

CONSTRUCTION OF A REACTIVE ENGINE INTENDED FOR MEASUREMENT OF THRUST CHARACTERISTICS AND EFFICIENCY OF SELECTED AVIATION FUELS

KONŠTRUKCIA REAKTÍVNEHO MOTORA URČENÉHO NA MERANIE ŤAHOVÝCH CHARAKTERISTÍK A ÚČINNOSTÍ VYBRANÝCH LETECKÝCH POHONNÝCH HMÔT

Matej Sitár
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
matejsitaar@gmail.com

Pavol Pecho
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
Pavol.pecho@fpedas.uniza.sk

Abstract

The content of the research consists in the approach and interpretation of pulsejet engines as simple devices that are able to produce thrust. Relevant information about the principle of operation, the process of manufacturing a pulse engine, together with knowledge about fuels, which are subjected to research focused on the production of thrust, provide the design of a functional valveless pulsejet engine type "Lockwood". The pulsejet engine is designed to measure the thrust characteristics and efficiencies of selected aviation fuels, and its construction is the main goal, which also provides insight into a comprehensive solution to the problem. Experiments focused on fuel research, have become the main motivation for our work, which in addition to theoretical knowledge also captures the factual solution to the problem in its practical part. The work describes a specific procedure for the construction of a pulsejet engine, but also a description of by-products of this process, in the form of a metal stationary base and the implementation of various functional components into the structure. The results of the experiments represent important outputs of the work, which clarify the values of thrust, which the engine produced when propelled by selected fuels and at the same time provide inspiration for the implementation of other similar research.

Keywords

Pulsejet engine, fuel, thrust

1. Úvod

Pulzné motory patria medzi najjednoduchšie zariadenia schopné produkovať ťah. Cieľom našej práce bolo zostrojiť konštrukciu funkčného bezventilového motora typu „Lockwood“, ktorá neobsahuje žiadne pohyblivé časti. Práve jednoduchosť konštrukcie umožňuje aj použitie rozličných druhov palív na jeho pohon. Možnosti, ktoré bezventilový pulzný motor poskytuje, sme využili na realizáciu experimentov zameraných na meranie ťahových charakteristík a účinností vybraných pohonných hmôt. Na zachytenie ťahu, ktorý motor produkoval slúžila konštrukcia kovového stacionárneho podstavca, do ktorej bol implementovaný digitálny silomer, schopný vyobraziť aktuálne hodnoty ťahu pulzného motora. Pri experimentoch sme sa zamerali na použitie pohonných hmôt, akými sú letecký petrolej JET-A1, bioetanol, benzín N95 a nafta. Hlavným prínosom projektu boli, rovnako ako fungujúci prototyp bezventilového pulzného motora, tak aj výsledky realizovaných experimentov v podobe hodnôt ťahu produkovaných týmto motorom počas jeho pohonu zvolenými druhmi pohonných hmôt.

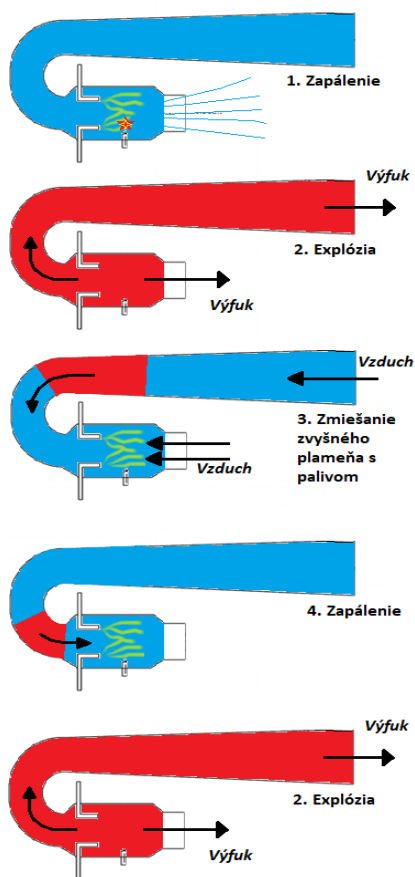
1.1. Princíp fungovania bezventilového pulzného motora

Princíp fungovania bezventilového pulzného motora sa dá výstižne opísať pomocou tretieho Newtonovho zákona akcie a reakcie, ktorý hovorí: „Sily, ktorými na seba navzájom pôsobia dve telesá, sú rovnako veľké a opačného smeru.“ [1] V pulznom

motore je pri jeho prevádzke ťah (reakcia) produkovaný množstvom vzduchu vychádzajúcim z motora pri určitej rýchlosti (akcia). Ťah predstavuje silu, ktorá tlačí motor vpred. Ide teda o rozdiel hybnosti vzduchu vstupujúceho do motora a hybnosti vzduchu, ktorý z motora vystupuje. [2]

