

ZNAČILNOSTI POTISKA IN  
FREKVENCE DELOVANJA  
PULZNIH REAKCIJSKIH  
MOTORJEV

---

**ZNAČILNOSTI POTISKA IN FREKVENCE DELOVANJA  
PULZNIH REAKCIJSKIH MOTORJEV**

*Avtor: Arne Rus 4.MM*

*Mentor: Urška Haule Feguš, univ. dipl. fiz. – Gimnazija Bežigrad*

*Somentor: prof. dr. Marko Hočevar – Fakulteta za strojništvo*

*Področje: Strojništvo*

*01. 03. 2025*

*Gimnazija Bežigrad*

## **Kazalo**

Zahvala .....	1
Povzetek .....	2
Abstract.....	3
Uvod .....	4
Teoretični del .....	6
Tipi pulznih reakcijskih motorjev .....	6
Delovanje motorja .....	10
Kadenacyjev efekt.....	11
Termodinamični proces.....	12
Frekvenca delovanja.....	12
Ustvarjanje potisne sile .....	14
Eksperimentalni del.....	16
Varnost .....	17
Postavitev in postopek eksperimenta.....	17
Rezultati .....	18
Analiza .....	22
Razprava in zaključek.....	24
Seznam uporabljene literature.....	25
Priloge .....	27

## **Zahvala**

Zahvaljujem se mentorjem in vsem ostalim, ki so me na tej poti podpirali. Še posebej bi se rad zahvalil prijatelju Anžetu Mahovliču ter Alešu Malneršiču, saj brez njiju izdelava motorja in izvedba eksperimenta sploh ne bi bili možni. Poleg tega se zahvaljujem znancu Timonu Medetu, ker me je navdušil za tak projekt. Zahvaljujem se tudi družini, ki mi je tekom ustvarjanja raziskovalne naloge stala ob strani.

## **Povzetek**

Naslov naloge: ZNAČILNOSTI POTISKA IN FREKVENCE DELOVANJA PULZNIH REAKCIJSKIH MOTORJEV

Raziskovalci: Arne Rus 4.MM

Šola: Gimnazija Bežigrad

Mentor: Urška Haule Feguš, univ. dipl. fiz.

Somentor: prof. dr. Marko Hočevar

Ključne besede: pulzni reakcijski motorji, potisna sila, frekvenca, resonanca, periodično zgorevanje

Ta raziskovalna naloga preučuje vpliv frekvence delovanja na ustvarjanje potiska v pulzih reakcijskih motorjih. Pulzni reakcijski motorji so pogonske naprave, ki delujejo s periodičnim zgorevanjem in vzdržujejo neprekinjeno delovanje s pomočjo tlačnih valov in resonance. Predpostavili smo, da višje frekvence delovanja povečajo generiranje potisne sile zaradi pogostejšega zgorevanja v danem času. Eksperimentalna faza je vključevala testiranje modificiranega kitajskega CS pulznega reakcijskega motorja brez ventilov. Rezultati meritev frekvence s pospeškometrom in mikrofonom so pokazali stabilno delovno frekvenco 415 Hz. Na osnovi dobljenih rezultatov smo ugotovili, da tradicionalni akustični modeli, kot sta četrtvalovni in šestvalovni model, napačno napovedujejo delovno frekvenco, medtem ko se je model Helmholtzevega resonatorja izkazal za boljši približek. Kljub številnim poskusom spreminjanja masnega pretoka je potisna moč motorja nepričakovano ostala razmeroma konstantna, in sicer okoli 2,98 N. Na podlagi tega je mogoče sklepati, da geometrija motorja in resonančni učinki bistveno omejujejo zmogljivost takšnih motorjev. Ugotovitve kažejo, da zgolj frekvenca ni edini dejavnik, ki bi določala potisno silo motorja. Ta namreč deluje v ozkem resonančnem območju, zaradi česar bi bilo treba za bistvene spremembe frekvence opraviti geometrijske spremembe motorja.

## Abstract

Title: THRUST CHARACTERISTICS AND OPERATING FREQUENCY OF PULSE JET ENGINES  
(ZNAČILNOSTI POTISKA IN FREKVENCE DELOVANJA PULZNIH REAKCIJSKIH MOTORJEV)

Researchers: Arne Rus 4.MM

School: Gimnazija Bežigrad

Mentor: Urška Haule Feguš, univ. dipl. fiz.

Commentor: prof. dr. Marko Hočevar

Key words: pulsejet engines, thrust, operational frequency, resonance, intermittent combustion

This study examines the effect of operating frequency on thrust generation in pulsejet engines. Pulsejets are propulsion devices that operate by intermittent combustion and maintain continuous operation through pressure waves and resonance. Our hypothesis was that higher operating frequencies result in increased thrust generation due to more frequent combustion events in a given time. The experimental phase involved testing a modified Chinese CS valveless pulsejet engine. Frequency measurements using an accelerometer and microphone indicated stable operating frequencies of 415 Hz. The results showed that traditional acoustic models, such as the quarter-wave and sixth-wave models, incorrectly predict the operating frequency, while the Helmholtz resonator model proved to be a closer approximation. Unexpectedly, the thrust produced by the engine remained relatively constant around 2,98 N despite numerous attempts to alter the mass flow rate. This suggests that engine geometry and resonance effects significantly limit the performance of such engines. The results suggest that frequency alone is not the sole determinant of the thrust produced by the engine, as it operates within a narrow resonance range, requiring geometric modifications to make significant changes.

## Uvod

Pulzni reakcijski motorji (angl. Pulsejet engines) so že vse od svoje iznajdbe v poznem 19. stoletju ostali ena od najbolj nenavadnih in neraziskanih pogonskih naprav. Zato je večina tovrstnih motorjev ostajala večinoma eksperimentalna, njihova prva večja uporaba pa se je pojavila šele v času druge svetovne vojne. V tem času je naprava prvič vstopila v množično proizvodnjo v Nemčiji pod imenom Argus As 14. Ta je bila nameščena na leteči bombi V-1 t. i. "buzzbomb", kot je razvidno s *Slike 1* (Amezcuca Sánchez, Antonio). Po koncu vojne se je razvoj pulzних motorjev zmanjšal v korist učinkovitejših turboreaktivnih motorjev prav zaradi njihovih lastnosti kot so visoka raven hrupa, mehanske vibracije in obremenitve ohišja ter slaba ekonomičnost porabe goriva. Ne glede na to pulzni motorji ostajajo pomembni z vidika možne uporabe, kot je pogon brezpilotnih letal, zaradi svoje preproste zasnove, enostavnega vzdrževanja in sposobnosti delovanja z več vrstami pogonskih goriv (Hussain et al. 40; „Pulsejet“).



*Slika 1: V-1 "buzzbomb" s pritrjenim Argus As 014. Vir slike: Free3D, <https://free3d.com/3d-model/v1-flying-rocket-bomb-ww2-7714.html>. Dostopano: 1. mar. 2025.*

Za razliko od ostalih vrst reakcijskih pogonskih sistemov, ki uporabljajo kompresorje in turbine, pulzni reakcijski motorji delujejo s periodičnim zgorevanjem, ki za vzdrževanje delovanja uporablja tlačne valove in resonanco (Hussain et al. 40). Po začetku procesa zgorevanja se ta sam vzdržuje, saj tlačna razlika, ki jo ustvarijo razširjajoči se plini, poganja zaporedne impulze zgorevanja. Zaradi odsotnosti gibljivih delov je delovanje odvisno od

natančnega časovnega usklajevanja med fazo zgorevanja in fazo izpuha, pri čemer se tlačni valovi širijo skozi sesalni in izpušni kanal (Hussain et al. 6, 7). Posledica tega nihanja je periodično ustvarjanje potiska, zaradi česar je frekvenca delovanja temeljni dejavnik celotne zmogljivosti motorja. Frekvenca je večinoma odvisna od geometrije motorja, zlasti od dolžine sesalnega in izpušnega kanala, ki vplivata na značilnosti resonance sistema. Spremembe frekvence delovanja lahko zato vplivajo na učinkovitost zgorevanja in silo, ki se ustvari na cikel, kar ima lahko za posledico različno potisno moč motorja, odvisno od frekvence (Geng et al. „Experimental and Numerical Investigation“ 7). Glede na to, da cikli zgorevanja potekajo v impulzih, pri določenih delovnih frekvencah povzročajo nihanje potiska. Posledično je vloga frekvence pri ustvarjanju potiska še posebej zanimiva, saj bi to pomenilo, da bi lahko višje frekvence zaradi pogostejših zgorevalnih dogodkov povečale proizvodnjo potiska.

Namen te raziskave je ugotoviti, v kolikšni meri lahko frekvenca delovanja pulznega reakcijskega motorja vpliva na njegov potisk. S preučevanjem obstoječih teoretičnih modelov na podlagi sekundarnih virov in primerjavo z izvedeno eksperimentalno analizo si ta raziskava prizadeva raziskati to razmerje. Razumevanje tovrstne povezave je ključnega pomena za izboljšanje učinkovitosti pulznega motorja, zlasti z vidika zmanjšanja porabe goriva in zmanjšanja emisij pulznih reakcijskih motorjev. Optimizacija učinkovitosti je še posebej pomembna za nadaljnji razvoj, zlasti z vidika možne uporabe v brezpilotnih letalih (Geng et al. „Experimental and Numerical Investigation“ 1) in pogonskih sistemih za doseganje visokih hitrosti. Kljub svojim pomanjkljivostim je pulzni curek privlačen kandidat za razvoj v prihodnosti še posebej zaradi svoje izredno preproste zasnove, ki bi lahko rešila številne težave, povezane s sedanjim delovanjem tovrstnih sistemov. Odpravljanje omenjenih izzivov bi lahko privedlo do učinkovitejših in vsestransko uporabnih pogonskih sistemov namenjenih različnim modernim zahtevam.

