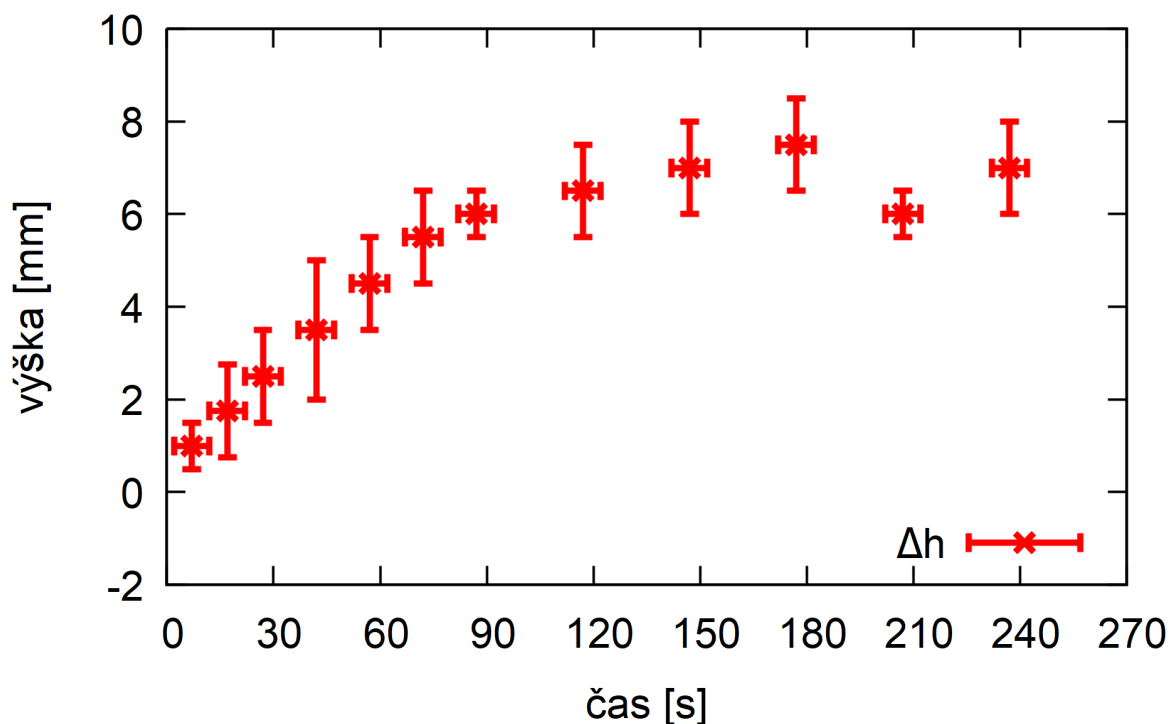
Kratší intervaly na začátku jsme zavedli za účelem zpřesnění měření. Větší intervaly jsme zvolili s ohledem na předpoklad konstantních nebo lineárních závislostí veličin.

## 5 VÝSLEDKY

### 5.1 Měření pro jednu svíčku

Jako model jsme zvolili svíčku o výšce 7 cm. V grafu na obr. 6 je zobrazena časová závislost hlavního parametru úlohy – výšky okraje svíčky nad hladinou, kde výšce  $h = 0$  mm odpovídá hladina vody. Z grafu je patrné, že výška nad hladinou nejdříve lineárně roste, ovšem od času přibližně  $t \approx 120$  min je výška s ohledem na chyby měření téměř konstantní. Toto je v rozporu s původní hypotézou, že výška bude růst přímo úměrně času a bude později diskutováno. Na tento fakt je poté vázána také interpretace dalších výsledků, což bude na příslušných místech zopakováno.

