

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2018

Tomáš Musil

Univerzita Hradec Králové
Přírodovědecké fakulta
Katedra fyziky

Měření zrychlení a rychlosti jednoduché rakety

Bakalářská práce

Autor:	Tomáš Musil
Studijní programy:	B1701/B1801 Fyzika/Informatika
Studijní obor:	Fyzika se zaměřením na vzdělávání/ Informatika se zaměřením na vzdělávání
Vedoucí práce:	RNDr. Michaela Křížová, Ph.D.



Zadání bakalářské práce

Autor: Tomáš Musil

Studium: S15FY005BP

Studijní program: B1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání, Informatika se zaměřením na vzdělávání

Název bakalářské práce: **Měření zrychlení a rychlosti jednoduché rakety**

Název bakalářské práce AJ: Measurement of acceleration and velocity of a simple rocket

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Cílem této bakalářské práce bude sestavit a proměřit fyzikální parametry letu několika raket na různé pohony, které jsou snadno vyrobitelné i ve školním prostředí. V teoretické části bude rozpracován pohyb a dolet různých raket z fyzikálního hlediska. V praktické části pak bude pomocí rychlokamery změřena rychlost a zrychlení letu rakety na různé pohony.

Vynálezy a objevy, I. Štoll: Dějiny fyziky, Halliday - Resnick - Walker : Fyzika,...

Garantující pracoviště: Katedra fyziky,
Přírodovědecká fakulta

Vedoucí práce: RNDr. Michaela Křížová, Ph.D.

Oponent: doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce: 11.4.2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, z kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne

.....
Tomáš Musil

Chtěl bych tímto poděkovat své vedoucí bakalářské práce paní RNDr. Michaele Křížové, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této práce. Též bych rád poděkoval panu RNDr. Danielovi Jezberovi za poskytnutí spolupráce a rad během provádění měření.

Anotace

Bakalářská práce “Měření zrychlení a rychlosti jednoduché rakety” pojednává o principech jednoduché rakety, snaze sestrojít ji a změřit její vyvinutou rychlost a zrychlení za pomoci videozáznamu. Cílem práce je porovnat teoretické a naměřené hodnoty letu jednoduché rakety a zodpovězení cílových otázek. Teoretická část poskytuje obecné vysvětlení problematiky raket, kde se postupně zaměří na rakety octové. Zmíněná je též problematika měření rychlosti a zrychlení objektů, za pomoci videozáznamu. V praktické části je vysvětlen postup výroby samotné rakety a dalších potřebných součástí. Následně se porovnávají získané teoretické a naměřené hodnoty.

Klíčová slova

Jednoduchá raketa, octová raketa, měření, rychlost, zrychlení, rychlokamera, ocet, jedlá soda, porovnání

Annotation

The bachelor thesis "Measurement of acceleration and speed of a simple rocket" discusses the principles of a simple rocket, with an effort to build it and measure its developed speed and acceleration through video footage. The aim of the thesis is to compare the theoretical and measured values of the simple rocket flight and answer the target questions. The theoretical part provides a general explanation of the issues with rockets, where it will gradually focus on vinegar rockets. Also mentioned are the issues with measurement of speed and acceleration of objects, using video recording. The practical part explains the process of making the rocket itself and other necessary components. Subsequently, the theoretical and measured values are compared.

Keywords

Simple rocket, vinegar rocket, measuring, velocity, acceleration, high-speed camera, vinegar, baking soda, compare

OBSAH

ÚVOD	1
1 TEORETICKÉ POZNATKY	2
1.1 Akce a reakce	2
1.2 Hybnost tělesa	2
1.3 Zákon zachování hybnosti.....	3
1.4 Ciolkovského rovnice.....	4
1.5 Tah.....	7
1.6 Celkový impuls	8
1.7 Specifický impuls.....	8
1.8 Popis parametrů rakety.....	8
1.9 Stabilita – centrum tlaku	9
1.10 Výtoková rychlost	11
1.11 Děje při odpalu rakety	13
2 Octová raketa.....	15
2.1 Části octové rakety	15
2.1.1 Tělo.....	15
2.1.2 Stabilizátory	16
2.1.3 Tryska.....	16
2.1.4 Hlavice	17
2.2 Optimální množství paliva	18
2.3 Tlakování octové rakety	19
3 Způsob měření rychlosti a zrychlení	22
3.1 Rychlokamera.....	22
3.1.1 Software	22
3.1.2 Princip určení rychlosti a zrychlení pomocí videozáznamu.....	22
4 Praktická část.....	24
4.1 Stavba odpaliště a rakety.....	24

4.1.1	Stavba odpaliště.....	24
4.1.2	Stavba rakety	27
4.2	Příprava před startem	29
4.3	Praktické měření.....	31
4.4	Výsledky měření	39
	Závěr.....	40
	Seznam použité literatury	41
	Další zdroje	43
	Internetové odkazy	43
	Seznam obrázků	44
	Příloha	45

ÚVOD

Název bakalářské práce se odkazuje na jednoduché rakety. Což znamená, že jejich stavba není komplikovaná a ani finančně náročná. Díky tomu je možné rekonstruovat měření i ve školním prostředí, kde jsou tyto specifikace klíčové.

Ve své práci se konkrétně zaměřím na rakety octové. Nicméně principy, které zde budu zmiňovat, platí obecně pro všechny druhy raket, které s sebou přinášejí i svoji problematiku. Octová raketa se pro mě stala zajímavou právě, díky tomu, že se nejedná čistě o fyzikální problém, ale zahrnuje i trochu chemie a šikovnosti.

Vývoj raket je spojen se spoustou pokusů a omylů, kdy je potřeba pro jejich zlepšení získat co nejvíce informací o průběhu letu. Já se v této práci zaměřím na měření rychlosti a zrychlení, neboť se domnívám, že se jedná o podstatné a zajímavé veličiny, ze kterých lze odvodit další proměnné (odpor prostředí, ...).

Mým záměrem v této práci bude poskytnout teoretické podklady potřebné k pochopení praktických výpočtů, které budou vycházet z měření reálných hodnot.

Jedním z cílů bude vytvořit návod pro možnou rekonstrukci mých měření. Krok po kroku se budu snažit ukázat, jak jsem vytvořil odpaliště rakety, samotnou testovací raketu a způsob jakým bude probíhat měření.

Důležitým faktorem, zde bude porovnání teoretických očekávaných hodnot měření s realitou a vysvětlení, proč se případně ne/shodují.

Cílem práce je též získat odpovědi na tyto otázky:

- Je možné změřit rychlost a zrychlení jednoduché rakety bez pomoci vnitřně zabudovaných zařízení?
- Bude rozdíl mezi teoretickou a praktickou hodnotou dosažené maximální rychlosti rakety menší než 10%?

1 TEORETICKÉ POZNATKY

Principy raket se opírají z velké části o základní blok fyziky, a to o mechaniku. V této kapitole se budu věnovat těm nejdůležitějším souvislostem, které mají co dočinění s fungováním raket. Dále se zde více zaměřím na rakety octové. Nakonec se zde dostaneme k vytvoření predikcí, které budeme v praktické části zkoumat dále.

1.1 Akce a reakce

Technicky vzato jsou všechny Newtonovy pohybové zákony pro pochopení funkčnosti raket podstatné. Avšak Newtonův třetí pohybový zákon je tím nejpodstatnější. Jeho definice zní: „*Síly, kterými na sebe působí dvě tělesa, jsou stejně velké, navzájem opačného směru, současně vznikají a zanikají a každá z nich působí na jiné těleso.*“ [1, str. 58] Zavedlo se pojmenování jedné ze sil jako akce a druhá jako reakce, kde pak lze tento zákon vyslovit jako: „*Každá akce vyvolává stejně velkou reakci opačného směru.*“ [1, str. 58] Z toho se tento zákon nazývá též jako zákon akce a reakce. Důležité je zmínit, že každá z těchto sil působí na jiné těleso, a proto se akce a reakce navzájem ve svých účincích nikdy nevyrušují. Dále je také důležité si uvědomit, že pohybový účinek stejně velkých sil akce a reakce nemusí být stejný. To vyplývá z druhého pohybového zákona, kde

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}.$$

Tímto dostává těleso o menší hmotnosti větší zrychlení a opačně hmotnější těleso zrychlení menší. [1]

1.2 Hybnost tělesa

Pro popis pohybového stavu v dynamice zavedl Newton veličinu, kterou nazval hybnost tělesa. Jedná se o vektor, který má stejný směr jako vektor okamžité rychlosti daného tělesa a je definován jako součin hmotnosti m a okamžité rychlosti \mathbf{v} tělesa, tedy

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}, [\mathbf{p}] = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Z kinematiky víme, že zrychlení hmotného bodu, je rovno změně rychlosti $d\mathbf{v}$ za dobu dt , za kterou tato změna nastala, neboli [1]

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}.$$

Dosazením do výše zmíněného vzorce druhého pohybového zákona dostaneme [1]

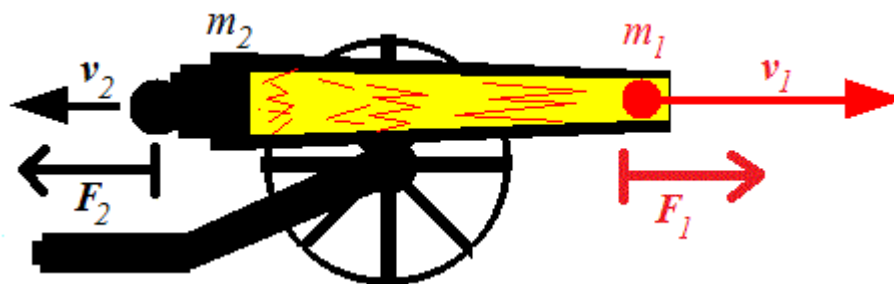
$$\mathbf{F} = \frac{m \cdot d\mathbf{v}}{dt}.$$

Podmínkou ke správnosti tohoto vzorce je konstantní hmotnost, což ale jak zjistíme, pro raketový pohon neplatí. Je tedy potřeba počítat s proměnnou hmotností, což bude provedeno v sekci 1.4.

1.3 Zákon zachování hybnosti

Další podstatný zákon, kterým se popisuje pohyb rakety, je zákon zachování hybnosti. Tento zákon vychází z třetího Newtonova pohybového zákona. Jeho definice zní: „*Celková hybnost izolované soustavy těles se vzájemným silovým působením nemění.*“ [1, str. 60] Pro izolovanou soustavu platí, že na tělesa v ní působí jen vnitřní síly. Nejsou tedy ovlivněny silami vnějšími, neboli silami, kterými působí tělesa vně uvažované soustavy. [1]

Abychom si udělali lepší pohled na situaci, využijí model kanónu. [2]



Obrázek 1 - ukázka zákona zachování hybnosti na kanónu [2, přeloženo a upraveno]

Sledujme nyní změny hybnosti naší izolované soustavy v okamžiku, kdy má dělová koule opustit hlaveň kanónu. Pro naši situaci platí, že $m_1 > m_2$, kde m_1 je hmotnost kanónu a m_2 je hmotnost dělové koule. Před samotným výstřelem, byla celková hybnost soustavy nulová. Při výstřelu došlo ke shoření střelného prachu, čímž vzrostl tlak uvnitř kanónu. Tlaková síla působí na kouli a uděluje jí hybnost $\mathbf{p}_1 = m_1 \cdot \mathbf{v}_1$. Naopak koule v důsledku zákona akce a reakce působí zpětně na kanón a uděluje mu hybnost $\mathbf{p}_2 = m_2 \cdot \mathbf{v}_2$. Podle ZZH platí, že [1]

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \text{konst.},$$

následně přepíšeme na tvar

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2 = 0.$$

A nakonec vzorec upravíme do tvaru

$$m_1 \mathbf{v}_1 = -m_2 \mathbf{v}_2 ,$$

z tohoto nám vyplývá, že hybnost, kterou nabude dělová koule a kanón při výstřelu, jsou stejně velké, ale opačného směru. Co je pro nás navíc podstatné, je velikost jejich rychlostí. Dáme-li do rovnosti jejich velikost hybností $m_1 v_1 = m_2 v_2$, pak pro poměr rychlostí dostaneme [1]

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{m_2}{m_1} .$$

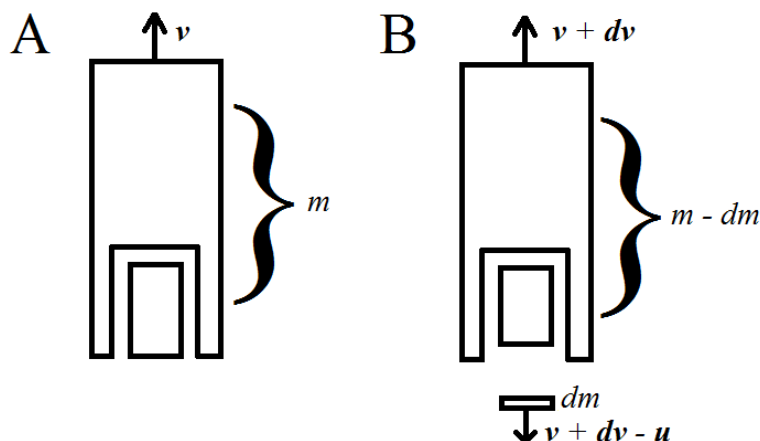
Tento poměr nám říká, že rychlost střely bude tolikrát větší než rychlost kanónu, kolikrát má dělová koule menší hmotnost než kanón. [1] To nastává u raket, kdy při využívání pohonných látek, které musí proudit jedním směrem relativně velkou rychlostí, neboť je jejich hmotnost relativně menší, než je hmotnost rakety v daném momentě. Zde ale musíme brát v úvahu pouze tu část pohonných látek, které v daném momentě byly využity, neboť podstatnou část hmotnosti rakety tvoří právě její palivo. Nyní je však potřeba si uvědomit, že v průběhu vypouštění pohonných látek se mění celková hmotnost rakety, což zavádí novou problematiku, kde se musí vyřešit, jaká musí být počáteční hmotnost rakety, aby dosáhla výsledné rychlosti, kterou potřebujeme například k opuštění atmosféry Země.

