

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojírenství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh pulzačního motoru

Autor: **Rudolf Netík**
Vedoucí práce: **Ing. Roman GÁŠPÁR**

Akademický rok 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Rudolf NETÍK**
Osobní číslo: **S10B0136P**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**
Název tématu: **Návrh pulzačního motoru**
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Máte za úkol:

1. Vypracovat přehled technologií (současných i minulých) pulzačního motoru.
2. Vypracovat přehled použitelných paliv pro pulzační motor a navrhnout vhodné palivo.
3. Výpočítat termodynamický cyklus motoru, který zohlední použité palivo (uvažovat reálné nevratné změny).
4. Vypracovat návrh konstrukce motoru.
5. Vypracovat výkresovou dokumentaci pro výrobu motoru - sestava, detaily klíčových částí.


Rozsah grafických prací: **výkresová dokumentace, sestava, detaily klíčových částí**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- **Mattingly Jack. D.: Elements of propulsion, AIAA - 2006, ISBN 1563477793**
- **Tharratt C. E.: The Propulsive Duct. Article-Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 1966**
- **Wojcicky S.: Silniki (Pulsacyjne, Strumieniowe, Rakietowe), Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, 1962**
- **CA Institute of Technology, Pasadena: JET PROPULSION**
- **Dudley E. Smith: The synchronous injection ignition valveless pulsejet, The University of Texas at Arlington, 1987**
- **Westberd F.: Inside the pulsejet engine, Privat study, 2000**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Gášpár**
Katedra energetických strojů a zařízení
Konzultant bakalářské práce: **Prof. Ing. Jiří Linhart, CSc.**
Katedra energetických strojů a zařízení
Datum zadání bakalářské práce: **5. listopadu 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. června 2013**


Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Jiří Polanský, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 1. listopadu 2012

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a parametrů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:.....

.....

podpis autora

Autorská práva

Podle zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Netík	Jméno Rudolf		
STUDIJNÍ OBOR	Stavba energetických strojů a zařízení			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Gášpár	Jméno Roman		
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKE			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ		Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Návrh pulzačního motoru			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2013
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	22	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	22
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Pulzační motory sehrály v historii velkou roli před nástupem proudových motorů. Jejich fyzikální podstata je velice zajímavá, proto i mým cílem bylo navrhnout funkční pulzační motor požadovaných vlastností. Dílčími body práce je vypracování přehledu technologií a použití paliv, vypočítání termodynamického cyklu motoru, výkresová dokumentace navrženého pulzačního motoru.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p style="text-align: center;">charakteristický zvuk, nízká účinnost, ventilový pulzační motor, bezventilový pulzační motor, jednoduchost</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Netík	Name Rudolf	
FIELD OF STUDY	Design of Power Machines and Equipment		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Gášpár.	Name Roman	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of pulse jet engine		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power system Engineering	SUBMITTED IN	2013
----------------	---------------------------	-------------------	--------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	62	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	22
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	A pulse jet engine was very important step in history of jet engines. The pulse jet has interesting physical function. Therefore the aim of my report is to design functional pulse jet engines. The body of this report is creating overview of technologies and fuel use. Then thermodynamic cycle of the pulse jet engine is calculated. The last step was to create drawings pulse jet engine.
KEY WORDS	the Argus, propulsion duct, Humphrey cycle, reed valve, strange noise

Obsah

1	Úvod.....	9
1.1	Historie.....	9
1.2	Použití.....	11
2	Pulzační motor	11
2.1	Ventilový pulzační motor.....	12
2.1.1	Konstrukce ventilových pulzačních motorů.....	12
2.2	Bezventilový pulzační motor	16
2.2.1	Konstrukce bezventilových pulzačních motorů.....	18
3	Popis funkce.....	22
3.1	Kadenacyho effect.....	22
3.2	Sání.....	22
3.3	Expanze.....	22
3.4	Výfuk.....	23
3.5	Zapálení nového cyklu	23
4	Termomechanika.....	24
4.1	Maximální tlak v pulzačním motoru	25
4.2	Sání.....	26
4.3	Termodynamický rozbor	28
5	Popis jednotlivých dílů.....	31
5.1	Vstup vzduchu.....	31
5.2	Jednosměrný ventil pro pulzační motory	32
5.2.1	Listový ventil.....	32
5.2.2	Mřížový ventil	33
5.2.3	Ventil pro dvoutaktní motory.....	34
5.3	Zapalovací systém	35
5.4	Tělo motoru.....	36
5.5	Vstřikovací zařízení.....	38
5.5.1	Automatické sání paliva	38
5.5.2	Přímé vstřikování	39
5.5.3	Časované vstřikování	40
6	Přehled použitých paliv pro pulzační motory	41
6.1	Benzín.....	41
6.2	Propan-butan (LPG)	41
6.3	Butan	42
6.4	Metanol.....	42
7	Závěr	42
8	Publikace.....	43

Přílohy:

Příloha č. 1: Výkresová dokumentace navrženého pulzačního motoru

Příloha č. 2: Výkresy a popis pulzačního motoru B-10

Příloha č. 3: Výkresová dokumentace Braunerovo motoru

Příloha č. 4: Popis motoru FWE

Příloha č. 5: Popis motoru Chinese OS

1 Úvod

Pulzační motory sehrály v historii velkou roli. Jejich jednoduchá konstrukce byla častá příčina pro jejich výzkum a snaha je využít. Proto i mým cílem bylo vymyslet pulzační motor požadovaných rozměrů. Nezbytnou součástí této práce je seznámit čtenáře s nejrůznějšími typy pulzačních motorů a porovnání jejich výhod a nevýhod. Dále je čtenář seznámen s jednotlivými díly pulzačního motoru a jejich popisem.

Důležitý parametr, který byl zadán je statický tah motoru 100N. Ostatní rozměry budou navrženy na základě zadaného tahu.

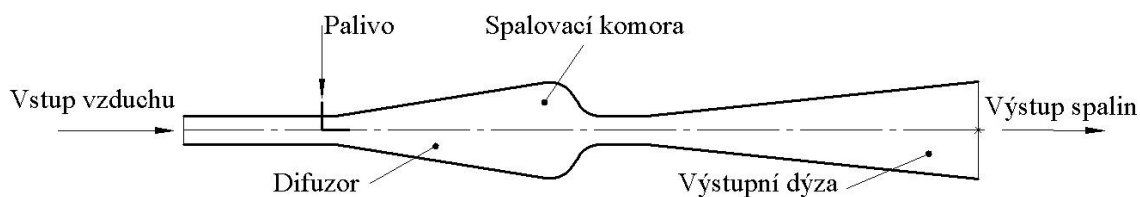
Motor nebude navrhován pro letecké účely. Navržený motor bude sloužit pro měření termomechanických veličin, které nám dopomůžou lépe pochopit jeho funkci a jeho další možnosti použití. Pulzační motor bude vyroben z nerezavějící oceli vhodného typu. Výpočty pulzačního motoru jsou počítány s ideálním plynem.

Součástí práce jsou podrobná výkresová dokumentace navrženého pulzačního motoru.

1.1 Historie

První zmínka o pulzačním motoru je z roku 1906 spojená se jménem ruského inženýra V. V. Karavodina. Karavodin experimentoval s pulzačním motorem. Navrhl takové rozměry motoru, při kterých dosahoval stabilní frekvence. Karavodin využíval rovný motor s konstantním průměrem. V roce 1907 si tento vynález nechal patentovat. Motor pracoval s vysokou výstupní rychlostí a s ustálenými cykly. Jako palivo použil kapalný uhlovodík (hydrocarbon).

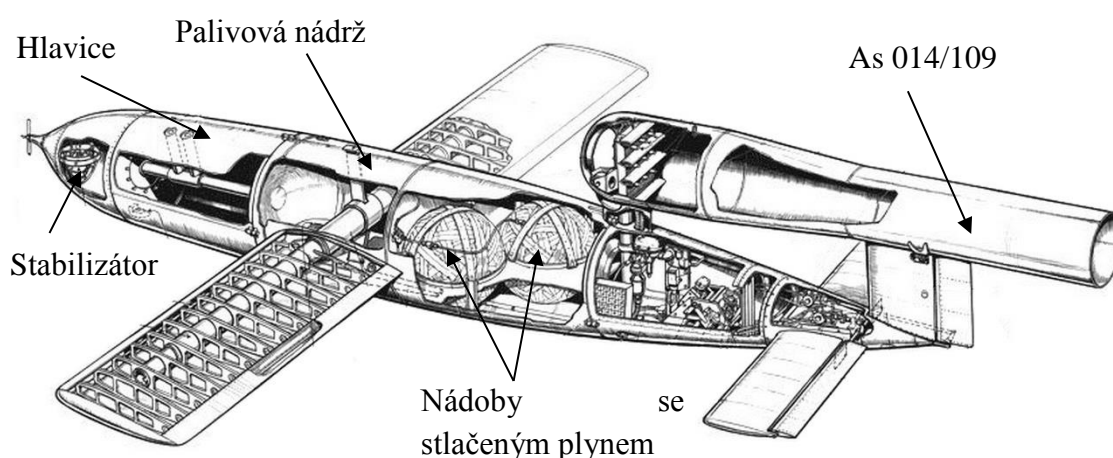
Dalším pokusem o pulzační motor byl o rok později první funkční bezventilový pulzační motor Francouze Georgese Marconnetta. Marconnetův motor měl specifický tvar (obr. 1). Difuzor a výstupní dýza mají rozšiřující se kónický tvar.



Obr. 1 Marconnetův pulzační motor

Německý inženýr Paul Schmidt úpravou Marconnetova motoru zvýšil jeho účinnost. Docílil toho především tím, že na vstup pulzačního motoru dal jednosměrný ventil. Vynalezl tak proslavený typ ventilového pulzačního motoru, který byl dlouhá léta využíván v německé armádě.

Bezventilové pulzační motory vyvíjela ve stejnou dobu německá společnost The Argus Engines. Inženýr Paul Schmidt spolupracoval s touto firmou na výrobě ventilových pulzačních motorů, které nesou název As 109-014. Pulzační motor As 109-014 byl vyhodnocen jako nejlepší z hlediska bilance cena-výkon. Tvar ventilového pulzačního motoru při srovnání s proudovými motory byl velice jednoduchý. Náklady na výrobu byly minimální, avšak výkon byl srovnatelný s proudovými motory. Na obrázku 2 je zobrazená německá bomba Fi-103 známá též pod názvem V-1. K zajištění pohonu byl použit právě pulzační motor As 014. V literatuře je často uvedeno, že Argus potřeboval pro start rychlost 240km/h. Tento předpoklad je však chybný, motor se dokázal spustit bez nutnosti vysoké rychlosti bomby. Bylo nutno pro uvedení bomby do pohybu používat odpalovací rampy, které urychlily bombu až na 320 km/h. Další možností uvedení bomby do pohybu bylo její shoení z letišho letadla. Specifikace bomby V-1 jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.