Pro porovnání dalších paramterů vnitřní části viz grafy na obr. 7 a 8. Z porovnání výšek v grafu (obr. 7a) je vidět, že v našem případě se rovná výška nad hladinou výšce kapalně části po dosažení

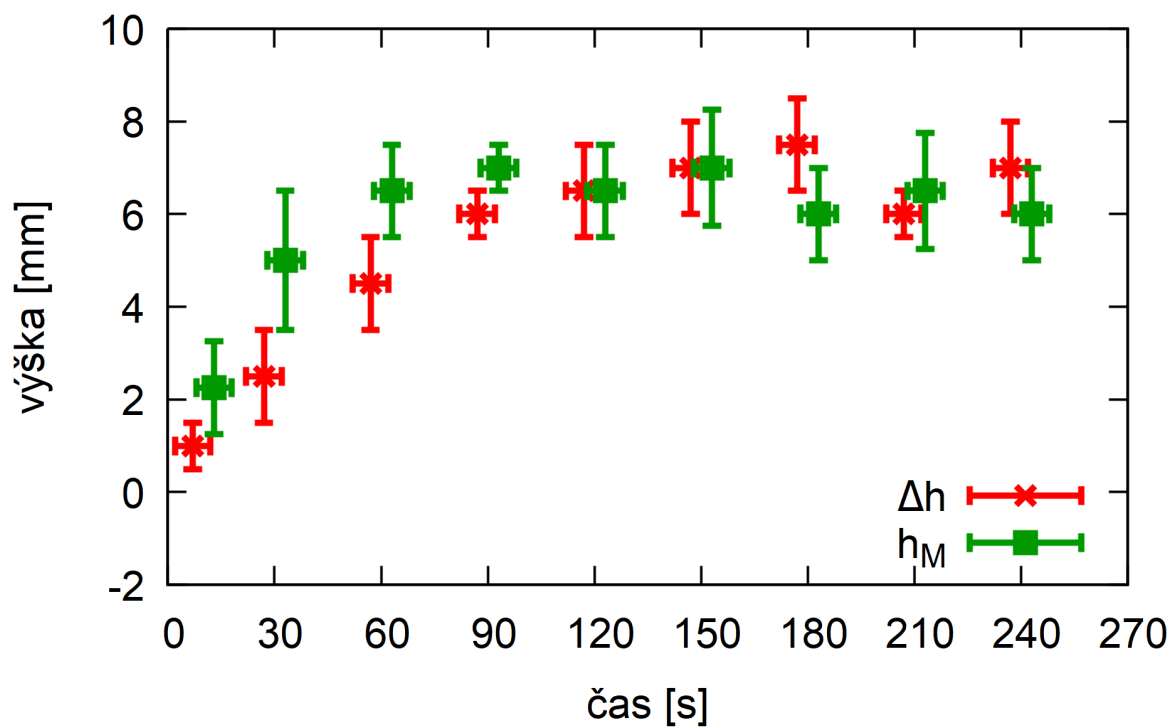


Obrázek 6: Závislost výška okraje svíčky nad hladinou

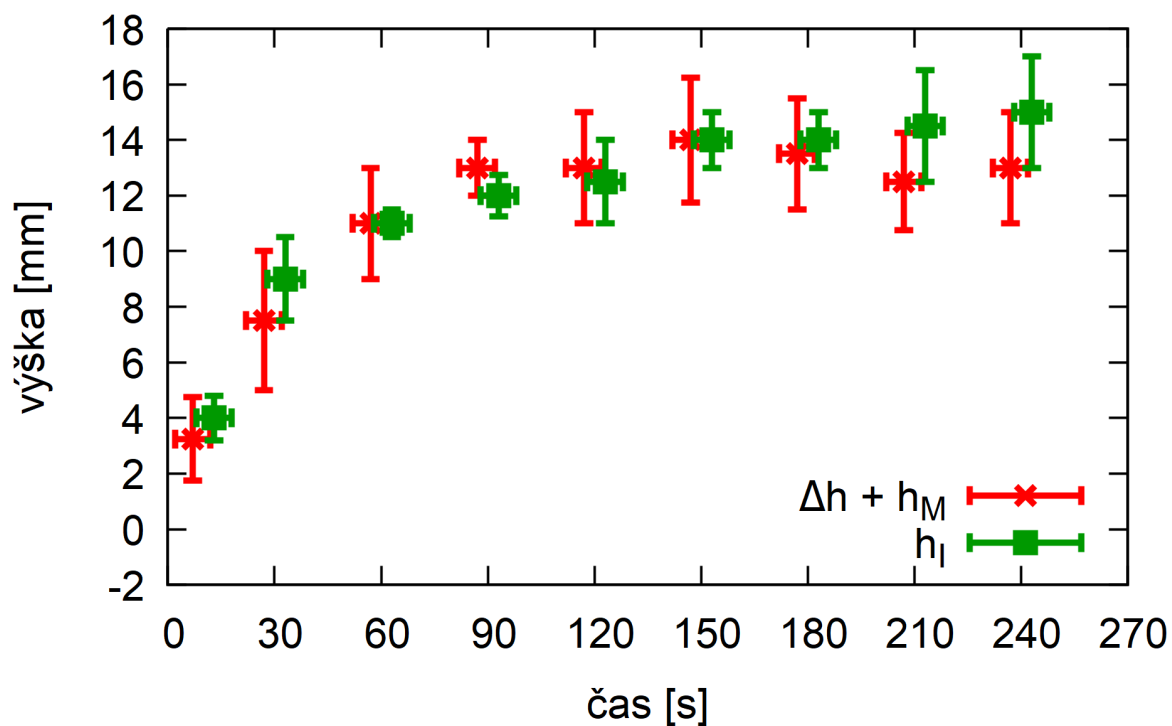
rovnovážného stavu, kdy jsou obě tyto výšky konstantní s přibližnou hodnotou  $\Delta h = h_M \approx (6 \pm 3)$  mm. Ovšem před dosažením tohoto stavu můžeme vidět, že výška kapalné části roste podstatně rychleji a také dříve dosáhne rovnováhy. Je ovšem nutno dodat, že se výšky rovnají jen v tomto konkrétním případě. Jelikož podle rovnice 3 v teoretické části závisí výška také na rozměrech svíčky, platí tento výsledek tedy jen pro udané vstupní parametry. Navíc víme, že výška kapalné části má být po delším čase konstantní a výška nad hladinou přímo úměrná času.