1.4 Ciolkovského rovnice

Konstantin Eduardovič Ciolkovskij, jakožto zakladatel toho co známe ze současné kosmonautiky, dal vzniknout stejnojmenné rovnici, která vychází již ze zmíněného ZZH.

Uvažujeme zjednodušenou situaci, kde máme raketu letící prostorem, kde není odpor vzduchu a nepodléhá gravitačním vlivům. V raketě je tekutina, která je vnitřním tlakem prudce vyvrhnutá, opačným směrem vůči směru letu rakety ven výtokovou rychlostí vzhledem k raketě \mathbf{u} . [3]

Mějme situaci **A**, kde máme raketu o hmotnosti m a rychlosti \mathbf{v} . Po určitém vyčerpání paliva o hmotnosti dm se dostáváme do situace **B**. V této situaci jsou již dva objekty, prvním je raketa, která má nyní hmotnost $m - dm$ a rychlost $\mathbf{v} + d\mathbf{v}$ a druhým je palivo, které bylo využito ke zrychlení rakety a které letí pryč od rakety rychlostí $\mathbf{v} + d\mathbf{v} - \mathbf{u}$. [3]



Obrázek 2 - ilustrace pro Ciolkovského rovnici

Použijeme tedy ZZH a opíráme se o invariant, což je celková hybnost, která zůstává v rovnosti. Zapišme tedy, že hybnost v situaci A je rovna hybnosti v situaci B

$$\mathbf{p}_A = \mathbf{p}_B$$

$$m \cdot \mathbf{v} = (m - dm) \cdot (\mathbf{v} + d\mathbf{v}) + dm \cdot (\mathbf{v} + d\mathbf{v} - \mathbf{u})$$

$$m \cdot \mathbf{v} = m \cdot \mathbf{v} + m \cdot d\mathbf{v} - \mathbf{v} \cdot dm - dm \cdot d\mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot dm - \mathbf{u} \cdot dm$$

$$0 = m \cdot d\mathbf{v} - dm \cdot d\mathbf{v} - \mathbf{u} \cdot dm$$

$$m \cdot d\mathbf{v} = dm \cdot d\mathbf{v} + \mathbf{u} \cdot dm.$$

Nyní se bude hodit, když si definujeme rychlost spotřeby paliva. Označíme ji písmenem q . Předpokládejme, že tato rychlost bude po celou dobu konstantní. Zapišme ji tedy jako [3]

$$q = \frac{dm}{dt}.$$

Zasadíme ji do předchozí rovnice, tak aby se nám tam vyskytovala tato veličina

$$m \cdot d\mathbf{v} = \frac{dm}{dt} \Delta v dt + \mathbf{u} \frac{dm}{dt} dt$$

$$m \cdot d\mathbf{v} = q \cdot d\mathbf{v} \cdot dt + \mathbf{u} \cdot q \cdot dt.$$

Vydělím hodnotou dt získáme

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q \cdot d\mathbf{v} + \mathbf{u} \cdot q$$

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{u} \cdot q.$$

Tímto jsme získali jednu pohybovou rovnici rakety. Mějme na paměti, že hmotnost v tomto vzorci je funkcí času, tj. $m = m(t)$. [3]

S počáteční hmotností m_0 rakety, která v našem případě klesá s konstantní rychlostí v závislosti na rychlosti využívání paliva q , bude platit

$$m(t) = m_0 - q \cdot t.$$

I v případě, že by se nejednalo o lineární závislost, bylo by možné tento vztah snadno modifikovat.

Pohybovou rovnicí můžeme tedy převést do tvaru

$$(m_0 - q \cdot t) \frac{dv}{dt} = \mathbf{u} \cdot q.$$

Z tohoto tvaru nyní můžeme odvodit Ciolkovského rovnici tak, že ji upravíme a zintegrujeme přes dobu trvání pohybu, resp. od 0 do časového okamžiku t . Máme tedy [3]

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{\mathbf{u} \cdot q}{m_0 - q \cdot t} \\ v(t) &= \int_0^t \frac{dv}{dt} dt = \int_0^t \frac{\mathbf{u} \cdot q}{m_0 - q \cdot t} dt \left| \begin{array}{l} m_0 - q \cdot t = x \\ -q \cdot dt = dx \end{array} \right| = \\ &= -\mathbf{u} \int_{m_0}^{m_0 - qt} \frac{1}{x} dx = -\mathbf{u} \ln(m_0 - q \cdot t) + \mathbf{u} \ln m_0 = \\ &= \mathbf{u} \ln \frac{m_0}{m_0 - q \cdot t}. \end{aligned}$$

Máme tedy Ciolkovského rovnici

$$v(t) = \mathbf{u} \ln \frac{m_0}{m_0 - q \cdot t}, \quad (1)$$

kde je třeba se zamyslet, kdy nám toto řešení dává smysl. Pro výraz $(m_0 - q \cdot t)$ platí, že je jistě nenulový až do okamžiku, kdy využijeme celou počáteční hmotnost rakety, to se ale nikdy nestane, neboť palivo tvoří pouze část celé hmotnosti a to i případě, kdy je hmotnost paliva mnohonásobně větší než hmotnost samostatné rakety.

Jmenovatel v logaritmu tedy nikdy v reálné situaci neklesne na nulu, nýbrž na hodnotu hmotnosti, kterou má raketa po využití paliva. Tomu se říká konečná hmotnost rakety a značíme ji m_1 . Vzorec by tedy mohl vypadat i takto

$$v = \mathbf{u} \ln \frac{m_0}{m_1}, \quad (2)$$

s tím, že nám v tomto případě sděluje konečnou rychlost rakety. [3] Poměr počáteční a konečné hmotnosti se nazývá Ciolkovského číslo C [4]

$$C = \frac{m_0}{m_1}.$$

S rovnicí (1) se též lze setkat v ekvivalentním tvaru

$$m(t) = m_0 \cdot e^{-\frac{v(t)}{u}},$$

Tato rovnice nám udává hmotnost rakety v daném okamžiku v průběhu pohybu. U (2) lze pozorovat, že si lze určit cílovou požadovanou rychlost rakety. Jedním ze způsobů jak dosáhnout zamýšlených rychlostí je zvyšování Ciolkovského čísla. Teoreticky je možné dosáhnout jakékoliv rychlosti, avšak logaritmická závislost těchto vztahů zpomaluje růst značným způsobem, kdy brzo narazíme na technické překážky, které nám neumožní přejít přes určitou hranici. [3] Druhým způsobem, jak tedy lze zvýšit možnou rychlost je zaměřit se na zvýšení výtokové rychlosti, avšak i zde se narazí na technické limity. Z těchto důvodů vznikla konstrukce několikastupňových raket, kde po využití paliva prvního stupně byla jeho zbývající nevyužitelná hmotnost oddělena a následně byl spuštěn další stupeň. [4]

Pro jednostupňovou raketu by platilo, že „pro dosažení první kosmické rychlosti je nutné, aby počáteční hmotnost rakety byla 14krát větší než konečná ($C = 14$), pro dosažení druhé kosmické rychlosti je nutné, aby počáteční hmotnost rakety byla 40krát větší než konečná hmotnost ($C = 40$). Při použití vícestupňových raket (Ciolkovského čísla se pak násobí) můžeme počítat s Ciolkovským číslem jednotlivých stupňů v rozmezí $C = 2$ až $C = 4$, jejichž výroba je naprosto reálná.“ [5]

Použití Ciolkovského rovnice je pro nás navíc pouze orientační, neboť nepředpokládáme žádné vnější síly, jako je například gravitace a odpor vzduchu.

Co je též zajímavé je, že Ciolkovského rovnice nám také ukazuje, že raketa může dosáhnout vyšší rychlosti, než je výtoková rychlost paliva. To nastává při hodnotách poměru C větších než Eulerovo číslo. [4]

1.5 Tah

Tah, nebo též tažná síla, je označení síly, kterou rakety vytvářejí k tomu, aby překonaly vnější síly, které na ně působí a dostaly raketu do pohybu. Označme tuto sílu jako T , přičemž je její velikost dána jako součin průtokového množství paliva q a výtokové rychlosti u [7]

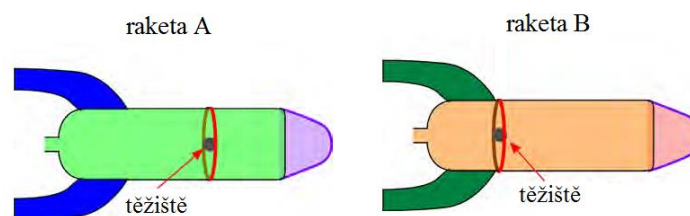
$$T = u \cdot q = \frac{u \cdot dm}{dt}.$$

Mějme tedy

- L ... výška těla válcové rakety
- d ... průměr těla válcové rakety
- F_p ... odpor prostředí
- x_T ... těžiště rakety
- F_G ... tíhová síla
- C_p ... centrum tlaku
- s ... vzdálenost těžiště rakety od centra tlaku
- p, V ... tlak a objem plynu v těle rakety
- V_k ... objem kapaliny v těle rakety

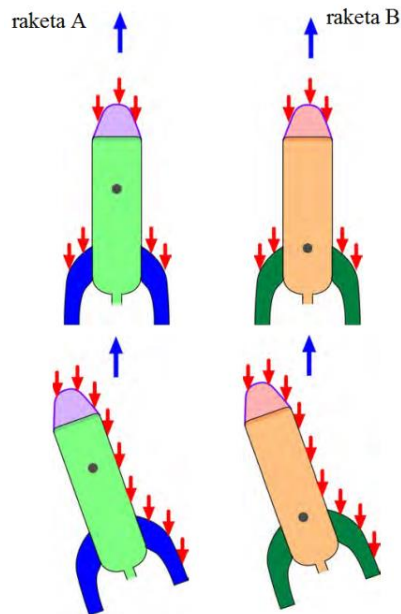
1.9 Stabilita – centrum tlaku

Stabilita letu rakety je nesmírně důležitou podmínkou úspěšného letu. S tím souvisí dva parametry a těmi jsou x_T těžiště rakety a C_p centrum tlaku, jehož podstatu vysvětlím níže. Předpokládejme, že známe jejich polohu. Porovnáme nyní dvě situace. Mějme raketu A a raketu B. Jsou kompletně vzhledově identické, nicméně mají rozdílné rozložení hmotnosti a jejich těžiště je tedy na rozdílných místech. Přesněji předpokládejme, že raketa B má těžiště v dolní polovině rakety a raketa A v horní polovině rakety. [10]



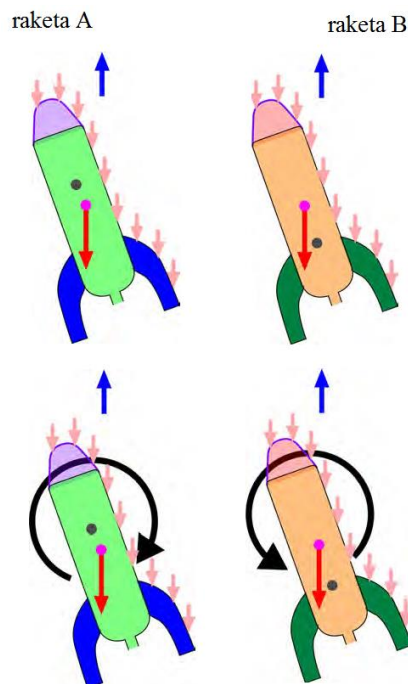
Obrázek 4 - ilustrace pro stabilitu rakety č. 1 [10, vlastní překlad a úprava]

Přejdeme-li nyní k situaci, kdy jsou tyto rakety vystřeleny v odporujícím prostředí. Převážná část plochy, která by v ideálním případě prorážela cestu vzhůru, je hlavice rakety a jenom z minimální části vrchní plocha stabilizátorů. Nicméně berme v potaz, že se raketa lehce pootočí vůči směru letu z důvodu drobného bočního větru. [10]



Obrázek 5 - ilustrace pro stabilitu rakety č. 2 [10, vlastní překlad a úprava]

V takovém případě se značně zvětší odpor prostředí, neboť se odhalí boční plocha rakety, a i značná část plochy stabilizátorů. Vypočítat podíly sil, které působí na jednotlivé části rakety v daný moment, by mohlo být poměrně složité. Pro nás je důležité vědět, že v určitém bodě uvnitř rakety se nachází bod, který funguje jako výslednice působících odporových sil. Tento bod je znám jako centrum tlaku. Jelikož jsou tvary obou raket stejné, leží centrum tlaku ve stejném bodě, avšak kvůli tomu, že je u obou raket těžiště na rozdílném místě, mají odporové síly prostředí na každou z nich rozdílný pohybový účinek. [10]



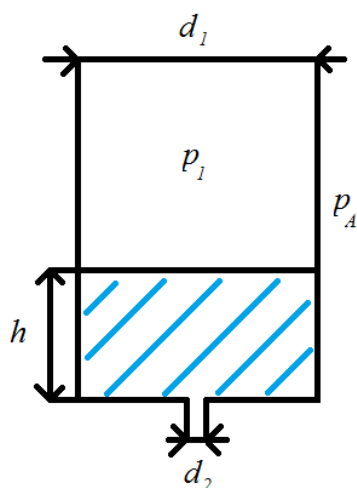
Obrázek 6 - ilustrace pro stabilitu rakety č. 3 [10, vlastní překlad a úprava]

Centrum tlaku C_p je na ilustraci vyznačeno růžovým bodem. Těžiště x_T vyznačeno šedým bodem, zde funguje jako osa otáčení.