Obr. 2 Německá bomba F1-103 (V-1)

Specifikace bomby V-1	
Motor	As 109-014
Tah (N)	2700
Váha při startu (kg)	2150
Rychlost (km/h)	645
Rozpětí křidel (m)	5,3

Tab. 1 Specifikace bomby Fi-103 (V-1)

První odpal této bezpilotní bomby byl v roce 1942. Bomba byla používána ve 2. světové válce, kdy jí nacisté použili při útoku na Anglii. Na Londýn bylo shoené přes 10 000 bomb V-1. Na jiná důležitá místa bylo shoené kolem 32 000 bomb V-1.

Pulzační motor při letu bomby vydával „bzučivý“ zvuk. Angličané jí proto začali říkat „Buzz-bomb“. Po válce byla firma The Argus zabavena Americkou a Sovětskou armádou. Většina zabavených věcí byla rozebrána a prozkoumána vědci z NACA.



Obr. 3 Co. XH-26 Jet Jeep

Pulzační motory se také využívaly k pohonu helikoptér, tam byly umístěny na koncích nosných rotorů. V roce 1952 americká armáda sestrojila průzkumnou helikoptéru poháněnou pulzačním motorem. Helikoptéra nese název Co. XH-26 Jet Jeep. Jedná se o jednočlennou helikoptéru. Výhodou pulzačních motorů proti turbínovým je, že nevzniká na trupu vrtulníku krouticí moment. U běžných helikoptér je turbínový motor přidělán nad kabinou pilota. Při chodu turbínového motoru vzniká moment, který má tendenci otáčet s kabinou pilota. Na helikoptéře s pulzačním motorem krouticí moment nevzniká. Helikoptér bylo vyrobeno pouze 5 prototypů. Další výroba byla zamítnuta z důvodů velké hlučnosti a nízké účinnosti motoru.

Pulzační motor vykazoval celou řadou nevýhod. Největší z nich byla nízká životnost vibrujících částí ventilů v přední části motoru. Dále to byla spotřeba paliva a velice hlučný chod motoru. Proto se pulzační motory nerozšířily a byly nahrazeny proudovými, které se vyznačují větší spolehlivostí i účinností.

1.2 Použití

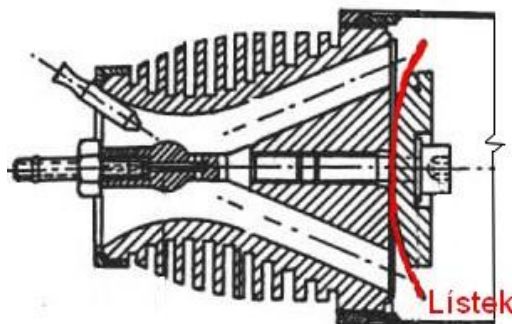
Využití pulzačního motoru je v dnešní době velmi řídké. Motor má totiž velmi nízkou účinnost a je velmi hlučný. Jediné uplatnění tohoto motoru je jako pohon dálkově řízených modelů, kde je jejich výhodou jednoduchost a nízká cena při zachování stejných parametrů jako u proudových motorů. Motor je velmi často sestavován amatérskými nadšenci, kteří si vyrábějí pulzační motor v dílnách a vyrábějí z nich nejrůznější dopravní prostředky.

2 Pulzační motor

Pulzační motor je jeden z nejjednodušších a nejlehčích typů reaktivních (tryskových) motorů. U většiny reaktivních motorů se palivo spaluje kontinuálně. U pulzačního motoru je palivo spalováno v pravidelných intervalech, díky nimž motor vydává charakteristický zvuk. Frekvence motoru závisí na jeho délce. Pro malé pulzační motory může frekvence dosahovat až 250 pulzací za sekundu, pro velké motory jako třeba Argus 103 frekvence je pouze 45 pulzací za sekundu. Práci pulzačního motoru lze zjednodušeně popsat Hamphreyovým oběhem. Ideální oběh je založen na adiabatickém stlačení, izochorické explozi a adiabatické expanzi plynu. Při práci motoru se jedná o fáze sání směsi vzduchu a paliva, expanze a výfuk.

Obecná konstrukce motoru je velice jednoduchá. Motor se skládá ze sací komory, který podporuje nárůst tlaku, z ventilu, spalovací komory a výstupní dýzy. U bezventilového typu je

ventil nahrazen speciálním tvarem motoru. U ventilového typu je jediná pohyblivá součást právě lístek ve ventilu, který zabráňuje spalínám zpětnému proudění do sací části.



Obr. 4 Sání s ventilem na motoru Alpha A.-S. Nidau

Jsou rozlišovány dva hlavní typy pulzačních motorů. V anglickém jazyce jsou označovány valved a valveless. Dále v této práci užívám pro lepší srozumitelnost pojmy ventilový a bezventilový typ, které jsem odvodil z funkce motoru. Oba typy využívají stejný cyklus.

2.1 Ventilový pulzační motor

Motor se skládá z tvarované sací komory, ventilu, spalovací komory a výstupní dýzy. Motor využívá vstupní ventil, jehož hlavním účelem je zabránit zapálené směsi uniknout vstupem motoru. Nejčastěji se používají dva druhy ventilů. Lístkový (pental valve) a mřížový ventil (grid valve).

Při odchodu expandovaných spalín se ventil vlivem podtlaku ve spalovací komoře otevře a umožní nasátí vzduchu do spalovací komory. Při nasávání vzduchu sebou proud vzduchu nasaje palivo, které může být i vstříkováno před ventilem. Další možnost je vstříkování paliva přímo do spalovací komory. Při explozi se ventil uzavře, čímž dojde k odchodu horkých spalín pouze výfukem.

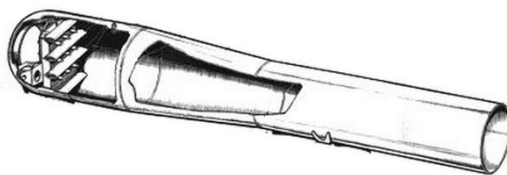
Výhodou tohoto motoru je velký tah, například Argus dosahoval tahu 2700 N. Další výhodou je jednoduchá konstrukce.

Nevýhodou tohoto ventilového typu je silné opotřebení pohyblivého lístku ventilu, který je způsoben vysokou frekvencí toku spalín a vzniklé teplotě ve spalovací komoře motoru.

2.1.1 Konstrukce ventilových pulzačních motorů

Pulzační motory se vyvíjely celou řadu let. Zde jsou popsány a zpracovány nejznámější typy pulzačních motorů, které byly nejvíce používány. Jedná se o typy Argus, Dynajet, The OS pulse jet a motor B-10.

Argus pulse jet (As 109-014)



Obr. 5 As 109-014

Nejvíce proslavený pulzační motor v historii byl právě Argus. Motor s názvem As 109-014 byl použit jako pohon na německé bombě Fi-103 také známou pod názvem V-1. První odpal této bezpilotní bomby proběhl na Štědrý den v roce 1942.

Pro start bomby byl použit acetylen. Díky jeho hořlavosti byl start umožněn i za špatného počasí. Po odhoření acetylenu byl motor poháněn kapalným palivem- benzínem. Motor fungoval i při nulové rychlosti.

Argus As 014	
Statický tah (N)	2060
Dynamický tah (N) při letu	3140
Délka (cm)	350
Maximální průměr (cm)	59
Průměr výfuku (cm)	38
Délka výfuku (cm)	175
Spotřeba paliva (litr/min)	26
Palivo	benzín/acetylen

Tab. 2 Parametry pulzačního motoru As 014

Dynajet

Dynajet je velice proslavený pulzační motor mezi RC modely letadel. V době slávy tohoto motoru se prodalo přes tisíc kusů. Dynajet je oblíbený u RC modelů z důvodů jeho nízké hmotnosti, malých rozměrů, vysokému tahu a snadné regulaci. Motor váží pouhých 0,45 kg a dosahuje 20 N statického tahu.



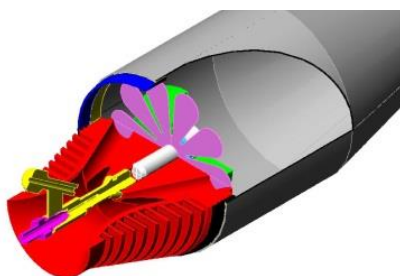
Obr. 6 Starý typ Dynajet motoru

Na obrázku 6 je zobrazen starší typ dynajet motoru. Zde byla zapalovací svíčka umístěna na zakřivené ploše mezi zapalovací komorou a výfukem. Difuzor vyrobený z hliníku neměl anodizovanou hlavu.



Obr. 7 Nový typ dynajet motoru

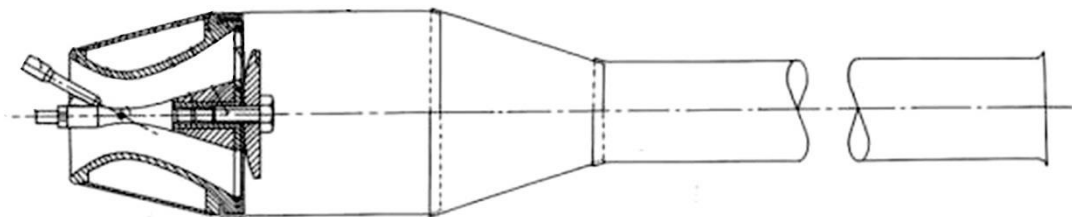
U novějšího typu motoru (obr. 7) je svíčka posunutá k sací komoře. Difuzor je zde anodizován sytě červenou barvou, proto se tento typ motoru často nazývá Dynajet Red-head. Na obvodu difuzoru je patrné jemné, hluboké drážkování za účelem chlazení difuzoru. Tělo motoru je tvořené ze spalovací komory a výfuku. Tělo je vyrobeno ze dvou vylisovaných plechů z nerezavějící oceli. Tyto dva plechy jsou podélně svařeny, na stranách motoru tak vzniknou dva švy. Díky použité metodě výroby těla má motor hladký přechod mezi spalovací komorou a výfukem.



Obr. 8 Řez vstupní dýzy dynajet motoru

Na obr.8 je vidět řez difuzoru a ventilu dynajetu. Pro tento typ motoru byl použit listový ventil (reed valve). Vibrující část ventilu je list hvězdicového tvaru (na obr.8 fialový díl). Nastavení maximálního vyklonění vibračního listu zde zajišťuje vypouklý plech (zelený díl). Pokud změnímě rádius na čele lístku, změní se tím i maximální vyklonění vibračního listku. Žlutá součást umístěná v ose difuzoru, je vstřikovací zařízení. Při sání motoru je palivo nasáto společně s čerstvým vzduchem.

Další modifikace Dynajet motoru je Braunerova konstrukce. Konstrukce jeho motoru je velice podobná předchozím dvěma typům. Liší se způsobem výroby jednotlivých dílů. Tělo Braunerova motoru tvoří svařované roury. Motor lze tedy sestavit pomocí víceúčelových strojů. Parametry Braunerova Dynajetu jsou v tabulce 3.