Geometrický tvar bezventilových pulzných motorov kompenzuje absenciu ventilov v ich konštrukcii. Dizajn konštrukcie je navrhnutý tak aby umožnil výstup výfukových plynov z rovnako orientovaného vstupného, ako aj výstupného ústrojenstva, ktoré sú v prípade tohto typu pulzného motora jedno zariadenie, slúžiace na vstup aj výstup plynov. Bezventilový pulzný motor je však navrhnutý tak, aby väčšina výfukových plynov vystupovala práve cez výstupné/vstupné ústrojenstvo orientované bližšie ku spaľovacej komore. [3] Obrázok 1 nižšie približuje proces aktívnej činnosti motora. Tento proces začína vstupom vzduchu cez vstupné/výstupné ústrojenstvo. V spaľovacej komore sa vzduch zmieša s palivom rozprášeným prostredníctvom palivových dýz. Následne je táto palivovo-vzduchová zmes zapálená iskrou zo zapalovacej sviečky v spaľovacej komore (1. Zapálenie). Spaľovanie prebieha pri zvyšujúcom sa tlaku a teplote v spaľovacej komore. Tento proces predstavuje expanziu plynov, ktoré následne prechádzajú vstupným aj výstupným ústrojenstvom. (2. Explózia). Výstupná dýza takýchto motorov má spravidla o niečo väčší výstupný prierez ako časť orientovaná bližšie k spaľovacej komore. Takýto rozmer a vzdialenosť od spaľovacej komory

zapríčiňujú, že vo výstupnej časti zostáva zvyšný plameň, zatiaľ čo zo vstupnej časti unikla všetka horiaca zmes. Je teda zrejme, že horiaca a expandujúca zmes sa dostala práve vďaka geometrii motora k výstupu ústrojenstva orientovaného bližšie k spaľovacej komore skôr, ako k výstupu ústrojenstva orientovaného vo väčšej vzdialenosti. Výsledkom tohto procesu je v motore vytvorený podtlak vzhľadom na okolitý tlak vzduchu. Vzniknutý podtlak obracia zvyšný plameň vo výstupnom ústrojenstve, a ten je opätovne nasávaný do spaľovacej komory. Z druhého konca je počas tohto deja nasávaný okolitý vzduch (3. Zmiešanie zvyšného plameňa s palivom). Zvyšný plameň a čerstvý vzduch sa stretávajú v spaľovacej komore (4. Zapálenie), kde pôsobením vzájomného protipohybu spomalia a tak po rozprášení čerstvého paliva vytvoria vhodné podmienky pre následný výbuch (5. Explózia). Tento proces sa opakuje cyklicky a je samo-udržateľný, vzhľadom na to, že pri jeho priebehu nie je potrebné ďalšie zapáľovanie pomocou sviečky. [4]



Obrázok 70: Princíp fungovania bezventilového pulzného motora. Zdroj: Autori.

2. Pohonné hmoty

Pri experimentálnej časti sme sa zamerali na výskum pohonných hmôt, konkrétne leteckého petroleju JET-A1, bioetanolu, benzínu N95 a nafty, ktoré sme skúmali z pohľadu hodnôt ťahu, aké bol pulzný motor pri jeho pohone danými palivami vyprodukovať.

Letecký petrolej JET-A1 je bezfarebná kvapalina s charakteristickým zápachom. Jeho minimálna výhrevnosť má

hodnotu $42,80 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Jeho hustota sa pohybuje v rozmedzí $775 - 840 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Jeho teplota samovznietenia je pri $215 \text{ }^\circ\text{C}$. [5]

Bioetanol je veľmi horľavé vysokooktánové, kvapalné, bezfarebné bio palivo s liehovým zápachom, vyrábané biologickým procesom technológiou alkoholového kvasenia biomasy. Na jeho výrobu sa používajú rastliny s vysokým obsahom škrobu (napr. kukurica), prípadne sacharidov. Bioetanol má teplotu tuhnutia pri $-114 \text{ }^\circ\text{C}$ a je charakteristický teplotou samovznietenia pri $425 \text{ }^\circ\text{C}$ a výhrevnosťou $26,81 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. [6] [7]

Medzi základné charakteristické vlastnosti Benzínu N95 patrí maximálna výhrevnosť, ktorá dosahuje hodnoty $43,125$ až $43,962 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Jeho hustota sa pohybuje v rozmedzí 710 až $760 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Bod kryštalizácie benzínu predstavuje teplota $-60 \text{ }^\circ\text{C}$. [8]

