VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

SPALOVACÍ KOMORY LOPATKOVÝCH MOTORŮ S NÍZKÝMI EMISEMI NOX
LOW NOX EMISSION COMBUSTION CHAMBER OF TURBINE ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Šafránek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Letecký ústav
Student:	**Martin Šafránek**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.**
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Spalovací komory lopatkových motorů s nízkými emisemi NOx

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Moderní letecké lopatkové motory musí plnit stále přísnější požadavky na vypouštěné emise. Pro dosažení nízkých emisí mají zásadní roli spalovací komory, které musí plnit protichůdné požadavky. Úkolem práce je zmapovat probíhající vývoj a zmapovat úskalí vznikající při návrhu nízko emisních spalovacích komor.

Cíle bakalářské práce:

1) Rešerše předpisové základny, popis norem CAEP.
2) Popis příčin vzniku nežádoucích emisí a možností jejich snížení.
3) Stávající konstrukčních řešení s rozborem výhod a nedostatků.
4) Shrnutí a provedení odhadu budoucího vývoje.

Seznam doporučené literatury:

KOCÁB J., ADAMEC J. (2000): Letadlové motory. 1. vyd. Praha: Kant, 176 s. ISBN 80-902914-0-6.

DALY M., GUNSTON B. (2007): Jane's aero-engines. Coulsdon: Jane's Information Group Limited, 778 s.: il., čb. fot. ISBN 1748-2534.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 2. 10. 2017

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT
Bakalářská práce se zabývá souhrnným popisem spalovacích komor lopatkových motorů s nízkými emisemi NO_X. Popisuje především děje, které se odehrávají ve spalovacích komorách a mechanismy vzniku všech sledovaných emisí. Zaměřuje se také na popis nejdůležitějších konstrukčních parametrů, jejich odhadovaný vývoj, zhodnocení a použití v civilní letecké dopravě. Dále se tato práce zabývá legislativou různých organizací, které vytváří certifikační standardy k regulaci množství vypouštěných emisí.

ABSTRACT
Bachelor thesis examines Low NOx emission combustion chamber of turbine engines. It describes in particular the events taking place in the combustion chambers and the mechanisms of generating all monitored emissions. It also focuses on the description of the most important design parameters, their estimated development, assessment and use in civil aviation. Further, this thesis deals with the legislation of various organizations that create certification standards for regulating the amount of emissions emitted.

KLÍČOVÁ SLOVA
lopatkový motor, emise, NO_X, ICAO, CAEP, DAC, TAPS, NEWAC, RQL, LBC, spalovací komora, LDI, LTO

KEY WORDS
jet engine, emissions, NO_X, ICAO, CAEP, DAC, TAPS, NEWAC, RQL, LBC, combustion chamber, LDI, LTO

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Šafránek, M. *Spalovací komory lopatkových motorů s nízkými emisemi NO_X.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018, 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Spalovací komory lopatkových motorů s nízkými emisemi NO_X vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a zdrojů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne 23. května

.....
Martin Šafránek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Šplíchalovi, Ph.D. za cenné rady a podnětné připomínky při zpracování bakalářské práce.

OBSAH

1 ÚVOD ... 3
2 LEGISLATIVA UPRAVUJÍCÍ EMISE LETECKÝCH MOTORŮ ... 5
2.1 Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO) ... 5
2.2 Výbor pro ochranu životního prostředí (CAEP) ... 6
2.3 Vývoj standardů ... 6
2.4 Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA) ... 7
3 EMISE V LETECKÉ DOPRAVĚ ... 8
3.1 Ověření emisní způsobilosti ... 8
3.2 Kouřovitost ... 9
3.3 Plynné emise ... 9
4 SPECIFICKÉ EMISE V LETECKÉ DOPRAVĚ ... 10
4.1 Oxidy dusíku ... 10
4.2 Oxidy uhlíku ... 12
4.3 Nespálené uhlovodíky ... 13
4.4 Pevné částice ... 14
5 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ EMISÍ ... 15
5.1 Použití alternativních paliv ... 15
5.2 Rozvoj infrastruktury ... 16
5.3 Obchodování s emisemi ... 16
6 SPALOVACÍ KOMORA ... 17
6.1 Požadavky ... 17
6.2 Volba materiálu ... 18
6.3 Proudění a spalování ... 18
6.4 Stabilita spalování a účinnost ... 19
6.5 Vznik emisí ve spalovací komoře ... 20
6.6 Typy spalovacích komor ... 22
6.6.1 Trubková spalovací komora ... 22
6.6.2 Prstencová spalovací komora ... 23
6.6.3 Smíšená spalovací komora ... 24
7 NÍZKOEMISNÍ SPALOVACÍ KOMORY ... 25
7.1 Stávající metody nízkoemisního spalování ... 25
7.1.1 Rich burn, Quick quench, Lean burn ... 25
7.1.2 Lean Burn Combustion ... 27

7.2 Vývoj nízkoemisních metod spalování 28
7.2.1 Lean Direct Injection 29
7.2.2 Partial Evaporation & Rapid Mixing 30
7.2.3 Lean Premixed Prevaporised 30
7.3 Nízkoemisní komory 31
7.3.1 Double Annular Combustor 31
7.3.2 Twin Annular Premixing Swirler 32
7.3.3 Variable geometry combustors 33
7.3.4 Trapped vortex combustion 34
7.4 Zhodnocení a vývoj nízkoemisních komor 35
7.4.1 Účinnost spalování 35
7.4.2 Tlakové ztráty 35
7.4.3 Vývojové projekty 36
8 ZÁVĚR 38
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 39
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 42
11 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ 44

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou spalovacích komor. Jedná se hlavně o popis současných spalovacích komor z hlediska procesů, které se uvnitř komor odehrávají, konstrukce, tvorby jednotlivých emisí a možnostmi vývoje moderních nízkoemisních komor. Spalovací komora jako konstrukční prvek má klíčový vliv na tvorbu emisí, proto je třeba dále se zabývat legislativou upravující toto množství. Historický vývoj, tvorba standardů a certifikačních předpisů jsou nedílnou součástí legislativ jednotlivých organizací, které tyto předpisy vydávají a kontrolují jejich dodržování.

Již před začátkem druhé světové války si inženýři začali uvědomovat, že schopnosti vrtulových motorů se začínají stávat nedostačující. Hlavně pokud jde o maximální výkon, který je limitován účinností vrtule. Bylo tedy nutné vrtulové motory nahradit jinou koncepcí. Již v roce 1932 získal Brit Frank Whittle patent na první proudový motor. První úspěšné testy proběhly s německým motorem HeS 3 o tahu 4,9 kN. V roce 1939 provedl letoun He 178 s tímto motorem historicky první let. První operačně nasazený letoun byl v roce 1944 Messerschmitt Me 262 Schwalbe. Vývoj proudových letadel začal koncem druhé světové války a trvá dodnes.[1]

S nárůstem letecké dopravy přímo souvisí zvýšené množství produkovaných emisí. Za poslední dekádu došlo ke značné globalizaci obchodu. To má za následek zvýšení přepravy osob a zboží. Počet cestujících v letecké dopravě se v Evropě i po celém světě od roku 1990 ztrojnásobil. Dalším příkladem je nárůst obchodu v zemích s rozvíjející se ekonomikou, který obnáší prodloužení cestovních vzdáleností. Došlo také ke zlevnění letenek, a na trhu vzrostl počet nízkonákladových dopravců, jejichž podíl na celkovém počtu letů se za posledních deset let zdvojnásobil.[2]

Emise mají přímý dopad na znečištění životního prostředí, hlavně v okolí letišť. Za hlavní znečišťovatele, které letadla produkují se označují oxidy dusíku zodpovědné za úbytek ozonu a tvorbu kyselých dešťů. Oxidy uhlíku, který mnoho studií spojilo s globálním oteplováním. Letadla v současné době vyrábí asi 4 % roční celosvětové produkce a předpokládá se, že tento podíl se v příštím desetiletí zvýší. Produkci kouře a nespálených uhlovodíků můžeme v současné době díky značnému pokroku v oblasti vývoje proudových motorů označit za téměř nulové. Produkce vodní páry se obecně nepovažuje za znečišťující, i když existují určité důkazy, že zvýšení vodní páry ve stratosféře způsobí vznik oblačnosti. Hlavní specifikum letecké dopravy je fakt, že emise jsou vypouštěny ve výškách 8 až 12 000 metrů, kde pozorujeme odlišné dopady na životní prostředí, něž bezprostředně u země. Podle agentury EPA letouny představují 12 % všech emisí a 3 % celkových emisí skleníkových plynů.

Aby se určitým způsobem regulovalo množství vypouštěných emisí, musí letadla splňovat certifikační standardy vydané Mezinárodní organizací pro civilní letectví ICAO, konkrétně podvýborem CAEP. Tyto standardy jsou obsaženy v příloze (Annex) 16 svazek II: Emise letadlových motorů. Postupem času se tyto požadavky stávají přísnější a výrobci leteckých motorů, zejména Rolls-Royce a General Electric, musí na tento trend reagovat. Aby tyto požadavky mohly být splněny, investují se nemalé finanční prostředky do vývoje spalovacích komor.

S postupným snižováním emisí rostl počet požadavků na provoz spalovacích komor, které si zpravidla odporují. Snahou je dosáhnout ideální podmínky pro spalování při dodržení minimálních tlakových ztrát. To znamená přivádět do komory dostatečné množství vzduchu, zajistit nízkou rychlost proudění a udržet vysoké teploty spalování po nezbytně dlouhou dobu, a to za všech provozních podmínek.