Obr. 9 Dynajet podle Braunera

Braunerovo Dynajet	
Hmotnost (g)	280-350
Tah (N)	17,7
Délka (mm)	553
Maximální průměr (mm)	64

Tab. 3 Parametry braunerova motoru

The OS pulsejet

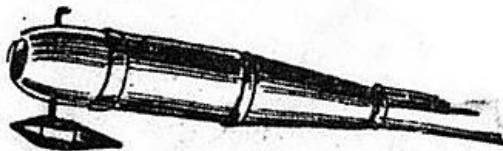


Obr. 10 The OS pulzační motor

The OS pulsejet byl vyráběn v letech 1950 a 1960 japonskou firmou OS. Jeho tělo bylo vyrobeno stejně jako v případě dynajet motoru. Rozdíl mezi dynajet a tímto typem motoru je v konstrukci sacího zařízení. Zatímco sání v dynajetu bylo tvořeno jedním obráběným dílem z hliníku, u OS motoru je sání vyrobeno ze dvou samostatných dílů, které jsou k sobě sešroubovány.

Podobných typů motorů jako je OS pulsejet a dynajet bylo vymyšleno v době slávy pulzačních motorů velké množství. Další typy jsou například Tigerjet, Alpha jet (PL-35), Atmojet, Pijet atd.

B-10



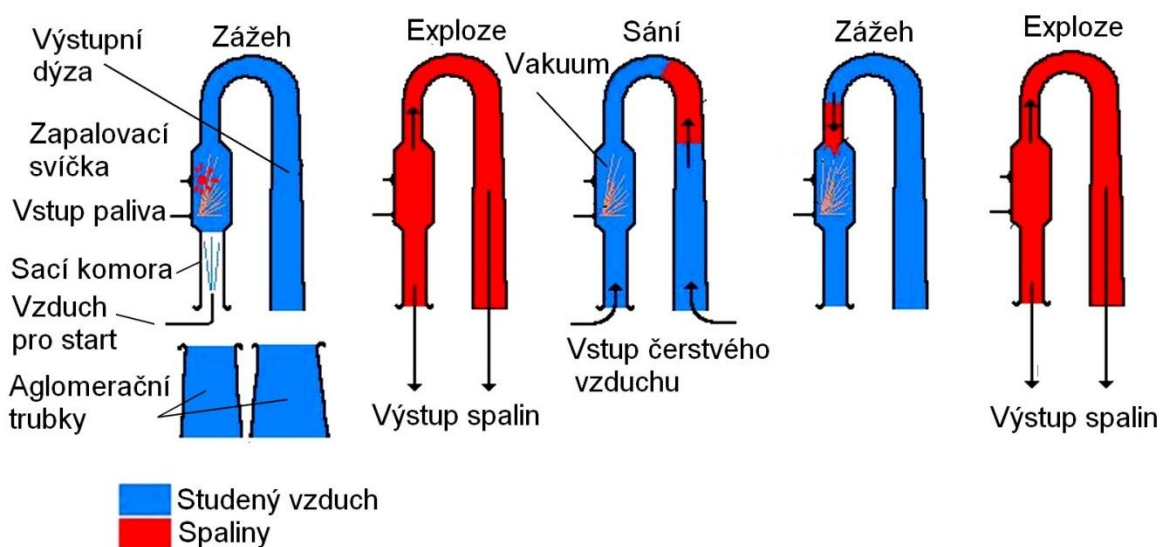
Obr. 11 B-10 česká verze pulzačního motoru

Motor B-10 vymyslel sovětský modelář V. A. Borodin. Borodin dbal při konstrukci na snadné vyrobení pulzačního motoru. Velice zajímavý je systém vstřikování a použité palivo. Tento motor pracuje na automobilový či letecký benzín. Benzín je nasáván v nejužším místě spalovací komory. Regulace množství nasávaného vzduchu je zajištěna pomocí tvarové jehly se závitem. V tabulce 4 jsou napsány parametry motoru. Konstrukce motoru a následný postup výroby byl popsán v časopise Věda a technika mládeži [15]. Článek je vložen v příloze č. 2.

B-10	
Statický tah (N)	5,4-6,3
Hmotnost bez nádrže (g)	180
Spotřeba paliva (g/min)	24-28
Délka (mm)	740
Palivo	automobilový nebo letecký benzín
Počet cyklů za vteřinu	142

2.2 Bezventilový pulzační motor

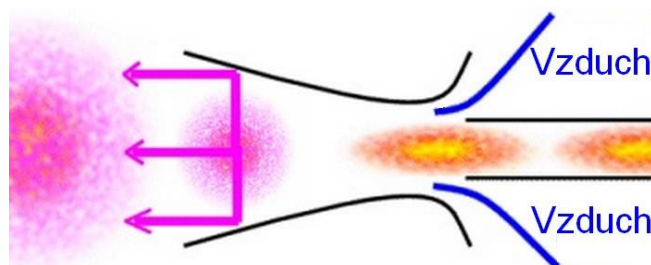
Charakteristickým znakem bezventilových pulzačních motorů je absence jakýchkoliv pohyblivých částí. Oproti ventilovému pulzačnímu motoru nepotřebuje k řízení průtoku odchozích spalin ventil, ale využívá vhodný tvar motoru. Všechny části motoru mají trubkovitý tvar. Konstrukce motoru je při srovnání s dnešními proudovými motory velice jednoduchá. Motor se skládá ze sací komory, spalovací komory, výstupní dýzy, vstřikovacího zařízení a zapalovacího systému. Sací komora je tvořena krátkou ocelovou rourou s menším průměrem než má výstupní dýza. Spalovací komora je roura s největším průměrem, ve kterém se uskutečňuje zapálení směsi vzduchu a paliva. Dlouhá rozšiřující se roura je obvykle výstupní dýza.



Obr. 12 Princip bezventilového pulzačního motoru

Zapálení prvního cyklu je provedeno pomocí svíčky, umístěné ve spalovací komoře. Palivo je smícháno se vzduchem už na vstupu, nebo je vstřikováno přímo do spalovací komory. Po zapálení směsi paliva a vzduchu následuje exploze. Spaliny odchází sací komorou i výstupní dýzou. Vlivem vysoké kinetické energie odchozích spalin vzniká ve spalovací komoře podtlak. Do spalovací komory se začne nasávat vzduch sací komorou. Část spalin, která ztratí kinetickou energii ve výstupní dýze, obrátí směr pohybu a vrátí se zpět do spalovací komory a zapálí novou směs. Cyklus se pak stále opakuje.

Zvyšování účinnosti



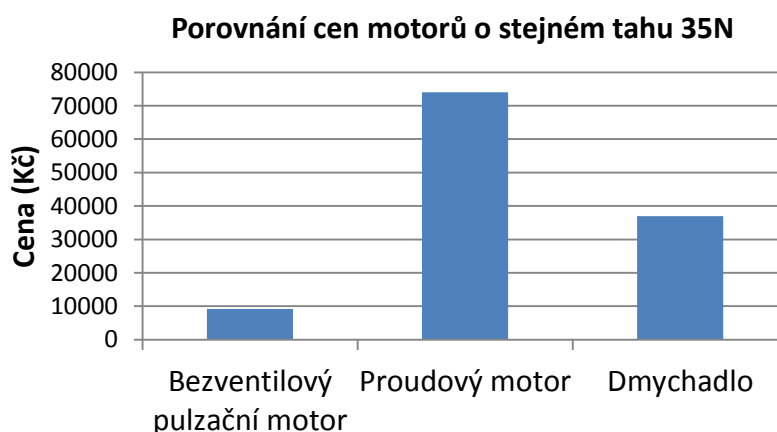
Obr. 13 Princip aglomerační trubky

Jednou z možností zvyšování účinnosti je použití aglomeračních trubek. Aglomerační trubky jsou kuželové roury, které se umísťují na konec výstupní dýzy, nebo na vstup sání. Mezi koncem dýzy a aglomerační trubkou musí být mezera pro sání studeného vzduchu. Při chodu výfukových spalin aglomerační trubkou je současně nasáván do aglomerační trubky studený okolní vzduch. Nasávání je založeno na principu Venturiho trubice. Spaliny se přírůstkem čerstvého vzduchu ochladí. Dojde k navýšení hmotnostního průtoku a tím i vyšší účinnosti motoru. Měření ukázalo, že zvýšení účinnosti je 10-15 procent.



Obr. 14 Aglomerační trubky na bezventilovém pulzačním motoru

Výhodou bezventilových pulzačních motorů je snadné startování, jednoduchost a nízká hmotnost. Motor se vyznačuje extrémně nízkou cenou, jak je znázorněno v grafu Graf 1. Protože zde nejsou pohybující se členy, motor se nemusí prakticky udržovat a disponuje dlouholetou životností. Motor nemá také nároky na speciální typ paliva. Sestrojit bezventilový motor s nízkou účinností a malým počtem cyklů na jedno spuštění je velice snadné. Základní princip motoru lze využít i v domácích podmínkách s pomocí sklenice kuželové roury a kusu drátu. Používané materiály pro výrobu motoru jsou snadno dostupné.



Graf 1 Porovnání cen motorů

Nevýhodou motoru je nízká termodynamická účinnost. Z důvodu nízké účinnosti má motor vyšší spotřebu paliva než proudové motory. Další značná nevýhoda je vysoká hluknost motoru a vibrace celé konstrukce. Proto se motor takřka nepoužívá.

2.2.1 Konstrukce bezventilových pulzačních motorů

Bezventilových pulzačních motorů bylo vyrobeno velké množství, zde uvádím pouze nejznámější a nejvíce používané. Jedná se o typ The Lockwood-Hiller a Chinese CS. Oba typy se používají ojediněle jako pohon lodních plavidel, zvláštních vozidel a pro modely letadel.

The Lockwood-Hiller



Obr. 15 HH 5.25-7

Tento typ pulzačního motoru vychází z Marconnetiho bezventilového pulzačního motoru. V roce 1950 na něm pracovali američtí vědci Lockwood a Hiller. Motor vylepšili přestavbou těla motoru.

Díky ohnuté výstupní dýze se celková délka motoru snížila na polovinu. Motor dosahoval vyššího výkonu a byl více flexibilní.

Na obrázku 15 je vidět prototyp Lockwoodova motoru, který nese název HH 5.25-7. Motor vážil 13,6 kg. Jeho maximální tah dosahoval 1330N. Průměrný tah motoru byl 1245N. Jeho spotřeba paliva za hodinu činila 38,5 kg /h.