Nafta je kvapalné uhľovodíkové palivo. Jej maximálna výhrevnosť je $41,9 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Hustota nafty sa pohybuje v rozmedzí od 820 až $850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Body kryštalizácie sa rozlišujú v závislosti od toho, či ide o letný druh nafty, ktorý má bod kryštalizácie $-4 \text{ }^\circ\text{C}$, alebo zimnú naftu, ktorá má bod kryštalizácie -22 až $-35 \text{ }^\circ\text{C}$. [8]

3. Proces zhotovenia konštrukcie pulzného motora

Ťah produkovaný motorom pri jeho aktívnej činnosti je vzhľadom na podstatu zamýšľaných experimentov potrebné odmerať. Dôležitou časťou projektu je teda tiež vhodné a bezpečné umiestnenie pulzného motora, ktoré je zabezpečené prostredníctvom stacionárneho kovového podstavca, ktorý umožňuje pohyb motora v axiálnom smere. Digitálny silomer implementovaný do takejto konštrukcie poskytuje údaje o okamžitých hodnotách ťahu produkovaného motorom. Zhotovenú konštrukciu je možné vidieť na Obrázku 2.



Obrázok 71: Konštrukcia kovového stacionárneho podstavca. Zdroj: Autori.

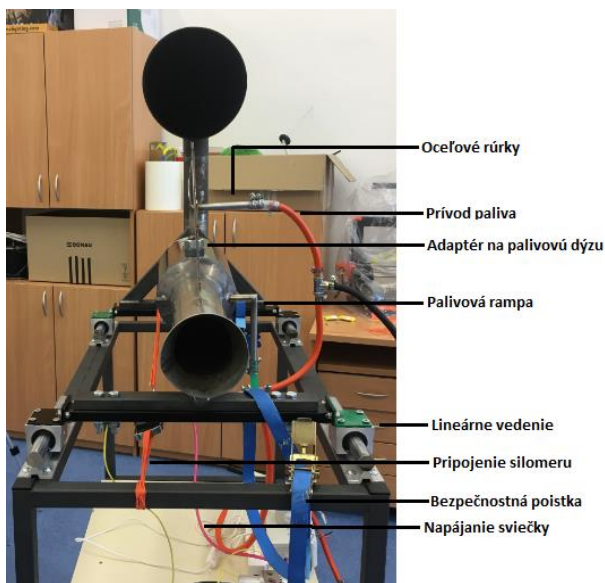
Na základe grafického návrhu bolo ďalej možné vyrezať laserom jednotlivé prvky konštrukcie pulzného motora, ktoré boli priestorovo ekonomicky rozmiestnené na plechu z nehrdzavejúcej ocele Aisi 304 s rozmermi $2 \times 1 \text{ m}$ a hrúbkou $1,5 \text{ mm}$. Materiál plechu determinuje materiál konštrukcie, z ktorého je zhotovená. Po vyrezaní prvkov z plechu bol ich tvar, ktorý definuje samotnú konštrukciu pulzného motora, ďalej prispôbostený ohýbacím tvárniacim procesom – zakružovaním, pri ktorom došlo k stočeniu plechu do valcov, a pri niektorých prvkoch konštrukcie, tiež kužeľovej formy. Ďalej bolo potrebné

vyrezané prvky konštrukcie zvarit. Na zváranie nehrdzavejúcej ocele bola zvolená metóda tavného zvárania TIG. Jedná sa o druh ručného zvárania elektrickým oblúkom, pri použití volfrámovej netaviacej sa elektródy. Prídavný materiál bol pri tomto druhu zvárania pridávaný samostatne, a to ručne zväračom. Prídavným materiálom pri zváraní prvkov konštrukcie bol SA 308L. Výsledok konštrukčného procesu je možné vidieť na Obrázku 3.



Obrázok 72: Konštrukcia bezventilového pulzného motora. Zdroj: Autori.

Na Obrázku 4 sú vyobrazené základné komponenty konštrukcie motora, ktoré zabezpečujú jeho správnu funkčnosť.



Obrázok 73: Komponenty pulzného motora. Zdroj: Autori.

4. Experimentálna fáza

Experimentálna fáza projektu zahŕňala zaznamenávanie ťahovej charakteristiky vybraných druhov pohonných hmôt v dvoch sériách meraní. Rozdiel medzi týmito sériami tvoril spôsob uchytenia silomeru a taktiež rozdiel v prietokovom množstve skúmanej pohonnej hmoty. Ďalej sme sa venovali analýze intenzity horenia skúmaných pohonných hmôt a taktiež analýze rozloženia tepla na konštrukcii pulzného motora. Po implementácii dvoch druhov senzorov bol zachytený priebeh hodnôt ťahu a teploty výfukových plynov v závislosti na čase.