## Teoretični del

### Tipi pulznih reakcijskih motorjev

Pulzni reakcijski motor je preprosta pogonska naprava, ki lahko iz mirovanja ustvarja potisk do razmeroma velikih hitrosti (John Grant O'Brien 15). V osnovi je sestavljen iz votle cevi z dovodom zraka, ki vsebuje mehanske ali aerodinamične ventile, zgorevalne komore in resonančnega izpuha (Amezcuca Sánchez, Antonio 13; John Grant O'Brien 15). Sistem za dovajanje goriva je običajno nameščen v bližini zgorevalne komore (Hussain et al. 1). Najbolj posebna lastnost pulznega curka je periodično ustvarjanje potiska. Do tega pride zaradi izmeničnega dovoda plinov, ki povzročajo pulzirajoče delovanje motorja (Amezcuca Sánchez, Antonio 13). Glede na obliko motorja imajo pulzni curki običajno nizko kompresijsko razmerje, kar ima za posledico nizek specifični impulz in slabši izkoristek („Pulsejet“).

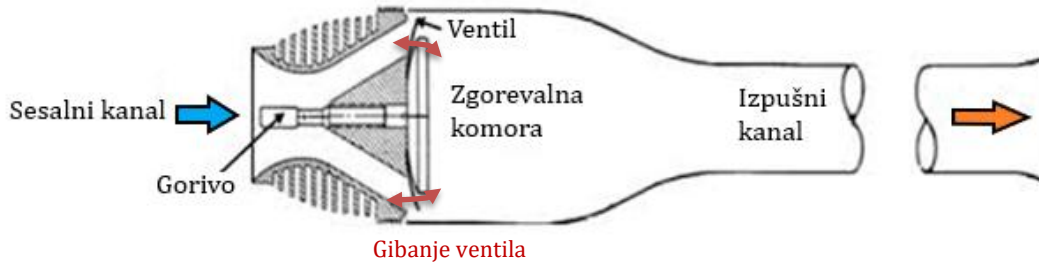
Glede na vrsto lahko pulzne reakcijske motorje razvrstimo v naslednji kategoriji:

- z ventili, pri katerih pretok zraka uravnavajo fizični ventili,
- brez ventilov, pri katerih geometrija motorja uravnava pretok zraka.

Ne glede na to je načelo delovanja pri obeh vrstah motorjev enako; glavna razlika med njima je le v načinu dovajanja zraka.

### *Pulzni reakcijski motor z ventili*

Shema 1 prikazuje prerez pulznega reakcijskega motorja z ventili.

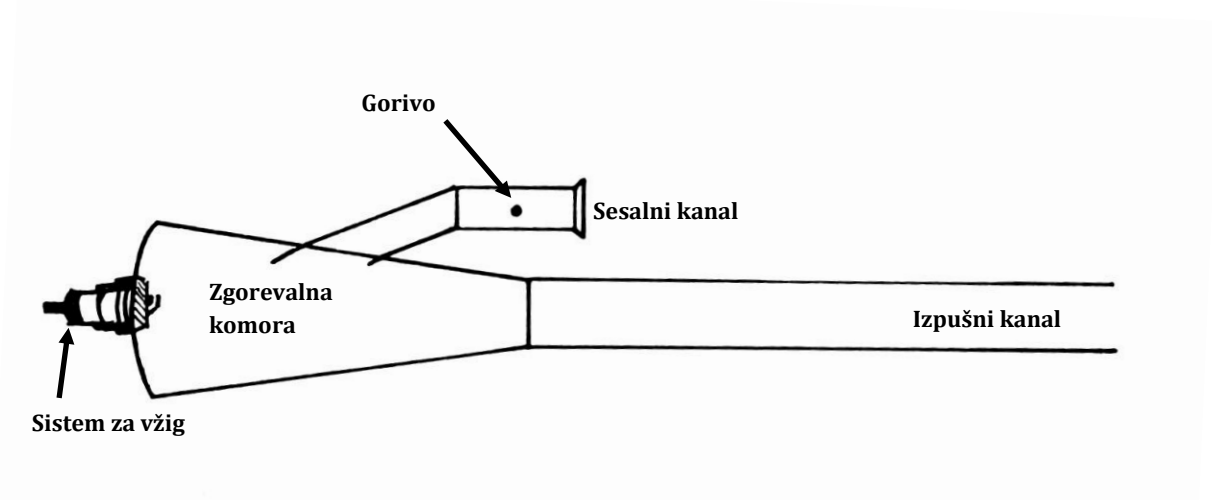


*Shema 1: Tipičen pulzni motor z mehanskimi ventili (Åstrand). Puščice označujejo smer toka plinov med delovanjem motorja.*

Pulzni reaktivni motorji z ventili uravnavajo pretok zraka s pomočjo lamelnih ventilov (ang. reed valves), kot so ventili Daisy/Petal ali pravokotne ventilne rešetke. Ti se odpirajo in zapirajo glede na razliko v tlaku med zunanostjo in notranostjo zgorevalne komore. Ta enosmerni mehanizem ventilov omogoča, da zrak vstopa skozi sesalni kanal in teče neposredno skozi zgorevalno komoro ter nato izstopa skozi izpušni kanal iz motorja. Kljub temu so ventili zaradi svoje mehanske narave dovzetni za obrabo zaradi stalne izpostavljenosti visokim temperaturam in hitrega gibanja, kar povzroča deformacije in manjšo vzdržljivost. Poleg tega lahko zaradi omejenega odzivnega časa ventilov pri premikanju med delovanjem motorja del izpušnih plinov uide skozi sesalni kanal, kar zmanjša splošno zmogljivost motorja (Amezcuca Sánchez, Antonio 13, 14; „Pulsejet“).

### *Pulzni reakcijski motor brez ventilov*

Shema 2 prikazuje prerez pulznega reakcijskega motorja brez ventilov.



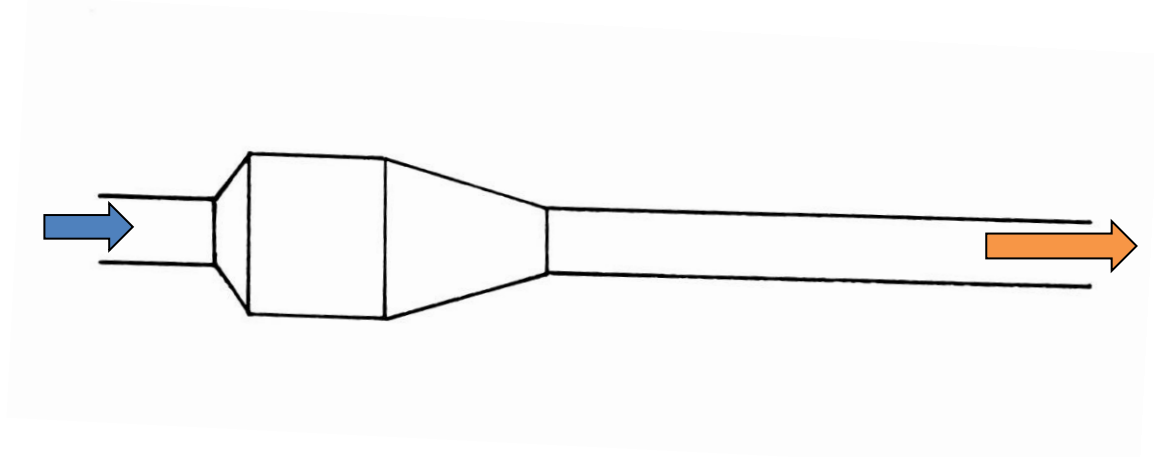
*Shema 2: Pulzni reakcijski motor brez ventilov (Hussain et al.).*

Za uravnavanje pretoka plina skozi motor se pri brezventilskih impulznih motorjih upošteva le njihova geometrija. Kljub temu je načelo delovanja analogno motorjem z ventili. Ker pri tej konfiguraciji ni ventilov, plini običajno izstopajo iz motorja tako na izpušnih kot na sesalnih kanalih (Åstrand 3; „Pulsejet“). V njihovi konstrukciji je običajno krajši kanal sesalni, daljši pa izpušni, kar zagotavlja, da sveža mešanica zraka in goriva doseže zgorevalno komoro, preden jo povratni tlačni val ponovno vžge. (Amezcuca Sánchez, Antonio 15). Z ustreznimi dimenzijami je tako mogoče doseči samozadosten resonančni proces zgorevanja (Åstrand 4, „Pulsejet“).

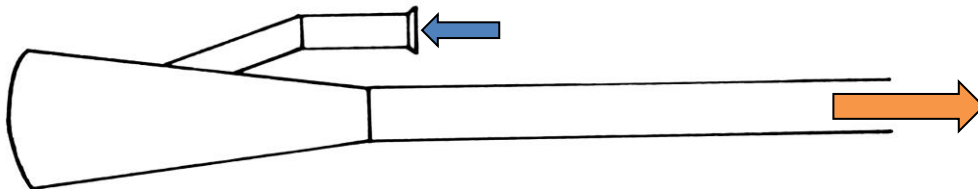
Motorji brez ventilov v primerjavi z motorji z ventili običajno potrebujejo večje dimenzije za doseganje enakega potiska, kar je posledica nižjega kompresijskega razmerja in manj učinkovitega kroženja plina (Amezcuca Sánchez, Antonio 15). Poleg tega je regeneracija zraka počasnejša, saj se plini izločajo skozi vse kanale, zaradi česar iz motorja uide več plina. Vseeno pa v praksi motorji brez ventilov ne potrebujejo veliko vzdrževanja in jih je lažje izdelati, poleg tega pa imajo nekateri celo izjemen izkoristek goriva. Dobro izdelani pulzni motorji brez ventilov se zato odlično izkazujejo tudi med letom. Za razliko od oblik

z ventili odsotnost ventilov ne vpliva na zmogljivost motorja pri visokih hitrostih, v nekaterih primerih pa jo lahko celo izboljša ("Pulsejet").