Pro raketu A, jejíž těžiště leží blíže špičky rakety než centrum tlaku, má výslednice sil procházející, právě centrem tlaku za následek vzniku momentu síly M , který v tomto případě natáčí raketu do optimální letové polohy, zatímco pro raketu B má moment síly za následek až úplné vyosení vůči optimálnímu letovému směru. [10]

1.10 Výtoková rychlost

Jak jsme tedy zatím zjistili, zbavováním se paliva, které opouští raketu za relativně velkých rychlostí, je princip jak se rakety dostávají do pohybu. Způsoby jak palivo tuto rychlost získá, se různí podle druhu použitých látek. Pro octovou raketu, kterou zde budu používat, se jako palivo využívá ocet a jedlá soda. Důsledkem chemické reakce, která bude popsána v sekci 2.3, nastane při kontaktu těchto dvou látek k navýšení tlaku uvnitř těla rakety. Právě tento tlak působí na hladinu paliva a tím urychluje jeho výtok skrze výtokový otvor. Nyní bude mým cílem zjistit, jak velkou rychlost palivo tímto procesem získá. Abych mohl tento problém teoreticky vyřešit, využiji Bernoulliho rovnici, kde budu předpokládat, že palivo bude mít vlastnosti ideální kapaliny.



Obrázek 7 - ilustrace pro výpočet výtokové rychlosti

Označení d_1 je průměr těla rakety, d_2 průměr výtokového otvoru, p_1 velikost vnitřního tlaku, p_A velikost atmosférického tlaku, h výška palivového sloupce, s tím že ρ se rovná hustotě dané kapaliny.

Mám tedy

$$\frac{1}{2}\rho\mathbf{u}_1^2 + p_1 + \rho gh = \frac{1}{2}\rho\mathbf{u}^2 + p_A + \rho\mathbf{g} \cdot 0,$$

Nyní vydělím celou rovnici hustotou a vznikne mi

$$\frac{\mathbf{u}_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gh = \frac{\mathbf{u}^2}{2} + \frac{p_A}{\rho},$$

kdy \mathbf{u} je výtoková rychlost, kterou hledám. Nyní využiji rovnici kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu a upravím ji pro parametr průměru

$$\begin{aligned}\mathbf{u}_1 \cdot S_1 &= \mathbf{u} \cdot S_2 \\ \mathbf{u}_1 &= \mathbf{u} \cdot \frac{S_2}{S_1} = \mathbf{u} \cdot \frac{\frac{\pi \cdot d_2^2}{4}}{\frac{\pi \cdot d_1^2}{4}} = \mathbf{u} \cdot \frac{d_2^2}{d_1^2}.\end{aligned}$$

Takto upravenou rovnici zpětně dosadím do Bernoulliho rovnice

$$\frac{\mathbf{u}^2}{2} \cdot \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4 + \frac{p_1}{\rho} + gh = \frac{\mathbf{u}^2}{2} + \frac{p_A}{\rho},$$

nyní je to otázka vyjádření u_2 ze vzorce a vyjde mi vzorec pro výtokovou rychlost

$$\mathbf{u} = \sqrt{\frac{2gh + 2\frac{p_1 - p_A}{\rho}}{1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^4}} \quad (3)$$

Nyní si musíme uvědomit, že výška h se bude postupně měnit, na druhou stranu bychom mohli člen $(2gh)$ zcela vynechat, neboť jeho velikost je v našich experimentech vůči $\left(2\frac{p_1 - p_A}{\rho}\right)$ zanedbatelná. Dále budu muset předpokládat, že by se po dobu uvolňování kapaliny neměnili tlaky p_1 a p_A . Pro atmosférický tlak to zaručit můžeme, neboť nečekáme vzlet rakety tak vysoký, že by se výrazně změnil. Problém očekávám u tlaku p_1 , [8] neboť zde dochází k adiabatickému ději. Důsledkem poměrně rychlého vyčerpání paliva se plyn, který tvoří tlak na kapalinu, roztahuje velkou rychlostí. Tím jednak nestíhá přijmout teplo a zároveň se snižuje tlak. Tento jev lze dobře pozorovat při úniku plynu z bombičky na sifonovou láhev. Otázkou tedy je, jak moc to ovlivní teoretickou hodnotu výtokové rychlosti, která nám později poslouží k výpočtu teoretické rychlosti rakety v daném čase podle zasazení do Ciolkovského rovnice.

1.11 Děje při odpalu rakety

Máme tedy všechny potřebné informace k tomu, abychom mohli popsat situace, které v průběhu letu nastanou. Jedná se celkově o 6 dějů, které proběhnou v následujícím pořadí.

Start

V tento moment má raketa hmotnost m_0 . Tlak uvnitř těla rakety dosahuje maxima. V tuto chvíli bychom měli být nejvíce opatrní, neboť krátce po startu získá raketa relativně velkou rychlost.

Hlavní urychlovací část

Nejkomplexnější děj, který prověří schopnost rakety na maximum. Jakýkoliv nedostatek se zde projeví. Kapalina uniká, raketa získává rychlost a výšku. Těžiště rakety se posouvá ke špičce a oddaluje se od centra tlaku. Let rakety se díky tomu více stabilizuje. Odpor prostředí se zvyšuje, tíhová síla se snižuje. Raketa se dostává k maximální rychlosti. Hmotnost rakety je ke konci prakticky roven m_1 .

Vedlejší urychlovací část

Plyn, který tlačil na tekutinu, nyní uniká velkou rychlostí. Kvůli jeho malé hmotnosti, však nedodává takovou hybnost jako kapalina. Rychlost se navýší jen z menší části. Dochází k dosažení maximální rychlosti. Raketa má nejlepší stabilitu. Odpor prostředí dosahuje maxima. Hmotnost rakety je roven konečné hmotnosti m_1 .

Zpomalování k vrcholu

Raketa je působením vnějších sil nucena svůj pohybový stav změnit. Zpomaluje a dostává se do vrcholu, neboli momentu, kdy je nejvýše od vzletové plochy.

Volný pád – let k zemi

Raketa má nyní maximální polohovou energii, která se postupně přemění na energii kinetickou. V tento moment můžou nastat dvě možnosti. První variantou je, že raketa vypustí zpomalovací zařízení ve formě padáku, který zamezí získání relativně velké dopadové

rychlosti. Druhou možností je víra v to, že se raketa po dopadu nezničí, či něco nezničí, popřípadě obojí.

Přistání

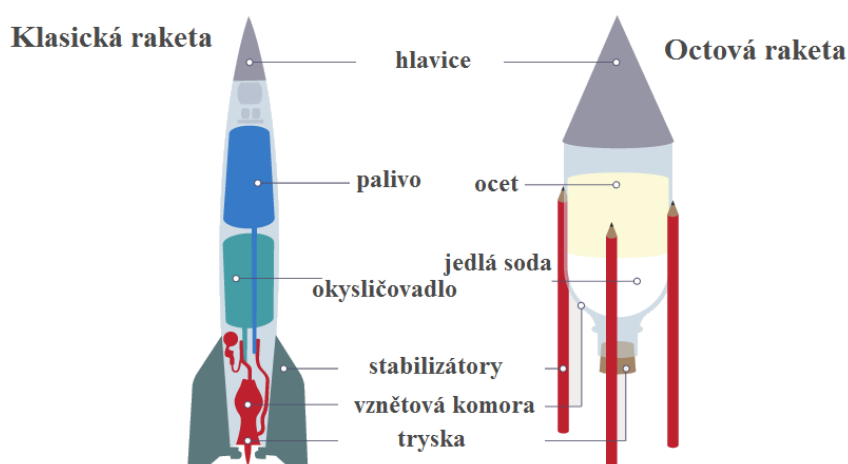
Velmi dobrý způsob jak hodnotit kvalitu octové rakety, je počet úspěšných odpalů a přistání. Za úspěšný model bych považoval raketu, která bude mít více než 20 přistání, bez potřeby závažných oprav.

2 Octová raketa

Rakety jsou spjaty s mnoha možnostmi využití a podoby. Ať už jako ty, které létají do vesmíru, nebo ty které třímají ničivou sílu. Co je spojuje, je vysoká cena, která je potřeba k vývoji a jejich sestavení. Je tedy vhodnější sestavit si nejdříve levnější model, kde je neúspěch pouze krokem k úspěchu. Možností jak snížit cenu a zachovat rysy rakety je spousta. Jedním z nich je sestavení octové rakety. Často se s ní lze potkat již na základních školách, kde se jedná o školní projekt.

2.1 Části octové rakety

Porovnáme-li části klasické rakety a té octové, dojdeme k závěru, že jsou stejné. Každá z částí má svůj důvod a specifika. Tím nejdůležitějším je u raket hmotnost, která je potřeba držet na minimu. Samozřejmě je potřeba brát v potaz, aby byl materiál pevný a dobře se s ním pracovalo. Díky současným podmínkám je možné získat přístup k poměrně levným a dobře dostupným materiálům, které tyto podmínky splňují.



Obrázek 8 – ilustrace porovnání raket [6, vlastní překlad a úprava]

Zaprvé se nenechme odradit tím, že by octová raketa měla vypadat, jako dětská hračka. To, jak raketa vypadá, je vždy zcela na schopnostech a možnostech stavitele.

2.1.1 Tělo

Jako první věc, kterou je potřeba vyřešit je tělo rakety. Jako jednoznačná varianta je využití PET lahvi. Není však pravidlem, že každá taková láhev je vhodná ke stavbě modelu rakety.

Největší překážkou je najít takovou, která se svým tvarem nejvíce podobá válci. To, protože nám tento tvar poskytuje optimální letové podmínky a jejich stavba je nejjednodušší. Vzhledem k tomu, že drtivá většina vyráběných PET lahví má speciální tvarování, tak aby přilákala zákazníka a odlišila se od ostatních prodejců, může být tedy celkem oříšek najít tu správnou. Když už se nám povede najít potřebný tvar, je důležité se zamyslet nad pevností, hlavně kvůli tomu, že uvnitř těla rakety vzniká velký tlak. Výrobci šumivých nápojů mají toto specifikum vcelku vyřešené, a proto je nejlepší hledat právě tam. Pokud však není možné najít v žádném z obchodů vhodnou PET láhev, je internet východiskem, kde ji najít. Když už tedy najdeme takovou, kterou chceme, doporučuji zakoupit hned několik do zásoby.

2.1.2 Stabilizátory

Při vytváření stabilizátorů je potřeba brát v potaz několik věcí: hmotnost, tvar, velikost, umístění, pevnost a jednoduchost zpracování. Pro začátečníky, kteří si chtějí vytvořit octové rakety, doporučuji, jako materiál karton a lepicí pásku zvanou duct tape. Lze je získat za poměrně nízkou cenu ve všech obchodech. Mají nízkou hmotnost a při šikovném zpracování mají i vhodnou pevnost a hlavně je jednoduché s nimi manipulovat. Můžeme využít variantu tří, nebo čtyř stabilizátorů. V případě tří svírají úhel 120° v ostatních případech se využívají čtyři stabilizátory, které svírají úhel 90° . Pro funkčnost je hlavním cílem, aby jejich usazení na tělu rakety bylo co nejnižší a aby jejich plocha byla dostatečná k vytvoření centra tlaku, které bude níže než těžiště, je ale potřeba brát v úvahu, že se vším s mírou a nevytvářet zbytečně velké stabilizátory, které budou těžké a zpomalovali by raketu, případně by mohli dráhu letu narušit stejně, jako kdybychom je neměli.

2.1.3 Tryska

Místo, kde palivo vyvěrá z rakety relativně velkou rychlostí, se nazývá tryska a hraje zásadní roli v tom, jak efektivně se dokáže využít energie uvnitř rakety. Problematika raketových trysek je téma, které by dalo na spoustu stránek. Pro nás je podstatné vědět, že vnitřní průměr trysky zásadně ovlivní let rakety.

Nyní porovnáme dvě nejčastější situace, jak se řeší trysky u octových raket. Prvním způsobem je využití otvoru PET láhve, tak jak byla vyrobena. Vnitřní průměr bývá lehce nad 20 mm. Druhým způsobem je využití rychlospojky. Její vnitřní průměr se liší dle typu, ale nejčastěji bývá

bud' 9 mm, nebo 10 mm. Máme tedy v podstatě o polovinu menší otvor, což bude mít za následek například to, že výtoková rychlost bude u rychlospojky větší, zato ztráta paliva bude pomalejší. S těmito změnami nastává několik rozdílů, jak bude vypadat let totožné rakety s rozdílnými tryskami. Bereme-li za cíl dosáhnout co největšího zrychlení, je větší tryska vítězem, avšak v případě maximální vzletové výšky, by už to tak platit nemuselo. Vše se samozřejmě odvíjí i od dalších parametrů, jako je například celková hmotnost rakety, proto je potřeba vyzkoušet obě varianty a případně hledat i lepší.

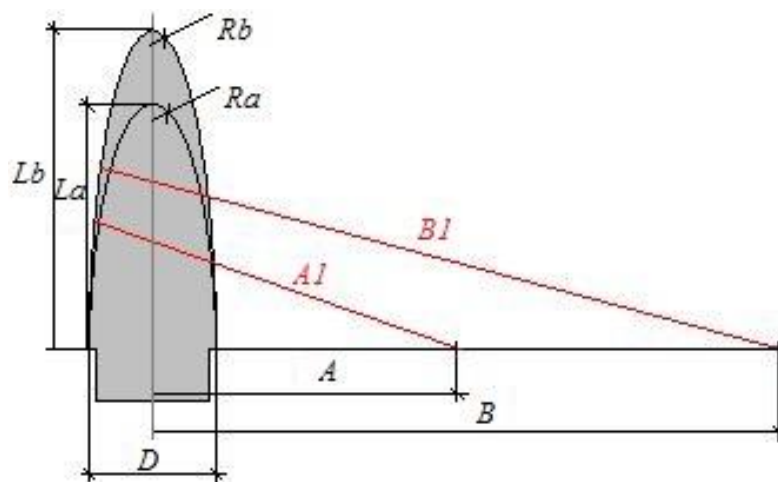
2.1.4 Hlavice

Aerodynamika hraje zásadní roli pro let rakety, navíc pokud má raketa občas za cíl nést náklad. K tomu, aby bylo možné zmírnit síly odporu prostředí a zároveň uchovat náklad v bezpečí při letu, slouží právě hlavice. Její tvar zde hraje nejdůležitější roli. Neboť podle Newtonova odporového vzorce působí na pohybující se objekt v odporujícím prostředí síla

$$F_p = \frac{1}{2} C_o S \rho v^2 ,$$

kde C_o je součinitel odporu, který závisí právě na tvaru hlavice. Je tedy našim cílem, zvolit takový tvar, který je nejvíce aerodynamický, neboli jeho hodnota se bude blížit nule, tak aby byla tato síla co nejmenší a raketa mohla dosáhnout vysokých rychlostí.