4.1. Prvá séria meraní

V prvej sérii meraní bolo palivové čerpadlo nastavené na prietok 0,3031 l/10s. Silomer bol v meracej polohe uviazaný na lanách, ktoré mali dĺžku približne 90 cm a silomer fixovali pod uhlom 6°. Polohu silomeru zachytáva Obrázok 5. Na samotný štart pulzného motora bol použitý propán-bután, dopravený do spaľovacej komory pulzného motora prostredníctvom samostatnej palivovej rampy, zhotovenej na tento účel. Po úspešnom štarte bolo potrebné odstaviť prívod propán-butánu a súbežne s týmto úkonom zapnúť palivové čerpadlo, ktoré dopravilo skúmané palivo do spaľovacej komory. Týmto spôsobom sme sa vyhli ovplyvneniu výsledkov hodnôt ťahu štartovacím plynom. Za úspešné merania, ktorých výsledky sú uvedené v Tabuľke 1 sme považovali tri merania, pri ktorých bol motor v aktívnej činnosti po dobu dlhšiu ako približne 5 sekúnd, nakoľko sme pozorovali ustálenie ťahu v priemere približne do 5 sekúnd. Po každom z meraní bolo potrebné pulzný motor následne chadiť po dobu minimálne 5 minút.



Obrázok 74: Poloha silomeru – Prvá séria. Zdroj: Autori.

Prvým skúmaným palivom, bol v prvej sérii meraní letecký petrolej JET-A1. Prebehli tri úspešné merania. Priemerná hodnota ťahu z troch meraní bola 19,9 Kg (195,15 N), pri priemernej odchýlke meraní v hodnote 0,55 %. Na základe videozáznamu sme pozorovali pomerne nízku stabilitu spaľovania. Prejavila sa nepravidelnosťou chodu motora a nestálosťou plameňov objavujúcich sa vo výstupnom ústrojenstve. Plameň bledomodrej až bielej farby sa objavoval na výstupe z motora, ktorý je orientovaný bližšie k spaľovacej komore.

Ďalším palivom, ktoré bolo podrobené skúmaniu, bol bioetanol. Podobne ako pri predchádzajúcich meraniach, boli tieto taktiež úspešné na prvý pokus. Priemerná hodnota ťahu produkovaného pulzným motorom bola, pri jeho pohone na bioetanol 16,92 Kg (165,93 N), čo je približne o 14,97 % menej ako letecký petrolej JET-A1. Nižší ťah pulzného motora pri pohone na bioetanol, bol očakávaný, nakoľko jeho výhrevnosť má podstatne nižšiu hodnotu, v porovnaní s ostatnými skúmanými palivami. Pulzný motor pri pohone na bioetanol vykazoval najvyššiu stabilitu spomedzi všetkých skúmaných palív. Motor mal neprerušovaný chod, čo potvrdzuje aj najmenšia priemerná odchýlka pri meraniach uvedená v Tabuľke 1. Tá bola v porovnaní s leteckým petrolejom menšia o 0,35 %. Šírenie plameňov bolo počas aktívnej činnosti motora rovnomerné, pričom nemenili ani svoju farbu, či intenzitu, čo opäť potvrdzuje vysokú stabilitu horenia bioetanolu.

Pri experimentoch sme sa ďalej venovali benzínu N95. Úspešnosť zrealizovaných meraní bola opäť stopercentná.

Motor produkoval priemernú hodnotu ťahu pri pohone na benzín 19,76 Kg (193,78 N). Priemerná odchýlka predstavovala 1,28 %, čo mohlo iba naznačovať väčšiu nestabilitu pohonnej hmoty. Na kamerovom zázname je však možné pozorovať pomerne nerovnomerné šírenie vystupujúcich plameňov z oboch častí motora. Tiež bolo možné pozorovať prerušené spaľovanie a jeho následné samovoľné obnovenie po približne 1 sekunde. Farba plameňov bola podobná ako pri ostatných skúmaných palivách.

Pri skúmaní nafty sa nám nedopatrením nepodarilo zhotoviť kamerový záznam, no napriek tomu boli všetky tri pokusy meraní opäť úspešné. Nafta bola charakteristická pomerne dobrou stabilitou horenia. Chod motora nebol však dokonale plynulý, čo potvrdzuje aj tretia najväčšia priemerná hodnota odchýlky medzi jednotlivými meraniami spomedzi skúmaných pohonných hmôt, ktorá predstavuje 0,39 %. Po spaľovaní nafty v pulznom motore, bola prítomná výrazná dymivosť, a to najmä po odstavení motora. Dym vystupujúci z motora mal bielu farbu, čo naznačovalo nedokonalé spaľovanie pohonnej hmoty. Dôvodom mohla byť nezhorená nafta, ktorá ostala po odstavení čerpadla (ktorým sa zastavoval chod pulzného motora) v spaľovacej komore a výstupnom ústrojenstve.