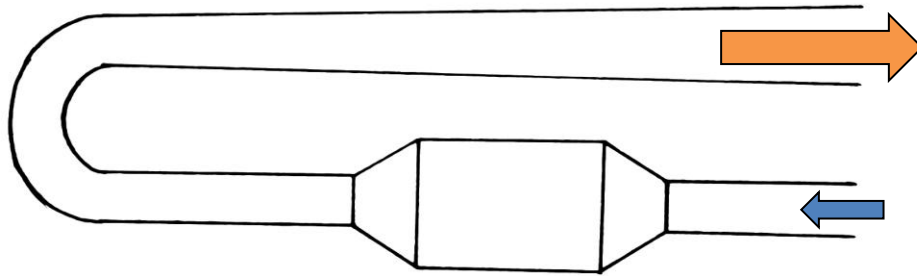
Na spodnjih slikah so prikazane različne konfiguracije pulznih motorjev brez ventila; in-line, linearni in motor v obliki črke U (ang. U-shape engine). Puščice označujejo osnovno funkcijo dela motorja in glavno smer gibanja plinov med delovanjem: modra predstavlja sesalni del, oranžna pa izpušni del.



*Slika 2.1: In-line brezventilski pulzni motor. Sesalni in izpušni tok sta usmerjena v nasprotni smeri, zato je potisna sila manjša (Åstrand 5).*



*Slika 2.1: Linearni pulzni motor brez ventila - Kitajski CS dizajn. Podobno kot pri linijski zasnovi, vendar je sesalni kanal nameščen na strani zgorevalne komore in je usmerjen v isto smer kot izpušni kanal (Åstrand 5).*



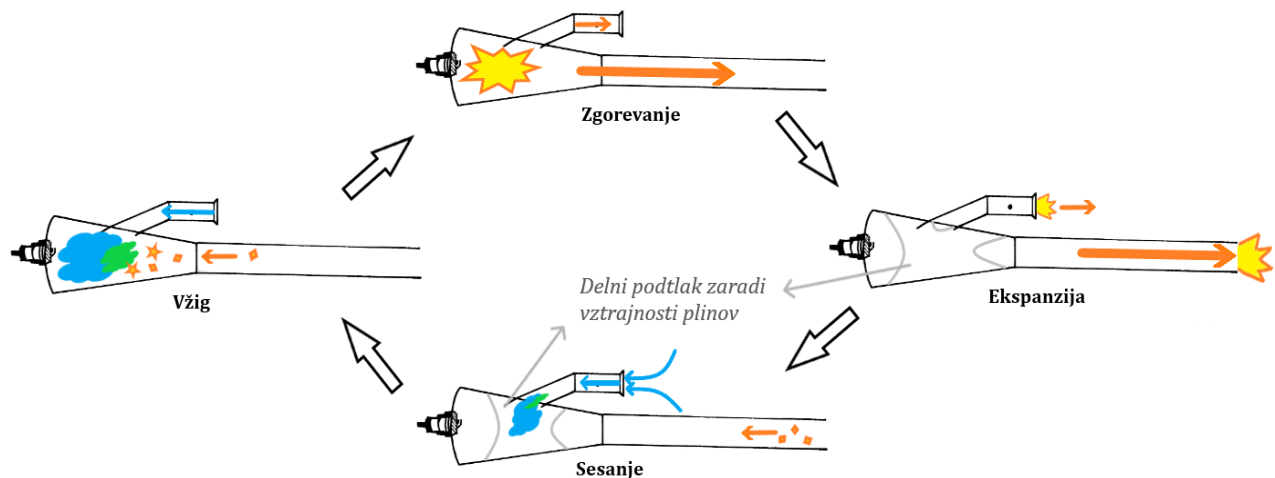
*Slika 2.2: Pulzni motor v obliki črke U (zasnova Lockwood). Podobno kot pri linearni zasnovi sta izpušni in sesalni kanal usmerjena v isto smer, kar poveča skupno potisno silo (Åstrand 5).*

## Delovanje motorja

Delovanje pulznih reakcijskih motorjev lahko razdelimo na štiri faze: fazo zgorevanja, ekspanzije, sesanja in vžiga (Isac et al. 1; Hussain et al. 17). Shema 3 prikazuje delovanje pulznega curka.

- 1. Zgorevanje** – Zgorevanje poteka v zgorevalni komori, kjer sproščanje toplote povzroči zvišanje notranjega tlaka, kar potisne vroče pline skozi izpušni kanal in tako ustvari potisno silo. Ekspanzivni plini se gibljejo tako po izpušni kot po vstopni poti, pri čemer se zaradi konstrukcijskih značilnosti večji delež plinov izloči skozi izpušni kanal, kar velja še posebej za motorje brez ventilov.
- 2. Ekspanzija** – Ko se plini pri zgorevanju razširijo na atmosferski tlak, se zaradi svoje vztrajnosti še naprej širijo, kar povzroči prekomerno ekspanzijo plinov. Posledica te prekomerne ekspanzije je padec tlaka v zgorevalni komori pod atmosferski tlak. To povzroči delni podtlak v zgorevalni komori.
- 3. Sesanje** – Zaradi tega delnega podtlaka se v zgorevalno komoro vsrka sveža mešanica zraka in goriva. Pri čemer nekaj preostalih izpušnih plinov iz izpušnega kanala zaradi spremembe tlaka ponovno vstopi v zgorevalno komoro.

4. **Vžig** – Preostali plini in prenos toplote s sten dvignejo temperaturo zmesi zraka in goriva na temperaturo samovžiga, kar sproži zgorevanje. To sproži nov dogodek zgorevanja. Cikel se ponavlja periodično, s čimer se ohranja pulzirajoče obratovanje motorja. Poleg tega je za zagon motorja potreben sistem za vžig, ki zagotovi, da se mešanica goriva in zraka vžge v zgorevalni komori.



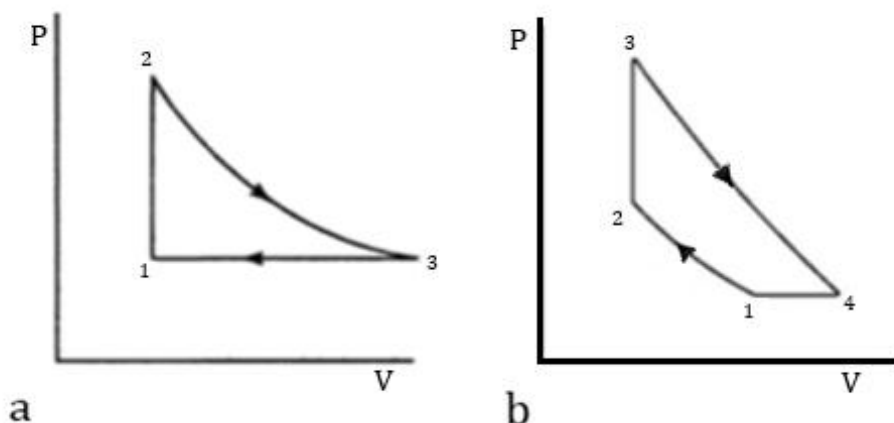
*Shema 3: Prikaz delovanja pulznega reakcijskega motorja.*

### Kadenacyjev efekt

Kadencijev efekt pojasnjuje, kako zrak pod visokim tlakom izstopa iz komore skozi večjo odprtino, medtem ko tlak v motorju zaradi vztrajnosti plina začne padati, najprej na tlak okolice, nato pa pod atmosferski tlak. To nihanje tlaka med visokim in nizkim tlakom poganja cikel delovanja pulznih reakcijskih motorjev. Ko se plini zaradi zgorevanja razširijo, se silovito izločijo, pri čemer nastane trenutni delni podtlak, ki vsrka svež zrak in gorivo, ta proces imenujemo aspiracija (Hussain et al. 5). Vztrajnost izstopajočih plinov ohranja nizkotlačno fazo in ustvarja tlačne razlike med notranjostjo in zunanostjo zgorevalne komore, zaradi česar v motor vstopata svež zrak in gorivo. Vstopajoča mešanica zraka in goriva skupaj s preostalimi izpušnimi plini vodi do vžiga naslednjega cikla zgorevanja (Sofia et al. 15).

## Termodinamični proces

Delovanje pulznih reaktivnih motorjev lahko opišemo z Lenoirjevim ali Humphreyjevim ciklom. Oba cikla opisujeta, kako se zmes zraka in goriva stisne, vžge in razširi, tako da se ustvari potisna sila. V idealiziranem modelu poteka zgorevanje pri konstantni prostornini, kar povzroči hitro naraščanje tlaka, zaradi česar se izpušni plini sprostijo iz naprave. Toda delovanje pulznega motorja se v praksi zaradi turbulentnega toka, aerodinamičnih izgub in nepopolnega zgorevanja nekoliko razlikuje od teh modelov. Ko se frekvenca poveča, spremembe vztrajnosti plina in časa zgorevanja vplivajo na učinkovitost vsakega cikla (Amezcuca Sánchez, Antonio 22, 23; Hussain et al. 18, 19). *Diagram 1* prikazuje diagrame  $P(V)$  Lenoirjevega in Humphreyjevega cikla:



*Diagram 1: Lenoirjev cikel (a) and Humphreyjev cikel (b) (Hussain et al.).*

## Frekvenca delovanja

Frekvenca delovanja določa, kako pogosto pride do cikla zgorevanja v določenem časovnem obdobju, kar neposredno vpliva na ustvarjanje potiska pulznega reakcijskega motorja. Glede na to, da pulzni curki temeljijo na nihanju tlaka in resonanci, ne pa na mehanskem stiskanju, na frekvenco vplivajo predvsem geometrija motorja, dinamika plinov in razmerje med zrakom in gorivom. Kljub temu natančno razmerje med frekvenco in potiskom ostaja pretežno neraziskano in bi zato zahtevalo globljo eksperimentalno analizo (Sofia et al. 16).

Številni modeli poskušajo predvideti frekvenco delovanja pulznih reakcijskih motorjev na podlagi akustičnih in resonančnih načel. Po teh modelih naj bi bila frekvenca ( $f$ ) pri pulznih motorjih z ventili ali brez ventilov obratno sorazmerna njihovi celotni dolžini ( $L$ ).