Pro vytvoření tvaru hlavice, jejíž hodnota součinitele odporu se bude pohybovat mezi hodnotami 0,05 a 0,1 lze navrhnout plánek pomocí kružítka. Dle situace lze vytvořit dvě varianty. Normální (L_a) a štíhlejší (L_b). Obě jsou založeny na stejném průměru rakety. [11]



Obrázek 7 - aerodynamická hlavice [11]

Pro výpočet hodnot platí [11]

$$A = 3,75 \cdot D ; B = 8,75 \cdot D ,$$

kde poloměr kružnice vyjde ze vztahu

$$A1 = 4,25 \cdot D ; B1 = 9,25 \cdot D .$$

Vzhledem k tomu, že ostré zakončení není ideální, vytváří se zaoblení s poloměrem špičky hlavice R_a a R_b . Jejich hodnota se volí 0,5 až 1 mm pro D menší jak 30 mm v ostatních případech volíme 1,5 mm až 2 mm. [11]

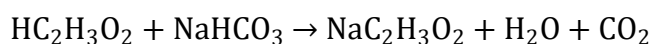
V případě octových raket bývá nejčastěji využita jako hlavice opět PET láhev, která by těmto hodnotám nejvíce odpovídala. Podélně láhev rozřízne v místě, kde je její průměr shodný s tělem rakety, víčko se uřízne a nalepí se na něj například polovina pingového míčku. Takto vytvořená hlavice vytváří dostatečný prostor, ve kterém je pak možné vytvořit návratový systém ve formě padáku nebo elektronický systém zaznamenávající letový stav. Padák má ve výsledku opačnou funkci než hlavice a to vytvořit co největší odporový činitel, který pro tvar duté koule proti proudu větru bývá kolem 1,4.

2.2 Optimální množství paliva

Důležitou otázkou, z hlediska letových schopností a ceny odpalu octových raket, je vědět: Jaké je optimální množství paliva před startem? Jedno ze základních pravidel v případě, že nemáme žádnou představu o optimálním množství paliva pro danou raketu, je nejlepší začít naplněním rakety do 1/3 jejího objemu palivem. Tudiž nám zbyde 2/3 volného objemu pro plyn. Důvod, proč nevyužijeme většinu objemu rakety pro kapalinu je prostý. Kapalina je v podstatě nestlačitelná a tedy nedokáže uchovat mnoho energie. Plyn na druhou stranu dokáže uchovat velké množství energie, když je natlakovaný. Není, ale tak hmotný a neposkytuje tedy takovou hybnost raketě, jako kapalina. Najít, ale optimální poměr mezi energií v plynu a hmotností kapaliny není něco, co by šlo vyřešit jednoduchým výpočtem, neboť záleží na mnoha vzájemně závislých faktorech, jako je například celková hmotnost rakety, součinitel odporu, startovací vnitřní tlak, velikost trysky a další. Máme tedy dvě možnosti. Tou první je využití simulátorů, které je možné najít na internetu. Například při zadání slov do vyhledávače „Water rocket simulation.“ V závěru přiložím odkazy na webové stránky simulátorů, které v této době fungují. Na těchto simulátorech lze po zadání parametrů rakety zjistit velké množství informací, ještě než raketa vzlétne. Je, ale potřeba brát v úvahu, že se jedná pouze o simulaci, která se od reality může lišit. Druhým způsobem je samotné testování rakety v terénu a vyhodnocení dle několika letů s různým poměrem kapaliny a plynu, při zachování stejného tlaku. [12]

2.3 Tlakování octové rakety

Nejdůležitější proces u octových raket, je když přijde jedlá soda s octem do kontaktu. Jedná se o rozhodující moment před startem octové rakety, kdy je třeba dodržovat bezpečnostní kroky, neboť se jedná o rychlou chemickou reakci. Abychom došli k fyzikálním výsledkům, je nejdříve nutné popsat probíhající chemickou reakci. Reaktivní složkou octa je kyselina octová $\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2$, soda je hydrogenuhličitan sodný NaHCO_3 .



Při reakci tedy k vytěsnění vodíku z karboxylové skupiny sodíkem a vznikne kyselina uhličitá, která však existuje pouze jako vodný roztok oxidu uhličitého. Právě uvolněnému oxidu uhličitému vděčíme za nárůst tlaku v naší raketě.

Mějme například 2l PET láhev, kterou naplníme do 1/3 octem, který obsahuje 8 % kyseliny octové, vycházíme-li z toho, že tato koncentrace je nejčastěji dostupná v obchodech. Snadno tedy zjistíme, kolik této kyseliny je přítomno v uvažovaném množství. Z tabulek zjistíme hustotu octa $\rho_{8\%} = 1,0097 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.

$$V_{8\%} = \frac{2}{3} l = \frac{2}{3} \cdot 10^3 \text{ cm}^3$$

$$\rho_{8\%} = 1,0097 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$$

$$m_{8\%} = V_{8\%} \cdot \rho_{8\%} = \frac{2}{3} \cdot 10^3 \cdot 1,0097 \doteq 673,13 \text{ g}$$

Hmotnost octa v raketě je teoreticky tedy 673,13 g. Z této hmotnosti však patří kyselině octové pouze 8 %.

$$w = 0,08$$

$$m_{\odot} = 673,13 \text{ g}$$

$$m_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2} = w \cdot m_{\odot} = 0,08 \cdot 673,13 \doteq 53,85 \text{ g}$$

Teoretická hmotnost kyseliny octové v roztoku je 53,85 g. Ve skutečnosti může být tato hmotnost jiná, nejen v důsledku toho, že objem octa byl určen pouze přibližně, ale i díky aditivům, které ovlivňují hustotu octa a ta se proto liší od tabelované hodnoty.

Ze zápisu chemické reakce je zřejmé, že kyselina octová a hydrogenuhličitan sodný reagují v poměru svých látkových množství 1:1. Provedeme jednoduchý výpočet na zjištění, kolik hydrogenuhličitanu sodného reaguje s přítomnou kyselinou octovou beze zbytku.

$$M_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2} = 60,05 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$m_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2} = 53,85 \text{ g}$$

$$M_{\text{NaHCO}_3} = 84,01 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$$

$$m_{\text{NaHCO}_3} = ?$$

$$n_{\text{NaHCO}_3} = n_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2}$$

$$\frac{m_{\text{NaHCO}_3}}{M_{\text{NaHCO}_3}} = \frac{m_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2}}{M_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2}}$$

$$m_{\text{NaHCO}_3} = M_{\text{NaHCO}_3} \frac{m_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2}}{M_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2}} = 84,01 \cdot \frac{53,85}{60,05} = 75,34 \text{ g}$$

Takže s 53,85 gramy kyseliny octové reaguje beze zbytku 75,34 g jedlé sody. Dopočítejme nyní látkové množství takto uvolněného oxidu uhličitého

$$n_{\text{CO}_2} = n_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2} = \frac{m_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2}}{M_{\text{HC}_2\text{H}_3\text{O}_2}} = \frac{53,85}{60,05} = 0,897 \text{ mol}$$

Protože objem, který může tento uvolněný plyn zaujmout je samozřejmě limitován objemem, který je ještě v PET láhvi k dispozici (předpokládáme, že kapalina je dokonale nestlačitelná, proto může plyn zaujmout pouze objem 4/3 litru). Před reakcí je uvnitř i vně láhve atmosférický tlak, během reakce vzniká v lahvi přetlak. Zanedbáme-li změnu teploty způsobenou chemickou reakcí, pak přetlak závisí pouze na příbytku látkového množství plynných látek.

$$\Delta pV = \Delta nRT$$

$$\Delta p = \frac{\Delta nRT}{V} = \frac{0,897 \cdot 8,314 \cdot 293,15}{\frac{4}{3} \cdot 10^{-3}} = 1\,640\,000 \text{ Pa}$$

Takový tlak je poměrně větší, než budeme prakticky potřebovat. Vycházím z toho, že [10, str. 37 - překlad] pro relativně nové a nepoškozené PET lahve, by se měl držet tlak pod 500 kPa. My se budeme držet z bezpečnostního hlediska hranice kolem 350 kPa. Cestou jak tedy získat takový tlak bude podělení množství jedlé sody a kyseliny octové pěti. Budeme tedy mít teoreticky

$$m_{\text{CH}_3\text{COOH}} = \frac{53,85}{5} = 10,77 \doteq 11 \text{ g}$$

$$m_{\text{NaHCO}_3} = \frac{75,34}{5} = 15,068 \doteq 15 \text{ g}.$$

Pro jedlou sodu je dávkování snadné, neboť se nachází v pevném skupenství ve formě prášku a lze navážít. Kyselinu octovou budeme muset naředit v poměru 1:5 s vodou. Výhodné bude připravit si speciální PET láhev, která bude mít označený okraj ve 20 % obsahu. S takovým množstvím bude tedy teoretická hodnota vnitřního tlaku rovna

$$n_{CO_2} = n_{CH_3COOH} = \frac{m_{CH_3COOH}}{M_{CH_3COOH}} = \frac{10,77}{60,05} = 0,179 \text{ mol}$$

$$p = \frac{\Delta nRT}{V} = \frac{0,179 \cdot 8,314 \cdot 293,15}{\frac{4}{3} \cdot 10^{-3}} \doteq 330 \text{ kPa}.$$

Tento poměr tedy berme jako limitní. Nabízí se samozřejmě možnost vylepšit pevnost PET lahve tím, že ji zpevníme karbonovými vlákny, ale to je poměrně složitý proces, který zde provádět nebudu. Se zkušenostmi, které mám je takto velký tlak dostačující a dokonce někdy i příliš velký. Pokud není za cíl vylézt co nejvíce a co nejrychleji, je dokonce výhodnější tento poměr i zmenšit a to když chceme spíše demonstrovat funkčnost rakety, což je případ, kteří řešíme zde. Je, ale potřeba brát v potaz, že se zmenšujícím poměrem kyseliny octové a jedlé sody bude proces tlakování pomalejší, neboť budou molekuly více rozprostřené uvnitř vodného roztoku. V praktické části se zaměřím i na to, zdali teoretické výpočty tlaku odpovídají realitě a případně zjistili, jaký poměr octa a jedlé sody je potřebný k dosažení potřebných hodnot tlaku.

3 Způsob měření rychlosti a zrychlení

V této práci využiji pro měření rychlosti a zrychlení zařízení zvané rychlokamera. Rozeberu zde tedy, problematiku práce s tímto zařízením a následný způsob zpracování získaných dat.

3.1 Rychlokamera

Zaznamenávání videa není nic jiného, než vytváření mnoha snímků v krátkém časovém okamžiku. Označení, které nám udává počet snímků za sekundu, se označuje z angličtiny FPS, neboli frames per second. Pro běžně dostupné kamery se tato hodnota pohybuje od 25 – 30 FPS, kdy je možné pomocí různých technik tyto hranice zdvojnásobit. To nám, ale nepomůže v případě, kdy chceme detailně pozorovat děje, které probíhají tak rychle, že je není lidské oko schopné zaznamenat. Proto se vyrábí rychlokamery, které dokáží zaznamenat tisíce snímků za sekundu a poskytnout tak možnost analyzovat procesy na vědecké úrovni. Největším počátečním problémem bývá cena, která je v dnešní době pořád vysoká a tak je potřeba často vyhledávat vlastníky těchto kamer. Když už rychlokameru máme, řešíme obtíže jako: zaostření, rozlišení, dostatečné nasvícení, velikost vnitřní paměti a mnoho dalších. Není tedy hned vyhráno, nicméně přes všechny tyto obtíže se záběry pořízené rychlokamerou stanou skvělým nástrojem jak pohlížet na procesy kolem nás. [13]

3.1.1 Software

Když už pořídíme videozáznam, je potřeba z něho získat co nejvíce informací s co největší lehkostí. K tomu zde využiji program Tracker. Jedná se o freewarový program, který nabízí intuitivní prostředí, ve kterém lze analyzovat a modelovat videozáznamy. Je určen k použití ve výuce fyziky, tak aby jej dokázali využívat i studenti. Je tedy velmi lehké s ním pracovat a získávat potřebné informace. Navíc podporuje český jazyk a obsahuje detailní návod. [14]

3.1.2 Princip určení rychlosti a zrychlení pomocí videozáznamu

K tomu abychom mohli zjistit rychlost a zrychlení pomocí videozáznamu, musíme nejlépe znát rozměr předmětu, který leží ve stejné vzdálenosti jako námi pozorovaný objekt. Tento předmět, nazýváme kalibrační, neboť právě kalibruje celé měření a je proto důležité mít jeho rozměr co nejpřesněji naměřen a nastaven.

Postupným „stopováním“ určitého pohybujícího se bodu snímek za snímkem, získáme soustavu souřadnic. Časový interval mezi nimi je dán jako převrácená hodnota snímkovací frekvence, tedy

$$\Delta t = \frac{1}{FPS},$$

určení rychlosti a zrychlení, je tedy pouze otázkou nejjednodušších výpočtů. K tomu, aby bylo měření přesné, je zapotřebí optimálního množství hodnot, které jsou důkladně stopované. Dostatečný počet hodnot zaručí vysoká snímkovací frekvence, zatímco přesnost stopování je závislé i na kvalitě videozáznamu.