Z dalšího grafu (obr. 7b) lze vypočítat zajímavou souvislost: součet výšky kapalné části a výšky nad hladinou je stejný jako výška vnitřní části celkem – jinými slovy je výška nad hladinou stejná jako výška duté části. Stejně jako v předchozím případě platí, že při změně parametrů svíčky, zejm. rozměrů se výška nad hladinou změní a také je opět nutno konstatovat, že výška nad hladinou by měla být lineární, kdežto zde je konstantní.<sup>3</sup> Přesto je možno předpokládat, že hladina vody bude přibližně v úrovni hladiny kapalného vosku, což lze zdůvodnit malými rozdíly mezi hustotami kapalného a pevného vosku.

<sup>3</sup>Na druhou stranu, uvažujeme-li svíčku s výškou nad hladinou přímo úměrnou času, pak budou obě veličiny lineární a nevylučujeme, že jejich hodnoty budou i tak shodné.

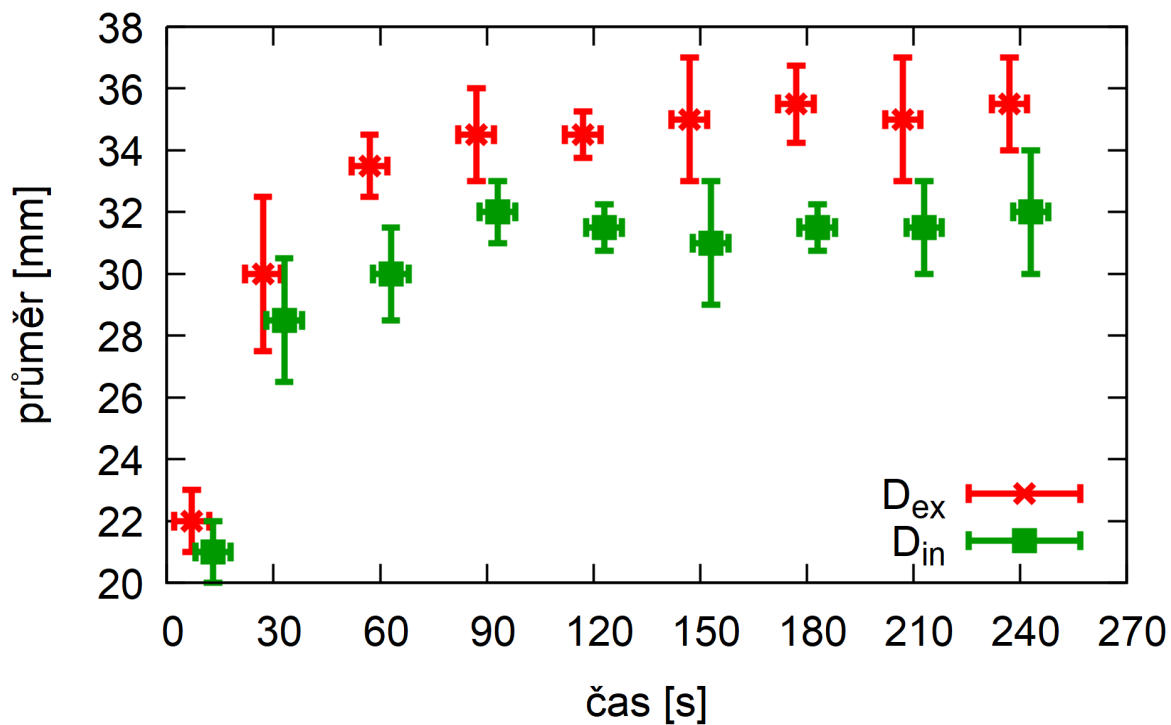


(a) Porovnání časové závislosti výšky nad hladinou a výšky kapalné části.



(b) Porovnání výšky vnitřní části

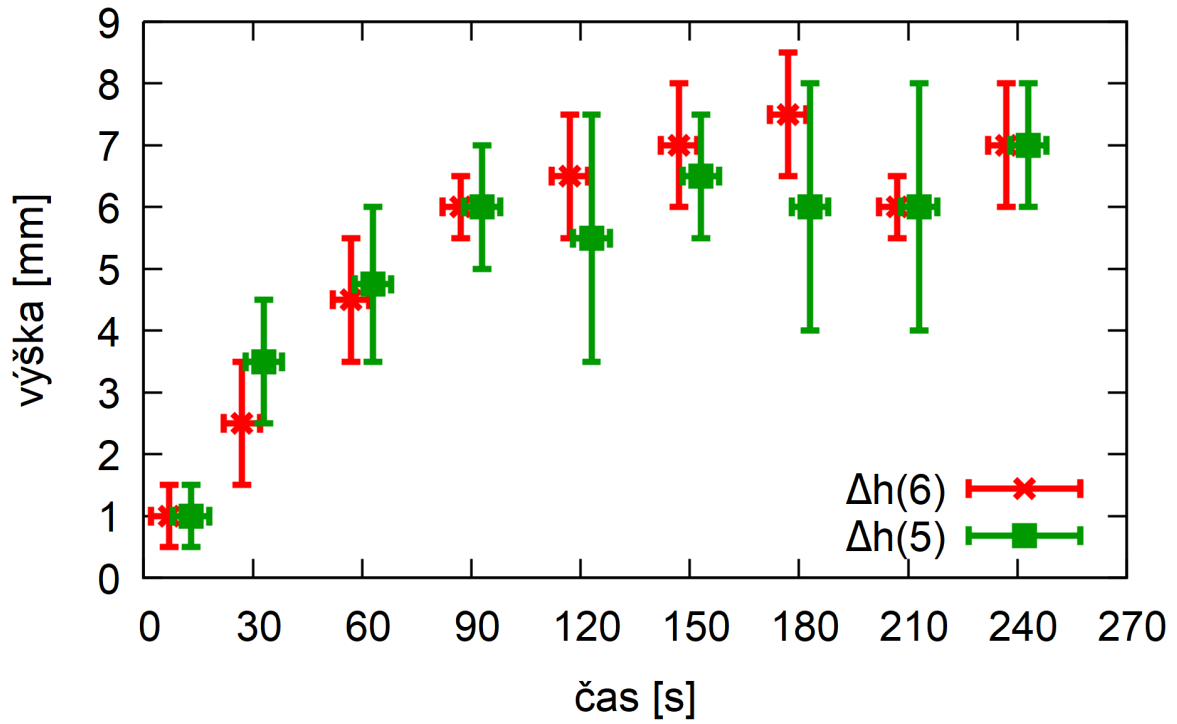
Obrázek 7: Porovnání rozměrů vnitřní části svíčky