Akustični četrtvalovni model (ang. fourth-wave model) obravnava impulzni curek kot resonančno cev s tlačnim grebenom (ang. antinode) v zgorevalni komori in vozliščem na izpušnem kanalu, na podlagi česar velja naslednje razmerje:

$$f = \frac{c}{4L} \quad (1)$$

pri čemer je  $f$  frekvenca,  $c$  hitrost zvoka,  $L$  pa skupna dolžina motorja. Ta model naj bi bolj ustrezal izvedbam motorjev z ventili (Amezcuca Sánchez, Antonio 25).

Pri motorjih brez ventilov se uporablja drugačna frekvenčna aproksimacija. Šestvalovni model (ang. sixth-wave model) predvideva, da je delovanje motorja bližje šestvalovni resonančni cevi in ne četrtvalovni, zaradi česar predvidena frekvenca ustreza (Amezcuca Sánchez, Antonio 25):

$$f = \frac{c}{6L} \quad (2)$$

Ta model upošteva dejstvo, da imajo pulzni motorji brez ventilov odprt vhod, kar omogoča, da plin iz vstopnega kanala tudi izstopa, kar spremeni dinamiko valovanja.

Druga metoda, model Helmholtzevega resonatorja, obravnava sesalno in zgorevalno komoro kot resonančno votlino, kar vodi do približka frekvence ( $f$ ). Pri tem se uporablja resonančna frekvenca Helmholtzevega resonatorja z večimi režami (Papadakis in Stavroulakis 3, Zheng et al. 4):

$$f = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{V_{kom}} \cdot \left( \frac{A_{ses}}{M_{ses}} + \frac{A_{izp}}{M_{izp}} \right)} \quad (3)$$

kjer sta  $A_{ses}$  in  $A_{izp}$  površini prečnega prereza sesalnega oz. izpušnega kanala,  $V_{kom}$  je volumen zgorevalne komore,  $\rho$  pa gostota plinov v motorju. Izraza  $M_{ses}$  in  $M_{izp}$

predstavljata efektivno maso zraka v sesalnem in izpušnem kanalu in sledita enačbi (Papadakis in Stavroulakis 3):

$$M = \rho(L + \alpha D) \quad (4)$$

kjer sta  $D$  in  $L$  premer sesalnega oziroma izpušnega kanala,  $\alpha$  pa je korekcijski koeficient, ki je odvisen od tega, ali ima konec kanala šobo ali ne (Papadakis in Stavroulakis 3). Opozoriti je treba, da enačba 3 ne upošteva morebitnega uhajanja plinov med delovanjem.

Med drugim T. Geng et al. opisujejo frekvenco delovanja kot funkcijo masnega pretoka  $\dot{m}$  dovedenih plinov. Masni pretok v praksi pomeni mešanico goriva ter vstopajočega zraka. Pri tem se je izkazalo, da je povezava med omenjenima vrednostma, kljub manjšim odstopanjem glede na konfiguracijo dovoda linearna, zaradi česar lahko uporabimo naslednjo enačbo:

$$\dot{m} = k \cdot f \quad (5)$$

kjer  $k$  pomeni empirično konstanto sorazmernosti, ki upošteva razmerje med masnim pretokom in frekvenco. Z njo označujemo, za koliko se poveča količina plina, ki se giblje skozi motor, ko ta deluje hitreje.

Na podlagi zgornjih matematičnih modelov je razvidno, da na frekvenco delovanja motorja vpliva veliko dejavnikov. Poleg tega lahko v realnih razmerah pride do odstopanj od modelov zaradi več dejavnikov, kot so učinkovitost, obremenitev in zunanji pogoji.

### **Ustvarjanje potisne sile**

Potisk je mehanska sila, ki jo pojasnjuje tretji Newtonov zakon, kjer izstopajoči plin ustvarja enako in nasprotno veliko reakcijsko silo, ki motor poganja naprej. Ker potisna sila nastaja s prekinitvami, bi se v teoriji z večanjem frekvence delovanja povečala potisna sila. Po drugi strani pa lahko višje frekvence povzročijo nepopolno zgorevanje, nestabilnost plinskega pretoka in manjšo učinkovitost (Sofia et al. 16), kar vse negativno vpliva na ustvarjanje potiska. Potisk ( $F$ ) je v glavnem izražen kot posledica izmenjave gibalne količine ( $\dot{m}v$ ), ki je podana s splošno enačbo potiska:

$$F = \dot{m}v_{izp} - \dot{m}v_{ses} \quad (6)$$

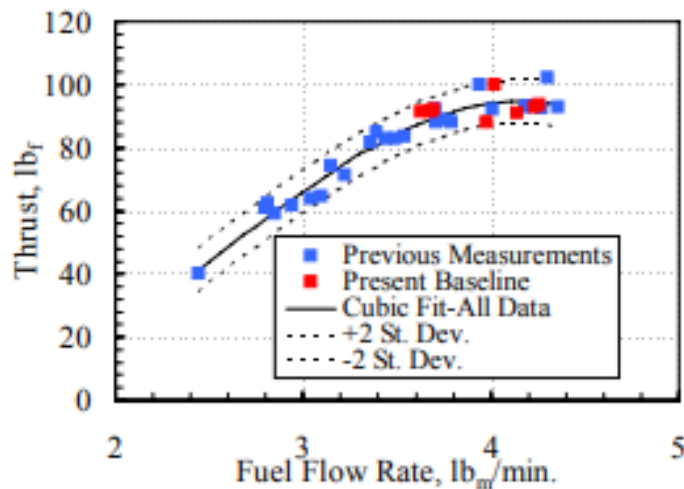
kjer  $\dot{m}$  pomeni masni pretok,  $v_{ses}$  in  $v_{izp}$  pa sta hitrosti vstopnih in izstopnih (oz. izpušnih) plinov. Masni pretok je podan z enačbo 5. V praksi se običajno predpostavlja, da je motor stacionaren, zaradi česar je  $v_{ses}$  zanemarljiv, kar pomeni, da se enačba 6 zmanjša na:

$$F = \dot{m}v_{izp} \quad (6.1)$$

Ko enačbo 6.1 združimo z enačbo 5 dobimo:

$$F = k \cdot f \cdot v_{izp} \quad (6.2)$$

kjer lahko opazimo povezavo med potisno silo motorja in njegovo frekvenco delovanja . To pomeni da, če sta  $k$  in  $v_{izp}$  konstantna, bi se morala potisna sila s frekvenco linearno povečati. Kljub temu eksperimentalni podatki kažejo, da to velja le pri zmerno velikih frekvencah. Paxon in drugi so analizirali potisk kot funkcijo masnega pretoka, ki je neposredno povezan z delovno frekvenco. To povezavo prikazuje *Diagram 2*:



*Diagram 2: Potisk pulznega reakcijskega motorja kot funkcija masnega pretoka ( $\dot{m}$ ), oz. pretoka goriva (E. Paxon et al. 3). Na grafu Thrust pomeni potisk merjen v funtih [lb], Fuel Flow Rate pa pomeni pretok goriva.*

Podatki kažejo linearno odvisnost med masnim pretokom in potisno silo, ko se masni pretok poveča. Toda pri večjih masnih pretokih se začne kazati rahlo odklanjanje od linearne sorazmernosti in s tem nakazuje zmanjševanje moči motorja oz. na večje izgube (zato Paxonova kubično ujemanje). To lahko pomeni, da povečanje masnega pretoka po določeni točki vodi k večjemu potisku (pri Paxonovem poskusu je bilo to približno

$3,8 \frac{lb}{min}$ ), ampak počasneje. Ker je celotni masni pretok vsota masnih pretokov goriva in zraka, sta ti dve količini med seboj tesno povezani, pri čemer masni pretok goriva določa razpoložljivo kemično energijo, medtem ko spremljajoči masni pretok zraka vpliva na učinkovitost zgorevanja in skupno reakcijsko maso nastopajočih plinov.

Pri manjših pretokih goriva se količina vsesanega zraka sorazmerno poveča, pri čemer razmerje med gorivom in zrakom ostane skoraj konstantno, kar povzroči linearno povečanje potisne sile. Pri večjih pretokih goriva pa se to ravnovesje lahko spremeni, kar pri višjih frekvencah povzroča neučinkovitosti zgorevanja in večje toplotne izgube, kar negativno vpliva na hitrost izpušnih plinov. Posledično se potisna sila pri nizkih stopnjah pretoka goriva povečuje skoraj linearno, a zaradi omejitev v resničnosti prihaja do odstopanj pri višjih vrednostih. Kljub vse manjšemu izkoristku se zaradi naraščajočega masnega pretoka še vedno povečuje celotna potisna sila.

### Eksperimentalni del

Da bi preverili razmerje med potisno silo in frekvenco delovanja, je bil izveden poskus z brezventilnim pulznim reakcijskim motorjem. Eksperimentalni motor je bil zasnovan kot rahlo spremenjena različica motorja Short Lady Pulsejet, ki izhaja iz kitajskega CS dizajna motorja. Zasnova brez ventilov je bila izbrana zaradi preprostejšje konstrukcije in preprostejšega vzdrževanja, zaradi česar je bila primerna za testiranje. *Slika 3* prikazuje izbrani motor:



*Slika 3: The Short Lady – 3D izris (“Focused Wave Engine Project - Work in Progress Page 1”).*

Za izdelavo je bilo uporabljeno nerjaveče jeklo, saj je zelo trpežno, odporno na ekstremne temperature in cenovno ugodno. Poleg tega zaradi visokih temperatur zgorevanja med delovanjem nerjaveče jeklo zagotavlja strukturno celovitost in povečuje varnost, saj zmanjšuje tveganje deformacije ali okvare med dolgotrajno uporabo. Podrobnosti načrtov

motorja so navedene v Prilogi. Kot gorivo smo uporabili utekočinjeni naftni plin oz. LPG, ki ga sestavlja zmes propana in butana. Kot gorivo je bil izbran zaradi tega, ker je zlahka dostopen, ravnanje z njim pa je relativno enostavno, saj je hranjen v tlačnih posodah.