Spalování musí mít velmi vysokou účinnost, se kterou se přímo váže ekonomie provozu a množství produkovaných emisí. Snížit produkci emisí můžeme několika způsoby, zejména vhodnou volbou způsobu spalování. Nové koncepce spalovacích komor využívají hlavně metody hoření bohaté (RQL) a chudé (LBC) palivové směsi. Spalovací prostor těchto komor je rozdělen na dvě části-pilotní a hlavní. Tyto zóny pracují v závislosti na požadovaném výkonu motoru. Metody hoření RQL a LBC mají velký potenciál a v této oblasti se předpokládá značný vývoj.

V budoucnu se předpokládá použití nových ekologických paliv, například vodíku a energie z obnovitelných zdrojů.

2 LEGISLATIVA UPRAVUJÍCÍ EMISE LETECKÝCH MOTORŮ

Od druhé poloviny dvacátého století se vytváří určitý tlak na snižování produkce emisí v letecké dopravě. Z toho důvodu po celém světě začaly vznikat organizace, které se zabývají úpravou a regulací emisních dopadů na životní prostředí. Mezinárodní organizace pro civilní letectví ICAO (International Civil Aviation Organization) působí na celosvětové úrovni, jejím protějškem je Evropská agentura pro bezpečnost letectví EASA (European Aviation Safety Agency) a Agentura pro ochranu životního prostředí EPA (Environmental Protection Agency) působící na území USA. V České republice je za úpravu emisní legislativy zodpovědný Úřad pro civilní letectví (ÚCL). Skupina leteckých dopravců ATAG (The Air Tactical Assault Group) je jednou z organizací v soukromém sektoru. Vládním subjektům nabízí hlavně poradenství ohledně návrhů a doporučených postupů k emisní problematice.

2.1 Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO)

Mezinárodní organizace pro civilní letectví je nejdůležitější mezinárodní organizace na světě spadající pod OSN (United Nations). V roce 1944 na základě pozvání 54 států se Chicagu konala Mezinárodní konference civilního letectví. Mezi nimi i tehdejší Československo. 7. prosince zde byla podepsána Úmluva o mezinárodním civilním letectví, která se označuje jako nejdůležitější dokument celé organizace. Dnes je známá jako Chicagská konvence. Zároveň byla zřízena Prozatímní mezinárodní organizace pro civilní letectví PICAO (The Provisional International Civil Aviation Organization). Konference položila základy pro soubor pravidel a předpisů týkající se letecké navigace jako celku, které zvýšily bezpečnost při létání a připravily cestu pro uplatnění společného leteckého navigačního systému na celém světě. [3][4]

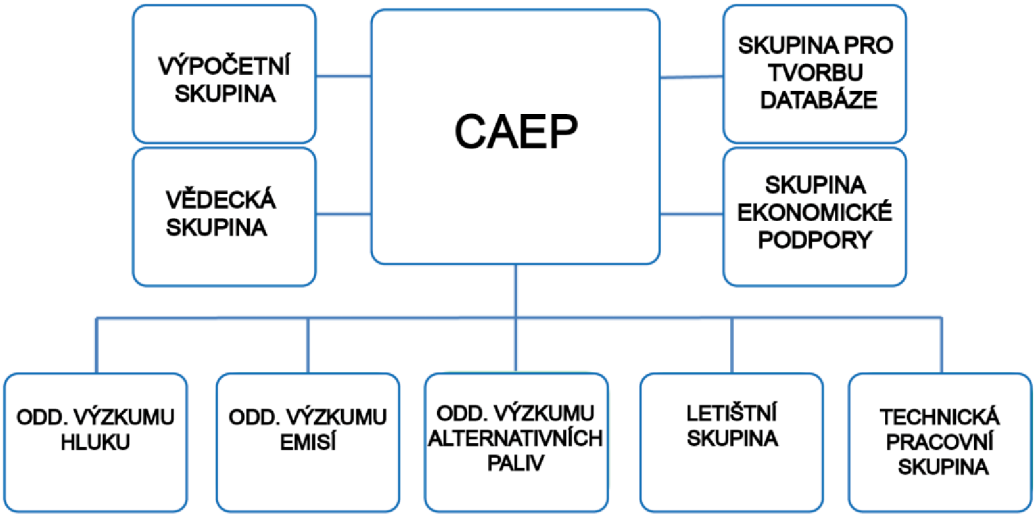
Samotná organizace ICAO vznikla až 4. dubna 1947. Jejím hlavním úkolem je sjednocení standardů, doporučených postupů, účinného, bezpečného a ekonomicky udržitelného sektoru pro civilního letectví. Cílem činnosti je také zajištění bezpečné letecké přepravy mezi členskými státy. Rovněž koordinuje pomoc a poradenství ohledně výstavby a zabezpečení letišť a vlastně celé globální letecké infrastruktury. [5]

Úmluva o vzniku ICAO byla doplněna přílohami (anexy), což jsou předpisy pro jednotlivé činnosti v civilním letectví. Jde o základní řadu příloh označených ICAO Annex 1 až 18. Smyslem jednotlivých annexů je stanovení minimálních požadavků a doporučení. Pro aplikaci do legislativ členských států se doporučuje, aby letecké předpisy v rámci národních zákonů byly přísnější než tyto minimální požadavky. Veškeré úsilí aplikovat přepisy ICAO do civilního letectví směřuje k vyšší bezpečnosti letecké dopravy. Od vzniku letecké dopravy se přílohy úmluvy zvýšily na více než 12 000 mezinárodních norem a doporučených postupů SARP (Standards And Recommended Practices). Dnes tato mezinárodní organizace se sídlem v Montrealu zahrnuje 192 států, mezi nimi i Českou republiku.[5]

2.2 Výbor pro ochranu životního prostředí (CAEP)

Výbor pro ochranu životního prostředí CAEP (The Committee on Aviation Environmental Protection) je technickou komisí ICAO zřízenou v roce 1983. Vytváří studie formuluje nové strategie ohledně dopadu na životní prostředí. Jeho rozsah činností zahrnuje výzkum hluku v okolí letišť, kvality ovzduší, zejména regulaci emisí CO_2 a NO_X, včetně leteckých technologií pro zlepšení provozu. Dále poskytuje hodnocení trendů v oblasti ochrany životního prostředí a budoucích prognóz o letecké dopravě. Hodnocení a návrhy CAEP jsou prováděny s ohledem na technickou proveditelnost, přínos pro životní prostředí, ekonomii provozu a další.[6]

Komise se schází každé tři roky za účelem stanovení krátkodobých, střednědobých i dlouhodobých plánů na snížení produkce emisí. Výsledkem každého zasedání je obsáhlá zpráva. Poslední zpráva, která byla vydána, se označuje jako CAEP/10. Poslední schůze výboru se uskutečnila v Montrealu 1. až 12. února 2016.[7]



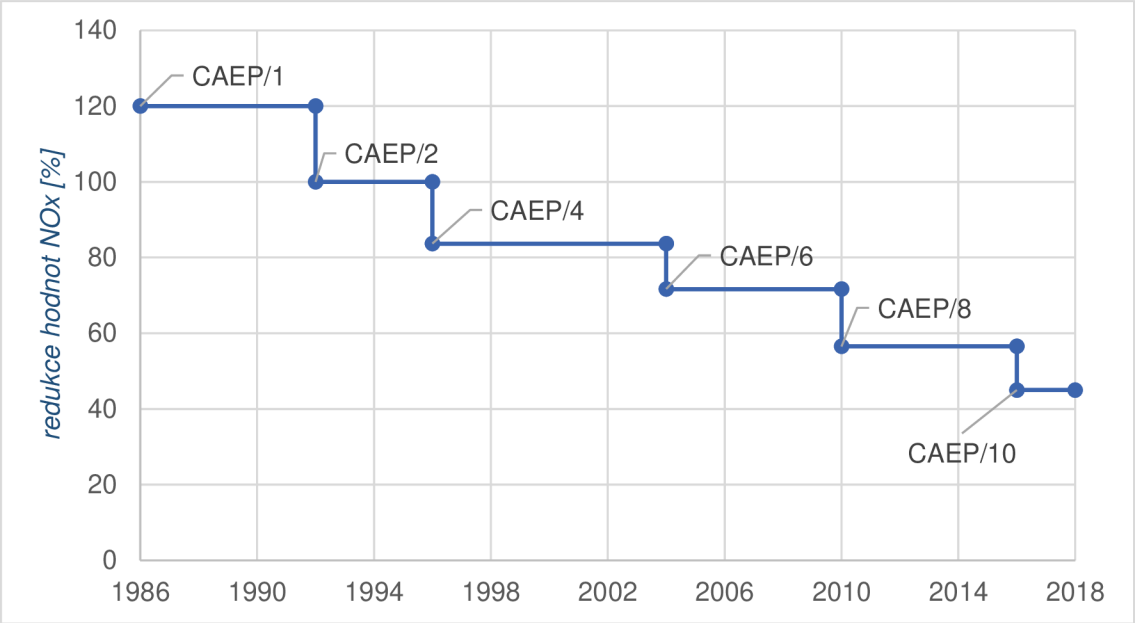
Obr. 1 Struktura podvýboru CAEP [8]

2.3 Vývoj standardů

Standard pro NO_X má zvláštní význam. Poprvé byl přijat v roce 1981 a v následujících letech se stále zpřísňoval. V roce 1986 byl přijat první komplexní standard popisující množství vyprodukovaného CO_2, NO_X, kouře a nespálených uhlovodíků pod názvem CAEP/1. Vzhledem k tomu, že v té době nebyla zatím problematika emisí více prozkoumána, regulované hodnoty byly vesměs bezvýznamné a neúplné. Všechny nadcházející standardy se proto odkazují k CAEP/2, jehož hodnoty se berou jako referenční.[9]