4 Praktická část

4.1 Stavba odpaliště a rakety

Jedna z nejtěžších částí celé této práce, bylo vymyšlení a sestavení sestavy, kterou bych mohl odpalovat octovou raketu v momentě, kdy budu chtít. Celý proces výroby jsem fotografoval. Samozřejmě můj způsob nemusí být ten nejlepší, ani nejuniverzálnější. Nápady jsem čerpal z mnoha videí, vlastních nápadů a možností, které jsem měl na dosah. **Všechny fotografie budou přiloženy na CD, jako příloha a jejich čísla budou korespondovat s těmi, které jim zde přiřadím do kulatých závorek, tudíž se nevztahují na číslování obrázků a rovnic v ostatních sekcích.** Fotografie jsou pořízeny z několika míst, neboť některé kroky vyžadovaly nářadí či otevřený prostor, které v místě kde bydlím, nemám. Budu se snažit uvádět přibližnou cenu jednotlivých částí tak, aby bylo možné zjistit výslednou cenu celého projektu.

4.1.1 Stavba odpaliště

Většina pokusů s octovou raketou funguje na principu toho, že se uzávěr rakety zašpuntuje korkem, který povolí v momentě, kdy je tlak dostatečný a tím nastane start rakety, nicméně takový start nastane vždy v jiný okamžik, který nelze načasovat a je zcela nahodilý. Navíc nejsme schopni posoudit, jestli tlak před startem docílil svého maxima. Aby bylo možné docílit kontrolovaného odpalu, je potřeba, aby tryska rakety byla perfektně uchycena a těsnila. Navíc, kvůli měření bude potřeba zajistit, aby raketa letěla ideálně kolmo vzhůru. Jako první je potřeba vytvořit část (1). Ta se skládá z několika součástí. Jedná se o mosaznou tyčku, která má 19 cm na délku a 16 mm průměr. Lze ji zakoupit v železářství a její cena 150,- Kč. Dále rychlospojka, též mosazná typ 3/4" cena 100,- Kč. Dolní část, která uchytí tuto část k základně je kabelová průchodka, doporučuji si vzít velikost o něco větší než vnitřní průměr tyčky, cena 15,- Kč. K tomu aby průchodka lépe držela a neviklala se několikrát obmotáme dolní část tyčky elektrikařskou lepicí páskou. Dále budeme potřebovat stahovací nerezovou objímku na uvolňovací mechanismus cena 10,- Kč. Následuje příprava základny. K tomu jsem využil desku ve tvaru kruhu z překližky o tloušťce 5 mm a průměru 60 cm (6). Rozhodl jsem se, že chci základnu vytvořit do čtverce a tak jsem si nejprve rozdělil kruh na 4 stejné části, které jsem na koncích spojil dohromady, tak aby mi vznikl čtverec. Zároveň jsem si vkreslil dle (2, 3) a (4) otvor pro držák rakety. Pomocí přímočaré pily (7) jsem kruh vyřezal na čtverec (8) a vyhladil jeho hrany pilníkem.

Nyní jsem pomocí vrtačky (9) a nástavce do dřeva s průměrem 25 mm (10, 11) vyvrtal otvor. Omylem jsem poničil spodek základny (12, 13). Nejednalo se ale o něco zásadního a tak jsem pomocí štípaček a pilníku zachránil situaci (14). Nyní (15-17) lze připevnit držák rakety k základně. Na (18) lze vidět pohled z boku, jak je držák upevněn. Nyní je potřeba vyřešit, jak zablockovat průchod v samičce rychlospojky (19, 20), tak aby neutíkal tlak a kapalina. K tomu jsem využil šteft. Za pomocí kulatiny (21), která má průměr nejlépe shodný s vnitřním průměrem rychlospojky, lze napevno uzavřít otvor (22,23). Naštěstí jsem takovou kulatinu našel a stačilo ji zkrátit na požadovanou délku pomocí pilky na železo (24). Takový kus krásně zapadne (25-27). Aby se šteft nepohnul z místa, provrtal jsem díru skrz něj a rychlospojku. Do díry jsem přibil hřebík (28,29), který jsem zařízl a zaťukl tak, aby se nevykroutil (30).

Je tedy na řadě zkonstruoval mechanismus, který bude uvolňovat rychlospojku. K tomu jsem využil stavebnici Merkur. Samozřejmě by to šlo i jinak, ale tato geniální stavebnice se k tomu přímo hodí a vytvořil jsem pomocí něj svůj první prototyp (31). Zároveň můžete vidět i tři nohy, které budou konstrukci podpírat. Nyní jsem si poznačil místa a vyvrtal jsem potřebné otvory k přichycení (32). Bylo potřeba získat dostatek šroubků, maticek a podložek (33-35). Následovalo zkušební přichycení jednotlivých částí (36-38). Nyní bylo třeba zlepšit vzhled a hlavně zajistit, aby dřevo nenatahovalo vodu. Koupil jsem dvě bílé barvy ve spreji (39) za 220,- Kč a jeden bezbarvý lak ve spreji (43) za 110,- Kč. Celkově jsem nanesl tři vrstvy bílé barvy (40-42) a dvě vrstvy laku s tím, že bílou vrstvu jsem vytvořil jenom na vrchní straně. Zakoupil jsem lepicí pásku pro vědecký vzhled za 100,- Kč (44). Oblepil jsem pomocí této pásky rohy základny (45-47) a nyní jsem mohl připevnit všechny části k základně (48-49). Chtěl jsem si být jist nepropustností základní desky a tak jsem koupil lodní lak (50) za 200,- Kč. Celkově jsem provedl dva nátěry (51-52). Doporučení - připravit si ředidlo a dávat pouze malé vrstvy nátěru, neboť při větší dávce může při tuhnutí praskat. Je potřeba dodat, že lodní lak tuhne 24 hodin. Na fotkách (53-54) je vidět krásný lesk tohoto laku, který můžu vřele doporučit, neboť slouží skvěle.

Nyní přijde na řadu dodělat odpalovací mechanismus. K tomu jsem koupil 5 m teflonového bowdenu v cyklo potřebách za 50,- Kč. Lanko do bowdenu jsem musel koupit v jiném obchodě, celkem 6 m nerezového lanka s průměrem 1,6 mm za 40,- Kč. Při montování na stávající mechanismus mi došlo, že musím upravit jednu z částí (55) a toto byl první prototyp mého odpalovače.



Obrázek 8 - odpalovač verze č. 1 (56)

Na obrázku (57,58) lze vidět sestavení páčky pro start. Navíc jsem použil plastové stahovačky ke spojení rychlospojky s ramenem, neboť provázek zbytečně pružil a měl tendenci povolovat. Takto sestavený odpalovač má však od dokonalosti ještě pár kroků, které jsem zjistil po několika neúspěších. Tím prvním bylo potřeba zajistit, aby raketa byla vedena po dobu, dokud nezíská dostatečnou rychlost, při které bude moci její stabilizační systém plně fungovat. K tomu jsem zakoupil nerezovou kulatinu 1,5 m dlouhou a 6 mm v průměru (59,60) za 80,- Kč. Navíc bylo potřeba zakoupit další průchodku, která by pasovala k této tyčce (61,62) za 10,- Kč. Na průchodku jsem vyvrtal patřičný otvor 15 mm a krásně se tam vtěsnala, což lze vidět zde (63) společně s prvním prototypem rakety. Při devátém videu, které jsem natočil, jsem se však rozhodl z důvodu nehody a nepraktičnosti při přípravě odpalu zavést další vylepšení. Tím bylo upravení rychlospojky (64, 65), kde jsem plastové stahovačky nahradil zbytkem nerezového drátku s háčkem ze stavebnice Merkur a zajistil jej. Zároveň jsem přidal na ramena toto vertikální prodloužení (66, 67) společně s využitím kusu kulatiny jako zajišťovací prvek. To dalo vznik verzi č. 2, která byla využita pro odpal při natáčení, a skvěle se uplatnila. Zde (68, 69) je vidět zajištění připravené k odpalu.



Obrázek 9 - odpalovač verze č. 2 (70)

Hlavní výhodou tohoto odpalovače, je možnost natlakování octové rakety, před samotnou instalací. Jako další možnost vylepšení bych viděl posuvný držák pro vodící tyčku, pro různé typy raket. V současné chvíli je cena dílů, kterou jsem vynaložil na odpaliště rovna 1085,- Kč. V ceně nejsou zahrnuty součástky, které jsem již vlastnil, ani čas a palivo, které jsem k tvorbě potřeboval.

4.1.2 Stavba rakety

První věc, která byla potřeba před tím, než jsem s čímkoliv začal, bylo třeba najít vhodné tělo rakety. První pokus bylo využití PET lahví na víno, které mají požadovaný tvar, ale při pokusu, zdali vydrží tlak kolem 3 atm selhávaly a bylo velmi lehké je poškodit. Procházel jsem tedy několik obchodů, než jsem narazil na speciální retro edici 2 litrových PET lahví s nápojem Coca Coly (71). Měly ideální tvar a jsou schopné udržet bezpečně tlak do 4 atm. Koupil jsem tedy rovnou 4 kusy za 120,- Kč. Malými nůžkami jsem ustříhl kus plastu, který drží uzávěry utěsněné před prvním otevřením. Pro lepší těsnění jsem zakoupil O-kroužky (72,73) za 20,- Kč a tři navlékl do spáry, kde byl ustříhnutý kus plastu. Jako další je tryska (74-77), která se skládá ze samečka rychlospojky, uzávěru z nádoby na tekuté mýdlo a těsnícího kroužku. Cílem zde je najít uzávěr, který by natěsno pasoval do šroubovice

rychlospojky a překrýval po zašroubování O-kroužky. Když takový uzávěr nalezneme, musíme do něj vytvořit otvor, tak aby přiléhal na stěny rychlospojky a nebránil průchodu kapaliny. Následuje pevné zajištění uzávěru k rychlospojce pomocí lepidla, já jsem využil dvousložkové pevnostní lepidlo odolné vodě, které jsem měl. Nakonec stačí vložit těsnící kroužek, který v rychlospojce byl při zakoupení vložen. Jenom je potřeba jeho velikost lehce redukovat, tak aby přiléhal, a tím je tryska hotová. Abychom vykompenzovali hmotnost trysky, připevníme pomocí lepicí pásky tenisový míček (78) na stojící stranu PET láhve (79). Než vytvoříme stabilizátory, potřebuje si vyznačit místa, kde je přichytíme. To provedeme tak, že si ustrihneme proužek papíru, který je o něco málo delší než obvod PET láhve. Obmotáme ho kolem a označíme si konec (80), následně si změříme délku na papírku a vyznačíme si 1/3 a 2/3 délky (81). Když nyní přiložíme proužek na láhev, můžeme si jednoduše vyznačit místa, která jsou dokonale v úhlu 120° (82, 83). Na papír jsem si vytvořil tvar stabilizátorů, dle tvaru láhve (84), který jsem si překreslil třikrát na karton (85), kde doporučuji mít výstřižky překreslené tak, aby karton nešel přehýbat vertikálně, zpevní se tak jejich konstrukce po přidělení k tělu rakety pomocí lepicí pásky (86). Zde je pak vidět raketa se všemi stabilizátory (87, 88). Malou odbočkou je, že se jedná o třetí verzi stabilizátorů, první vypadala takto (89, 90). Vyrobeny z plexiskla, byly pevné, ale těžká a jejich malý tvar nedržel dost pevně, proto jsem vytvořil jejich kopii z kartonu (91) a pro lepší pevnost jsem jejich konečky svázal takto (92-95). Tento nápad se ale nevyplatil, neboť i tak byly stabilizátory nedostatečně upevněné k tělu rakety a příliš se „viklaly“. Vytvořil jsem z toho důvodu větší verzi, která měla přichycený i zahnutý okraj těla rakety (96). To pomohlo a s těmito stabilizátory jsem spokojený. Je na čase vytvořit hlavici. Vzal jsem novou láhev a přepůlil ji v půli (97). Vyznačil jsem si pomocí proužku papíru z tvorby pro vyznačení místa stabilizátorů rovnou čáru kolem dokola (98) a nůžkami zarovnal (99). Pomocí svěráku (100) a pilky (101) jsem uzávěr odstranil (102, 103) a brusným papírem vyhladil (104). Pro překrytí vzniklého otvoru jsem použil tenisový míček, který jsem přeřízl zhruba v 1/3 (105). Poslouží zároveň jako tlumič nárazu, neboť raketa, nebude mít padák. Pro lepší úchyt jsem uřízl část, převrátil ji na rub a sestříhal její hrany (106 - 108). Nyní stačilo, zkontroloval, zdali pasuje na hlavici (109, 110) a pomocí lepidla Mamut jsem uříznutou část připevnil a nechal ztvrdnout. Nyní už jen stačí hlavici natlačit na tělo rakety (112) a zajistit jednou vrstvou lepicí pásky (113). Jako třesinka na dortu je připevnění brčka, které obklopuje vodící tyčku (114) a tím je moje raketa hotová.



Obrázek 10 - octová raketa Tom I (115)

Nejedná se samozřejmě o nejlepší metodu, jak vytvářet octovou raketu, ale k mému měření poslouží dostatečně. Její cena se bez započítání trysky pohybuje na 150,- Kč, kde nejdražší bylo zakoupení lepicí pásky.

4.2 Příprava před startem

Nyní, když máme připravené odpaliště a model rakety, nezbývá nic jiného, než ji odpálit. Než se ale vydáme vzhůru, je potřeba zjistit zdali vše funguje tak jak má a jestli naše teoretické předpoklady souhlasí s realitou. Provedeme tedy dva pokusy, podle nichž posoudíme letuschopnost rakety. Budeme k tomu potřeba základní vybavení pro operaci s octovými raketami.