Obr. 16 Nový typ Lockwoodova pulzačního motoru

Postupem času byl Lockwoodův motor stále zjednodušován (obr. 16). Roura s největším průměrem je spalovací komora. Vstřikovací systém paliva může být přidělán na válcové ploše spalovací komory, na přední kuželové ploše komory, či na vnitřní výztuze v sání motoru. Kratší roura je sací komora. Dlouhá zakřivená roura tvaru U je výstupní dýza. Dýza má na konci motoru rozšiřující tvar připomínající Lavalovu dýzu. Původní motor byl navržen pro palivo propan. Později byl motor upravován i na použití tuhých paliv. Nejoblíbenějším a nejjednodušším způsobem však stále zůstává vstřikování paliva v plynném skupenství.

Chinese CS



Obr. 17 Chinese CS pulzační motor

Tento typ motoru vyráběla firma CS v Šanghaji v roce 1960. Firma CS byla výrobcem dvouválcových motorů. Motory sloužily jako pohon RC modelů letadel. Na americký trh se dostaly dva typy těchto motorů. Jedná se o typ SJP-1 (délka motoru 56 cm, statický tah 11,6 N) a typ SJP-2 (délka motoru 86 cm, statický tah 22,6 N) oba typy motorů byly navrženy na kapalné palivo- benzín. Amatérský vývoj umožnil použití plynného paliva propanu. Na obr. Obr. 18 je zobrazen motor od společnosti GLC inc., která v dnešní době pulzační motory tohoto typu stále vyrábí. Firma pochází z Kanady a dle požadavků může zaslat nerezové díly k výrobě Chinese CS motoru.



Obr. 18 Chinese CS pulzační motor od společnosti GLC inc.

V přední části motoru je spalovací komora tvořená válcovou rourou. Zapálení směsi je provedeno svíčkou, která je umístěna v přední části spalovací komory. Na kuželové ploše spalovací komory je připájeno sání motoru v podobě ohnuté roury. Sacích komor může být ke spalovací komoře připojeno více. Propan je vstřikován do sací komory. Výstupní dýza je tvořena dlouhou rozšiřující se rourou.

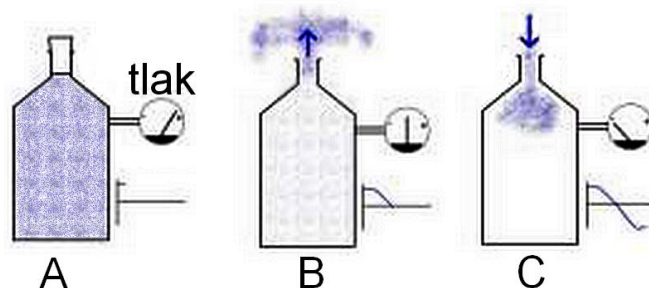
Vynálezce Larry Cottrill zjednodušil Chinese CS pulzační motor a vyvinul takzvaný Focus Wave Energy (FWE) bezventilový pulzační motor. Vynálezce vyvinul tento typ motoru s nastavitelnou délkou výfuku. Díky tomu mohl zkoumat účinek sání a vyfukování plynu. Na základě zkoumání vyrobil optimální motor o celkové délce 1035 mm se statickým tahem 23,5 N. Motor nikdy nebyl podroben přesnému měření. Jsou pouze známy hodnoty od amatérských stavitelů motorů. Spotřeba paliva je v rozmezí 3 až 6 kg/kg/h a poměr mezi tahem a hmotností činí 3 až 5.



Obr. 19 FWE pulzační motor

3 Popis funkce

3.1 Kadenacyho effect

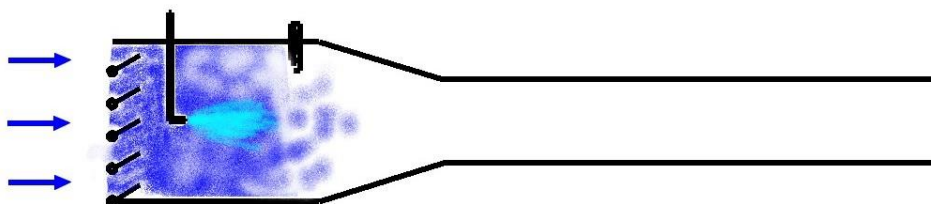


Obr. 20 Popis kadenacyho efektu

Máme uzavřenou nádobu s plynem o tlaku větším než je tlak atmosférický (obr. 20, A). Pokud dostatečně rychle sundáme horní víko z nádoby, začne se tlak v nádobě vyrovnávat s atmosférickým tlakem (obr. 20, B). Plyn v nádobě se začne pohybovat kinetickou energií ven z nádoby. Tlak v nádobě se sníží na tlak atmosférický. Díky kinetické energii odchozích plynů se však v nádobě vytvoří podtlak (obr. 20, C). Do nádoby se začne nasávat okolní vzduch. Nasávání je doprovázeno kinetickou energií, která stlačí plyn v nádobě. Celý cyklus se zopakuje několikrát za sekundu. S časem se rozdíl tlaků snižuje, pokud se tlak v nádobě vyrovná s atmosférickým tlakem, jedná se o ustálený stav. Podobné chování se vyskytuje u rozkmitané pružiny vnější silou.

Pulzační motor pracuje v opakujících se cyklech. Jedná se o sání, (stlačení), expanze a výfuk.

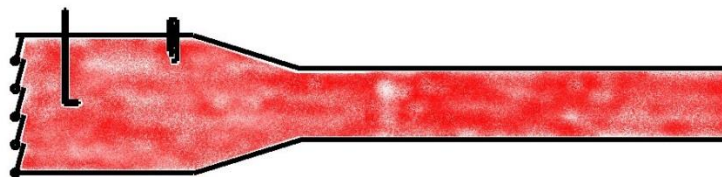
3.2 Sání



Obr. 21 Fáze sání

V první fázi cyklu motor nasaje čerstvý vzduch. Nasátí čerstvého vzduchu je důsledkem vzniklého podtlaku ve spalovací komoře. Vstupní ventil způsobuje, že nasátý vzduch je stlačen. Stlačený vzduch proteče otvory v otevřeném ventilu a dojde ke smíchání vzduchu s palivem. Při startování motoru je nutno vytvořit přetlak na vstupu, to je možné zajistit kompresorem nebo stlačeným vzduchem.

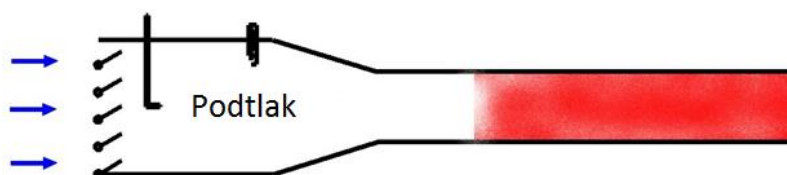
3.3 Expanze



Obr. 22 Fáze expanze

V druhé fázi oběhu dojde k zapálení směsi paliva a vzduchu. Zapálení směsi se uskuteční při prvním spuštění pomocí svíčky. Při dalším cyklu je směs zapalována od výstupních spalin. Zapálením směsi dojde k explozi, která způsobí náhlý, téměř izochorický nárůst tlaku ve spalovací komoře. Tlak zapříčiní uzavření ventilu na vstupu, proto výfukové plyny odchází pouze výfukem.

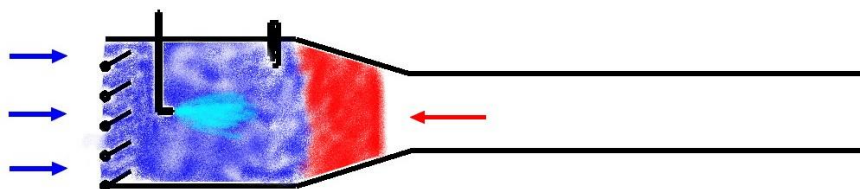
3.4 Výfuk



Obr. 23 Fáze výfuk

Ve třetí fázi dojde k výfuku spalin ze spalovací komory skrz výfuk. Tlak ve spalovací komoře se začne vyrovnávat s atmosférickým tlakem. Vlna výfukových plynů se začne pohybovat vysokou kinetickou energií na konec výstupní dýzy. Když se vlna výfukových plynů dostane na konec výstupní dýzy, je tlak výfuků roven tlaku okolí. Nicméně přední část výfukových plynů má stále kinetickou energii a dojde k dalšímu rozpínání až za pulzační motor. Tento jev vytvoří nižší tlak ve spalovací komoře než atmosférický tlak. Nižší tlak zapříčiní otevření vstupního ventilu a umožní nasátí čerstvého vzduchu do spalovací komory.

3.5 Zapálení nového cyklu



Obr. 24 Zapálení nového cyklu

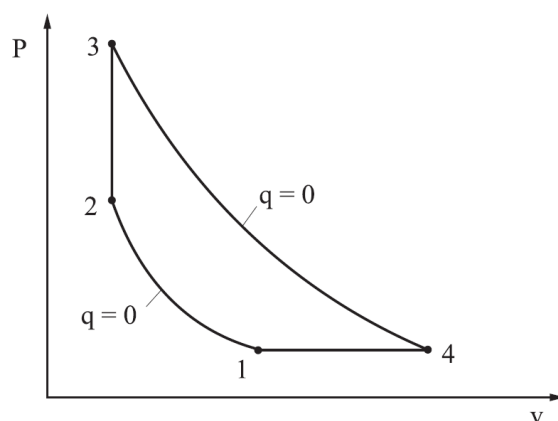
Plyny, které ještě nestihly expandovat vlivem snižování tlaku, ztratí hybnost a obrátí směr pohybu. Tím se zadní část výfukových plynů vrací zpět do spalovací komory a zapálí novou směs.

Cyklus se pak opakuje.

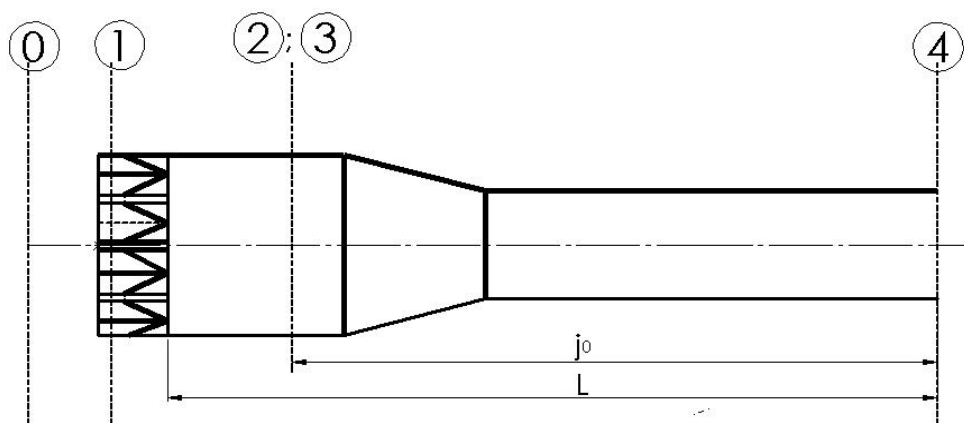
4 Termomechanika

Podle skript Kapitoly z termomechaniky od profesora Mareše [1] pulzační motor pracuje na základě Humphreyovo cyklu (graf 2). Graf je zjednodušený. Na výstupu motor nemá žádnou klapku, která by zachovala konstantní objem v době výbuchu. Tlak by tedy nemohl dosáhnout stavu 3, horní část cyklu by byla nejspíše zaoblená. Tento jev je pro další výpočty však zanedbán.