Jeden z nejvýznamnějších odborných posudků zabývající se produkcí NO_X byl roku 2010 publikován v CAEP/8. Obecně se CAEP/8 soustředí na problematiku pevných emisních látek, protože v porovnání s těkavými látkami je výzkum v této oblasti mnohem pokročilejší. Hlavním tématem standardu je regulace množství NO_X, která snižuje současný stav až o 15 %. Dále bylo dohodnuto ukončení výroby motorů podle starého standardu s účinností od 31. prosince 2012. Navíc byl odsouhlasen nulový růst uhlíkových emisí, a to od roku 2020. Někteří členové dokonce aplikovali tento cíl na všechny formy emisí. Podobným způsobem se přijala opatření pro snížení spotřeby paliva, kterých je možné dosáhnout snižováním hmotnosti, vyšší optimalizací systému letadel, zlepšením aerodynamiky a účinnosti motoru. [9]

Na konferenci v Montrealu roku 2013 byly schváleny nové certifikace standardů CO_2. Dále byly prezentovány výsledky střednědobých a dlouhodobých cílů pro technologie snižování spotřeby paliva a redukce hluku. Zatím poslední soubor standardů s názvem CAEP/10 přijala schůze ICAO 3. března 2016. Jedná se o nový energeticky nezávislý standard pro emise pevných částic zabývající se různými otázkami technické implementace, zavedení nové normy emisí CO_2 NO_X a hluku.[10]



Obr. 2 Vývoj standardů CAEP s dílčími snižovanými hodnotami produkce NO_X [11]

2.4 Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA)

Evropská agentura pro bezpečnost letectví je letecký úřad Evropské unie pověřený regulačními a výkonnými úkoly v oblasti civilního letectví. Byla založena v Kolíně nad Rýnem 23. září 2003. Mezi hlavní úkoly agentury patří schvalování předpisů, certifikace, prosazování evropských a světových bezpečnostních a emisních norem. Vypracování technických pravidel, typové osvědčení letadel a komponentů. Schvalování společností, které zajišťují konstrukci, výrobu a údržbu leteckých výrobků. Bezpečnostní dohled a podpora pro země EU a to hlavně v oblasti ochrany životního prostředí, řízení letového provozu a spolupráce s mezinárodními partnery.[12]

Vyhlášky jsou závazné a bezprostředně použitelné v každém členském státě. Nařízení má aplikační přednost před národními právními předpisy. Angažuje se v ní také Evropské sdružení volného obchodu (ESVO, angl. EFTA-European Free Trade Association), které zastupuje země nepatřící do EU. [13]

3 EMISE V LETECKÉ DOPRAVĚ

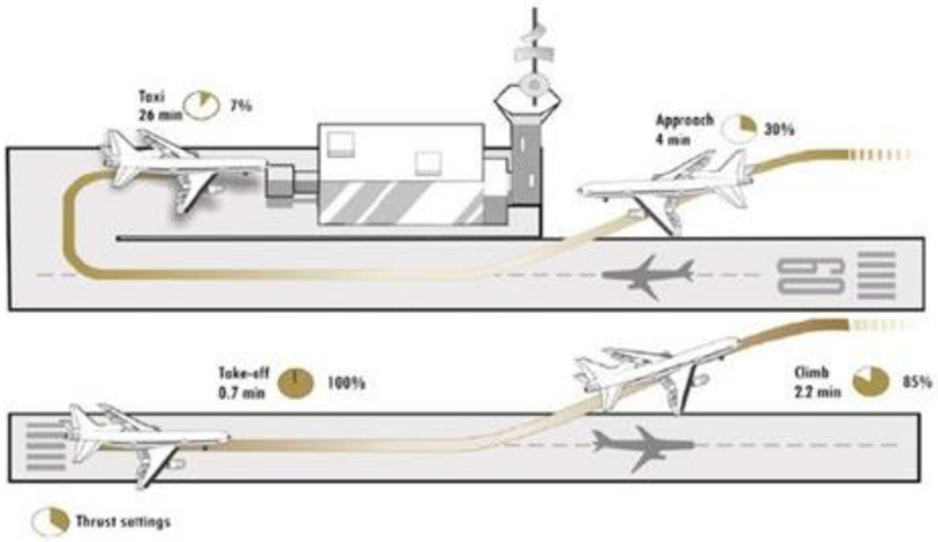
Celkově mají emise produkované letovým provozem 3,5 % podíl na změnách klimatu způsobených člověkem. Základním řešením problému je stanovit emisní limity pro letecké motory, což je hlavním úkolem ICAO. Produkci emisí můžeme posuzovat ve dvou různých režimech. První se týká vlivu na životní prostředí, jako je globální oteplování, změny klimatu a poškozování ozonové vrstvy. Týká se především letu, kdy je spálena většina paliva. Druhý se týká bezprostřední blízkosti letiště. Zahrnuje procesy spouštění motorů letadla, pojíždění, vzlet a přistání. [14][15]

Tyto limity jsou definovány v příloze (Annex) číslo 16 k Chicagské konvenci, Úmluvy o mezinárodním civilním letectví. Tato příloha se v současnosti skládá ze dvou svazků, tj. Svazku I: Hluk letadel a svazek II: Emise letadlových motorů. V České republice je tento dokument Ministerstvem dopravy označen L/16.[9]

3.1 Ověření emisní způsobilosti

Emise jsou měřeny během takzvaného cyklu vletu a přistání LTO (Landing and Take-Off), který je přímo popsán v příloze 16. Průběh cyklu je následující. Letadlo spustí své motory, pojíždění na začátek přistávací dráhy, vzlet, výstup do výšky 915 m. n. m., pak následuje klesání, přistání, pojíždění na stání a vypnutí motorů. [16]

Celé měření musí být uskutečněno za předepsaných atmosférických podmínek. Výsledky jsou ukládány do datové banky pro emise výfukových plynů, která byla vydána v roce 1995 a obsahuje komplexní databázi údajů o certifikaci emisí z letadlových motorů. Aktualizace datové banky jsou k dispozici na internetových stránkách ICAO.[9]



Obr. 3 Postup měření cyklu vzletu a přistání (LTO) [17]

Pro komplexní měření je postup LTO příliš omezený, protože letadlo nepřesáhne výšku 915 m. n. m. Tato výška je vhodná pro řešení problematiky přímého vlivu emisí na zdraví obyvatelstva v okolí letišť, ale nijak neřeší problematiku působení emisí letecké dopravy na atmosféru. Jinou možností je měření emisí přímo za letícím letadlem, které je ale velice problematické a v praxi se proto nepoužívá. V současné době jsou limity pro jednotlivé látky nastaveny tak vysoké, že současné motory nedosahují většinou ani 50 % maximálních povolených hodnot. [18]

3.2 Kouřovitost

Udává tzv. kouřové číslo. Zaznamenává se při všech čtyřech LTO provozních režimech nastavení tahu motoru a nesmí překročit hladinu stanovenou následujícím vztahem:

$83{,}6(F_\infty)^{-0{,}274}$ nebo hodnota 50, a to podle toho, která hodnota je nižší[1] (3-1)

3.3 Plynné emise

Tab. 1 Pro výpočet údajů o plynných emisí musí být dodrženy následující hodnoty:[1]

Fáze	Nastavení tahu [%]	Čas provozního režimu [min]
Vzlet	100	0,7
Stoupání	85	2,2
Přiblížení	30	4,0
Pojíždění na volnoběh	7	26,0

Hladiny plynných emisí nesmí překročit předepsané hladiny stanovené podle následujících vztahů:[1]

uhlovodíky (CH): $$\frac{D_p}{F_\infty} = 19{,}6 \quad (3\text{-}2)$$

oxid uhelnatý (CO): $$\frac{D_p}{F_\infty} = 118 \quad (3\text{-}3)$$

oxidy dusíku (NO_X):[2] $$\frac{D_p}{F_\infty} = 40 + 2\pi_\infty \quad (3\text{-}4)$$

Tab. 2 V uvedených vztazích se vyskytují tyto veličiny

Veličina	jednotky	funkce
D_p	[g]	hmotnost kterékoli plynné znečišťující látky vypuštěné během cyklu LTO
F_∞	[kN]	jmenovitý tah
π_∞	[-]	referenční poměr stlačení

Pro každý motor, který byl měřen pro účely ověření emisní způsobilosti, musí být k dispozici následující údaje pro každé nastavení tahu motoru:

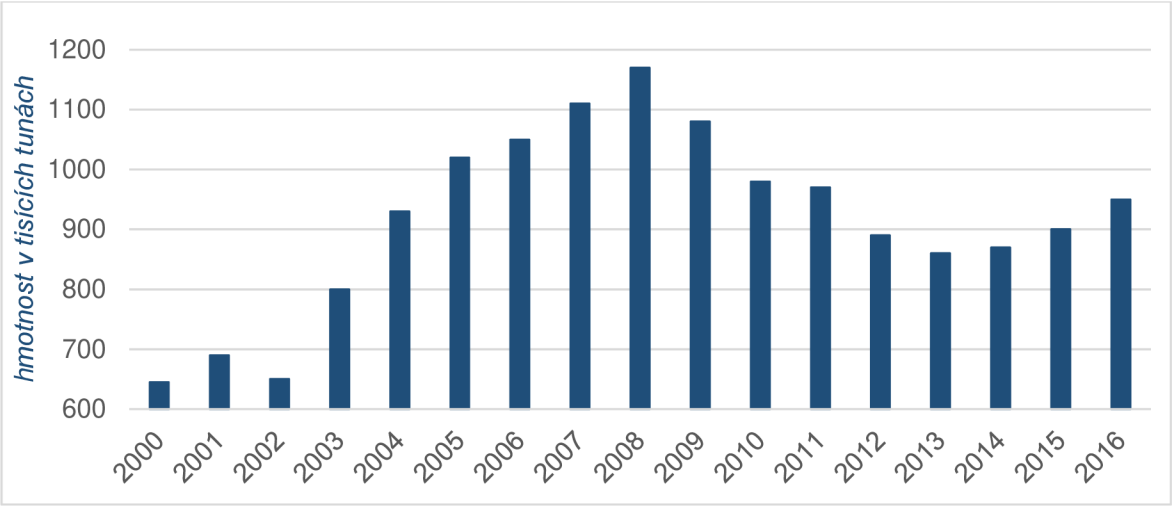
a) průtok paliva (kilogramy za sekundu)
b) emisní index (gramy na kilogram) pro každou plynnou znečišťující látku
c) naměřené kouřové číslo
d) celková hrubá emise každé plynné znečišťující látky, změřená v průběhu LTO cyklu
c) hodnoty D_p/F_∞ pro každou plynnou znečišťující látku (gramy na kilonewton) [16]