Obrázek 11 - vybavení pro odpal octové rakety (116)

Jedná se o nůž, nůžky, nit, papírové ubrousky, trychtýř, odměrka, 2l láhev, voda, ocet 8%, jedlá soda, odměrková lžička a popřípadě přidržovací kleštičky.

V prvním pokusu zjistíme, zdali vzniká v raketě tlak, který vycházel z teoretických hodnot. Budeme tedy muset zředit ocet a vytvořit kapsuli s jedlou sodou. Do dvou litrové láhve nalijeme 400 ml octa a dolijeme zbytek vodou a zatřepeme. Pro výrobu kapsulí nejprve zjistíme hmotnost jedlé sody v jedné odměrce lžičky (117, 118). Hodnota 15 g na lžičku odpovídá našim teoretickým hodnotám. Nyní rozdělíme jeden ubrousek na čtyři části (119, 120), kde doporučuji využít nůž, jako při otevírání dopisu. Z nitě ustrihneme 40 cm a vytvoříme očko (121). Na ústřížek ubrousku dáme 15 g jedlé sody (122), zabalíme (123 - 125) a pomocí nitě opatrně utáhneme, tak aby se ubrousek neprotrhl (126). Pomocí trychtýře nalijeme do dvou litrové láhve zředěný ocet, vložíme kapsuli, kterou za nit přidržujeme a po puštění rychle uzavřeme, pomocí speciálního uzávěru (127, 128), který má skrz protažený bezdušový ventil. Pokud nenastává reakce samostatně, pomůžeme jí zatřepáním. Po ukončení reakce vyčkáme, než se rozpadne kapsule a nyní víme, že je reakce u konce. Nyní použijí manometr (129), abych zjistil velikost tlaku. Celý proces je natočený na videu číslo 11 a výsledná hodnota tlaku je 190 kPa, což je méně než 2/3 z očekávaných 330 kPa. To může být dáno tím, že nastala chemická rovnováha, nicméně pro mě je důležité získat očekávanou hodnotu tlaku a tak navýším poměr octa a jedlé sody na poměr 1:3. Výsledek navýšení poměru lze vidět na videu číslo 12, kde dosáhneme na tlak 310 kPa, což je hodnota se kterou jsem spokojen.

Nyní bude tedy potřeba vyzkoušet, zdali samotná raketa vydrží tento tlak a hlavně jestli těsní. Tento pokus je důležité provádět na otevřené ploše, neboť oba konce rakety jsou potenciálně nebezpečné, proto je potřeba brát v potaz zvýšenou opatrnost. Raketa Tom I tuto zkoušku obstála a je připravená k odpalu.

4.3 Praktické měření

Začnu tím, že vypočítám dle rovnice (3) výtokovou rychlost kapaliny. Mějme tedy vzorec (3), kde pro hodnoty platí:

$$g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$h = 0,1 \text{ m}$$

$$p_1 = 310\,000 \text{ Pa}$$

$$p_A = p_n \doteq 101\,000 \text{ Pa}$$

$$d_1 = 0,099 \text{ m}$$

$$d_2 = 0,01 \text{ m}$$

$$\rho = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \text{ (předpokládám nedokonalé rozložení kyseliny octové a zbytku příměsí).}$$

Mám tedy všechny proměnné v základních jednotkách a stačí dosadit

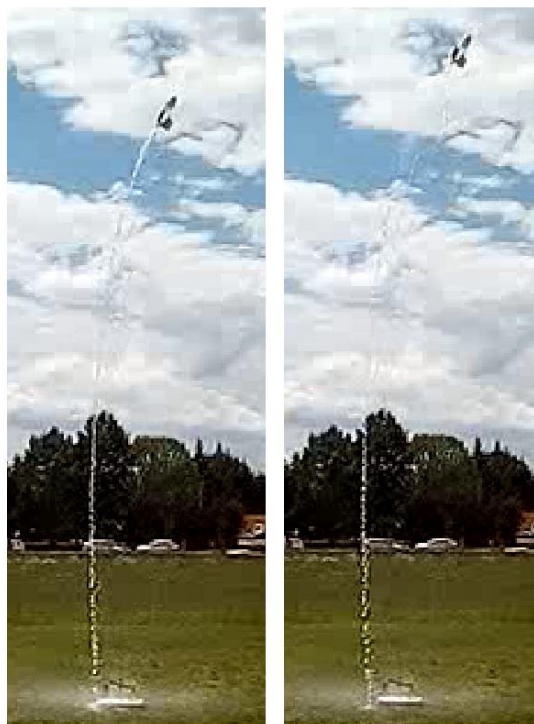
$$u = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1 + 2 \cdot \frac{310\,000 - 101\,000}{1000}}{1 - \left(\frac{0,01}{0,099}\right)^4}} = \sqrt{\frac{1,962 + 418}{0,999}} \doteq 20,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1},$$

Jedná se samozřejmě o teoretickou hodnotu, tudíž nemusí odpovídat realitě, avšak poskytuje nám první náhled na to, co můžeme očekávat ještě před letem rakety. Je nutno říci, že tato hodnota by měla být prakticky dosažena krátce po startu a postupně by měla lehce klesat z důvodu snižování hodnot h a p_1 .

Teoreticky lze nyní určit rychlost spotřeby paliva, jako

$$q_t = u \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \cdot \rho = 20,5 \cdot \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} \cdot 1000 = 1,61 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Ve skutečnosti je tato hodnota menší. K tomu abych zjistil skutečnou hodnotu, jsem využil videozáběru č. 2, na kterém lze pozorovat moment, kdy končí hlavní urychlovací část. Díky programu Tracker jsem zjistil, že se tak stalo 18 snímků po startu.



snímek č. 17

snímek č. 18

Obrázek 12 - ukončení hlavní urychlovací části

Snímkovací frekvence videorekordéru byla 30 FPS. Máme tedy

$$30 \text{ FPS} \Rightarrow \Delta t = \frac{1}{30} = 0,033 \text{ s},$$

kde Δt je časový délka jednoho snímku. Celková doba hlavní urychlovací části je tedy

$$t = 18 \cdot 0,033 = (0,594 \pm 0,033) \text{ s},$$

kdy berme v potaz jistou nepřesnou z důvodu nízké snímkovací frekvence a nízké kvalitu videozáznamu.

Nyní je tedy možné určit skutečnou hodnotu rychlosti spotřeby paliva q , pro který platí

$$q = \frac{dm}{dt} \doteq \frac{m}{t},$$

kde budu počítat jeho průměrnou hodnotu. Hmotnost paliva je rovna součtu hmotnosti zředěného koncentrátu octa 1:3 a dvou 15 gramových kapsulí jedlé sody. Máme tedy

$$m = m_{\text{koncentrát}} + m_{\text{kapsulí jedlé sody}} = 0,7 \text{ kg} + 0,03 \text{ kg} = 0,73 \text{ kg}.$$

Průměrná spotřeba paliva během hlavní urychlovací části letu je tedy

$$q_p = \frac{0,73}{0,594 \pm 0,033} = (1,229 \pm 0,065) \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Rozdíl oproti teoretické hodnotě tudíž je

$$\Delta q = q_t - q_p = 1,61 - 1,23 = 0,38 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1},$$

což je procentuálně ztráta

$$ztráta = \left(1 - \frac{q_p}{q_t}\right) * 100 = 23,66 \% .$$

Jako další parametr nyní můžu vypočítat teoretický tah rakety

$$T = q_p \cdot u = 1,229 \cdot 20,5 = 25,2 \text{ N} .$$

Pokud známe tah rakety a dobu, po kterou ho raketa produkovala, lze vypočítat celkový impuls.

$$I_c = T \cdot t = 25,2 \cdot 0,594 = 14,97 \text{ N} \cdot \text{s}$$

Těž lze vypočítat specifický impuls, jako

$$I_{sp} = \frac{T}{q_p} = \frac{25,2}{1,229} = 20,5 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} .$$

Co si lze povšimnout je, že velikost výtokové rychlosti a specifického impulsu je stejná. To samozřejmě platí jenom na papíře, neboť jak jsem již řekl, teoretická hodnota výtokové rychlosti se může lišit od té skutečné.

Jako další nyní můžeme vytvořit predikci rychlosti a zrychlení rakety pomocí Ciolkovského rovnice.

Máme tedy (1)

$$v(t) = u \ln \frac{m_0}{m_0 - q \cdot t} ,$$

kde potřebujeme znát m_0 , neboli počáteční hmotnost rakety před startem, to získáme, jako součet hmotností již vypočítané hmotnosti kapaliny, jedlé sody a prázdné rakety Tom I

$$m_0 = m_{kap.+jedlá\ soda} + m_{prázdné\ rakety} = 0,73 \text{ kg} + 0,23 \text{ kg} = 0,96 \text{ kg} .$$

Kde $m_{prázdné\ rakety}$ je hmotnost po hlavní urychlovací části, kterou označíme jako m_1 . Nyní můžeme zjistit Ciolkovského číslo jako

$$C = \frac{m_0}{m_1} = \frac{0,96}{0,23} = 4,174 .$$

Jelikož budu později porovnávat tyto výsledky s videozáznamem z rychlokamery, budu jako časový krok volit 1/500 s, neboť snímkovací frekvence rychlokamery byla 500 FPS

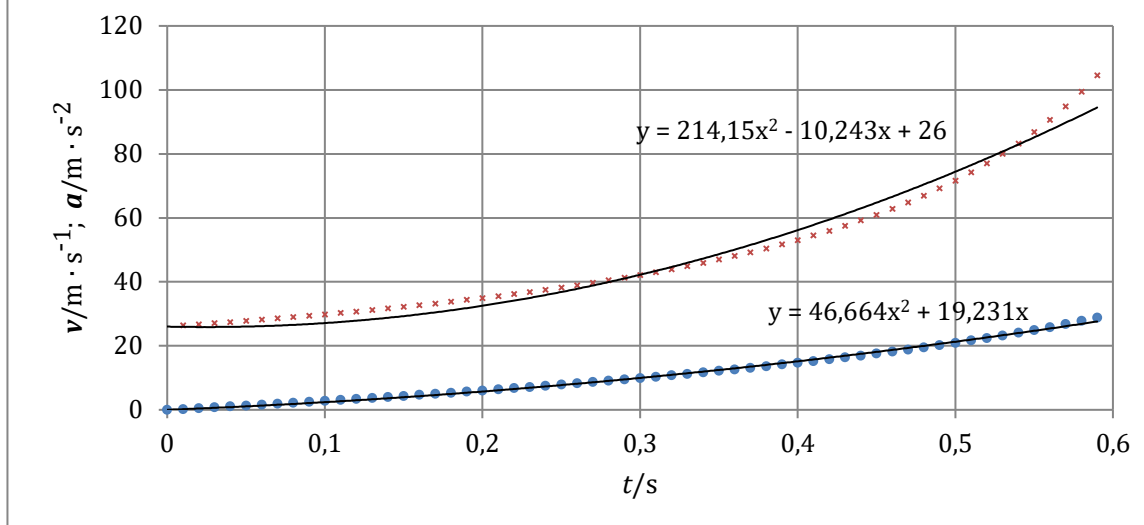
$$500 \text{ FPS} \Rightarrow \Delta t = 0,002 \text{ s} .$$

Takto malý krok jsem však po přezkoumání vynásobil pěti, tudíž

$$\Delta t = 0,002 \cdot 5 = 0,01 \text{ s} = 10 \text{ ms} .$$

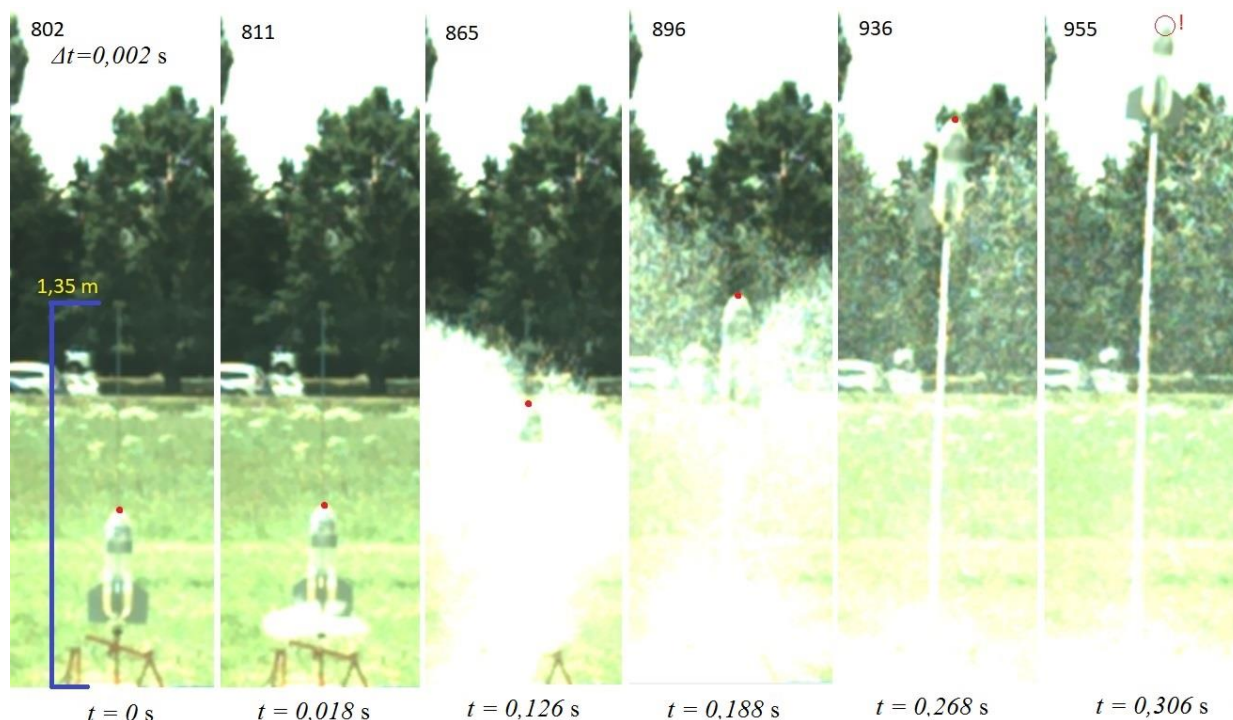
Ciolkovského rovnice pro let v hlavní urychlovací části rakety Tom I					
t/s	$v/m \cdot s^{-1}$	$a/m \cdot s^{-2}$	t/s	$v/m \cdot s^{-1}$	$a/m \cdot s^{-2}$
0,00	0,00	0,00	0,30	9,93	42,17
0,01	0,26	26,41	0,31	10,37	43,06
0,02	0,53	26,76	0,32	10,80	43,98
0,03	0,80	27,11	0,33	11,25	44,95
0,04	1,08	27,48	0,34	11,71	45,95
0,05	1,36	27,85	0,35	12,18	47,01
0,06	1,64	28,23	0,36	12,67	48,11
0,07	1,92	28,63	0,37	13,16	49,27
0,08	2,22	29,03	0,38	13,66	50,48
0,09	2,51	29,45	0,39	14,18	51,75
0,10	2,81	29,88	0,40	14,71	53,09
0,11	3,11	30,32	0,41	15,26	54,51
0,12	3,42	30,78	0,42	15,82	56,00
0,13	3,73	31,24	0,43	16,39	57,57
0,14	4,05	31,73	0,44	16,98	59,23
0,15	4,37	32,23	0,45	17,59	60,99
0,16	4,70	32,74	0,46	18,22	62,86
0,17	5,03	33,27	0,47	18,87	64,85
0,18	5,37	33,82	0,48	19,54	66,97
0,19	5,71	34,39	0,49	20,23	69,23
0,20	6,06	34,98	0,50	20,95	71,65
0,21	6,42	35,58	0,51	21,69	74,25
0,22	6,78	36,21	0,52	22,46	77,04
0,23	7,15	36,86	0,53	23,26	80,05
0,24	7,53	37,54	0,54	24,10	83,30
0,25	7,91	38,24	0,55	24,96	86,83
0,26	8,30	38,97	0,56	25,87	90,67
0,27	8,69	39,72	0,57	26,82	94,87
0,28	9,10	40,51	0,58	27,81	99,47
0,29	9,51	41,32	0,59	28,86	104,55