### **Varnost**

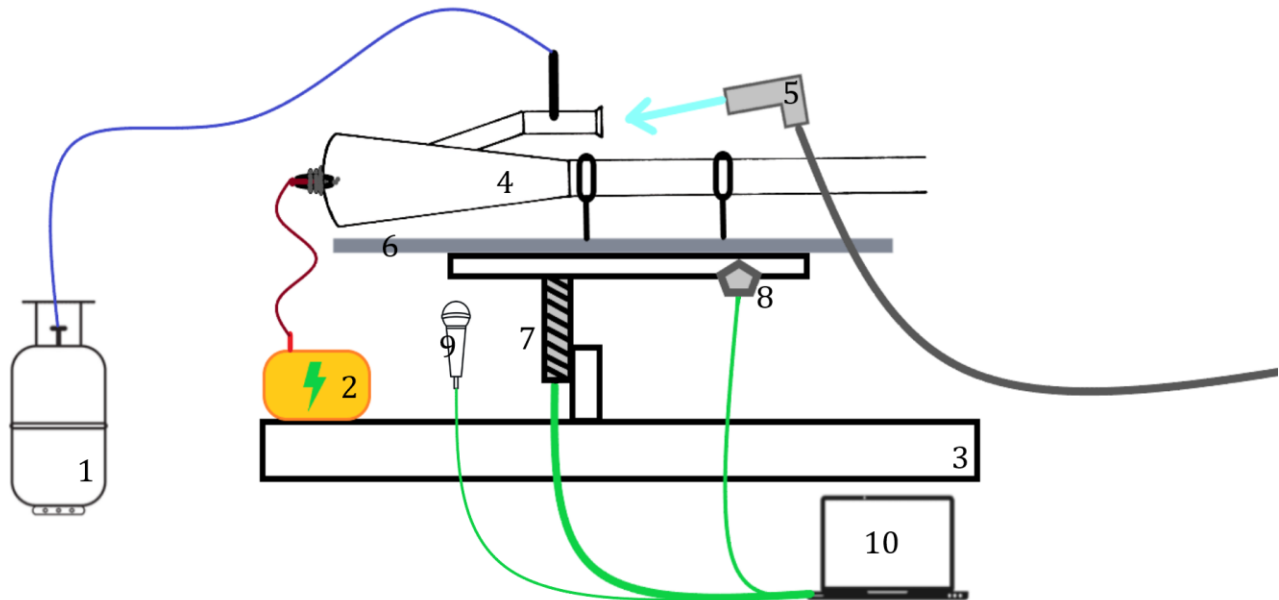
Zaradi potencialnih nevarnosti, ki so povezane z delovanjem pulznega curka, smo se držali večih varnostnih ukrepov, saj smo ravnali z nevarnimi snovmi:

- Testiranje je potekalo v preskuševalnem laboratoriju za motorje, opremljenem s polnim aktivnim prezračevanjem, z namenom čim bolj zmanjšati tveganja, povezana z morebitnimi emisijami strupenih plinov.
- Za spremljanje kakovosti zraka se je med poskusom uporabljal prenosni detektor ogljikovega monoksida.
- Za zaščito pred vročino smo uporabili laboratorijska očala in laboratorijske halje.
- V primeru izbruha požara smo imeli na voljo gasilni aparat.
- Za zmanjšanje negativnih učinkov visoke jakosti zvoka, ki ga je povzročal motor, smo uporabili glušnike oz. zaščitne slušalke.

### **Postavitev in postopek eksperimenta**

Motor je bil nameščen na fiksno stojalo, opremljeno z merilno celico za merjenje potisne sile WIKA F4818. Pod motorjem je bil nameščen pospeškometer oz. akcelerometer, ki je zajemal vibracije, v bližini motorja pa je bil mikrofoni, s katerimi smo posneli akustično obnašanje motorja. Obe napravi sta neodvisno izmerili oscilacijsko obnašanje motorja, pri čemer je bila za določitev delovne frekvence potrebna naknadna obdelava. Zbiranje podatkov v realnem času je bilo izvedeno s programsko opremo NI Labview, nadaljnja analiza pa je bila opravljena v programu Microsoft Excel. Kot vir goriva je bila izbrana jeklenka s propanom, pretok pa se je uravnaval z ročnim ventilom. Medtem ko je bil pretok goriva nadzorovan ročno, masnega pretoka zaradi pomanjkljive opreme ni bilo mogoče neposredno izmeriti. Za vžig motorja je bila uporabljena avtomobilska vžigalna svečka. Ob zagonu je bil potreben dodatni dovod zraka pod pritiskom, ki smo ga dovedli s kompresorjem, zato da bi zagotovili stabilno in neprekinjeno delovanje motorja. Pod motor je bila nameščena majhna kovinska plošča za zaščito merilne opreme pred visokimi

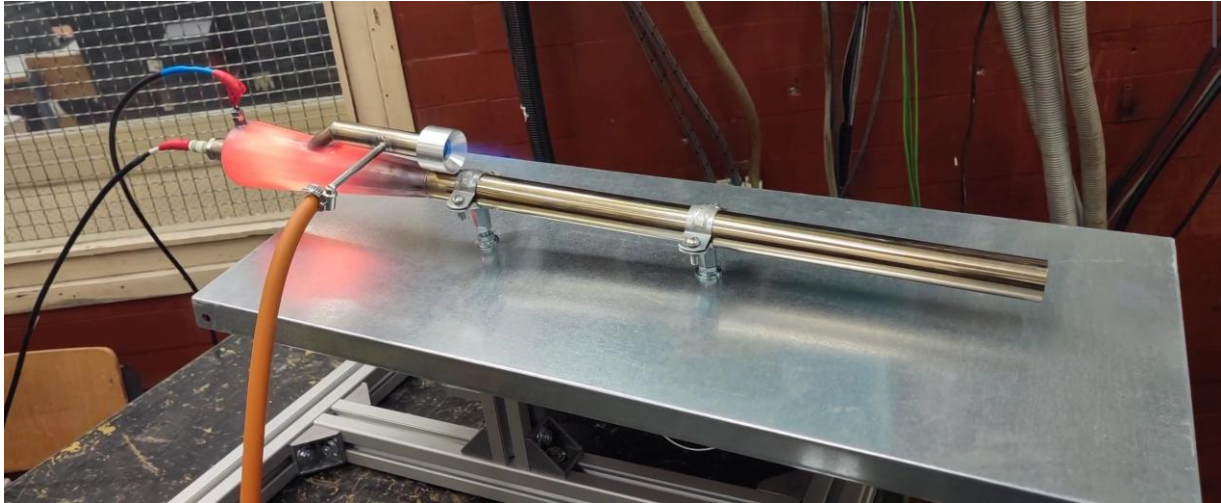
temperaturami zgorevalne komore. *Shema 4* prikazuje eksperimentalno postavitev sestavnih delov, oštevilčenih glede na njihovo specifično funkcijo:



*Shema 4: Shema postavitve poskusa. Vsi oštevilčeni sestavni deli ustrezajo določeni funkciji: (1) sistem za vbrizgavanje goriva, (2) sistem za vžig, (3) stojalo motorja, (4) motor, (5) stisnjen zrak, (6) kovinska zaščitna plošča, (7) merilna celica, (8) pospeškometer oz. akcelerometer, (9) mikrofoni, (10) naprava za zbiranje podatkov v realnem času z ustrežno programsko opremo.*

## Rezultati

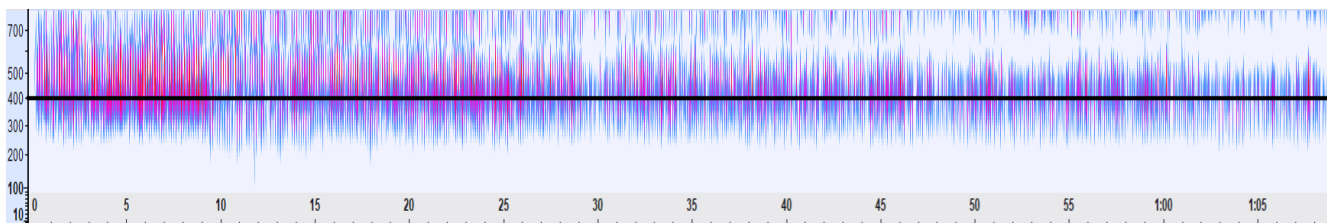
Doseganje stabilnega delovanja in vžiga motorja se je izkazalo za izjemno težavno zaradi težav pri doseganju pravilnega stehiometričnega razmerja med zrakom in gorivom, potrebnega za kontinuirano zgorevanje goriva. Zaradi pomanjkljive merilne opreme takšnega razmerja ni bilo mogoče določiti. Zaradi tega je bil vžig motorja predvsem odvisen od poskušanja doseganja tovrstnega razmerja, dokler motor končni ni pričel z neprekinjenim delovanjem. Najvišja temperatura na površini zgorevalne komore je bila ocenjena na približno 1270 K, pri čemer je motor neprekinjeno deloval več kot 5 minut. Temperaturo smo izmerili z infrardečim digitalnim termometrom. *Slika 4* prikazuje motor med delovanjem:



*Slika 4: Delujoči pulzni reakcijski motor (Več slik je priloženih v prilogah).*

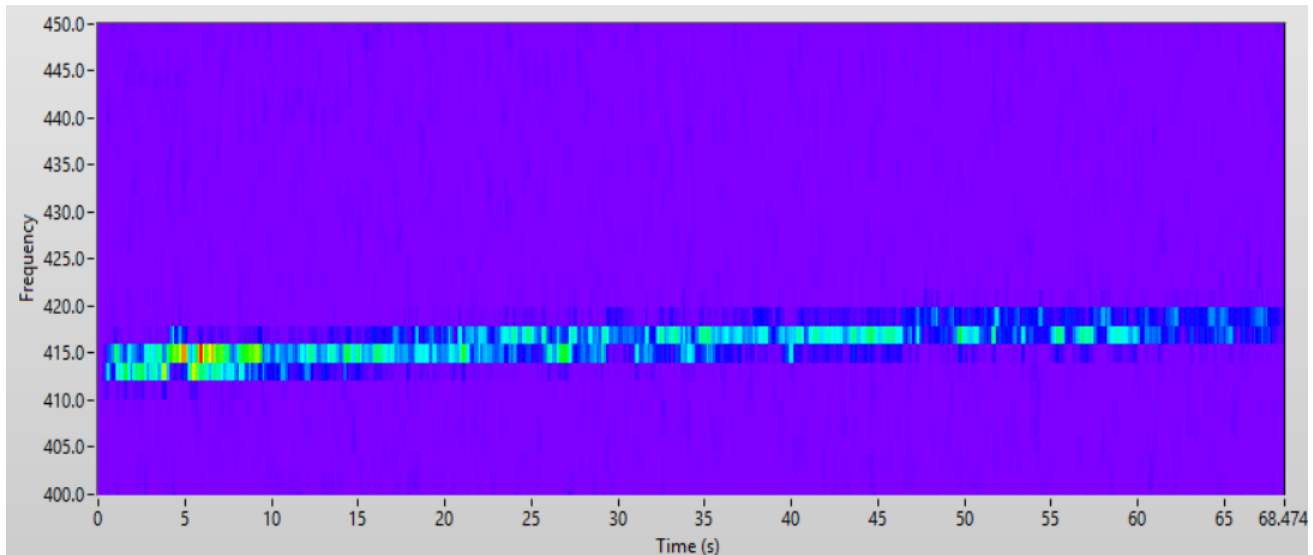
### ***Frekvenca delovanja***

Eksperiment kaže, da je pulzni reakcijski motor deloval v ozkem frekvenčnem območju, kar je v nasprotju s prvotnimi napovedmi, da je mogoče s prilagajanjem pretoka goriva in masnega pretoka doseči širše frekvenčno območje. Podatki o frekvenci so bili zbrani z uporabo pospeškometra oz. akcelorometra ter mikrofona, kjer je analiza Fourierove transformacije potrdila skladnost rezultatov med uporabljenima metodama. Maksimalna frekvenca, ki smo jo izmerili z merilnikom pospeška, je znašala 418 Hz. Podobne rezultate je pokazal tudi spektrogram na podlagi meritev z mikrofonom. Zabeležena je bila prevladujoča frekvenca približno 415 Hz z manjšimi odstopanji, ki so bila verjetno posledica cikličnega oz. oscilatornega delovanja motorja. *Slika 5* prikazuje spektrogram mikrofona, na katerem je razvidno, da je obnašanje motorja v danem času ostajalo relativno stabilno z manjšimi nihanji frekvence:



*Slika 5: Spreminjanje frekvence v času delovanja motorja. Črna črta na spektrogramu označuje frekvenco 400 Hz.*

Prav tako to potrjuje spektrogram STFT na *Sliki 6*, ki ga je zbral mikrofoni, saj kaže dobro definirano frekvenčno območje pri približno 415 Hz med delovanjem motorja.



*Slika 6: Spektrogram frekvence delujočega motorja, po podatkih pospeškometra. Opazna je delovna frekvenca 415 Hz.*

Čeprav so na spektrogramih vidna rahla nihanja, je frekvenca ostala večinoma stabilna in se je v danem času le rahlo povečala. Poleg tega je bilo opazno rahlo zmanjšanje jakosti zvoka, kar je razvidno iz postopnega bledenja barv na spektrogramu. Žal spremembe intenzivnosti zvoka v poskusu niso bile predvidene kot znatne spremenljivke in zato niso bile količinsko opredeljene.

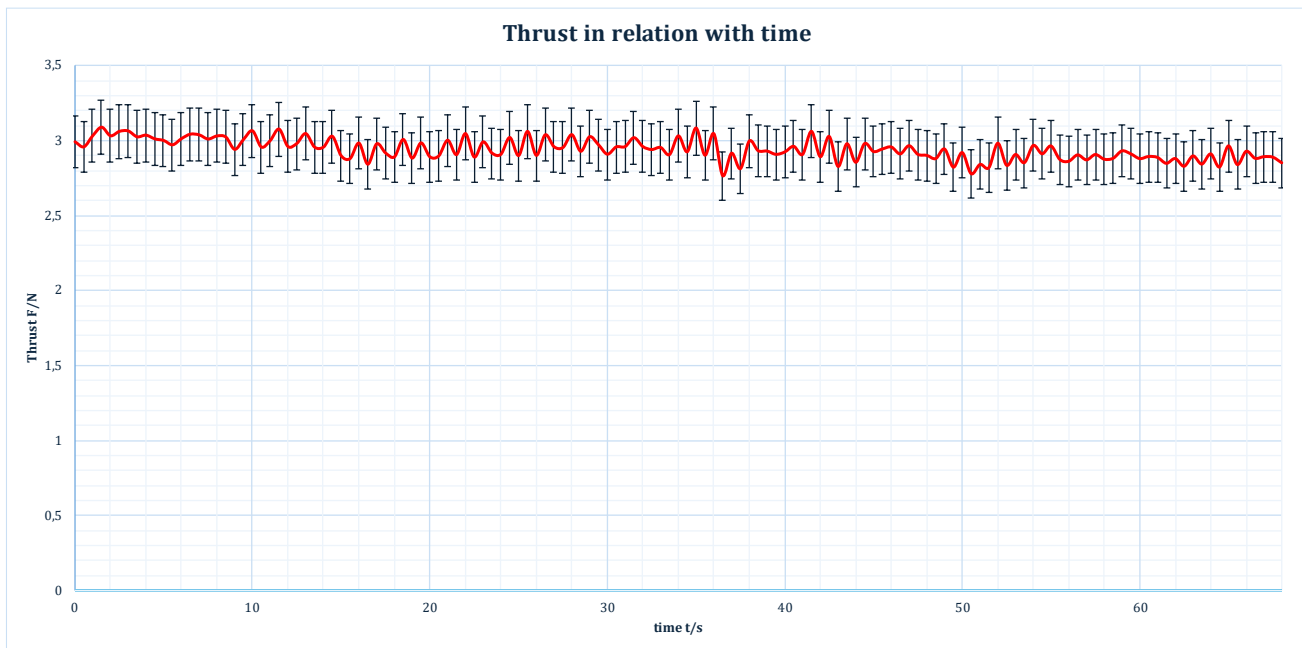
Poskusi spreminjanja pretoka goriva in posledično masnega pretoka niso povzročili nobene razlike v frekvenci. Nasprotno, spremembe od optimalnega pretoka goriva  $1,1 \frac{g}{s}$  oz. masnega pretoka so povzročile popolno zaustavitev motorja, kar kaže na to, da so na delovno frekvenco močno vplivali celotna geometrija motorja in resonančni učinki. Zato spremembe v frekvenci delovanja, niso bile nastavljive le s pretokom goriva oz. masnim pretokom.

Glede na dimenzije motorja sta četrtvalovni in šestvalovni model napačno napovedala delovno frekvenco, saj je četrtvalovni model ocenil 260 Hz, šestvalovni model pa 174 Hz. Po drugi strani pa je model Helmholtzevega resonatorja napovedal zelo natančen približek 320 Hz. Pri računanju frekvenc je bila upoštevana hitrost zvoka v zraku pri temperaturi

1000 °C kot  $695 \frac{m}{s}$  gostota zraka pri tej temperaturi pa kot  $0,277 \frac{kg}{m^3}$ . Rezultat kaže na to, da kljub odstopanju za 95 Hz, matematični model Helmholtzevega resonatorja najnatančneje opisuje delovanje pulznega reakcijskega motorja, ki je bil testiran.

### Potisna sila

Podobno kot pri frekvenci delovanja je tudi potisna sila, ki jo proizvede motor, ki deluje pri optimalnem masnem pretoku, ostajala razmeroma stabilna tekom delovanja motorja. to je prikazano na *Diagramu 3*.



*Diagram 3: Graf potisne sile, ki jo je motor proizvedel v odvisnosti od časa.*

Graf prikazuje večinoma konstantno potisno silo, ki niha okrog povprečne vrednosti 2,98 N, kar je verjetno posledica cikličnega oz. oscilatornega delovanja motorja. Kljub temu je sčasoma prišlo do majhnega zmanjšanja potisne sile. Ta padec potiska je bil zelo majhen in ni kazal na to, da bi nanj vplivala regulacija masnega pretoka. Napaka meritev je bila določena na približno 5,8 % na podlagi specifikacij merilne celice, uporabljene v poskusu. Dobljene vrednosti potisne sile so sicer rahlo nihale, vendar brez nenadnih ali pomembnih sprememb.

## Analiza in razprava

Teoretični modeli napovedujejo medsebojno sorazmerje med potisno silo in frekvenco delovanja, pri čemer bi povečanje frekvence povzročilo več ciklov zgorevanja v določeni časovni enoti; s tem pa bi se povečala tudi potisna sila motorja. Kljub temu pa je iz poskusa razvidno, da ta povezava sicer obstaja, vendar ni povsem direktna. Sila potiska je ostala relativno konstantna, kar kaže na dejstvo, da je odvisnost potiska od frekvence močno odvisna tudi od geometrije motorja. Motor je vzdrževal delovno frekvenco 415 Hz z manjšimi nihanjem. Poskusi spreminjanja masnega pretoka in posledično razmerja med gorivom in zrakom so imeli zanemarljiv vpliv na frekvenco, kar kaže na to, da imajo resonančni učinki in dimenzije motorja večjo vlogo pri določanju končne delovne frekvence. Kot zanimivost je treba omeniti, da sta modela četrtnalnega in šestvalnega valovanja napovedala bistveno prenizko delovno frekvenco, kar dokazuje, da ta dva modela nista bila primerna za modeliranje obnašanja testiranega motorja. Ta razhajanja poudarjajo zapletenost resonančnega zgorevanja v pulznih reakcijskih motorjih, zlasti pri modelih brez ventilov, zaradi številnih dejavnikov, ki vplivajo na končno frekvenco in potisno silo.