Tabuľka 7: Výsledné hodnoty ťahu vybraných pohonných hmôt – Prvá séria meraní

DPH	Motorom vyprodukovaný ťah [kg]				
	M 1	M 2	M 3	PH	PO [%]
Petrolej JET-A1	19,84	19,92	19,93	19,90	0,55
Bioetanol	16,88	16,93	16,97	16,92	0,2
Benzín N95	19,38	20,10	19,80	19,76	1,28
Nafta	19,56	19,68	19,79	19,68	0,39
CELKOM					0,61

DPH – druh pohonnej hmoty

PH – priemerná hodnota

PO – priemerná odchýlka

4.2. Druhá séria meraní

Pri druhej sérii meraní bolo palivové čerpadlo nastavené na konštantný prietok 0,2626 l/10s. Hodnota prietoku pohonnej hmoty bola teda znížená o 13,36 %. Poloha silomeru bola upravená do vodorovnej meracej polohy, pričom bola tiež eliminovaná dĺžka lán.

Prvým skúmaným palivom, podrobeným trom meraniam, bol bioetanol. Pulzný motor vyznačoval opäť stabilným a neprerušovaným chodom. Tak ako tomu bolo pri všetkých skúmaných pohonných hmotách, sme aj pri bioetanle zaznamenali pokles priemernej hodnoty ťahu voči prvej sérii meraní. Plamene sa v druhej sérii vyznačovali menšou intenzitou, no farbu mali približne rovnakú. Ich stabilita však ostáva na najvyššej úrovni spomedzi skúmaných palív.

Druhým skúmaným palivom bol letecký petrolej JET-A1. Pri meraniach sme zaznamenali nižšiu priemernú hodnotu ťahu, a to o 4,92 %. Pri pozorovaní plameňov sme zaznamenali určité zmeny. Miernu zmenu farby plameňov, ktorá naznačuje o niečo

nižšiu teplotu spaľovania, je možné prisúdiť menšiemu spaľovanému objemu paliva v porovnaní s prvou sériou. Môžeme teda konštatovať, že v dôsledku zníženého prietokového množstva, bola intenzita horenia o niečo menšia, ako pri prvej sérii. Zaznamenali sme však vyššiu stabilitu horenia leteckého petroleja JET-A1.

Tretou skúmanou pohonnou hmotou bola nafta. Motor nebol pri zníženom prietokovom množstve schopný plynulého a stabilného chodu po dobu dlhšiu ako 5 sekúnd. Farba plameňov opäť aj pri nafte naznačovala zníženú teplotu horenia. Pri plameňoch bolo ďalej možné pozorovať ich prerušovaný a nerovnomerný výskyt a slabú intenzitu. Neschopnosť aktívneho chodu motora po dobu dlhšiu ako 5 sekúnd, mohla byť pravdepodobne spôsobená možnou zníženou teplotou spaľovania spolu s nižším prietokovým množstvom a teda aj pravdepodobným nižším tlakom pri spaľovaní, ktoré mali za následok predčasné a samovoľné zahášanie motora. Pulzný motor produkoval pri zníženom prietokovom množstve, v krátkych okamihoch, priemerný ťah 19,85 Kg (194,66 N), čo predstavuje o 0,9 % väčšiu hodnotu ako pri prvej sérii. Relevantnosť takýchto výsledkov však pokladáme za nedostatočnú. Biely dym šíriaci sa z výstupného ústrojenstva bolo možné pozorovať aj pri tejto sérii meraní, avšak jeho intenzita bola miernejšia.

Posledným skúmaným palivom druhej série experimentov bol benzín N95. Pri zníženom prietokovom množstve sme zaznamenali pokles priemernej hodnoty ťahu voči prvej sérii experimentov o 9,72 %. Výskyt plameňov, sa vo vzdialenejšom výstupnom ústrojenstve od spaľovacej komory, zmiernil. Stabilita horenia bola však výrazne lepšia, chod motora bol neprerušovaný a plynulý.