Vývoj teoretické rychlosti a zrychlení rakety Tom I



Jak lze vidět, raketa by teoreticky mohla získat rychlost vyšší než je výtoková rychlost, právě díky tomu, že C je větší než 2,7.

Přejdu nyní na práci s pořízenými videozáznamy. Celkem se pořídily dva záznamy, točené ze stejného místa rozdílnými kamerami. Hlavní výsledky získala rychlokamera, která pokrývá úzkou část startovní části rakety a vedlejším porovnáním bude záznam z mobilní kamery, která zabírá hlavní a vedlejší urychlovací část letu rakety. Je potřeba dodat, že trajektorie letu rakety nebyla optimální, kdy krátce po opuštění přídržovací laťky začala raketa zatačet doprava. To nám naše měření ovlivní minimálně, neboť kalibračním objektem byla právě přídržovací laťka, která je ve stejné vzdálenosti od kamery jako raketa. Jako stopovací bod jsem si vybral vrchní část hlavičky rakety, neboť byla nejvíce odlišitelná od pozadí.



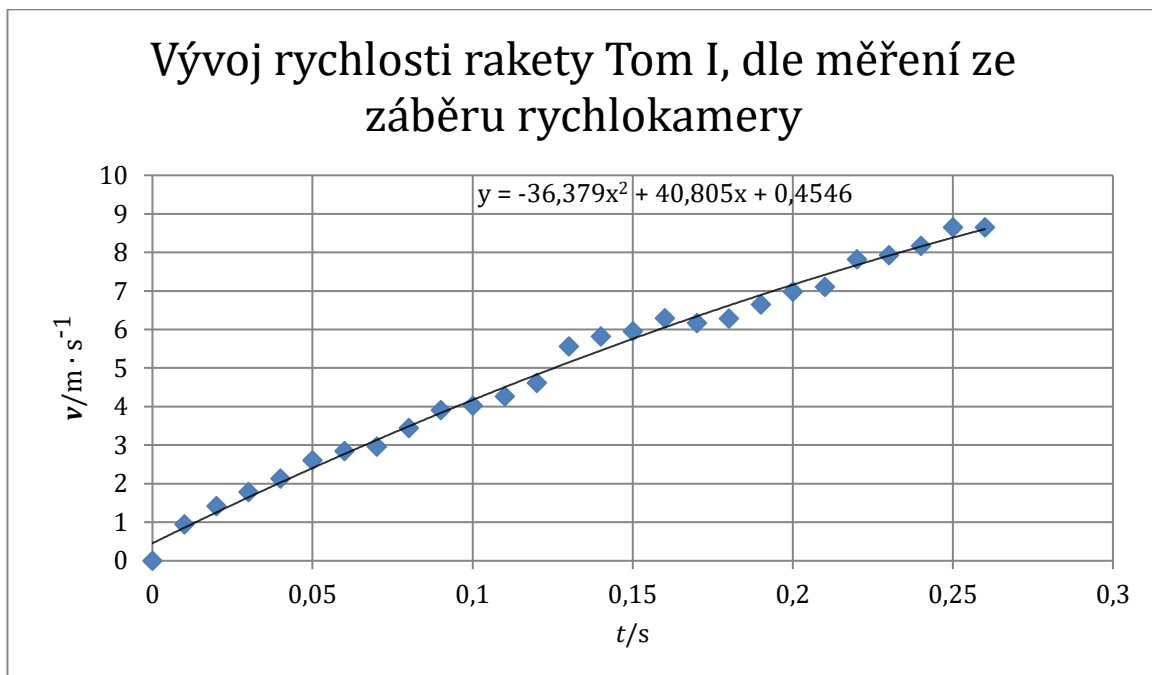
Obrázek 13 - snímky z rychlokamery

Zde jsou nejdůležitější snímky záznamu z rychlokamery. Na prvním snímku jsem vyznačil kalibrační objekt a jeho rozměr, zároveň jsem do levých horních rohů snímků vložil jejich číslo, které odpovídá nesestríhanému záběru. Červenou tečkou jsem vyznačil stopovaný bod.

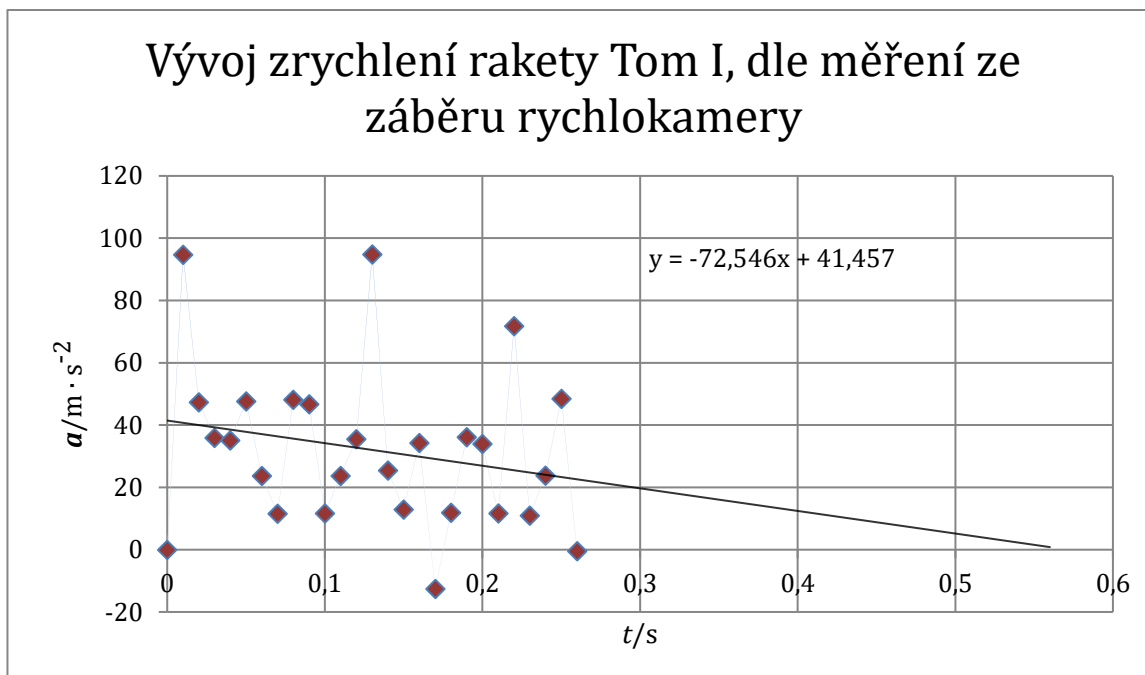
Nyní k tomu, proč jsou tyto snímky klíčové. První snímek je moment maximálního povolení rychlospojky a raketa nyní odstartuje. Na druhém snímku se raketa úspěšně odpojila od startovní plochy. Třetí ukazuje maximální tah rakety, kdy je o něco složitější určit polohu stopovaného bodu z důvodu odražené kapaliny od startovní plochy. Čtvrtý se nachází v bodě, kdy je stopovaný bod na konci přidržovací laťky, krátce po té, již bude raketa samovolně ve vzduchu. V pátém snímku je poslední chvíle, kdy je možné určit polohu stopovaného bodu s dobrou přesností. Na šestém již nelze přesně určit umístění stopovaného bodu a není tedy vhodné pokračovat ve stopování.

Samotné měření jsem prováděl po pěti krocích, tudíž $\Delta t = 0,01 \text{ s}$, kde tedy vyšli následující hodnoty.

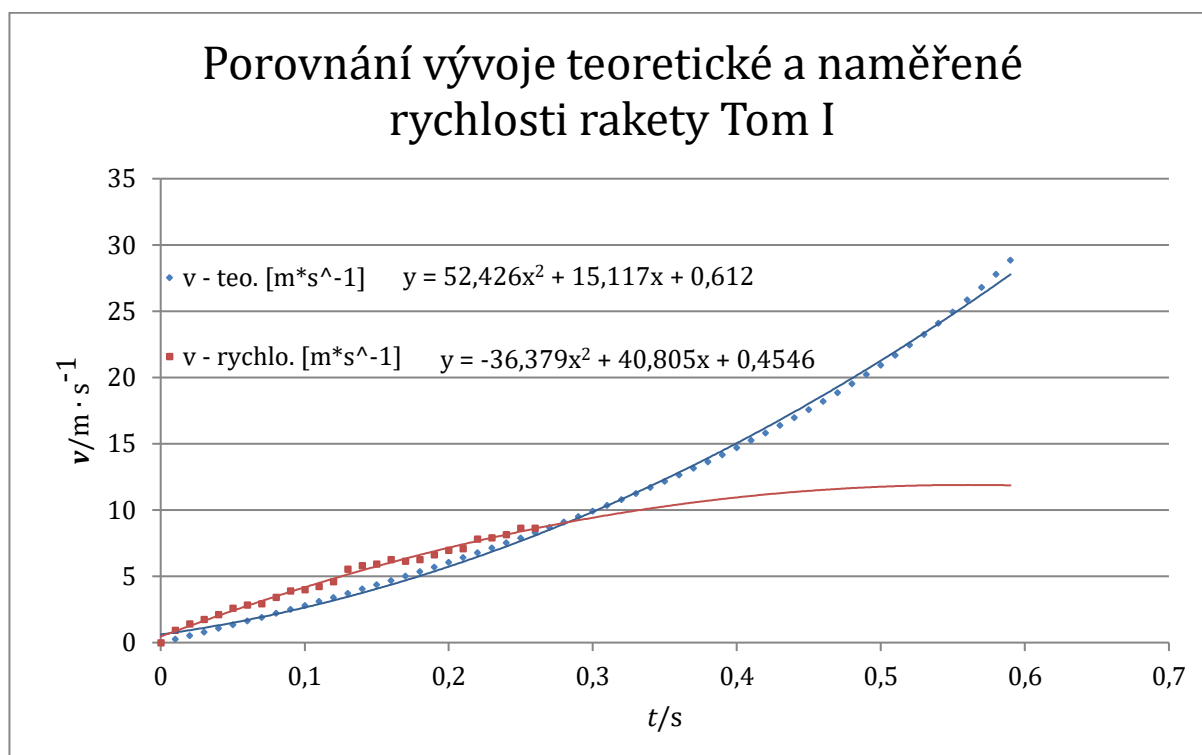
Naměřené hodnoty letu rakety Tom I pomocí vysokorychlostní kamery					
t/s	$v/m \cdot s^{-1}$	$a/m \cdot s^{-2}$	t/s	$v/m \cdot s^{-1}$	$a/m \cdot s^{-2}$
0,00	0,00	0,00	0,14	5,818	25,40
0,01	0,947	94,70	0,15	5,947	12,90
0,02	1,42	47,30	0,16	6,29	34,30
0,03	1,779	35,90	0,17	6,164	-12,60
0,04	2,13	35,10	0,18	6,283	11,90
0,05	2,606	47,60	0,19	6,644	36,10
0,06	2,843	23,70	0,2	6,984	34,00
0,07	2,959	11,60	0,21	7,101	11,70
0,08	3,44	48,10	0,22	7,819	71,80
0,09	3,907	46,70	0,23	7,929	11,00
0,1	4,024	11,70	0,24	8,167	23,80
0,11	4,261	23,70	0,25	8,652	48,50
0,12	4,616	35,50	0,26	8,647	-0,50
0,13	5,564	94,80			



Ač se jedná o poměrně krátký časový interval, díky velké četnosti záznamů je jeho spolehlivost dostatečná. Zajímavé je, že vývoj rychlosti má v trendu snižovat svoji hodnotu. To lze pozorovat na následujícím grafu vývoje zrychlení.



Nyní bych provedl porovnání rychlostí teoretických a naměřených.