[1] Uvedené vztahy a hodnoty platí pouze pro proudové a dvouproudové motory určené k pohonu při podzvukových rychlostech
[2] Uvedený vztah platí pouze pro motory schváleného typu nebo verze, které byly vyrobeny sériově do 1. 1. 1996 a pro motory vyráběné kusově do 1. 1. 2000

4 SPECIFICKÉ EMISE V LETECKÉ DOPRAVĚ

Za hlavní znečišťovatele, které letadla produkují můžeme označit oxidy dusíku (NO_X), uhlíku (CO_X), kouř (saze) a nespálené uhlovodíky (CH). Hlavní specifikum letecké dopravy je fakt, že emise jsou vypouštěny ve výškách 8 až 12 000 metrů nad povrchem země, čímž zaznamenáváme jiné dopady na životní prostředí, něž u subjektů na povrchu.[14]

Celkové množství produkovaných emisí se každý rok navyšuje. V tomhle ohledu byl rekordní rok 2008, kdy se produkce emisí pohybovala kolem 1200 kilotun. V roce 2009 zaznamenáváme prudký propad zapříčiněnou celosvětovou ekonomickou krizí. V posledních letech se celkový objem opět navyšuje.



Obr. 4 Množství všech emisí vyprodukovaného leteckou dopravou [19]

4.1 Oxidy dusíku

Oxidy dusíku (NO_X) jsou vedlejším produktem spalování. Jejich vznik je do značné míry závislý na teplotě. K průběhu reakcí je zapotřebí vysokých teplot okolo 2000 °C. V nižších hladinách zvyšují koncentraci ozónu, který podporuje skleníkový efekt a vznik kyselých dešťů. Naopak produkce těchto oxidů ve velkých výškách, zejména ve stratosféře, kde se nachází většina leteckých koridorů, ozón rozkládá. [20]

Připomeňme, že ozón má na samotnou lidskou existenci nedozírný vliv. Tyto molekuly chemického složení O_3 zabraňují ultrafialovému záření pronikat na zemský povrch. Kdyby zmíněné UV paprsky prošly na zemský povrch bez ztráty energie v ozonové vrstvě, byly by mimořádně nebezpečné, protože vysoká energie fotonů vede ke vzniku různých onkologických onemocnění a poškození zraku. Faktorů pro rozpad ozonové vrstvy ve výškách kolem 25 kilometrů je více, v minulosti to byly například freony, které se používaly jako medium v chladících zařízeních. [21]

Emise oxidů dusíku produkované letovým provozem tvořilo v roce 2008 3 % jeho celkové produkce způsobené lidskou činností. V roce 2050 by tento podíl měl tvořit až 5 % celkové produkce za předpokladu 10 % nárůstu letového provozu ročně. V horizontu 5 až 10 let má letecký průmysl ambice snížit svůj podíl na celkové produkci až o 50 %.[19]

Množství produkovaných emisí (nejen NO_X, ale i ostatních) můžeme předpovědět na základě vzorců, které jsou založeny na výsledcích zkoušek různých leteckých pohonných jednotek. Nejčastěji používané metodiky výpočtů vycházejí z výzkumů A. H. Lefebvra a N. Rizka - H. Mongia.

Produkce se měří pomocí tzv. emisního indexu (EI), který vyjadřuje množství škodlivin v gramech na kiligram spotřebovaného paliva (g/kg_{palivo}). V následujících vzorcích se vyskytují různé veličiny. Některé, jako je absolutní tlak na výstupu z kompresoru (P_3), objem spalované směsi (V_c) nebo teplota v primární zóně spalování (T_{pz}), můžeme ovlivnit vhodným složením dodávané směsi. Jiné parametry, jako průměr trysky (SMD) a spalovací komory (D_0), jsou ovlivněny samotnou konstrukcí spalovací komory.[22]

Tyto veličiny přímo ovlivňují množství produkovaných emisí. Aby spalování bylo co nejdokonalejší, tedy v s minimální produkcí částic NO_X, je třeba zajistit působení vysokých teplot jen po minimální dobu. Z uvedených vzorců vyplývá, že veličiny, které mají na tvorbu emisí NO_X největší vliv, jsou čas (t) a teplota v primární zóně spalování (T_{pz}).

Výpočet emisního indexu dle Lefebvra[23]:

$$El_{NO_X} = \frac{9 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{P_3}{1000}\right)^{1,25} \cdot V_c \cdot \exp(0{,}01 T_{st})}{m_{pz} \cdot T_{pz}} \tag{4-1}$$

Výpočet emisního indexu dle Rizk-Mongia[24]:

$$El_{NO_X} = 15 \cdot 10^{14} \cdot (t - 0{,}5 \cdot t_e)^{0,5} \cdot \exp\left(-\frac{71100}{T_{st}}\right) \cdot {P_3}^{-0,05} \cdot \left(\frac{\Delta P_{3-4}}{P_3}\right)^{-0,5} \tag{4-2}$$

Výpočet emisního indexu dle Odgers-Kretschmera[25]:

$$El_{NO_X} = 29 \cdot \exp\left(-\frac{21670}{T_C}\right) \cdot {P_3}^{0,66} \cdot [1 - \exp(-250t)] \tag{4-3}$$

Tab. 3 Souhrn veličin užitých ve vzorcích vyjadřující tvorbu škodlivin NO_X

Symbol	Rozměr	Veličina
EI_{NOx}	$[g/kg_{palivo}]$	emisní index NO_X
m_{pz}	[kg]	hmotnost palivové směsi na vstupu do komory
P_3	[Pa]	absolutní tlak na výstupu z kompresoru
ΔP_{3-4}	[Pa]	rozdíl tlaku před vstupem a za výstupem spalovací komory
t	[s]	čas spalování
t_e	[s]	čas odpařování směsi
T_c	[K]	teplota hoření směsi
T_{pz}	[K]	teplota v primární zóně spalování
T_{st}	[K]	teplota hoření dané stechiometrické směsi
V_c	$[m^3]$	objem spalované směsi

4.2 Oxidy uhlíku

Oxid uhelnatý (CO) je bezbarvý plyn bez zápachu. Má přibližně stejnou hustotu jako vzduch. Při vdechnutí se rychle váže na krevní barvivo hemoglobin a blokuje přenos kyslíku krví. Vzniká nedokonalým spalováním, tj. při nedostatku kyslíku. [20]

Při snížení teploty částečně oxiduje na oxid uhličitý (CO_2). Taktéž vzniká dokonalým spalováním a dýcháním. Je velice stálý, ve vyšších vrstvách atmosféry dokáže setrvat až desítky let. Ač se jeho koncentrace v atmosféře pohybuje kolem 0,04 %, značnou mírou přispívá ke skleníkovému efektu a globálnímu oteplování. Snahou posledních let je snížit produkci tohoto plynu ve všech lidských činnostech včetně letectví. V budoucnosti bude snížení produkce CO_2 vyžadovat používání alternativních paliv, jako je například vodík. [21]

Podobně jako u oxidů dusíku i zde dokážeme predikovat množství nežádoucích emisí. Toto množství se vyjadřuje buď pomocí emisního indexu nebo jako množství částic na milion ostatních částic (ppm). CO vzniká za nižších teplot než NO_X, přesto je jeho vznik podmíněn stejnými veličinami, tedy časem spalování (t) a teplotou v primární zóně (T_{pz}).