V této kapitole se budeme zabývat výpočtem jednoho cyklu v pulzačním motoru a všech důležitých parametrů v jednotlivých částech motoru. Na obrázku 25 je zobrazen přibližný tvar mého pulzačního motoru s vyznačenými důležitými stavy 0 až 4.



Graf 2 Humphreyův oběh



Obr. 25 Schéma pulzačního motoru s vyznačenými stavy

Stav 0 – hodnoty v tomto místě jsou pro atmosférické prostředí.

Stav 1– stav je umístěn v zúženém místě před lístky ventilu. Protože je zde menší plocha, předpokládá se zde větší dynamický tlak a tím menší statický tlak.

Stav 2 – stav je umístěn ve spalovací komoře. Zde vzroste průměr čímž se sníží dynamický tlak a vzroste tlak statický.

Stav 3 – expanze směsi paliva a vzduchu. Dojde k vysokému nárůstu statického tlaku.

Stav 4 – Z pravé strany je konec motoru vystaven atmosférickému tlaku.

Od stavu 1 do stavu 2 je chování plynu nasávaného vzduchu adiabatické, protože zde nepřivádíme ani neodvádíme teplo. Přivedené teplo do motoru je mezi stavy 2-3, kde směs expanduje. Tato změna stavu je považována za izochronickou. Při výfuku tj. ze stavu 3 do 4 nedochází k dalšímu přívodu tepla. Děj je tedy adiabatický. Abychom dostali uzavřený cyklus, budeme uvažovat stav mezi 4 a 0 za izobarický.

Pro určení termodynamického cyklu nám však předchozí závislosti nestačí. Musíme znát statické tlaky v jednotlivých bodech motoru. Závislosti na mezi tlaky 0 až 4 jsou popsány v následujících kapitolách.

4.1 Maximální tlak v pulzačním motoru

Jeden z nejdůležitějších vztahů popisující změnu tlaku v pulzačním motoru je vztah (1). Vztah odvodil Tharratt. [14] a slouží pro výpočet podílu tlaku v místě výbuchu k tlaku atmosférickému.

$$\frac{p}{p_0} = \left[1 - nL \cos nat \ln \frac{1}{1 - \frac{j_0}{L}} \right]^{-\kappa} \quad (1)$$

Kde:

n	vlastní frekvence	[Hz]
L	délka motoru	[m]
j_0	místo výbuchu v motoru	[m]
a	rychlost zvuku	[m/s]
t	čas	[s]

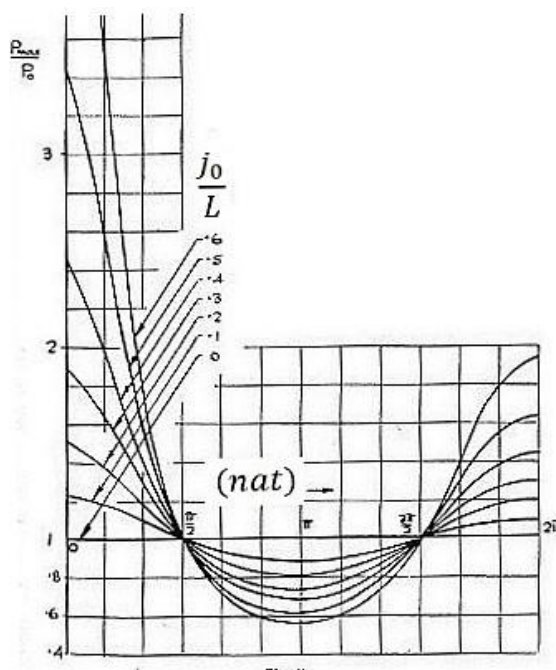
Maximální tlak ve stavu 3 v závislosti na tvaru motoru dostaneme, pokud $\cos nat = 1$, tedy pro $nat = 0; 2\pi; \dots$. Tento předpoklad vystihuje graf. 3.

$$\left(\frac{p_{max}}{p_0}\right)_{x=0} = \left[1 - nL \ln \frac{1}{1 - \frac{j_0}{L}}\right]^{-\kappa} \quad (2)$$

Kde:

p_{max}	max. tlak	[Pa]
p_0	at. tlak	[Pa]
L	délka motoru	[m]
j_0	místo výbuchu v motoru	[m]
κ	poissonova konstanta	[-]

Maximální tlak motoru ($p_{max} = p_3$) je tedy závislý na vlastní frekvenci n rozměrech motoru j_0/L . Součin nL Tharratt ve své práci odvodil v závislosti na j_0/L . V tabulce 5 je tato závislost popsána.



3 Průběh funkce podílu max. tlaku a at. tlaku

j/L	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
nL°	44	48,5	53,1	58,5	65	74,5

Tab. 4 Určeno nL dle tvaru motoru

4.2 Sání

V této části se snažíme vyřešit závislost $\frac{p_1}{p_0}$ a $\frac{p_2}{p_1}$ v závislosti na předpokladech popsané níže.

Sání motoru bude odvozeno na základě následujících předpokladů:

- adiabatické proudění mezi stavy 1 a 2 ($q = 0$)
- proudění je stlačitelné ($\rho \neq 0$)
- ideální plyn
- $Ma_2=0,2$; ve spalovací komoře (stav 2) musí být Machovo číslo rovno 0,2. Při vyšších Machových číslech by nedocházelo ke kvalitnímu hoření směsi.
- $X=0,23$; podíl průřezů $X=S_1 / S_2$ musí být 0,23, aby Machovo číslo čerstvého vzduchu nepřekročilo hodnotu 0,2. Tento poznatek byl odvozen panem Tharrattem.

Při sání je v pulzačním motoru vyvolán podtlak. Tento jev je patrný z grafu 3 Průběh funkce podílu max. tlaku a at. tlaku pro hodnoty od $nat = \frac{\pi}{2}$ do $nat = \frac{3\pi}{2}$. Díky podtlaku se otevřou klapky ventilu a začne se nasávat čerstvý vzduch do spalovací komory. Nyní určíme maximální podíl tlaku, který při nasávání může nastat, tedy pro $nat = \pi$.

$$\left(\frac{p_1}{p_0}\right)_{x=0} = \left[1 - nL \cdot \pi \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{j_0}{L}}\right]^{-\kappa} \quad (3)$$

Kde:

p_{\max}	max. tlak	[Pa]
p_0	at. tlak	[Pa]
L	délka motoru	[m]
j_0	místo výbuchu v motoru	[m]
κ	poissonova konstanta	[-]

K dalším výpočtům budeme potřebovat Machovo číslo ve stavu 1. To je možné odvodit z prvního zákona termodynamiky pro kontrolní objem. Z úsporných důvodů je zde uveden pouze výsledný vztah.

$$Ma_1 = \left[\frac{2}{\kappa - 1} \left[\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} - 1 \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Kde:

Ma_1	Machovo číslo ve stavu 1	[-]
p_1	tlak ve stavu 1	[Pa]
p_0	at. tlak	[Pa]
κ	poissonova konstanta	[-]

Nyní budeme řešit podíl tlaku p_2 a p_1 . Vycházíme z rovnice kontinuity pro proudovou

trubici. Rovnici vydělíme rychlostí zvuku a tím do vzorce dostaneme Machovo číslo. Mezi stavy 1 a 2 platí adiabatický děj, díky němuž určíme závislost podílu tlaků na Machových číslech a podílu ploch (7).

$$\rho w A = konst \cdot \frac{1}{a} \quad (5)$$

$$\rho \frac{w}{a} S = \frac{konst}{a} \quad (6)$$

$$\rho_1 \cdot Ma_1 \cdot S_1 = \rho_2 \cdot Ma_2 \cdot S_2$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{S_1}{S_2} \cdot \frac{Ma_1}{Ma_2}$$

Mezi 1 a 2 platí adiabatický děj:

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = konst \Rightarrow \frac{p_1}{\rho_1^\kappa} = \frac{p_2}{\rho_2^\kappa}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(X \cdot \frac{Ma_1}{Ma_2} \right)^\kappa \quad (7)$$

Kde:

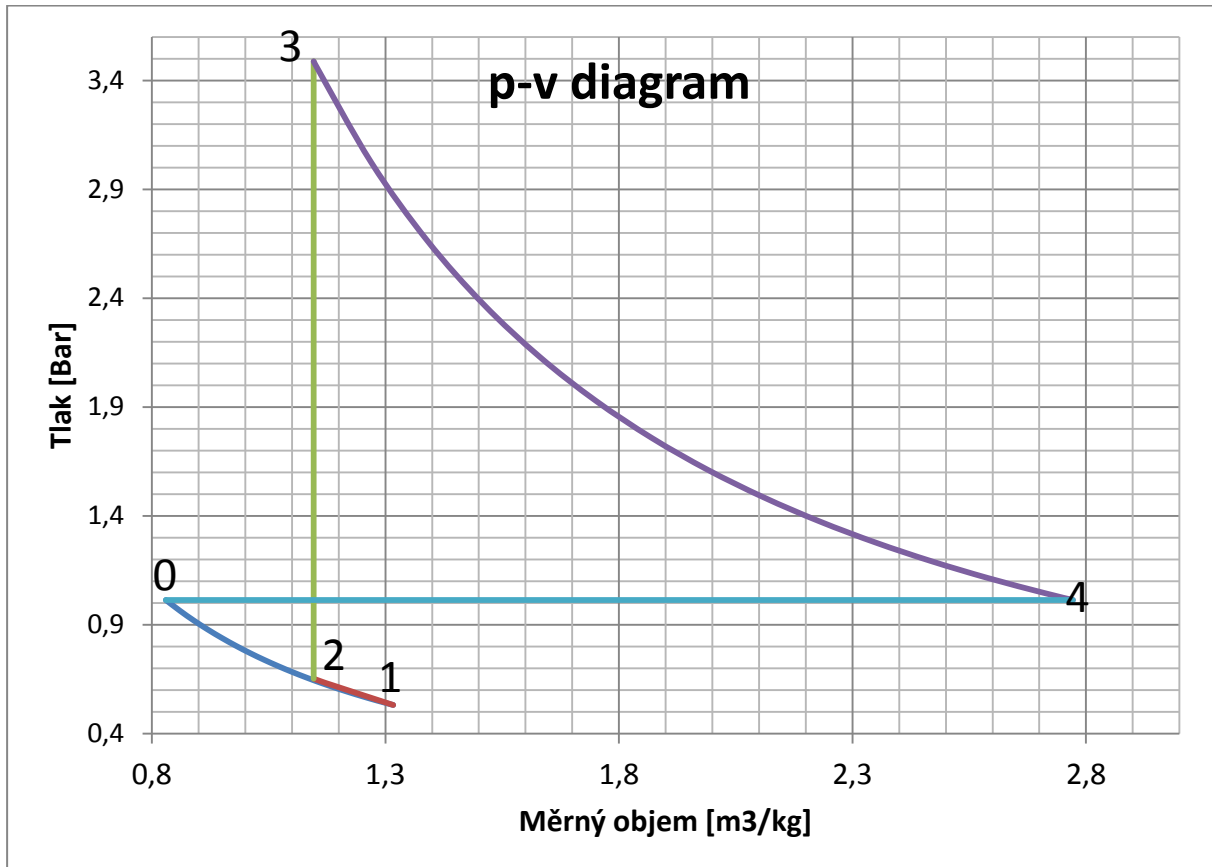
p	tlak	[Pa]
X	poměr průřezů: $X = \frac{S_1}{S_2}$	[-]
Ma	Machovo číslo	[-]
ρ	hustota	[kg/m ³]
w	rychlost	[m/s]
a	rychlost zvuku	[m/s]
κ	poissonova konstanta	[-]
S	plocha	[m ²]