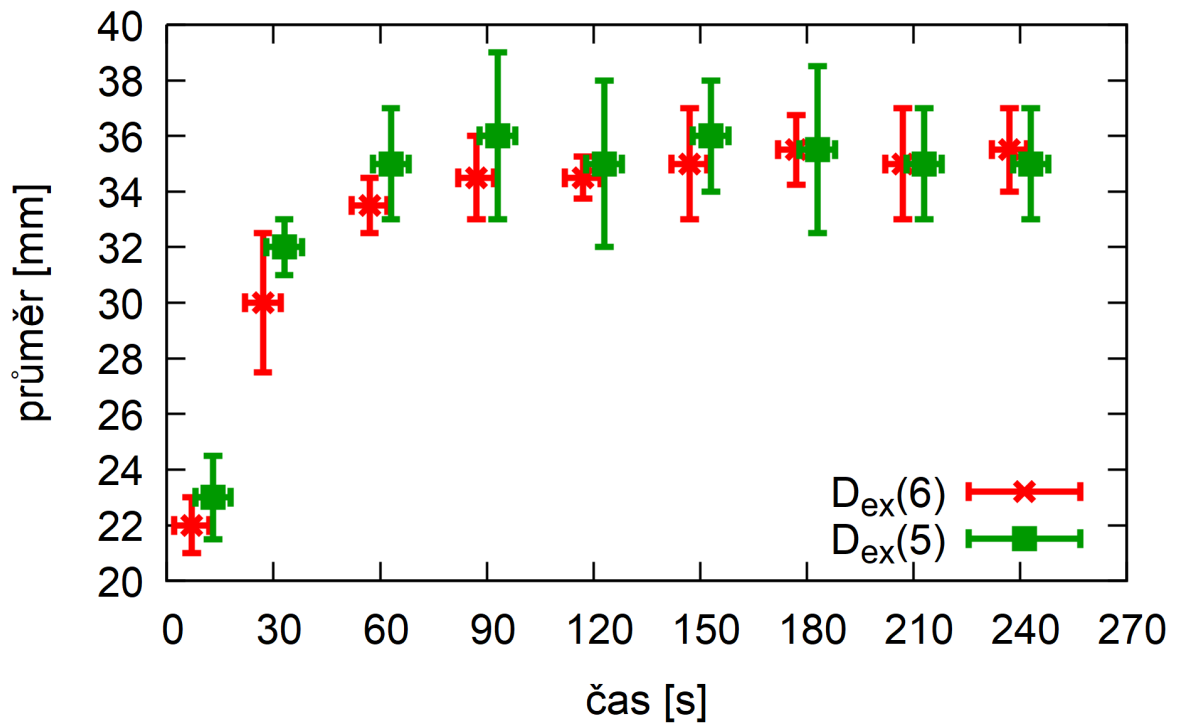
Obrázek 8: Časová závislost průměrů vnitřní části

## 5.2 Porovnání svíček mezi sebou

Pro toto srovnání jsme použili svíčky s výškou 5 a 6 cm. Příslušná srovnání jsou shrnuta v grafech na obr. 9. Ze změřených dat plyne, že jev je nezávislý na výšce svíčky a s tím spojené hmotnosti – potvrzuje náš předpoklad, protože v rovnici 3 se tyto parametry nevyskytují.