Meritve potiska so pokazale razmeroma stabilno potisno silo 2,98 N med delovanjem motorja, z manjšimi spremembami, ki so posledica značilnega periodičnega zgorevanja. Teorija sicer pravi, da bodo višje frekvence povzročile večji potisk zaradi večje pogostosti dogodkov zgorevanja, vendar tega ni bilo mogoče eksperimentalno ugotoviti. Razlog za pomanjkljivo povezavo med potiskom in frekvenco bi bilo lahko neučinkovito zgorevanje pri naraščajočih temperaturah in interakcijah tlačnih valov ali pa omejitve glede učinkovitega odvajanja delujočih plinov. Poleg tega je povečanje masnega pretoka nad optimalno raven (tj.  $1.1 \frac{g}{s}$ ) povzročilo nestabilno zgorevanje in ni povečalo potisne sile. To potrjuje idejo, da resonanca in geometrija strogo določata omejitve pri delovanju motorja.

Rezultati kažejo, da preizkušeni motor deluje v ozkem režimu masnega pretoka, pri katerem sta frekvenca in potisk stabilna znotraj ozkega območja. Zato izris grafa potisne sile v odvisnosti s frekvenco ni bil smiseln, saj je bila zabeležena le ena delovna frekvenca ter njej pripadajoča potisna sila. Zasnova testiranega motorja (tj. brez ventilov) je pomenila, da je njegovo delovanje pretežno določala njegova fizična oblika, kot pa ostale

spremenljivke. Iz tega sledi, da bi večje spremembe potiska in frekvence verjetno lahko dosegli s spremembami oblike motorja, na primer s spreminjanjem dolžine sesalnega in izpušnega kanala ali s prilagajanjem prostornine zgorevalne komore. Z nadaljnjo analizo bi lahko raziskali, ali imajo različne konfiguracije motorjev, npr. pulzni motorji z ventili oziroma drugačni tipi motorjev, izrazitejšo povezavo med potiskom in frekvenco. S prilagajanjem teh lastnosti bi lahko spremenili resonančne značilnosti pulzних reakcijskih motorjev, zaradi česar bi bilo razmerje med potiskom in frekvenco morda lažje vidno..

Dobljeni rezultati poudarjajo, da je delovna frekvenca temeljni faktor za delovanje pulznega reakcijskega motorja, vendar je njen vpliv na potisk odvisen od značilnosti zasnove samega motorja. Zaradi tega bi se morale prihodnje raziskave osredotočiti na to, kako spreminjanje geometrije motorja vpliva na frekvenco in silo potiska. Poleg tega bi bilo potrebno raziskati metode, ki bi izboljšale učinkovitost zgorevanja pri visokih temperaturah, kot so bile zabeležene tekom eksperimenta. Te ugotovitve lahko zato prispevajo k optimizaciji zasnove pulzних reakcijskih motorjev za praktično uporabo v prihodnosti, pri čemer je izboljšanje učinkovitosti ključni izziv. To bi lahko pripomoglo tudi k širši rabi pulzних reakcijskih motorjev na splošno.

## Zaključek

Ta raziskava je v nasprotju s prvotnimi pričakovanji pokazala, da poskus ni povezan samo s frekvenco delovanja in da ta povezava ni povsem enostavna. Namesto stalnega povečevanja potisne sile z višjimi frekvencami, rezultati kažejo, da se potisna moč stabilizira v ozkem območju. To kaže, da je delovanje motorja precej bolj odvisno od njegove oblike in posledičnih resonančnih značilnosti. Poskus je tudi pokazal, da motor deluje pri stabilni frekvenci, ki se tesno ujema z napovedmi modela Helmholtzevega resonatorja, medtem ko bistveno odstopa od četrtvalnega in šestvalnega matematičnega modela. To odstopanje izpostavlja omejitve klasičnega ocenjevanja frekvence delovanja, saj na delovanje motorja vpliva kompleksna dinamika plinov. V našem primeru je potisna sila ostala razmeroma konstantna, manjše spremembe pa je možno pripisati cikličnemu delovanju motorja.

Ker delovne frekvence ni bilo mogoče znatno spremeniti, je mogoče sklepati, da resonančne značilnosti motorja omejujejo njegovo zmogljivost. Poskus povečanja masnega pretoka izven optimalnega območja je povzročil ustavitev motorja in ne povečanega potiska, kar še dodatno potrjuje to idejo. Čeprav teoretični modeli predvidevajo neposredno povezavo med potiskom in frekvenco zaradi večjega števila dogodkov zgorevanja, je zaradi resničnih dejavnikov (npr. neučinkovito zgorevanje ali nepopolno mešanje goriva z zrakom) to povezavo težko določiti.

Čeprav ima delovna frekvenca pomembno vlogo pri delovanju motorja, je za optimizacijo potiska potrebna nadaljnja analiza učinkovitosti zgorevanja, dinamike pretoka plinov in oblikovanja konstrukcije pulznih reakcijskih motorjev. Zato bi se morale prihodnje raziskave osredotočiti na prilagajanje geometrije motorjev in raziskati, ali drugačne oblike motorjev omogočajo lažje upravljanje masnega pretoka plinov oz. celotnega pretoka plinov skozi motor. Prav tako bi lahko raziskave izboljšanih sistemov vbrizgavanja goriva ali drugačnih oblik zgorevalne komore prispevale k izboljšanju učinkovitosti pulznih reakcijskih motorjev. Z obravnavanjem teh vprašanj bi lahko tehnologijo pulznih curkov v prihodnosti nadgradili. S tem bi se lahko tehnologija pulznih curkov nadalje razvijala v praktične namene, zlasti za pogon brezпилotnih letal in druge nizkocenovne komercialne namene.

## Seznam uporabljene literature

- Amezcuca Sánchez, Antonio. "Design, Construction and Testing of a Pulsejet Engine." *Handle.net*, 20 Oct. 2022, [hdl.handle.net/10251/188324](https://hdl.handle.net/10251/188324), <http://hdl.handle.net/10251/188324>. Dostopano 14 Avg. 2024.
- Åstrand, Johanna. *Performance Prediction of a Valved and Valveless Pulse-Jet Engine Running on Alternative Fuel*. 1 Jan. 2014. Dostopano 20 Aug. 2024.
- Cory William Kerr, and James Robert Reynolds. "Valveless Pulsejet Engine." *DigitalCommons@CalPoly*, 2024, [digitalcommons.calpoly.edu/aerosp/6](https://digitalcommons.calpoly.edu/aerosp/6). Dostopano 14 Avg. 2024.
- E. Paxson, Daniel, et al. *Performance Assessment of a Large Scale Pulsejet- Driven Ejector System*. NASA Center for AeroSpace Information, May 2006.
- "Focused Wave Engine Project - Work in Progress Page 1." *Cottrillcyclodyne.com*, 2025, [www.cottrillcyclodyne.com/Focused\\_Wave/Focused\\_Wave.html](http://www.cottrillcyclodyne.com/Focused_Wave/Focused_Wave.html). Dostopano 28 Feb. 2025.
- Geng, T., et al. "Combined Numerical and Experimental Investigation of a 15-Cm Valveless Pulsejet." *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 78, no. 1, 6 Nov. 2006, pp. 17–33, [military-history.fandom.com/wiki/Pulsejet](https://doi.org/10.1007/s10494-006-9032-8), <https://doi.org/10.1007/s10494-006-9032-8>. Dostopano 29 Jul. 2024.
- . "Experimental and Numerical Investigation of an 8-Cm Valveless Pulsejet." *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31, no. 7, July 2007, pp. 641–647, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.06.005>. Dostopano 24 Jul. 2024.
- Geng, Tao, et al. "Comparison between Numerically Simulated and Experimentally Measured Flowfield Quantities behind a Pulsejet." *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 84, no. 4, 12 May 2010, pp. 653–667, <https://doi.org/10.1007/s10494-010-9247-6>. Dostopano 4 Sept. 2021.
- Hussain, Sadig, et al. *Theoretical and Experimental Evaluation of Pulse Jet Engine*. 2008.

Isac, Joseph Kalyan Raj, et al. “Numerical Simulation of a Hydrocarbon Fuelled Valveless Pulsejet.” *Propulsion and Power Research*, vol. 3, no. 2, June 2014, pp. 90–95, <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2014.05.004>. Dostopano 31 Jul. 2022.

John Grant O'Brien. *The Pulsejet Engine*. National Technical Information Service U. S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 1974.

Litke, Paul J, et al. “Assessment of the Performance of a Pulsejet and Comparison with a Pulsed-Detonation Engine.” *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 10 Jan. 2005, <https://doi.org/10.2514/6.2005-228>.

Papadakis, Nikolaos M., and Georgios E. Stavroulakis. “Tunable Helmholtz Resonators Using Multiple Necks.” *Micromachines*, vol. 14, no. 10, 15 Oct. 2023, p. 1932, <https://doi.org/10.3390/mi14101932>. Dostopano 25 Feb. 2025.

“Pulsejet.” *Wikipedia*, 9 May 2020, <en.wikipedia.org/wiki/Pulsejet>.

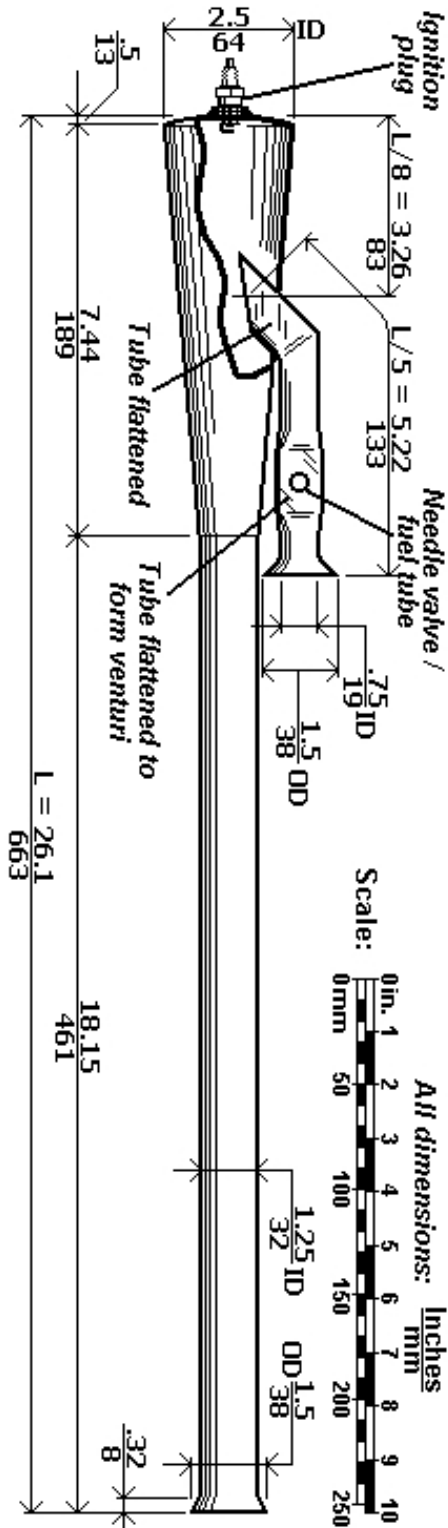
Sofia, Andreia, et al. *UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR Engenharia Pulsejet Engine Performance Estimation (Versão Revista Após Discussão)*.