4.3 Termodynamický rozbor

Zadané parametry		
kapa	[-]	1,4
M2	[-]	0,2
nL°	[°]	48,5
poměr j/L	[-]	0,5
X= A3/A2	[-]	0,23

	Jednotky	Vzorec pro výpočet	Hodnota
stav 0			
Teplota	K		293
Plak	Pa		101325
Měrný objem	m ³ /kg		0,82
Hustota	kg/m ³		1,20
stav 1			
Rychlost	m/s	$M_1 \cdot a$	352,38
Tlak	Pa		53103
Machovo číslo	-		1,01
Teplota	K	$T_0 \cdot \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$	236
Měrný objem	m ³ /kg	$v_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}}$	1,32
Hustota	kg/m ³	$1/v_1$	0,76
stav 2			
M2	-	ZVOLENO	0,2
p ₂ /p ₁	-	$\left(\frac{X \cdot Ma_1}{Ma_2}\right)^\kappa$	1,23
Tlak	Pa	$\frac{p_2}{p_1} \cdot p_1$	65197
Teplota	K	$p_2 \cdot \frac{v_2}{r}$	260
Měrný objem	m ³ /kg	$p_2 \cdot \frac{v_2}{r}$	1,15
Hustota	kg/m ³	$\frac{1}{v_2}$	0,87
stav 3			
p ₃ /p ₀	-	$\frac{p_3}{p_2} = 1 - \cos(B) \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - \frac{e}{L}}\right)^{-\kappa}$	3,44
Tlak	Pa	$\frac{p_3}{p_0} \cdot p_0$	348790
Teplota	K	$p_3 \cdot \frac{v_3}{r}$	1388
Měrný objem	m ³ /kg	$v_3 = v_2$	1,15
Hustota	kg/m ³	$1/v_3$	0,87
stav 4			
Tlak	Pa	$p_4 = p_0$	101325
Teplota	K	$p_4 \cdot v_4/r$	975

Měrný objem	m ³ /kg	$v_4 = v_3 \cdot \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{1}{\kappa}}$	2,77
Hustota	kg/m ³	1/v ₄	0,36
Frekvence motoru	Hz	$\frac{\alpha_4}{4L}$	176



Graf 4 p-v diagram navrženého pulzačního motoru

5 Popis jednotlivých dílů

5.1 Vstup vzduchu

Tvar difuzoru v pulzačním motoru závisí na typu vstupního ventilu. U lístkového ventilu (reed valve) je potřeba umístit difuzor před lístkový ventil. Difuzor má za účel přivést potřebné množství vzduchu k zavíracím lístkům ventilu. Pro mřížový ventil není difuzor zapotřebí jako v případě motoru Argus. U mřížového typu ventilu je velká sací plocha, proto nepotřebujeme usměrnit tok vzduchu k lístkům ventilu.

Pro zvýšení statického tlaku v pulzačním motoru však můžeme difuzor použít jak u lístkového, tak u mřížového typu ventilu. To docílíme tvarem vnitřního kanálu podzvukového vstupu, který se směrem od lapače ke spalovací komoře musí rozšiřovat. V rozšiřujícím kanálu postupně klesá rychlost proudu a stoupá statický tlak.

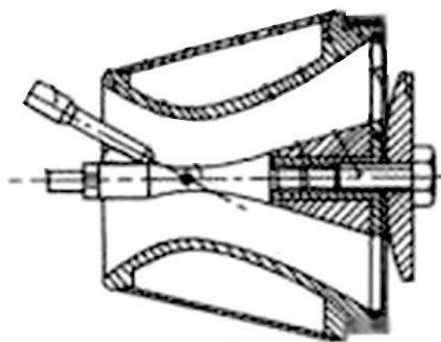
Obecně tvar vstupu závisí na velikosti Machova čísla, pro které je proudový motor konstruován. Dle Machova čísla rozdělujeme vstupní ústrojí na nadzvuková a podzvuková. Pulzační motor bude navržen s podzvukovým vstupem. Nepředpokládáme používání motoru pro letecké účely, motor musí být pevně přidělán k podstavci.

Na internetové stránce www.leteckemotory.cz [11] je velmi přesně popsán návrh vstupu podzvukových leteckých motorů:

Vnitřní kanál podzvukového vstupu se od lapače směrem ke kompresoru rozšiřuje. V rozšiřujícím se kanálu při podzvukové vstupní rychlosti plynule klesá rychlost proudu a plynule roste statický tlak. Zvýšením tlaku se částečně ušetří práce kompresoru. Náporové motory musí mít zvýšení tlaku v této části mnohem vyšší, protože k dalšímu zvyšování tlaku už nedochází a plyny jdou ze vstupního ústrojí přímo do spalovacího prostoru. U náporových motorů je tak rychlost proudu za vstupem velmi malá. Rozšiřování kanálu musí být plynulé, bez prudkých ohybů a ostrých hran, jinak by mohlo dojít k odtržení proudu od stěn, ke vzniku vírů a zpětného proudění - zvýšily by se ztráty a snížil tah motoru.

Pokud je podzvukový vstup navržen tak jak má, tak bez problému poskytuje motoru potřebné množství vzduchu. Množství nasávaného vzduchu je přímo ovlivněno motorem - zvýší-li se otáčky kompresoru, vzroste rychlost proudu před motorem, klesá statický tlak, zvýší se tak rozdíl mezi atmosférickým tlakem a tlakem ve vstupním ústrojí, roste rychlost v lapači vzduchu - v konečném důsledku se zvýší průtokové množství vzduchu. Motor si tedy sám reguluje, kolik vzduchu bude lapačem nasáváno.

Příklad návrhu sání motoru je uveden na obrázku 26. Jedná se o hlavu Braunerova pulzačního motoru.



Obr. 26 Difuzor dle Braunera

5.2 Jednosměrný ventil pro pulzační motory

Nejkritičtější místo v pulzačním motoru je právě vstupní ventil. Ventil se během činnosti otevře a zavře 45 až 250-krát za sekundu. Ventil je vystaven velikému mechanickému namáhání, proto se při zvolení špatného materiálu mohou vyskytovat únavové lomy. Lomy mohou vzniknout následkem creepu. Při výbuchu směsi paliva a vzduchu totiž dochází k velkým teplotám. Ventil musí být stavěn tak, aby odolal těmto faktorům.

Hlavní funkcí ventilu je při zapálení směsi utěsnit vstup, aby spaliny proudily pouze výfukem. Naopak při odchodu expanodovaných spalin ze spalovací komory se musí ventil rychle otevřít, aby umožnil nasátí vzduchu do spalovací komory. K těmto pohybům dopomáhá dříve zmíněný Kadency jev, kde při výbuchu směsi dojde k uzavření klapky ventilu. Při odchodu spalin ze spalovací komory je ventil otevřen vlivem vzniklého podtlaku ve spalovací komoře.

Nyní se zaměříme na jednotlivé typy ventilů, které se postupem času vyvíjely a byly použity ve známých strojích.

5.2.1 Listový ventil



Obr. 27 Listový ventil na difuzoru

Tento typ konstrukce je dnes velmi využíván především u menších pulzačních modelů hlavně kvůli své jednoduchosti. Ventil je složen z přední opěrné desky, hvězdicového vibračního lístku a opěrky. Opěrná deska může být vyrobena jako samostatný kus, či může být součástí sacího zařízení. Do opěrné desky jsou vyřezány otvory pro proudění vzduchu do

komory. Nejnamáhavější částí tohoto ventilu je vibrační lístek. Lístek má tvar hvězdice, aby umožnil kmitání jednotlivých prutů. Pruty vlivem Kadencyho efektu začnou vibrovat určitou frekvencí. Jak velké vychýlení pásků nastane, můžeme seřídít materiálem a tloušťkou pásků. Vychýlení a samotný průběh ohybu pásků seřídíme také opěrkou.

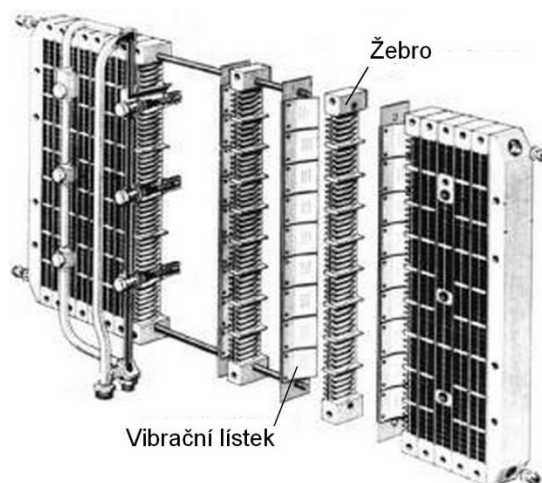
Opěrka má kruhovitý tvar, slouží jako doraz vibračního kroužku. Středem ventilu je obvykle taženo vstřikovací zařízení pro dokonalé rozptýlení směsi ve spalovací komoře.

Ventil disponuje jednoduchou konstrukcí a nízkou pořizovací cenou. Při průchodu vzduchu ventilem se musí vzduch vyklonit o téměř 90° , což má velice nepříznivý dopad na účinnost ventilu. Konce vibračních pásků jsou vystaveny vysokým teplotám, také narážejí na opěrnou desku. Tyto extrémní podmínky zapříčiňují vznik trhlin, či vylamování konců vibračních pásků (obr 28). Jednotlivé vibrační pásky jsou obvykle vyráběny jako jeden vibrační lístek. I v případě poškození pouze jednoho pásku, je nutné vyměnit celý lístek. Proto má tento typ ventilu značné náklady na údržbu. Pental Valve je vhodné použít pro malé pulzační motory. Bruce Simpson [3] doporučuje používat ventil jen pro tahovou sílu menší jak 100N.