Výpočet emisního indexu dle Lefebvra[23]:

$$El_{CO} = \frac{86}{V_c - V_e} \cdot m_{\mathrm{pz}} \cdot T_{pz} \cdot \Delta P_{3-4} \cdot {P_3}^{0,5} \cdot \exp(-0{,}00345 T_{pz}) \tag{4-4}$$

$$V_e = \frac{0{,}55 \cdot m_{pz} \cdot {D_0}^2}{\rho_{pz} \cdot \lambda_{eff}} \tag{4-5}$$

Výpočet množství částic CO na milion částic dle Rizk-Mongia[24]:

$$CO = \frac{0{,}18 \cdot 10^9 \cdot \exp\left(\frac{7800}{T_{pz}}\right)}{{P_3}^{1,5} \cdot (t - 0{,}4 t_e) \cdot {\Delta P_{3-4}}^{0,5}} \tag{4-6}$$

Tab. 4 Souhrn veličin užitých ve vzorcích vyjadřující tvorbu škodlivin CO

Symbol	Rozměr	Veličina
D_0	[m]	průměr spalovací komory
El_{CO}	[g/kg$_{palivo}$]	emisní index oxidu uhelnatého
m_{pz}	[kg]	hmotnost palivové směsi na vstupu do komory
P_3	[Pa]	absolutní tlak na výstupu z kompresoru
ΔP_{3-4}	[Pa]	rozdíl tlaku před vstupem a za výstupem spalovací komory
t	[s]	čas spalování
t_e	[s]	čas odpařování směsi
T_{pz}	[K]	teplota v primární zóně spalování
V_c	[m^3]	objem spalované směsi
V_e	[m^3]	objem odpařeného paliva
λ_{eff}	[m^2/s]	konstanta odpařování
ρ_{pz}	[kg/m^3]	hustota směsi v primární zóně spalování

4.3 Nespálené uhlovodíky

Nespálené uhlovodíky (CH) se tvoří v místech s nízkou teplotou plamene, především ve štěrbinách a v blízkosti stěn spalovací komory. Koncentrace CH v závislosti na vzdálenosti od stěny má přibližně hyperbolický charakter. Všechny škodliviny, ale především emise CH, jsou rozhodujícím způsobem ovlivněny stylem tvorby směsi, průběhem a teplotou hoření a tvarem spalovacího prostoru. Tyto plyny mohou při vyšších koncentracích vyvolat zdravotní potíže, hlavně tím že jsou karcinogenní. V atmosféře jsou schopny setrvat až desítky let. [26]

Nespálené uhlovodíky vznikají v blízkosti stěn za nízké teploty. Se vzrůstající teplotou sice klesá množství CH, ale zároveň roste množství NO_X. Navíc kdybychom prodloužili proces spalování potřebný pro spálení CH, produkce NO_X by opět vzrostla.

Výpočet emisního indexu CH dle Lefebvra[23]:

$$El_{CH} = \frac{11764 \cdot m_{pz} \cdot T_{pz} \cdot V_c \cdot \exp(-0{,}00345 T_{pz})}{(V_c - V_e) \cdot {P_3}^{0{,}25}} \tag{4-7}$$

Výpočet množství částic CH na milion (ppm) dle Rizk-Mongia[24]:

$$CH = \frac{0{,}755 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(\frac{9756}{T_{pz}}\right)}{{P_3}^{1{,}1} \cdot (t - t_e)^{0{,}1} \cdot {\Delta P_{3-4}}^{1{,}2}} \tag{4-8}$$

$$t_e = \frac{SMD^2}{\lambda_{eff}} \tag{4-9}$$

Tab. 5 Souhrn veličin užitých ve vzorcích vyjadřující tvorbu škodlivin CH

Symbol	Rozměr	Veličina
El_{CH}	[g/kg$_{palivo}$]	emisní index oxidu uhelnatého
m_{pz}	[kg]	hmotnost palivové směsi na vstupu do komory
P_3	[Pa]	absolutní tlak na výstupu z kompresoru
ΔP_{3-4}	[Pa]	rozdíl tlaku před vstupem a za výstupem spalovací komory
SMD	[m]	průměr palivové trysky
t	[s]	čas spalování
t_e	[s]	čas odpařování směsi
T_{pz}	[K]	teplota v primární zóně spalování
V_c	[m^3]	objem spalované směsi
V_e	[m^3]	objem odpařeného paliva
λ_{eff}	[m^2/s]	konstanta odpařování

4.4 Pevné částice

Částicemi rozumíme jednak částice pevné jako jsou saze a kapalné jako uhlovodíky a sulfáty. Zjednodušeně je nazýváme kouř. Saze se tvoří při spalování kapek paliva v prostření s nízkou teplotou a malým množstvím vzduchu. Tvorba sazí se snižuje s rostoucím přebytkem vzduchu. Jsou nebezpečné, protože na svém povrchu mohou nést mutageny a kancerogeny. Působí i mechanickým drážděním a způsobují alergii.[26]

Od počátku 70. let došlo k výraznému poklesu produkce emisí a spotřeby paliva. Díky moderním technologiím již dnes téměř vymizela produkce oxidu uhelnatého, nespálených uhlovodíků a kouře.[2]

5 MOŽNOSTI SNÍŽENÍ EMISÍ

Cest, jak tyto limity nepřesáhnout a zajistit snižování ekologické zátěže, je několik. Základní předpoklad je snížit spotřebu paliva. Toho můžeme dosáhnout optimalizací letecké infrastruktury, rozdělováním emisních povolenek apod. V budoucnu se počítá s nahrazením kerosinu určitou formou alternativního paliva. V současné době veškeré úsilí snižovat spotřebu paliva a zároveň produkci emisí směřuje k vývoji nízkoemisních spalovacích komor.

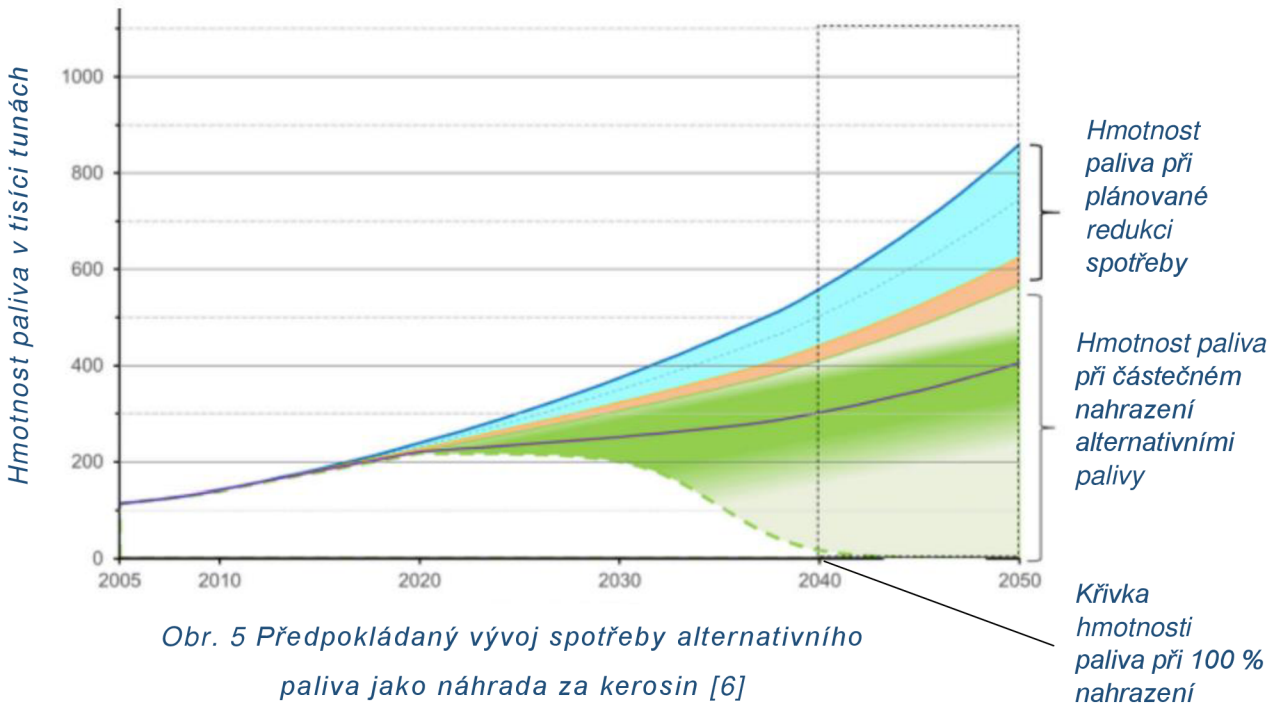
5.1 Použití alternativních paliv

Využití nových technologií by mělo přinést hlavně snížení spotřeby paliva, mezi jinými prostřednictvím výzkumu v oblasti pohonných jednotek a konstrukce letadel. Do budoucna se uvažuje využití alternativních druhů paliv a elektrické energie. Jako např. nahrazení kerosinu biopalivy nebo vodíkem.

V případě použití biopaliv není zásah do konstrukce současných spalovacích komor významný. Ale vzhledem k obrovskému objemu spotřebovaného paliva se zásadní problém biopaliv jeví v jeho nedostatku. Masová produkce by zásadně ovlivnila jiné sféry lidské činnosti. Samotné použití biopaliv ve vysoké míře tedy nemá význam, navíc ve velkých výškách v důsledku nízkých teplot tuhnou.

Použití vodíku vyžaduje nová konstrukční řešení motorů i samotných letadel. Dále je třeba najít nové možnosti dodávky a skladování nových druhů paliv. To přináší další požadavky na bezpečnost, která je v leteckém průmyslu stěžejní kritériem. Navíc hlavní problém u vodíku je jeho extrémní hořlavost.