(a) Srovnání výšky nad hladinou



(b) Srovnání průměrů duté části

Obrázek 9: Porovnání parametrů vnitřní části pro různé svíčky

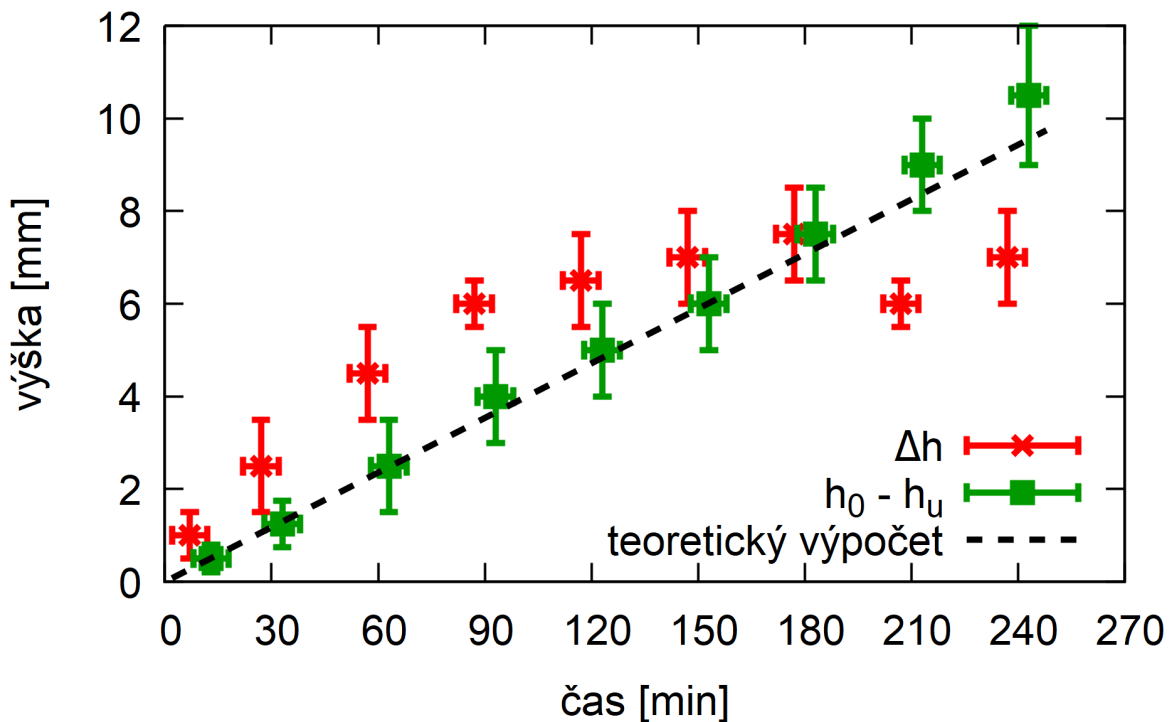
## 6 DISKUSE

### 6.1 Porovnání teorie a experimentů

V části Výsledky jsme identifikovali důležitý rozpor experimentů s literaturou a to ten, že výška nad hladinou není přímo úměrná, jak jsme předpokládali dle rovnice 3, naopak od času přibližně  $t \approx 90$  min se zdá být konstantní. Při zkoumání tohoto rozdílu jsme si všimli, že v teoretické části jsme zanedbali změnu výšky svíčky a předpokládali jsme, že je konstantní. Zjistili jsme, že všechny svíčky měly po ukončení experimentu výšku menší o přibližně  $h_0 - h_1 \approx 1$  cm. Jev odůvodňujeme tím, že po vystoupení se postupně ztrácí vliv vody (konkrétně tedy, jak jsme již několikrát naznačili, ochlazování vnějšího vosku), a v souvislosti s experimenty provedenými v části 4.3 můžeme říci, že plamen roztavil i vosk na horní hraně svíčky.<sup>4</sup> Z toho důvodu jsme při opakování experimentů zavedli další veličinu s názvem „hypotetická výška“ – jde o výšku nad hladinou, kterou by svíčka měla, pokud by si zachovávala stejnou celkovou výšku po celou dobu experimentu (tedy kdyby plamen neroztavil horní hrany svíčky). Tuto hypotetickou výšku můžeme nepřímo změřit pomocí výšky ponořené části  $h_u$  – jednoduše je to rozdíl původní výšky a výšky pod vodou. Tuto výšku jsme pak porovnávali s výškou získanou podle vzorce 3

$$\Delta h_{hyp} = h_0 - h_u \quad (4)$$

$$\Delta h = \frac{4jt}{\pi D^2 \rho_k} \quad (3)$$



Obrázek 10: Srovnání teoretických a experimentálně zjištěných hodnot

Porovnání reálně naměřené, hypotetické a teoreticky vypočtené výšky nad hladinou je zobrazeno na obr. 10. Vidíme, že teoretická přímka prochází všemi hodnotami hypotetické výšky (s přihlédnutím k chybám měření). Toto potvrzuje správnost našeho teoretického předpokladu.

<sup>4</sup>Je zřejmé, že kdybychom bývali použili svíčku o větším průměru, pravděpodobně by výška nad hladinou byla přímo úměrná času, jak jsme předpokládali.

## 6.2 Porovnání s literaturou

Co se týče srovnání s literaturou, při sestavování experimentů a odvozování rovnic jsme vycházeli hlavně ze středoškolských znalostí, ovšem jako vodítko jsme používali především ze článků [paradox] a také s tímto článkem tedy budeme srovnávat naše výsledky.