Tabuľka 8: Výsledné hodnoty ťahu vybraných pohonných hmôt – Prvá séria meraní

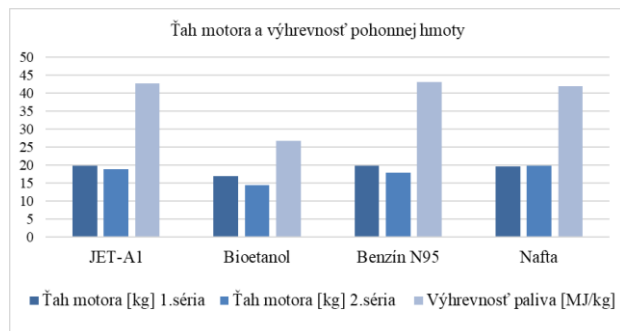
DPH	Motorom vyprodukovaný ťah [kg]				
	M 1	M 2	M 3	PH	PO [%]
Bioetanol	14,42	14,45	14,48	14,45	0,21
Petrolej JET-A1	18,80	18,95	19,01	18,92	0,42
Nafta	19,91	19,80	19,85	19,85	0,3
Benzín N95	17,98	17,80	17,75	17,84	0,5
CELKOM					0,36

DPH – druh pohonnej hmoty

PH – priemerná hodnota

PO – priemerná odchýlka

4.3. Porovnanie výsledkov meraní ťahu z dvoch sérií



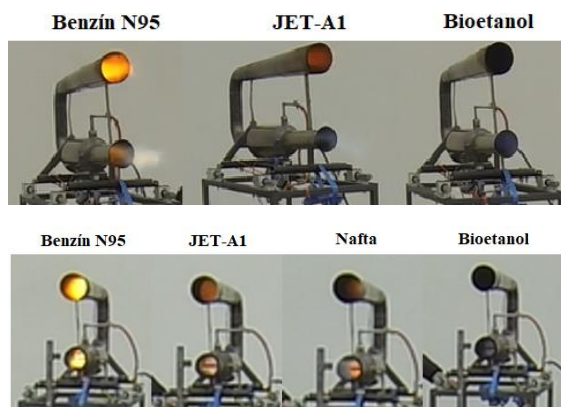
Graf 4: Ťah pulzného motora pri rôznom prietokovom množstve v súvislosti s výhrevnosťou

Graf 1 graficky znázorňuje súvislosť vyprodukovaného ťahu s nastavením prietokového množstva. Je možné konštatovať, že pulzný motor produkoval nižší ťah v prípadoch druhej série, kedy bolo palivové čerpadlo nastavené na menší prietok. A to v prípade benzínu N95 leteckého petroleju JET-A1 a bioetanolu. Pri naftě sme však zaznamenali pri menšom prietokovom množstve mierne zvýšený ťah, avšak takýto výsledok nepokladáme za dostatočne relevantný.

Pulzný motor produkoval najnižší ťah pri pohone na bioetanol. Na Grafe 1 je možné pozorovať, že bioetanol sa vyznačuje spomedzi všetkých skúmaných pohonných hmôt, najnižšou výhrevnosťou. Naopak, benzin N95 a letecký petrolej majú podobné hodnoty výhrevnosti, ktoré sú zároveň vyššie ako pri bioetanole. Pulzný motor pri pohone tými tromi palivami vyprodukoval vyššie hodnoty ťahu. Môžeme teda konštatovať, že čím vyššia je výhrevnosť skúmanej pohonnej hmoty, tým väčšie hodnoty ťahu môžeme očakávať pri pohone motora touto pohonnou hmotou.

4.4. Intenzita horenia skúmaných pohonných hmôt

Vďaka kamerovému záznamu, zhotovenému pri experimentoch, je možné pohonné hmoty medzi sebou porovnať aj z pohľadu intenzity ich horenia v pulznom motore.



Obrázok 75: Intenzita horenia. Zdroj: Autori.

Prvá séria (na Obrázku 7 vyššie) je charakteristická vyšším prietokovým množstvom a teda aj vyššou intenzitou horenia pohonných hmôt. Najväčšou intenzitou horenia sa v oboch sériách vyznačoval benzin N95. Ako jeden z dôvodov je možné uviesť, že táto pohonná hmota má najväčšiu hodnotu

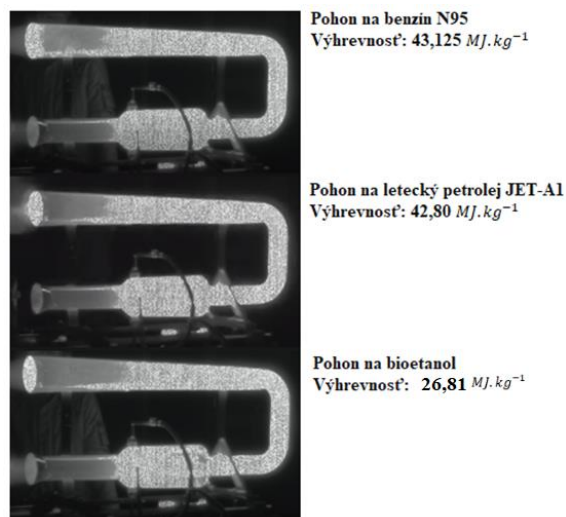
výhrevnosti spomedzi skúmaných pohonných hmôt. V rovnakej súvislosti môžeme konštatovať, že letecký petrolej má druhú najväčšiu intenzitu horenia, nafta tretiu a bioetanol štvrtú.