Obr. 28 Použitý lístek

5.2.2 Mřížový ventil



Obr. 29 Ventil použitý na motoru Argus

Mřížový ventil je obecně používán pro delší pulzační motory s tahem nad 100N. Větší pulzační motory vyžadují větší sací plochu. Použití listového ventilu pro velké motory by

bylo značně nepraktické. Nejznámější použití tohoto ventilu je v motoru Argus As-014 (obr. 5).

Ventil je složen z žeber a vibračních lístků. Mezi jednotlivá žebra (obr. 7) jsou vloženy slabé vibrační lístky a plech, který odděluje jednotlivá žebra. Plech slouží také jako doraz vibračních lístků. Lístky jsou umístěny rovnoběžně ve směru proudění vzduchu.

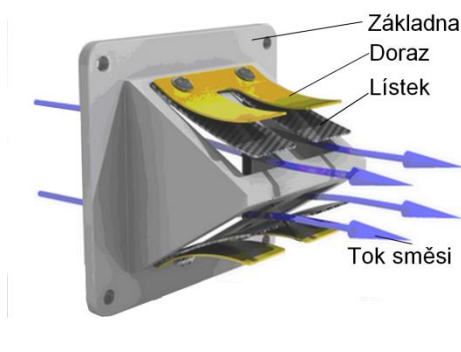
Při expanzi směsi paliva a vzduchu je ventil vlivem vysokého tlaku ve spalovací komoře uzavřen. Vlivem Kadencyho efektu vznikne při odchodu spalin ve spalovací komoře podtlak. Podtlak umožní nadzvednutí vibračních lístků a tím i vstup čerstvého vzduchu do spalovací komory. Při prvním startu cyklu jsou vibrační lístky nadzvednuty pomocí přídavného kompresoru. Po rozběhnutí motoru není kompresoru nadále potřeba.



Obr. 30 Mřížový ventil

Proud vzduchu se nemusí tolik vyklánět při průchodu vzduchu ventilem. Ventil má také větší sací plochu. Tyto důvody zapříčiňují vysokou účinnost ventilu. Hlavní nevýhodou ventilu je jeho složitost. Mříže použité ve velkých motorech, jako například Argus jsou mimořádně složité a nákladné na výrobu.

5.2.3 Ventil pro dvoutaktní motory



Obr. 31 Proudění směsi ventilem

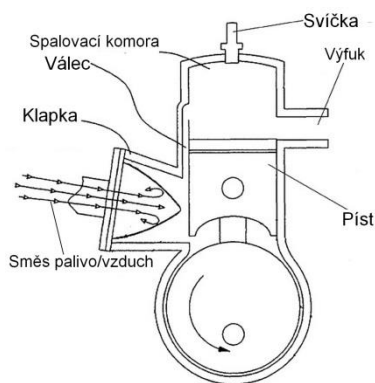
Jedná se o ventil používaný u dvoutaktních motorů zejména v závodních motocyklech. Klapka pracuje na stejném principu a za podobných podmínek jako je ventil u pulzačních

motorů. Ventil je v dvoutaktním motoru vystavena vysokým rázům a teplotám podobně jako ventily u pulzačních motorů. Proto tato klapka lze použít i pro pulzační motor.

Ventil je složen ze základní desky vyprofilovanou do tvaru V. K ní je přišroubován lístek s opěrným plíškem. Velikost vychýlení můžeme regulovat tvarem opěrky. Opěrka v tomto typu ventilu představuje vyhnutý plech. Lístek se vyrábí z karbonu, sklolaminát, pertinax nebo ocele.

Hlavním účelem klapky je zamezení návratu nasávané směsi zpět z válce do karburátoru.

Při pohybu pístu do dolní úvrati se vytváří tlak, který přefukovými kanály tlačí směs do horní části válce (spalovací komory). Přičemž je vyvolán nežádoucí jev, kdy dochází k zpětnému tlačení směsi z válce do karburátoru. Proto je jednosměrný ventil vložen mezi karburátor a válec (obr. 32). Klapky zabraňují zpětnému proudění směsi do karburátoru. Při pohybu pístu do horní úvratě je pístem vyvolán podtlak, který otevře lístky klapky a tím umožní nasávání nové směsi z karburátoru.



Obr. 32 Umístění klapky ventilu

V dnešní době se vyrábí mnoho typů ventilů do dvoutaktních motorek. Jedním z nejznámějších výrobců ventilu je společnost Polini. Cena ventilu se pohybuje od 400 Kč do 1800 Kč dle použitého materiálu lístku a rozměru ventilu.

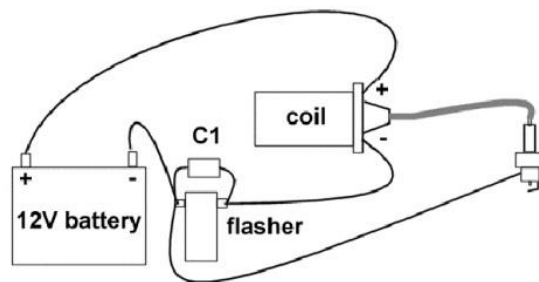


Obr. 33 Lístkový ventil od společnosti Polini

5.3 Zapalovací systém

Zapalovací systém v pulzačním motoru slouží k zapálení směsi paliva a vzduchu. Zapálení se provede pouze v prvním cyklu, v dalších cyklech je směs zapálena od výstupních spalin.

Bruce Simpson [3] uvádí jednoduchou možnost výroby zapalovacího systému a to pomocí auto elektroniky. K obvodu potřebujeme: autobaterii, přerušovač, cívku z auta, svíčku. C1 je kondenzátor. Do obvodu je nutné přidělat vypínač, kterým se jiskra na svíčce bude spouštět. Zapojení však vyvolá pouze jednu jiskru při spuštění.



Obr. 34 zapalovací systém dle Bruce

Další možnost, která se nabízí je zapojit svíčku na paralyzér. Paralyzér je v dnešní době snadno k dostání za přijatelnou cenu. K vytvoření jisker bude zapotřebí jen paralyzér, měděný drát a žhavicí svíčka. Výhodou tohoto způsobu je jednoduchost, snadné zapojení a ovládání. Paralyzér nám také umožní dlouhé zapojení elektrického oblouku, čímž se výrazně urychlí spuštění motoru.



Obr. 35 Paralyzer UZI 500 000 Voltů

5.4 Tělo motoru

Tělo motoru se skládá ze spalovací komory a výstupní dýzy (výfuk). Tvar těla motoru závisí na použitém typu ventilu. Jeho velikost je však také závislá na celkovém tahu motoru. Pro listkový ventil je spalovací komora rozšířena, abychom docílili větší sací plochy pro ventil. Na rozdíl od mřížového ventilu, který má větší účinnost, není potřeba rozšiřovat spalovací komoru. Proto je spalovací komora přibližně stejně velká jako výfuk motoru.

Tharrat ve své publikaci [14] odvodil vztah mezi celkovým objemem motoru, délkou motoru a celkovým tahem motoru:

$$\frac{V}{L} = 0,00316 \cdot F \quad (8)$$

Vztah je ve stopách do převedení na jednotky SI:

$$\frac{V}{L} = 0,000066 \cdot F \quad (9)$$

Kde:

V	objem těla motoru	[m ³]
L	délka těla motoru	[m]
F	tah	[N]

Pomocí tohoto vzorce byly navrhovány nejznámější typy pulzačních motorů jako je Argus a Dynajet. Objem vyjádříme jako součin průřezu a délky $V = A \cdot L$. Dosadíme do vztahu (9) a dostaneme závislost síly na průřezu:

$$As = 0,000066 \cdot F \quad (10)$$

Kde:

As	střední plocha	[m ²]
F	tah	[N]

Tharratt navrhoval pulzační motory rovné, bez změny průřezu. Proto tento průřez je průřezem podél celé délky motoru. Tharratt nepředpokládal, že se tento vzorec bude používat pro motory typu dynajet, které mají rozšířenou spalovací komoru. Nicméně rozšíření spalovací komory výrazně nezvýší či nesníží tah motoru.

Podle vztahu (10) vidíme, že délka nezmění výkon motoru. Na délce motoru je však závislá jeho frekvence. Podle Tharrattova vztahu se frekvence motoru spočítá podle následujícího vztahu:

$$f = \frac{a}{4 \cdot L} \quad (11)$$

Kde:

f	frekvence	[Hz]
a	rychlost zvuku	[m/s]
L	délka těla motoru	[m]

Délka motoru se vztahuje k střednímu průměru L/D . Pokud platí $L/D < 7$ je zde problém s udržení spalování chemických paliv po delší dobu. Proto by poměr měl být větší jak 7

($L/D > 7$). Používané poměry pro různé motory jsou napsány v tabulce Tab. 5. Zřejmě platí, že čím je motor větší, tím by měl být poměr L/D menší.

Vlastnosti motorů			
Typ motoru	L/D	Statický tah (N)	Frekvence
Dynajet	15	20	260
Argus As-014	9,6	2 200	46

Tab. 5 Vlastnosti pulzačních motorů

Další velmi důležitý vztah pro návrh motoru je vztah mezi sací plochou ventilu A_v a středním průřezem A_s . Vztah odvodil známý autor Tharratt, je dnes velmi používaný při návrhu pulzačního motoru.

$$A_v = 0,23 \cdot A_s \quad (12)$$

Kde:

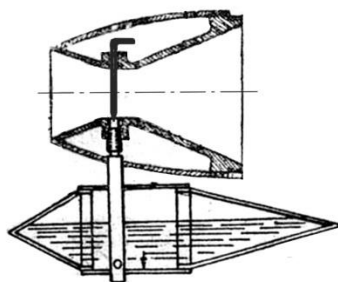
A_s střední plocha [m²]

A_v plocha u ventilu [m²]

5.5 Vstřikovací zařízení

Vstřikovací zařízení slouží k dopravě paliva do spalovací komory v požadovaném množství. Je snaha, aby palivo bylo ve spalovací komoře rozprášeno na co nejmenší kapičky. Podle způsobu dopravy paliva do spalovací komory dělíme vstřikovací zařízení na sání (automatizace, rozřik), vstřikování a časované vstřikování.

5.5.1 Automatické sání paliva



Obr. 36 Ukázka sání motoru B-10

Jedná se o nejjednodušší způsob vstřikování kapalného paliva do motoru. Palivová nádrž je umístěna pod vstupní dýzou. Potrubím se přivádí palivo do nejužšího místa dýzy. Při toku vzduchu do spalovací komory sebou proud vzduchu nabírá palivo. Palivo je nabíráno, protože v nejužším místě dýzy vzniká vysoká rychlost a z toho důvodu i nízký statický tlak (Venturiho efekt). Množství paliva lze regulovat jehlou, která mění průřez trubičky. Nasávané palivo se smíchá ve vstupní dýze a spolu projde ventilem do spalovací komory.