V současnosti náhrada kerosinu prakticky neexistuje, proto se úsilí leteckých subjektů zaměřuje na jeho efektivní užívání. Pro srovnání silniční doprava má 75 % podíl na celkové spotřebě paliva v dopravním sektoru, zatímco letectví 12 %. Za dobu třicetiletého vývoje došlo také k přibližně 50 % zlepšení využití poměru palivo/pasažér/km.[14]



Obr. 5 Předpokládaný vývoj spotřeby alternativního paliva jako náhrada za kerosin [6]

5.2 Rozvoj infrastruktury

Další cestou je vylepšení infrastruktury, které pomáhá zavádění nových postupů na poli komunikací a navigace. Očekávanou úsporu tvoří 6 až 12 % spotřebovaného paliva na letadlo/let. Na řešení problému se mohou poskytovatelé letových a navigačních služeb podílet zkracováním času, po který se letadla pohybují po letištních plochách se spuštěnými motory. Létání v rozmezí optimálních cestovních rychlostí a zkracování doby pojíždění se teoreticky může ročně ušetřit až 300 000 tun paliva, a to jen v Evropě. Využitím konceptu flexibilního vzdušného prostoru se v Evropě ušetří přibližně 120 000 tun paliva ročně, což je přibližně ekvivalent 400 000 tun vyprodukovaného oxidu uhličitého. Úspornými a ekologicky účinnými opatřeními se zabývá například Mezinárodní asociace leteckých dopravců (IATA). Jedno z nich je snažit se zbavit letadla zbytečného zatížení, které přímo úměrně zvyšuje spotřebu paliva.[14]

5.3 Obchodování s emisemi

Možným řešením je vybírání daní z emisí, finanční kompenzace za produkci uhlíkových zplodin v podobě přidané hodnoty na palivu a obchodování s emisemi. Systém obchodování s emisemi v rámci Evropské unie EU ETS (European Union Emmision Trading System) vstoupil v platnost v roce 2003 jako důsledek směrnice Evropského parlamentu. Důvodem k vytvoření trhu s emisemi bylo dostát závazkům plynoucích z Kjótského protokolu, ve kterém se evropské státy zavázaly snížit množství vypouštěných skleníkových plynů způsobující globální změny klimatu. EU ETS určí maximální celkový limit skleníkových plynů, které smí všechny společnosti ve členských státech EU vyprodukovat. Společnost následně obdrží určitý počet povolenek k danému skleníkovému plynu. Tyto povolenky jsou volně obchodovatelné a umožňují společnostem potřebné povolenky získávat z různých zdrojů. Do programu jsou zapojeny všechny průmyslové subjekty, a hlavně letecká doprava. Program na území EU pokrývá 45 % produkce všech skleníkových plynů.[18]

Podstatou je, že celkové množství povolenek přidělených klesá a to o 1,74 % každý rok, což do roku 2020 povede ke snížení množství celkových emisí o 21 %. Cílem je v roce 2020 produkovat méně škodlivin než v roce 2003. Pro představu v roce 2003 byl celkový počet povolenek stanoven na 2 miliardy při ceně 7 eur/povolenka. Z celkového množství povolenek se 88 % rozděluje běžným způsobem, dalších 10 % je vyhrazeno pro chudší země a 2 % pro státy, které dokázaly od roku 1990 snížit svoje emise o více jak 20 %. Obchodování s povolenkami dále využívají země jako Nový Zéland, Austrálie a Švýcarsko. [18]

Primární cíle EU ETS jsou snížit množství emisí skleníkových plynů a motivovat producenty emisí k zavádění moderních technologií. Přestože EU ETS působí pohledem na vývoj emisí dobrým dojmem, emise v EU klesaly především z důvodu snížení ekonomické aktivity, způsobené celosvětovou ekonomickou krizí. Navíc v celosvětovém měřítku dochází ke znevýhodnění leteckých společností, které jsou do programu zapojeny vůči těm, které nejsou.[27]

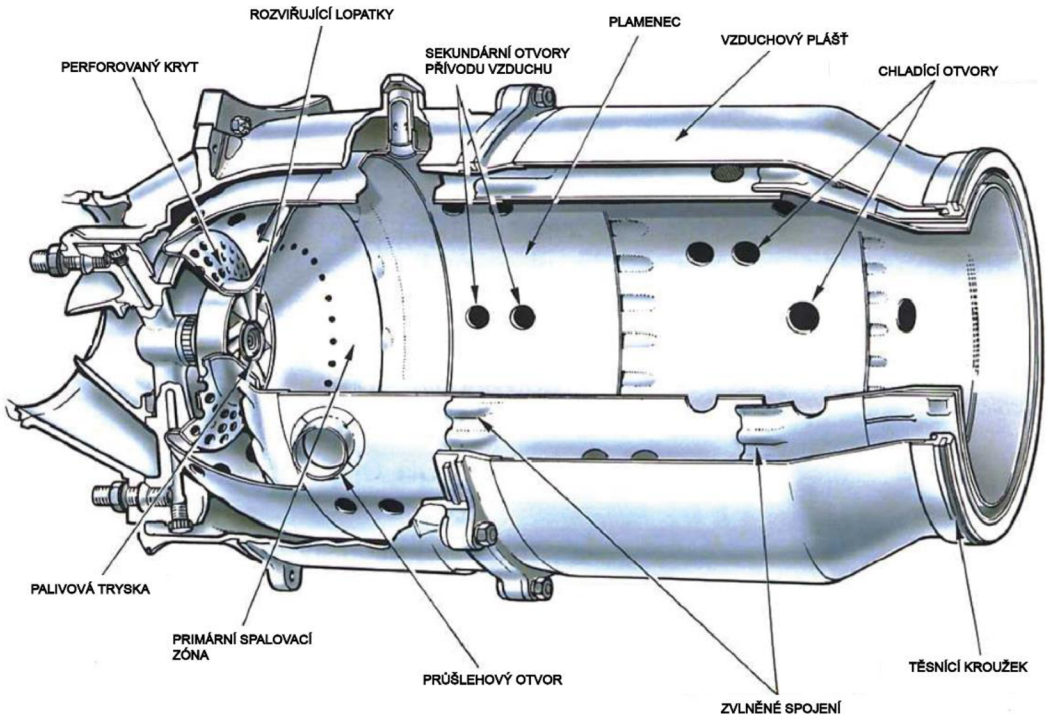
6 SPALOVACÍ KOMORA

Ve spalovací komoře je se do oběhu motoru přivádí energie v podobě kapalného paliva, nejčastěji kerosinu. Pomocí trysek se toto palivo rozprašuje a kontinuálně mísí se stlačeným vzduchem. Zažehnutím směsi se uvolní tepelná energie a horké plyny vycházející ze spalovací komory Ty pak roztáčejí turbínu v zadní části motoru, která přes hřídel vedoucí podélnou osou pohání kompresor. Za turbínou, ve výstupní trysce se tepelná energie mění na kinetickou, tím vzniká tah motoru.[28]

6.1 Požadavky

Požadavky, které spalovací komora ke své správné činnosti musí zajistit, si výrazně odporují. Spolehlivou práci celého motoru zaručuje stabilita hoření. Spalování musí mít velmi vysokou účinnost, která souvisí s ekonomií provozu a množstvím produkovaných emisí. Rovnoměrné teplotní pole na vstupu do turbíny po obvodovém i příčném směru je nezbytné, protože palivo nesmí dohořívat mimo komoru a plamen zasahovat do turbíny. Celý proces hoření musí být dosažen s minimální ztrátou tlaku a maximálního uvolnění tepla pro daný spalovací prostor. Dále musí být zajištěno spolehlivé spuštění na zemi i ve vzduchu. [20]

Spalovací komory lopatkových motorů musí mít přijatelnou velikost, aby se vešly mezi kompresor a turbínu. Zároveň se navrhuje co nejkratší hřídel, protože jeho velikost výrazně ovlivňuje hmotnost a mechanickou tuhost celého systému. [15]



Obr. 6 Trubková spalovací komora [20]

6.2 Volba materiálu

Spalovací komory jsou většinou vyráběny svařováním z žáruvzdorného plechu tloušťky 1,2 až 1,4 mm. Materiál je perforovaný, vyztužený nákružky, prolisy a žebry. Hlavice plamenců se někdy vyrábí jako tenkostěnné odlitky z žárupevných materiálů. V provozu je pravidelná kontrola plamenců velmi důležitá, zejména trhlinám a lokálnímu propálení se věnuje zvýšená pozornost. [20]

Inženýři musí zvolit nejen vysokoteplotní materiály, ale materiály schopné odolat vysokoteplotní oxidaci a zachovat si svůj tvar při provozu. Musí mít dostatečnou pevnost při vysokých teplotách, odolávat únavě, praskání, oxidaci a creepu (tendence materiálu pomalu měnit tvar při namáhání a vysoké teplotě). Vzhledem k tomu, že žádný kov nemá všechny požadované vlastnosti, volí se nejrůznější slitiny. Obecně to jsou slitiny na bázi niklu, kobaltu nebo železa. Například titan zaručí vysokou pevnost a prvky vzácných zemin, jako je yttrium zlepšuje odolnost proti korozi. Dalšími takovými prvky jsou wolfram, molybden, niob, tantal a rhenium. Dobré uplatnění zde najdou keramické a keramicko-kovové směsi. Mají velmi vysokou teplotu tání a nevyžadují účinné chlazení. Nevýhodou je křehkost, takže je snaha vyvinout nové keramické kompozity, které obsahují materiály pro zlepšení vlastností. [29]

6.3 Proudění a spalování

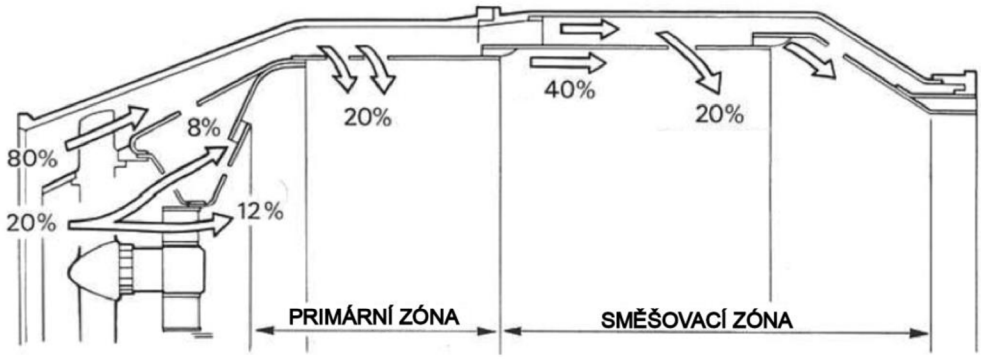
Před komorou se vzduch rozděluje na dva proudy. Primární proud se účastní vlastního hoření a tvoří přibližně 20 % hmotnostního toku, zbylých 80 % tvoří sekundární vzduch. Sekundární vzduch slouží k chlazení stěn plamence a po smíchání s primárním proudem k ochlazení spalin.[20]