V článku jsou uvedené grafy závislostí pro poloměr duté části (v našem případě průměr) a výšku kapalně části – jsou zde změřeny a teoreticky odvozeny jako konstantní veličiny v dostatečně dlouhém čase, což se i nám podařilo pozorovat. Pro výšku duté části a výšku nad hladinou jsou v článku uvedeny závislosti lineární. Závislost výšky nad hladinou jsme teoreticky odvodili, ovšem nepozorovali – v předešlé části diskuse jsme rozebrali, čím toto bylo způsobeno.

Jako hodnotu rychlosti spalování  $j$  pro svíčku částečně ponořenou ve vodě (což odpovídá našemu případu ve většině času) zde jsou uvedeny hodnoty  $7,124 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ , což odpovídá  $4,2 \cdot 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{min}^{-1}$ . Tyto hodnoty se řádově shodují s námi experimentálně zjištěnými hodnotami, odlišnost v přesné hodnotě může být způsobena např. odlišným tvarem svíčky (zejména rozměry mohou ovlivnit působení vody na vosk) nebo rozdílným složením paliva.

## 6.3 Diskuse dalších podmínek

Zde se ve stručnosti vrátíme k dalším možným parametrům a jevům v soustavě, které mohou ovlivnit pozorovaný děj.

1. **Ohřívání vody** – Jediné, v čem by se toto mohlo projevit je ve změně hustoty. Hustota vody v závislosti na teplotě mezi 4 a  $100^{\text{circ}}\text{C}$  se mění v rozsahu  $1 - -0,958 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ . Při použití hodnoty  $1 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{mm}^3$  je tento rozdíl v řádu  $10^5$  zanedbatelný i vzhledem k chybám měření.
2. **Nekonstantní rychlost spalování** – Tento jev by mohl mít vliv na průběh závislosti výšky nad hladinou na čase, v teoretické části jsme předpokládali, že je konstantní, přičemž hodnoty odpovídaly experimentálním datům. Nekonstantní rychlost spalování by vedla na obecnější rovnici 5 pro výšku nad hladinou  $\Delta h$  v čase  $x$

$$\Delta h(x) = \frac{4}{\pi D^2 \rho_k} \int_0^x j dt \quad (5)$$

3. **Interakce závaží** – Předpokládáme, že závaží má malý objem vzhledem ke svíčce a také že teplo vydané plamenem neohřívá závaží. V případě, že by to neplatilo, můžeme očekávat, že část tepla bude také spotřebovávat závaží a vzhledem k tomu, že jsme použili kovové, bude toto teplo vést a tavit vosk okolo něj (místa, kde je zabodnut). Kromě toho také v případě, že vnitřní část dosáhne hloubky, kde je ukotveno závaží, může dojít k průniku vody vzniklou trubicí, ochlazení vosku a narušení experimentu.



## 7 ZÁVĚR

Úloha je zaměřená na popsání jevu a tomu bylo přizpůsobeno i vypracování. V teoretické části jsme se zabývaly působením sil na svíčku a jejich příčinami, pozornost byla rovněž věnována chemickým jevům, které se odehrávají při hoření svíčky a jak se promítají do fyzikálního popisu. V soustavě jsme popsali hmotnost závaží potřebného ke správnému fungování a výšku, do které svíčka vystoupá v čase odvozením z Archimédova zákona pomocí znalostí středoškolské fyziky.

V praktické části jsme provedli experimenty s různými svíčkami a měřili parametry útvarů vzniklých v průběhu experimentu. Při analýze výsledků byla konstatována potřeba měřit výšku nad hladinou nepřímo při malých průměrech svíčky z důvodu tavení horních okrajů plamenem. Po této korekci jsme zjistili shodu v teoretických a experimentálních datech, pozitivní bylo také srovnání s použitou literaturou.

## 8 REFERENCE

,

Reference jsou uvedeny v pořadí výskytu odkazů v textu.