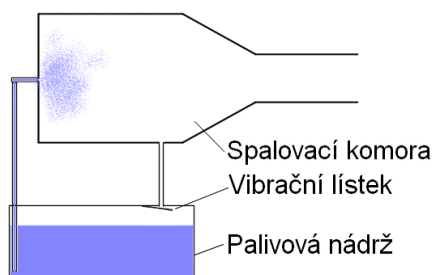
Palivo je pomocí tohoto vstřikovacího systému, aplikováno v podobě velkých kapek. Problém těchto velkých kapek však je, že se musí předem vypařit, aby mohly začít hořet. Naštěstí uvnitř spalovací komory vznikají vysoké teploty, které přispívají k odpaření velkých kapek.

Výhodou tohoto způsobu dopravy paliva je celková jednoduchost. Stačí nám pouze trubička s nádrží. Systém nevyžaduje tlakové nádoby ani jiná zařízení.

Automatické sání paliva má však řadu nevýhod. Jednou z nich je nízký efekt Venturiho trubice. Dopravované množství paliva je velmi malé. Při poklesu hladiny v nádrži na základě Bernolliovy rovnice se sníží množství nasávaného vzduchu. Pokud nádrž položíme moc nízko od vstupní dýzy, může se tok paliva zastavit úplně. Když palivovou nádrž položíme moc vysoko, bude kapalina vlivem gravitace samovolně vytékat do motoru a motor bude zahlcen. Tento nedostatek lze odstranit použitím tlakové nádrže.

Nastává otázka, jakým způsobem vytvoříme tlak v palivové nádrži?

Jedna z možností je použít tlakovou nádobu se stlačeným plynem, který budeme pouštět do nádrže. Tento způsob byl použit na německé bombě V-1. Lepší možností je využití změny tlaku ve spalovací komoře jak znázorňuje obrázek 37. Vibrační plíšek by se dal umístit přímo do spalovací komory. Ale při této alternativě vznikne nevýhoda nebezpečí vznícení motoru, jelikož horké spaliny mohou vniknout do palivové nádrže.



Obr. 37 Automatické sání paliva

5.5.2 Přímé vstřikování

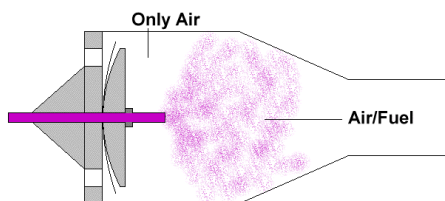
Prakticky všechny motory, které mají statický tah nad 90N používají přímé vstřikování paliva spíše než automatické sání. U tohoto způsobu se palivo vstřikuje přímo do spalovací komory pod tlakem. Chod motoru je tím daleko spolehlivější. Můžeme zde regulovat hmotnostní tok a tím měnit výkon motoru.

Systém přímého vstřikování vyžaduje určitým způsobem natlakované palivo. Jednou z možností je použít palivové čerpadlo, nebo natlakovat celou palivovou nádrž.

Na motoru Argus byla použita druhá možnost. Palivová nádrž byla natlakována stlačeným vzduchem. Stlačený vzduch poháněl ještě gyroskop a palubní řídicí systém.

Pro většinu menších pulzačních modelů je používáno palivo propan. Propan je v tlakové nádrži již stlačen. Nemusíme tedy přidávat stlačený vzduch do nádrže nebo použít čerpadlo. Motor při chodu nevyžaduje žádnou obsluhu.

Pro pulzační motory s lískovými ventily vede trubička s palivem uprostřed difuzoru a lískového ventilu (obr. 38). Trysky jsou umístěny za opěrkou ventilu. Při vstřikování kapalného paliva dochází vlivem vysokých teplot ve spalovací komoře k přeměně kapalného stavu paliva na plynné.



Obr. 38 Přímé vstřikování

5.5.3 Časované vstřikování

Nevýhodou přímého vstřikování je, že palivo je vstřikováno do pulzačního motoru po celou dobu cyklu. Přímé vstřikování je tedy velice neefektivní. Navíc musíme zajistit správný hmotnostní tok paliva do spalovací komory. Hmotnostní tok paliva je závislý na použitém typu paliva.

Existují dvě možnosti jak konstrukčně zajistit časované vstřikování, tedy vstřikování paliva jen v době sání. První možností je použít elektricky řízený časovač. Tento způsob je používán například u moderních automobilů. Je však značně náročný. Mnohem jednodušší možností je použití vibračního plíšku na konec trysky (obr. 39). Vstřikování paliva pracuje na stejném principu jako lískový ventil.



Obr. 39 Tryska u časovaného vstřikování

6 Přehled použitých paliv pro pulzační motory

Výhoda pulzačních motorů je, že mohou spalovat jakýkoliv typ paliva. Pulzační motory mohou spalovat plynná, kapalná, ale i paliva v pevném skupenství. Na konci druhé světové války bylo nedostatek kapalných paliv, proto Němci upravili motor Argus na spalování uhlého prachu.

Podle měření Princetonské Univerzity v roce 1947 bylo dokázáno, že výkon motoru nějak zvlášť nezávisí na použitém typu paliva. Palivo ovlivní pouze teplotu ve spalovací komoře a životnost vibračních lístků.

Mírné zvýšení výkonu můžeme docílit použitím nitropropanu nebo nitrometanu. Nicméně při volbě vhodného paliva je důležité dbát na cenu použitého paliva. V následující stati se budeme zabývat pouze nejpoužívanějšími palivy.

6.1 Benzín

Při použití benzínu dostaneme čisté spalování. Je těkavý, to znamená, že se snadno rozpráší ve spalovací komoře a snadno se vznítí při startu. U benzínu je rozhodujícím kritériem oktanové číslo. U pulzačních motorů platí, čím větší oktanové číslo, tím se nepatrně sníží výkon. Nevýhodou benzínu je zajištění požadovaného hmotnostního průtoku paliva do spalovací komory. Při použití benzínu se dá využít automatické spalování, přídavné čerpadlo, nebo natlakování nádrže (popsáno výše).

6.2 Propan-butan (LPG)

Propan je snadno dostupný. Cena propanu je srovnatelná s cenou benzínu. Po shoření propanu není cítit žádný zápach ani neprodukuje žádný odpad. Co se týče bezpečnosti, propan je sice stlačen v tlakové lahvi, ale také se velice rychle vypařuje, proto je jeho použití ještě bezpečnější než benzín. Bod varu propanu je nižší, než pokojová teplota, proto z trysky sání proudí v plynném skupenství, i když je v tlakové lahvi v kapalném stavu.

Při použití paliva v tlakové lahvi není potřeba použít regulátor. Regulátor snižuje tlak plynu. Při použití regulátoru nebude motor správně fungovat, pouze těkat. Pro řízení průtoku je možné zakoupit plynový hořák, který se přidělá mezi vstřikovací zařízení a tlakovou láhev. Další možností regulace průtoku plynu je využití jehlového ventilu. Jehlový ventil je snadno dostupný a nabízí jemnou regulaci průtočného množství.



Obr. 40 Plynový hořák

6.3 Butan

Butan se pro pulzační motory nepoužívá. Tento plyn v pulzačním motoru při pokojové teplotě nedokáže vyvinout tak vysoký tlak jako propan. Pro pulzační motory tedy není vhodné tento plyn použít.

6.4 Metanol

Jedná se o prudce jedovatou kapalinu, která patří pod skupinu alkoholů. Výhodou tohoto paliva je jeho nenáročnost na správný poměr palivo/vzduch. Palivo je schopno hořet při velkém rozsahu poměru palivo/vzduch, to znamená jednoduší zážeh a rozběh motoru. Srovnáme-li využití paliva metanol a benzín, pulzační motor poháněný metanolem dosahuje větších výkonů. Na druhou stranu metanol na sebe váže vlhkost. Při rozběhu motoru ve vlhkém prostředí může metanol způsobit horší zažehnutí motoru. Použití metanolu oproti jiným palivům je nebezpečné, protože metanol hoří bezbarvým plamenem. Pokud se metanol rozleje, může začít hořet bez viditelného plamene. Jako vedlejší produkt při spalování paliva vzniká voda a oxid uhličitý. Při použití metanolu se tedy může vyskytnout rez na vibračních lístcích motoru.

7 Závěr

Základním cílem bakalářské práce bylo navrhnout pulzační motor požadovaných rozměrů a vypočítat termodynamický cyklus motoru. V první části se autor zabývá popisem jednotlivých typů motorů, jejich konstrukcí a dosaženého tahu. V odstavci termomechanika, byl čtenář seznámen s hlavními přínosy méj práce. Jedná se o tabulku vypočítaných hodnot v jednotlivých částech motoru a následný p-v diagram. Pro výpočty byly použity základní zákony popsáné ve skriptech [1] prof. Mareše a odvozené vztahy panem Tharrattem [14].

Zajímavým poznatkem této práce je rozdíl mého p-v diagramu oproti diagramu popisující Humpreyovův cyklus. Rozdíl diagramů je způsoben tím, že můj pulzační motor je počítán jakožto nehybný, kdežto Humpreyovův oběh je stanoven pro pulzační motor v letu, kde na vstupu motoru vzniká dynamický tlak.

Na základě teorie a podkladů amatérských výrobců pulzačních motorů byl navržen pulzační motor požadovaných rozměrů a narýsována výrobní dokumentace. Podle navržené dokumentace bude motor vyroben. Na motoru bude možno provádět měření veličin a porovnat naměřené veličiny s vypočítanými. Další možností uplatnění motoru je přidělat motor na nejrůznější dopravní prostředky, kde bude motor sloužit jako pohonná jednotka.

8 Publikace

- [1] MAREŠ, R., *Kapitoly z termomechaniky*, Plzeň: ZČU, 2009
- [2] FREDERIK, WEBSTEK, *Insidethe pulse jet engine*, 2000
- [3] BRUCE, SIMPSON, *The Enthusiast's Guide to pulsejet engines*, 2005
- [4] LINHART, J., *Mechanika tekutin*, Plzeň: ZČU, 2009, ISBN 978-80-7043-766-7
- [5] OGORELEC, BRUNO, *Valveless Pulsejet Engines 1.5*, 2005
- [6] NAUGHTON, THOMAS, *Design, Construction & Analysis of a Pulsejet Engine*, the University of Limerick, 2010
- [7] WESTBERG, FREDRIK, *Inside the pulsejet engine*, 2000
- [8] ROLLS ROYCE, *the Jet engines*, 1996, ISBN 0902121 235
- [9] WIKIPEDIA, http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse_jet_engine
- [10] <http://www.pulsejetengines.com/>
- [11] MZAK PICTURES, <http://www.leteckemotory.cz/teorie/teorie-konstr-01.php>
- [12] <http://aardvark.co.nz/pjet/valveless.htm>
- [13] GARY WEAVER,
http://www.clstunt.com/htdocs/dc/dcboard.php?az=show_topic&forum=103&topic_id=358202
- [14] Tharratt, C.E., *The Propulsive Duct*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 38 Iss: 2, pp.328 – 364, 1965
- [15] *Věda a technika mládeži*, str. 79