Na tomto grafu mě zaskočilo, že jsou naměřené hodnoty z počátku lehce vyšší, než teoretické. Překážku vidím v nedostatku informací o průběhu celé urychlovací fáze letu. V tuto chvíli mě nezbyvá nic jiného, než se opřít o hodnoty, které znám a o dalším průběhu předpokládat, že se bude držet stávajícího vývoje. Jeden z poznatků, který lze konstatovat je, že vnější síly projevují svoje působení na let rakety, čímž se nedostávají teoretické výsledky letu, které je ve svých výpočtech zanedbávali.

4.4 Výsledky měření

Shrnutí všech dosažených hodnot.

Raketa Tom I			
veličina	značka	hodnota	jednotka
teoretická výtoková rychlost	u	20,5	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
teoretické hmotnostní průtokové množství	q_t	1,61	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
průměrné hmotnostní průtokové množství	q_p	1,23	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
tah	T	25,2	N
celkový impuls	I_c	14,97	$\text{N} \cdot \text{s}$
specifický impuls	I_{sp}	20,5	$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}$
hmotnost prázdné rakety	m_1	0,23	kg
hmotnost rakety před startem	m_0	0,96	kg
Ciolkovského číslo	C	4,174	
teoretický tlak při směsi 1:5	p_t	330 000	Pa
naměřený tlak při směsi 1:5	p	190 000	Pa
teoretický tlak při směsi 1:3	p_t	550 000	Pa
naměřený tlak při směsi 1:3	p	310 000	Pa
výška rakety	L	0,43	m
průměr rakety	d_1	0,099	m
průměr trysky	d_2	0,01	m
odhadovaný činitel odporu	C_o	0,3	
plocha stabilizátoru	S	106,25	cm^2
doba hlavní urychlovací části, dle videa	t	0,594	s
čas dosažení maximální rychlosti, dle grafu	t_{max}	0,561	s
maximální dosažená rychlost, dle grafu	v_{max}	11,9	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
počáteční zrychlení, dle grafu	a_{start}	41,5	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
průměrné snížení zrychlení, dle grafu	$a_{snížení}$	-72,5	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
maximální odpor prostředí	F_{pmax}	0,21	N
startovní tíhová síla	F_{t0}	9,42	N
tíhová síla při maximálním odporu prostředí	T_{t1}	2,26	N

Jak můžeme vidět, bylo dosaženo poměrně velkého počtu hodnot, které jsou spjaty s letem octové rakety. Zajímavé je například zjištění, že při tlakování rakety jsou naměřené hodnoty tlaku zhruba o 45% nižší než by podle teoretických výpočtů měli být. Jako úspěch vidím, že se doba hlavní urychlovací části vypočtena pomocí videozáznamu z mobilního zařízení velmi shoduje s grafem, jehož hodnoty, byly získány pomocí videozáznamu z rychlokamery. To naznačuje jednak, na přesnost měření i na potvrzení, že se jedná o stejný let. Vzhledem k relativně nízké maximální rychlosti, je velikost odporu prostředí poměrně menší, než je tíhová síla a to i, když je tíhová síla nejmenší v momentu, kdy je palivo rakety zcela využito.

Závěr

Provádění pokusů nejen ve školním prostředí se může potýkat s finančními problémy. V této práci jsem ukázal, že je možné vytvořit konstrukci rakety, která je jednoduchá na výrobu a skládá z dobře dostupných materiálů, které nejsou relativně drahé. Je tedy velmi snadné rekonstruovat dané měření, kde si může každý vytvořit vlastní raketu a tím získá znatelně větší motivaci a zájem, vůči této problematice.

Jak jsem zjistil, tak octové rakety mají i své technické limity. S postupnou snahou zvětšováním tlaku, pro větší konstrukce roste problém s dávkováním jedlé sody, před procesem tlakování. Navíc je potřeba brát v potaz, že samotné palivo vržené raketou hubí rostliny. I tak si myslím, že se nejedná o problémy, které by měli odrazovat od využití právě octových raket, spíše by měli dát za vznik nápadům, které by tyto nedostatky minimalizovali.

Průběh výroby odpaliště a rakety byl několikrát upravován, neboť se nejednalo o přesnou repliku jiného postupu. Většinu z těchto změn jsem popsal ve videonahrávkách, které budou přiloženy v příloze na CD a v odkazu níže. Tyto změny byly potřebné k tomu, aby byla předletová příprava jednodušší a bezpečnější, což se výsledku podařilo.

Teoretické poznatky jsem se snažil předkládat, tak aby na sebe postupně navazovaly a byly tak pro čtenáře s různou znalostí problematiky vodící linkou, jak z nich čerpat.

Cílem práce bylo též získat odpovědi na tyto otázky: Je možné změřit rychlost a zrychlení jednoduché rakety bez pomoci vnitřně zabudovaných zařízení? Ano, jak se ukázalo, tak pomocí kvalitního videozáznamu lze získat hodnoty rychlosti a zrychlení. Bude rozdíl mezi teoretickou a praktickou hodnotou dosažené maximální rychlosti rakety menší než 10%? Vzhledem k zanedbávání vnějších sil při výpočtu teoretických hodnot, se hodnoty znatelně rozcházejí, tudíž nejsou menší než 10%.

Nápady, jak by se tato práce dala rozvinout: Samotná výtoková rychlost by se dala naměřit, pokud by se raketa upevnila a rychlokamera by se zaměřila pouze na výtok urychlené kapaliny. Dala by se tak porovnat teoretická a naměřená hodnota. Dále bych doporučil snímat let rakety z větší dálky s využitím digitálního přiblížení kamery a zároveň mít za snímaným objektem pozadí, které zaručí dobré pozorování v průběhu celého letu. Dále porovnání letových vlastností, při různém tlaku a objemu paliva. Vyzkoušet, zdali přidání kapky mycího prostředku na nádobí do paliva zlepší průtokové vlastnosti a tím i celkový let octové rakety. Vytvoření počítačového simulátoru, který by byl zdokonalován výsledky samotných měření. Měřit rychlost a zrychlení i za pomoci vnitřně zabudovaných zařízení a porovnat je s hodnotami naměřenými pomocí videozáznamu.

Seznam použité literatury

- [1] SVOBODA, Emanuel. Přehled středoškolské fyziky. 4., upr. vyd. Praha: Prometheus, 2005, 531 s. ISBN 80-7196-307-0.
- [2] *National aeronautics and space administration* [online]. Poslední revize 12. 6. 2014 [cit. 27. 6. 2018]. Dostupné z: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/rocket/TRCRocket/rocket_principles.html
- [3] ZELINA, Michael. Raketová rovnice. Ukázky aplikací matematiky, vyd. MFF, 2016, 11 s., dostupné z: http://www.karlin.mff.cuni.cz/~tuma/Aplikace16/Prace/Raketova_rovnice.pdf
- [4] *Malá encyklopedie kosmonautiky* [online]. Poslední revize 30. 12. 2001 [cit. 2. 7. 2018]. Dostupné z: <http://mek.kosmo.cz/zaklady/rakety/pohon.htm>
- [5] KRÁLOVÁ, Magda. © *Techmania Science Center, o.p.s* [online]. [cit. 2. 7. 2018]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/gravitace/kosmonautika/teorie-kosmickych-raket>
- [6] *HYPROGEO* [online]. [cit. 5. 7. 2018]. Dostupné z: <https://www.hyprogeo.eu/kids-corner>
- [7] *Raketové modely* [online]. Poslední revize 18. 3. 2017 [cit. 8. 7. 2018]. Dostupné z: <http://raketove.modely.sweb.cz/>
- [8] REICHL, Jaroslav, VŠETIČKA, Martin, *Encyklopedie fyziky* © 2006 - 2018 [online]. [cit. 8. 7. 2018]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/604-adiabaticky-dej>
- [9] *Real world physics problems* © 2009-2018 [online]. [cit. 8. 7. 2018]. Dostupné z: <https://www.real-world-physics-problems.com/water-rocket-physics.html>
- [10] *National Physical Laboratory*. A guide to building and understanding the physics of Water Rockets [online]. Poslední revize 1. 7. 2007 [cit. 8. 7. 2018], verze 1.02, 50 s., Dostupné z: http://www.npl.co.uk/upload/pdf/wr_booklet_print.pdf
- [11] *MONAKO* [online]. Poslední revize 1. 1. 2007 [cit. 10. 7. 2018]. Dostupné z: http://www.mo-na-ko.net/index_old.htm
- [12] *Air Command Water Rocket* © 2006-2018 [online]. Poslední revize 25. 5. 2011 [cit. 10. 7. 2018]. Dostupné z: <http://www.aircommandrockets.com/water.htm>
- [13] KOMENDA, Jan, NOVÁK, Miroslav, *Ruce vzhůru*, Co je vysokorychlostní kamera? [online]. [cit. 12. 7. 2018]. Dostupné z: <http://www.rucevzhuru.cz/index.php/video/53-rychllokamery.html>

- [14] BROWN, Douglas, *Tracker, Video analysis and Modeling Tool* © 2018. Poslední revize 1. 5. 2018 [cit. 15. 7. 2018]. Dostupné z: <https://physlets.org/tracker/>
- [15] *National aeronautics and space administration* [online]. Poslední revize 1. 5. 2015 [cit. 16. 7. 2018]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/specimp.html>

Další zdroje

HALLIDAY, David, WALKER, Jearl a RESNICK, Robert. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Vyd. 1. V Brně: VUTIUM, 2000. 5 sv. Překlady vysokoškolských učebnic; sv. 1. ISBN 80-214-1868-0.

JARNÍK, Vojtěch. Diferenciální počet: celost. vysokošk. učebnice pro stud. matematicko-fyz. a přírodověd. fakult. Sv. 1. 7., nezm. vyd. Praha: Academia, 1984. 391 s.

KVASNICA, Jozef et al. Mechanika. Vyd. 2. Praha: Academia, 2004. 476 s. ISBN 80-200-1268-0.

Internetové odkazy

MUSIL, Tomáš, Videozáznamy z bakalářské práce, 2018, url:

https://www.youtube.com/playlist?list=PLuwbqZ_tjOwRTjmWdg-p38NVWuKQipTnT

MUSIL, Tomáš, Fotografie z bakalářské práce, 2018, url:

https://drive.google.com/open?id=1bmZp2v-O_EtsphEFeZ6XLnRf98YVZ1Nc

HEATH, Clifford, Water Rocket Simulation, url: <http://polyplex.org/rockets/simulation/>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - ukázka zákona zachování hybnosti na kanónu	3
Obrázek 2 - ilustrace pro Ciolkovského rovnici.....	5
Obrázek 3 - parametry rakety	8
Obrázek 4 - ilustrace pro stabilitu rakety č. 1	9
Obrázek 5 - ilustrace pro stabilitu rakety č. 2	10
Obrázek 6 - ilustrace pro stabilitu rakety č. 3	10
Obrázek 7 - ilustrace pro výpočet výtokové rychlosti.....	11
Obrázek 8 – ilustrace porovnání raket	15
Obrázek 9 - aerodynamická hlavice	17
Obrázek 10 - odpalovač verze č. 1	26
Obrázek 11 - odpalovač verze č. 2	27
Obrázek 12 - octová raketa Tom I	29
Obrázek 13 - vybavení pro odpal octové rakety	30
Obrázek 14 - ukončení hlavní urychlovací části	32
Obrázek 15 - snímky z rychlokamery	36

Příloha

Tracker

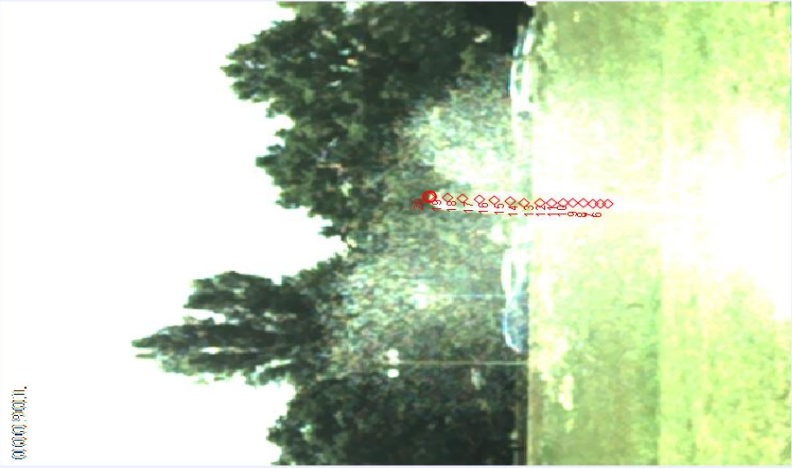
Soubor Úpravy Vídeo Sledování Soutřadnicový Systém Zobrazit Nápověda

131 100% 1,000 kg Raketa m

00:00:30:00

Ovládní Stop Σ

Raketa



Raketa (t, v)

v (m/s) t (s)

Tabulka Raketa Gaps

t (s)	v (m/s)	r (m)
0.000		2.220E-16
0.010	0.847	7.101E-3
0.020	1.420	1.884E-2
0.030	1.779	3.550E-2
0.040	2.130	5.449E-2
0.050	2.606	7.811E-2
0.060	2.843	0.107
0.070	2.959	0.135
0.080	3.140	0.166
0.090	3.307	0.204
0.100	4.024	0.244
0.110	4.261	0.284
0.120	4.616	0.329
0.130	5.564	0.378
0.140	5.818	0.440
0.150	5.947	0.492
0.160	6.290	0.559
0.170	6.164	0.618
0.180	6.283	0.682
0.190	6.644	0.744
0.200	6.984	0.815
0.210	7.101	0.883
0.220	7.819	0.957
0.230	7.929	1.040

z=1,488 m v=0,651 m/s

131 100% 1,000 kg Raketa m

Paketa vyřáno (nastavit limitnost na nástrojové listě, snížit kliknutí pro přeznačení zobrazené polohy)

Let rakety Tom - video číslo 1 - Tracker.ttr