[1] Příspěvatelé Wikipedie, *Svíčka* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2017, Datum poslední revize 22. 12. 2017, 12:55 UTC, [citováno 28. 01. 2018] <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sv%C3%AD%C4%8Dka&oldid=15666357>>

[2] BENEŠOVÁ, Marika, Erna PFEIFEROVÁ a Hana SATRAPOVÁ. *Odmaturuj! z chemie. 2.*, přeprac. vyd. Brno: Didaktis, c2014. Odmaturuj!. ISBN 978-80-7358-232-6.

[3] KLOUDA, Pavel. *Základy biochemie. 3. vyd.* Ostrava: Pavko, 2013. ISBN 978-80-86369-16-7.

[4] KLOUDA, Pavel. *Biochemie zblízka. Druhé, upravené vydání.* Ostrava: Pavel Klouda - nakladatelství Pavko, 2016. ISBN 978-80-86369-20-4.

[5] Příspěvatelé Wikipedie, *Hentriakontan* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2017, Datum poslední revize 8. 10. 2017, 13:50 UTC, [citováno 28. 01. 2018] <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Hentriakontan&oldid=15441567>>

[6] Příspěvatelé Wikipedie, *Dokosan* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2017, Datum poslední revize 8. 10. 2017, 13:43 UTC, [citováno 28. 01. 2018] <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Dokosan&oldid=15441533>>

[7] *540-10-3 CAS MSDS (CETYL PALMITATE) Melting Point Boiling Point Density CAS Chemical Properties.* Chemical book [online]. 2017 [cit. 2018-01-28]. Dostupné z: <[http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_US\\_CB8749079.aspx](http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_US_CB8749079.aspx)>

[8] *Triacetyl hexadecanoate | CAS:6027-71-0 | Chemsrce. ChemSrc* [online]. 2018 [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: [https://www.chemsrc.com/en/cas/6027-71-0\\_637031.html](https://www.chemsrc.com/en/cas/6027-71-0_637031.html)

[9] VOHLÍDAL, Jiří. *Chemické a analytické tabulky.* Praha: Grada, 1999. ISBN 978-80-7169-855-5.

[10] THEODORAKIS, Stavros a Charalambos ARISTIDOU. The paradox of the floating candle that continues to burn. *Am. J. Phys.* 2012, 80(8), 657–663.

[11] TARÁBEK, Pavol a Petra ČERVINKOVÁ. *Odmaturuj! z fyziky.* Vyd. 2. Brno: Didaktis, c2006. Odmaturuj!. ISBN 80-7358-058-6.

[12] Příspěvatelé Wikipedie, *Rychlostní rovnice* [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2016, Datum poslední revize 6. 01. 2016, 15:35 UTC, [citováno 29. 01. 2018] <<https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Rychlostn%C3%AD%8Drov%C3%AD%8Dnice>>

# PŘÍLOHA I – ODVOZENÍ ROVNICE 1

$m_w, V_w, \rho_w$  hmotnost, objem a hustota vosku (materiálu/paliva)  
 $m_z, V_z, \rho_z$  hmotnost, objem a hustota závaží  
 $m, V$  hmotnost a objem svíčky a závaží  
 $\rho_k$  hustota vody

Vyjdeme z Archimédova zákona

$$mg = \rho_k V g$$

Vyjádříme celkovou hmotnost (resp. objem) jako součet hmotností (objemů) vosku a závaží

$$m_w + m_z = \rho_k (V_w + V_z)$$

Vyjádříme objem závaží jako podíl hmotnosti a hustoty a upravíme:

$$m_w + m_z = \rho_k V_w + \rho_k \frac{m_z}{\rho_z}$$

$$m_z \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho_z}\right) = \rho_k V_w - m_w$$

Dosadíme součin hustoty a objemu vosku za hmotnost, vyjádříme hmotnost závaží:

$$m_z \left(1 - \frac{\rho_k}{\rho_z}\right) = \rho_k V_w - \rho_w V_w$$

$$m_z = \frac{V_w (\rho_k - \rho_w)}{1 - \frac{\rho_k}{\rho_z}}$$

Úpravou složeného zlomku získáme konečnou rovnici, kterou můžeme vyjádřit buď pro objem, nebo hmotnost vosku:

$$m_z = \frac{\rho_z V_w (\rho_k - \rho_w)}{\rho_z - \rho_k} = \frac{\rho_z m_w (\rho_k - \rho_w)}{\rho_w (\rho_z - \rho_k)} \quad (1)$$