4.5. Analýza rozloženia tepla na konštrukcii pulzného motora

Pri druhej sérii meraní bol zhotovený aj termovízny kamerový záznam. Pri skúmaní týchto fotografií je možné pozorovať, že teplo sa vo všetkých prípadoch šírilo od prednej časti spaľovacej komory, v dôsledku spaľovania pohonných hmôt v tomto mieste. Teplo sa ďalej šírilo do zadnej časti pulzného motora. Je tiež možné pozorovať, že plocha pôsobenia tepla zasahovala, vo veľkej miere, do výstupného ústrojenstva vzdialenejšieho od spaľovacej komory.

Pri sledovaní termovízneho kamerového záznamu je ďalej možné pozorovať šírenie tepla na konštrukcii, v súvislosti s princípom fungovania bezventilového pulzného motora typu „Lockwood“. Najintenzívnejšie zahriate miesta sú totiž také, v ktorých sa horiace plyny pri procese cyklického chodu motora vyskytujú s najvyššou frekvenciou.

Pri analýze rozloženia tepla na konštrukcii motora je možné taktiež pozorovať súvislosť intenzity zahrievania konštrukcie s tepelnou výhrevnosťou jednotlivých skúmaných pohonných hmôt. Logickú súvislosť medzi tepelnou výhrevnosťou pohonnej hmoty a zahrievaním konštrukcie motora je možné pozorovať na Obrázku 8. Na tomto obrázku sa nenachádza vyobrazený pulzný motor pri pohone naftou, nakoľko jeho termovízna fotografia nie je relevantná, vzhľadom na jeho krátky čas chodu pri pohone na túto pohonnú hmotu.

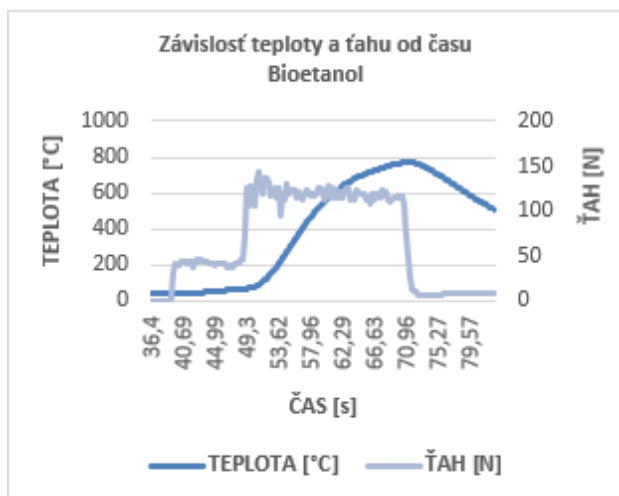


Obrázok 76: Termovízne zábery. Zdroj: Autori.

4.6. Implementácia senzorov

Na nasledujúcom Grafe 2 je možné pozorovať priebeh hodnôt ťahu a teploty výfukových plynov pri pohone motora na bioetanol. Graf 2 vznikol na základe nameraných hodnôt prostredníctvom tenzometrického senzora a termočlánku. Podobné grafy boli zhotovené aj pre ostatné skúmané palivá,

avšak vzhľadom na rozsah určený pre tento príspevok, je uvedený len vzorový príklad.



Graf 5: Závislosť teploty výfukových plynov a ťahu na čase

5. Záver

Cieľom experimentálnej časti projektu bolo v prvom kroku overiť, či je zostrojený pulzný motor schopný produkovať ťah pri pohone viacerými druhmi pohonných hmôt. Pri experimentoch boli použité palivá bioetanol, letecký petrolej JET-A1, benzín N95 a nafta. Pulzný motor produkoval ťah pri všetkých skúmaných pohonných hmotách, pričom bolo možné, pri ich skúmaní, pozorovať určité hodnotové odchýlky ťahu, no tiež stability, či intenzity horenia. Každá, z dvoch sérií meraní bola charakteristická rozdielnym prietokovým množstvom skúmanej pohonnej hmoty.