“Thrust Equation | Glenn Research Center | NASA.” *Glenn Research Center | NASA*, 27 July 2022, [www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-force/#general-thrust-equation](http://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/thrust-force/#general-thrust-equation).

Zheng, F, et al. “A New Acoustic Model for Valveless Pulsejets and Its Application to Optimization Thrust.” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 130, no. 4, 28 Apr. 2008, <https://doi.org/10.1115/1.2900730>. Dostopano 22 Apr. 2024.

## Priloge

Načrti The Short Lady (“Focused Wave Engine Project - Work in Progress Page 1”)



### Focused Wave Pulsejet Engine (Conical Chamber)

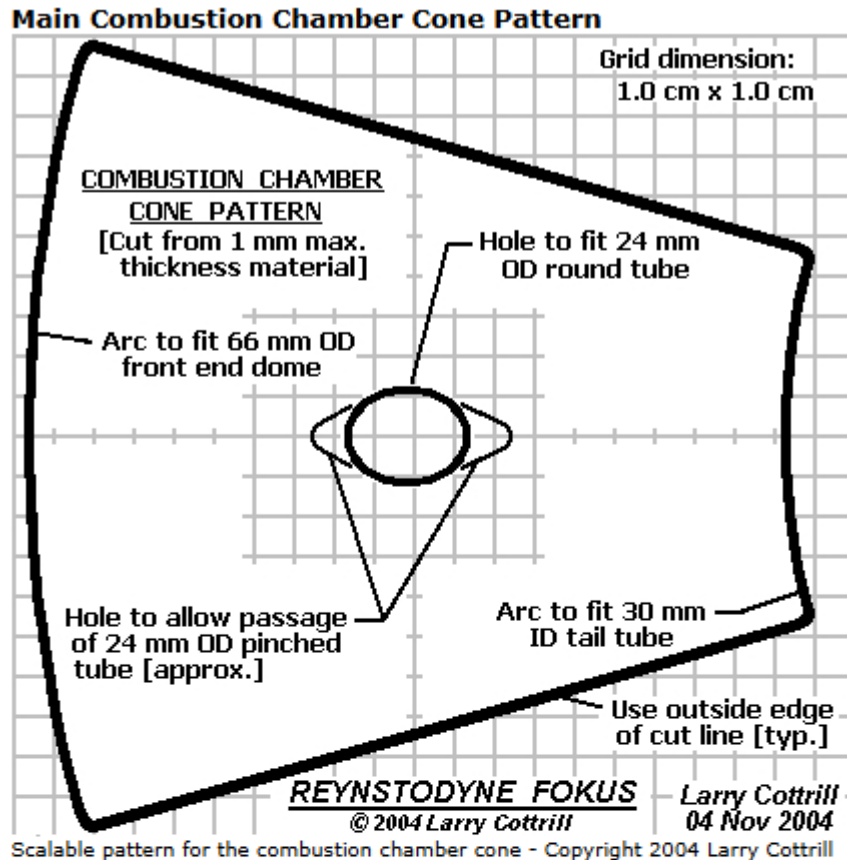
©2004 Larry Cottrill

Larry Cottrill  
30 Aug 2004

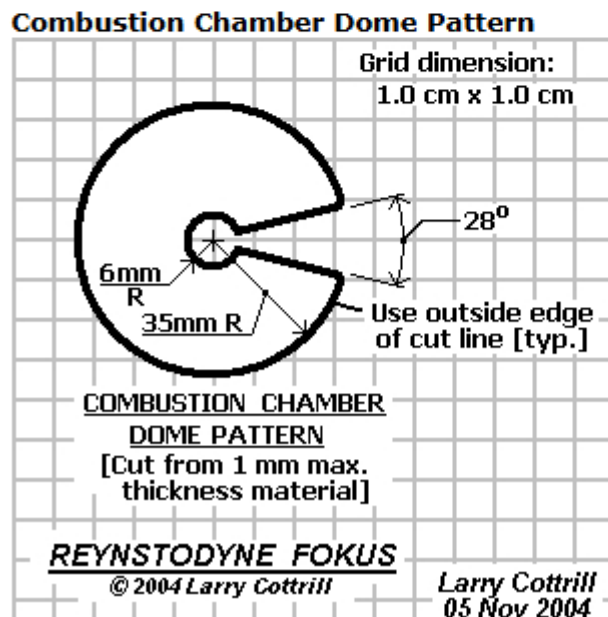
#### **FOCUSED WAVE VALVELESS PULSEJET ENGINE - the 'Short Lady'**

The scale working drawing, as disclosed on 14 Sep 2004. The engine was designed to be fabricated entirely from mild steel tubing and sheet steel, with fully welded construction. The first prototype was built by high school student Steve Bukowsky of Connecticut, USA. I did not show engine mounts on the drawing.  
Drawing Copyright 2004 Larry Cottrill

Dimenzije testiranega motorja so praktično enake kot v načrtu. Modifikacije prvotnega dizajna so bile raba drugačne vstopne šobe na sesalnem kanalu, nestisnjen sesalni kanal ter odsotnost difuzorja na izpušnem kanalu.



Scalable pattern for the combustion chamber cone - Copyright 2004 Larry Cottrill



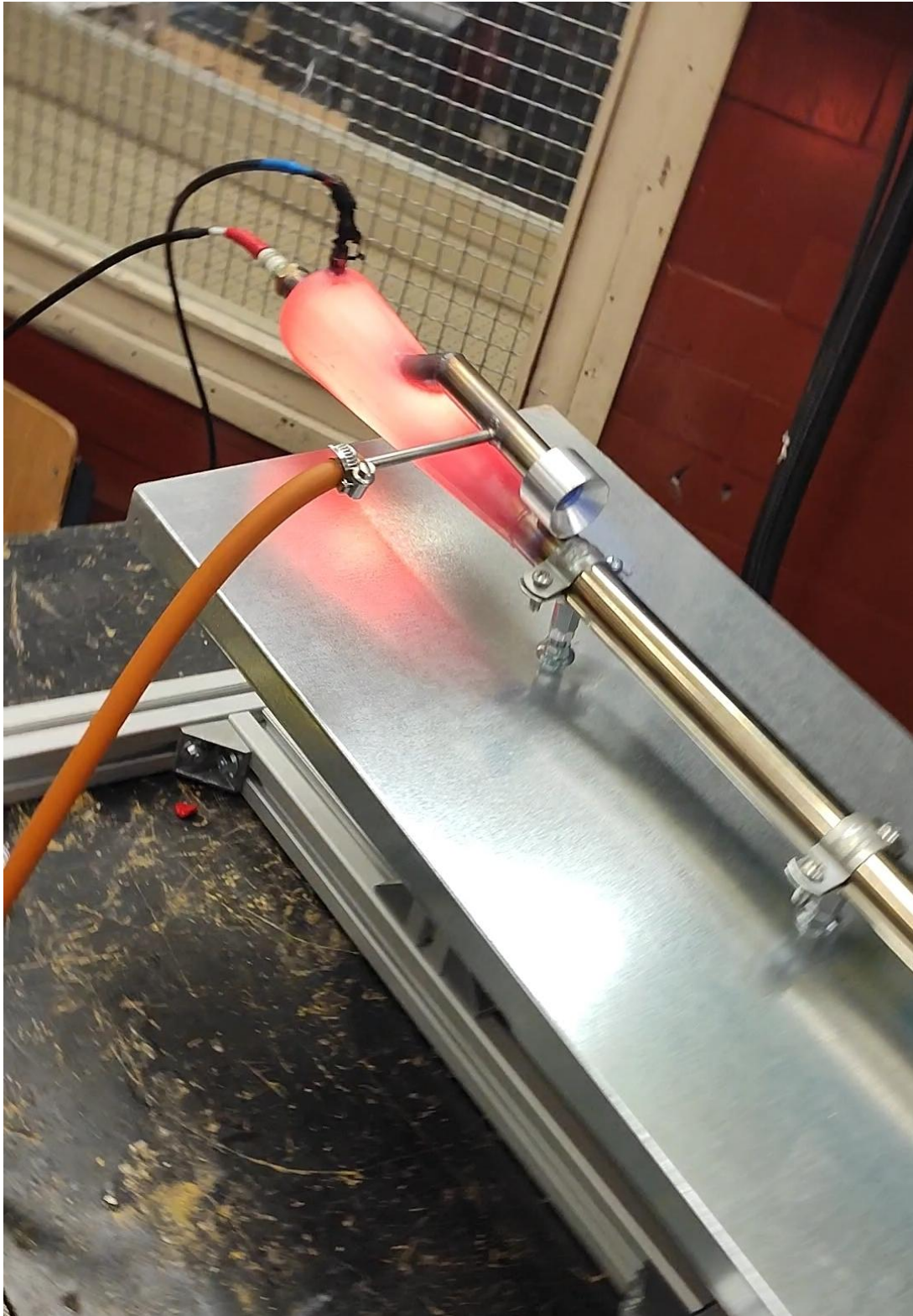
Scalable pattern for the combustion chamber dome - Copyright 2004 Larry Cottrill



*Šoba na testiranem motorju.*



*Zgorevalna komora in sesalni prostor z vidno vžigalno svečko in iglo vbrizgalnega sistema.*



*Delujoč motor.*