Vzduch vstupuje do komory rychlostí 110 až 140 ms^{-1}. Tato rychlost se v difuzoru snižuje zhruba na třetinu. Zpomalení způsobí zvýšení tlaku vzduchu. Vzhledem k rychlosti hoření kerosinu, která dosahuje pouze několika metrů za sekundu, je třeba vytvořit vhodné podmínky pro axiální rychlost hoření tak, aby splňovala provozní podmínky motoru. [20]

Při normálním provozu se celkový směšovací poměr (vzduch:palivo) pohybuje mezi 45:1 a 130:1. Avšak kerosin se účinně spaluje při hodnotě 15:1, takže palivo musí být spáleno pouze za přítomnosti malého množství vzduchu (cca 20 %), který vstupuje do komory. Tato oblast komory se nazývá primární spalovací zóna. Vzduch do ní proudí přes palivovou trysku a rozvířující lopatky. Pomocí rozvířujících lopatek se docílí protiproudého víření ve tvaru toroidu a tím dostatečné snížení axiální rychlosti pro kvalitní smísení vstřikovaného paliva. Kvalitně promísená směs zaručuje její stabilní hoření. [28]

Střední teplota v jádru plamene dosahuje hodnoty až 2700 °C, to je podstatně více, než jsou teploty přípustné pro materiály, ze kterých se vyrábí trysky, stěny plamence a turbíny. Proto spaliny vstupující na turbínu se ochlazují na teplotu 1300 až 1900 °C. Primární vzduch při vstupu do plamence musí být řádně rozvířen a pro správnou funkci komory je nezbytné vytvořit zpětné proudění. [20]

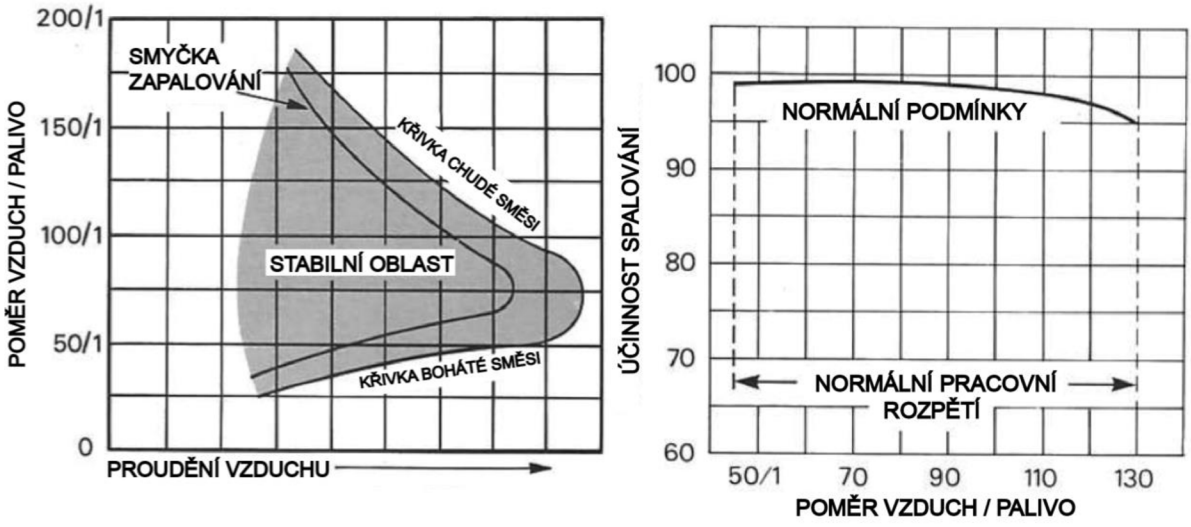
Další 20 % vzduchu prochází do primární zóny pomocí sekundárních otvorů. Tato část tvoří izolační vrstvu mezi stěnou komory a plamenem. Sekundární vzduch je využíván k podélnému chlazení stěn plamence, následně po částech vstupuje otvory do směšovací zóny.



Obr. 7 Proudění ve spalovací komoře [28]

6.4 Stabilita spalování a účinnost

Zajistit stabilní spalování je nezbytné pro správnou funkci komory ve všech provozních režimech. Pro každý typ spalovací komory existuje limitní hodnota směšovacího poměru (vzduchu:palivo). Po překročení této hodnoty plamen zhasne. Ke zhasnutí plamene dochází během letu střemhlav nebo klouzání na volnoběh, tj. za vysokého proudu vzduchu a malého průtoku paliva. S nárůstem rychlosti se rozsah tohoto poměru snižuje. Provozní rozsah je definován jako tzv. oblast stabilního hoření paliva, která je ohraničena limitními hodnotami chudé a bohaté směsi paliva a vzduchu. Zejména smyčka procesu zapalování musí ležet uvnitř oblasti stabilního hoření. [28]



Obr. 8 Závislost směšovacího poměru na oblasti stabilního spalování a jeho účinnosti [26]

Účinnost spalování většiny plynových turbín je při vzletu 100 %. Ve výškách vodorovného letu klesá až na 95 %. Vedle tlakových ztrát je účinnost jedním z nejdůležitějších faktorů návrhu, realizace a hodnocení spalovacích komor.

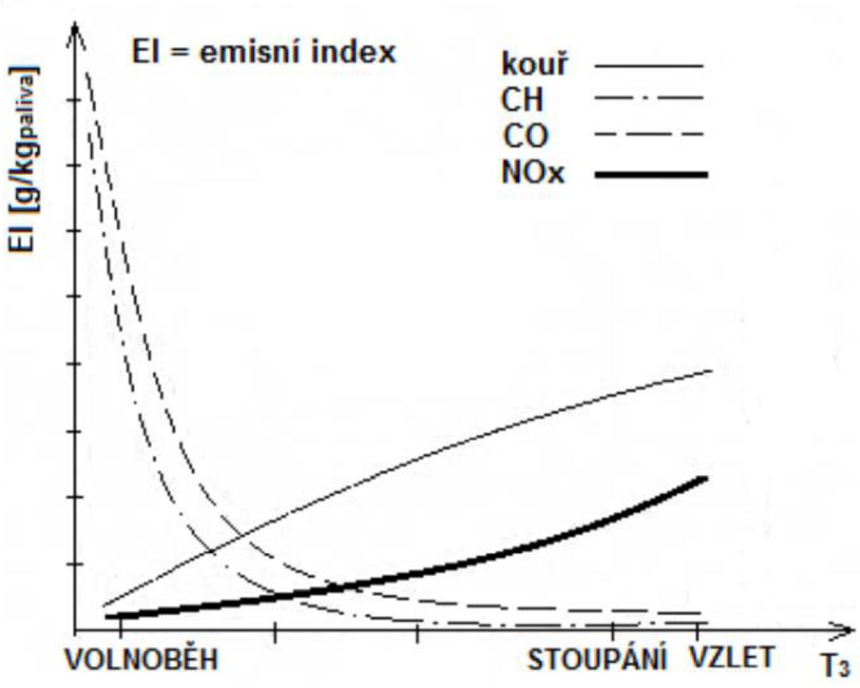
6.5 Vznik emisí ve spalovací komoře

Spalovací komora má zásadní vliv na vznik emisí. Množství škodlivých látek závisí na:

- fázi letu
- množství a rychlosti proudícího vzduchu
- složení a koncentraci reagujících látek (stechiometrickém koeficientu)
- způsobu a poměru mísení paliva se vzduchem
- rychlosti, teplotě a tlaku spalování
- rychlosti ochlazení produkovaných spalin
- konstrukčním provedení spalovací komory

Pokud motory neběží na plný výkon, například při sestupu nebo pojíždění, teploty motoru jsou nižší, což má za následek menší účinnost a tím i neúplné spalování. Při neúplném spalování nejsou všechny uhlovodíkové molekuly oxidovány na CO_2. Výsledkem je zvýšená produkce CO a sazí. [15]

Splnit požadavky na nízkou produkci škodlivin je velice složité. Se vzrůstající teplotou klesá množství CO a CH, ale roste množství NO_X a mimo jiné účinnost samotného motoru. Navíc tím, že bychom prodloužili proces spalování z důvodu snížení tvorby CO a CH, vzrostla by produkce NO_X. Požadavky udržovat nízkou hodnotu NO_X při vysokém tahu (krátký pobyt při vysokých teplotách) a zároveň nízké hodnoty CO, CH při nízkém tahu (dlouhá doba pobytu) jsou protichůdné. Řešení problému spočívá v regulování nezbytně nutného množství vzduchu při spalování. Toto množství vyjadřujeme pomocí stechiometrických koeficientů.[20][15]