Pri prvej sérii meraní, bolo palivové čerpadlo nastavené na jeho maximálny výkon, čo spôsobovalo, že motor produkoval vyššie hodnoty ťahu a vykazoval vyššiu intenzitu horenia v porovnaní s druhou sériou. Táto séria priniesla výsledky v podobe hodnôt ťahu pulzného motora, pričom najvyššiu hodnotu ťahu sme zaznamenali pri pohone motora na letecký petrolej JET-A1. Stabilita horenia skúmaných pohonných hmôt dosahovala len nedokonalú úroveň, vynímajúc bioetanol, pri ktorom motor vykazoval značnú stabilitu spaľovania v oboch sériách.

V druhej sérii meraní bolo palivové čerpadlo nastavené na znížený výkon, ktorý bol v porovnaní s prvou sériou menší o 13,36 %. Výsledky meraní naznačujú, že motor dosiahol najvyššiu hodnotu vyprodukovaného ťahu pri jeho pohone na naftu. Avšak pri naftu sme taktiež zaznamenali výraznú nestabilitu horenia pri zníženom prietokovom množstve, a tak sme nepokladali tieto výsledky za dostatočne relevantné. Vysokú stabilitu horenia a druhú najvyššiu hodnotu ťahu sme zaznamenali pre letecký petrolej JET-A1. Obe sérii meraní nám priniesli poznatky o súvislosti výhrevnosti skúmaných pohonných hmôt a nameranými hodnotami ťahu. Na základe kamerového záznamu zhotoveného pri oboch sériách meraní, bol tiež v projekte zhotovený rozbor intenzity horenia skúmaných pohonných hmôt, pri ktorom bola opäť naznačená súvislosť medzi intenzitou horenia a výhrevnosťou skúmaných pohonných hmôt. V druhej sérii meraní, sme sa zamerali aj na analýzu rozloženia tepla na konštrukcii pulzného motora pri pohone jednotlivými skúmanými pohonnými hmotami. Analýza

priniesla poznatky o smere šírenia tepla, no na základe tejto analýzy bolo tiež možné pozorovať súvislosť zahrievania konštrukcie s princípom fungovania bezventilového pulzného motora a výraznú súvislosť šírenia tepla s výhrevnosťou skúmanej pohonnej hmoty. Implementácia dvoch senzorov do meracej sústavy motora, sprostredkovala pohľad na priebeh hodnôt ťahu pulzného motora a teploty jeho výfukových plynov, pri jeho pohone na rôzne druhy skúmaných pohonných hmôt. Sensory zároveň prispievajú k jednoduchosti meracieho procesu a prinášajú možnosť namerané dáta ukladať do pamätí elektronických zariadení.

Referencie

- [1] KŘÍŽ, J. 2004. *Lietadlové pohonné jednotky*. Žilina: Vydavateľstvo ŽU, 2004. 264 s. ISBN 80-8070-342-6.
- [2] KUSSIOR, Z. 2002. *Letecké motory*. In *Letecké motory*. [Online] 2002 [cit. 2020-08-15]. Dostupné na internete: <<http://www.leteckemotory.cz/teorie/teorie-01.php>.>
- [3] DIXIT, M. A. – ABHISHEK, S. G. – KUMAR, G. S. – YADAV, G. S. August 2012. *Experimental Studies on a Valveless Twin Pulsejet Engine*. In *Research Gate*. [Online] 2012. [cit. 2020-10-09]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/320311248_Experimental_Studies_on_a_Twin_valveless_Pulsejet_Engine.>
- [4] MELO, A. – BROJÓ, F. November 2019. *Influence of Fuel on a Valveless Pulsejet Engine Performance and Pollutant Emissions*. In *Research Gate*. [Online] 2019. [cit. 2020-10-15]. Dostupné na internete: <https://www.researchgate.net/publication/338732689_Influence_of_Fuel_on_a_Valveless_Pulsejet_Engine_Performance_and_Pollutant_Emissions.>
- [5] *Letecký petrolej JET A1*. 19. Január 2017. Slovaft [Online]. 2017. [cit. 2020-11-16]. Dostupné na internete: <<https://slovaft.sk/sk/velkoobchod/vyrobky/pohonne-hmoty/letecky-petrolej/>.>
- [6] *Bioetanol*. Enviengroup. [Online] [cit. 2020-15-2] Dostupné na internete: <<https://www.enviengroup.eu/sk/produkty/bioetanol>>
- [7] *Bioetanol – Karta bezpečnostných údajov*. 1. December 2010. Enviral
- [8] ADAMEC, J. – HANUS, D. – KOCÁB, J. – MARŠÁLEK, J. – TŘETINA, K. 2006. *Pohonná jednotka*. Brno: Akademické nakladateľstvo CERM, 2006. ISBN 80-7204-477-X