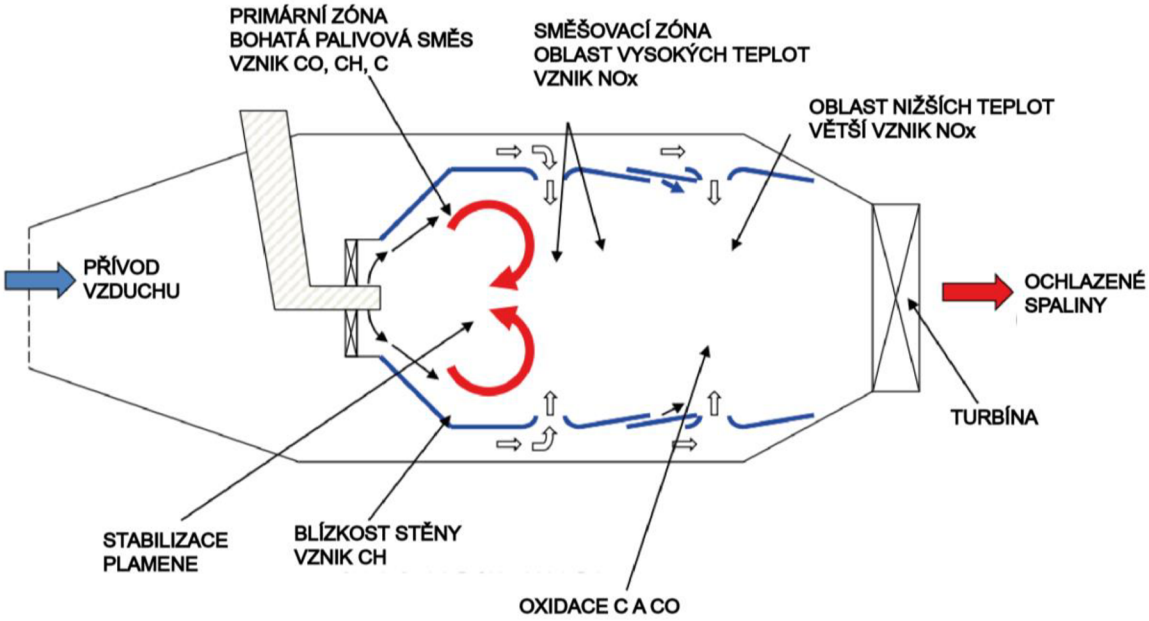


Obr. 9 Vznik jednotlivých emisí na fázi letu [20]

Vznik oxidu uhličitého a vodní páry jsou nevyhnutelnými důsledky spalování uhlovodíkového paliva. A mohou být významně sníženy pouze tím, že zvýšíme účinnost motoru nebo a snížíme aerodynamický odpor letadla.[20]

Produkce oxidů síry je výrazněji zastoupena při rafinaci paliva než při jeho spalování v motoru a obvykle se udržuje velmi nízko. Množství oxidů dusíku, nespálených uhlovodíků, oxidu uhelnatého a částic (zejména sazí, tedy volného uhlíku) závisí na výkonu spalovací komory. Pro ideální případ by byly tyto emise nulové.[15]

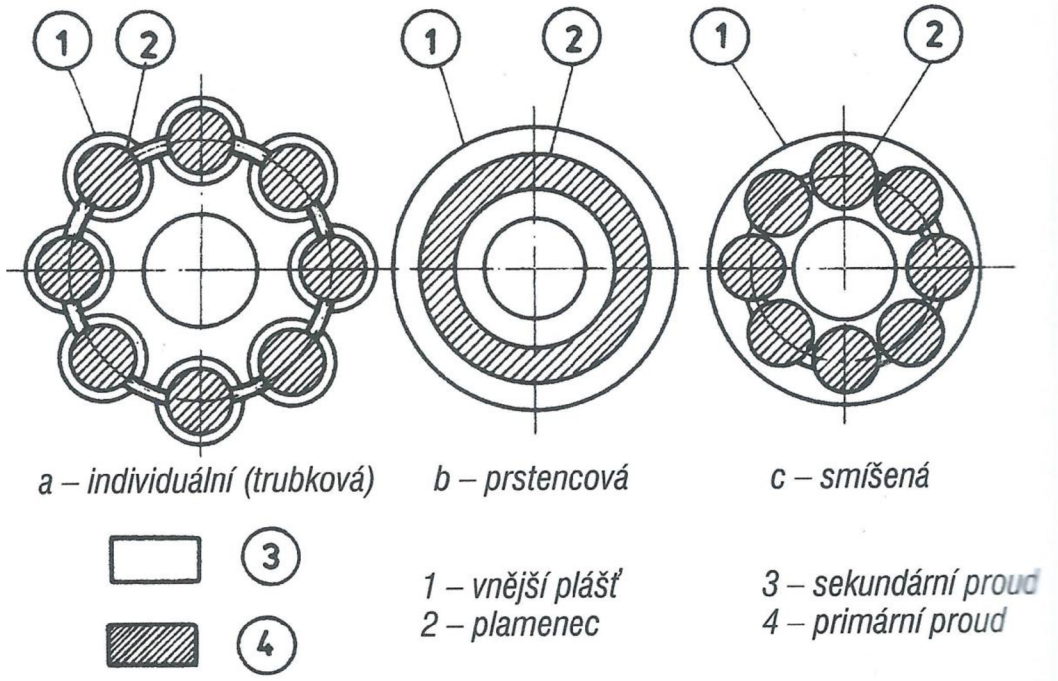
Spalování probíhá po minimální dobu tak, aby se zabránilo dlouhému působení vysokých teplot. Palivo tedy musí shořet rychle a na krátké vzdálenosti. Dokonaleji provedené chlazení stěn plamence vyžaduje menší množství vzduchu potřebné k chlazení, přičemž umožňuje věnovat větší množství vzduchu k chlazení spalin. Správná koncentrace směsi a času jejího hoření výrazně ovlivňuje množství všech emisí. Snížení škodlivin také může být dosaženo tvary plamenců, plášťů komor, difuzorů, typem chlazení plamenců nebo větším počtem palivových trysek.[20][15]



Obr. 10 Oblasti vzniku jednotlivých emisí uvnitř plamence [30]

6.6 Typy spalovacích komor

Existují tři hlavní typy spalovacích komor používané pro lopatkové motory. Liší se hlavně konstrukcí. Rozdílné vlastnosti výrazně ovlivňují množství produkovaných emisí. Jsou to individuální (trubková), prstencová a smíšená.



Obr. 11 Základní typy spalovacích komor [20]

6.6.1 Trubková spalovací komora

Tento typ spalovací komory se používá u motorů s radiálním kompresorem a starších typů s kompresorem axiálním. Je to přímý vývoj prvního typu Whittlovi spalovací komory.[28]

Trubková spalovací komora se skládá z pláště a vlastního plamence. Jednotlivé komory jsou rozmístěny kolem motoru, nejčastěji v počtu 6 až 14. Jsou skloněné k ose motoru nebo navíc šikmo natočené, tedy ve šroubovici. Touto konstrukční úpravou došlo k celkovému zkrácení délky motoru. Komory bývají uchyceny do společného difuzoru. Je zde obtížné dosáhnout rovnoměrného teplotního pole. Výhodou však zůstává snadná demontáž plamence a nízké vývojové náklady. Všechny komory kolem motoru jsou propojeny průšlehovými trubkami, tím pádem ve všech komorách je při spalování stejný tlak. Trubky hlavně slouží k zapálení plamene, protože zapalovači jsou vybaveny pouze dvě protilehlé komory. [20]

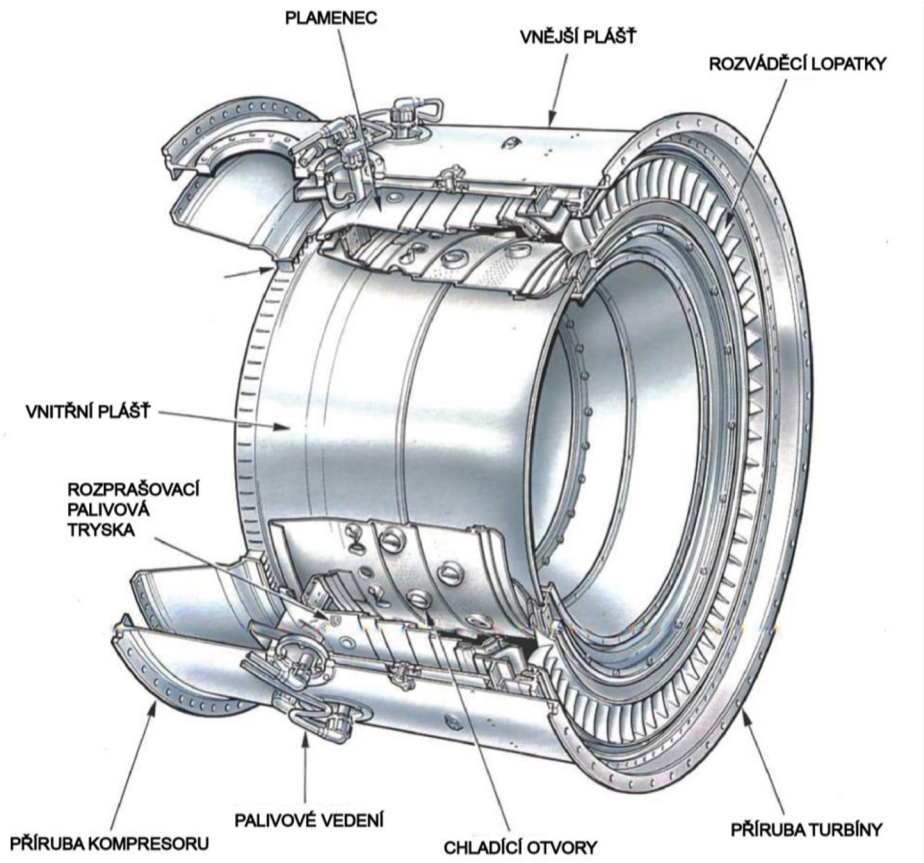
Komora k dodávce paliva používá jednoduché, případně duplexní vstřikovací trysky. V případě trysek jednoduchých se palivo přivádí do trysek pod tlakem přibližně 8 MPa, u duplexních až 60 MPa. Uvnitř trysek se nacházejí vhodně tvarované kanálky, které zaručují palivu při opuštění trysek rotačně kuželovitý tvar. Velikost kapek paliva se pohybuje kolem 70 až 100 μm. Aby bylo spalování co nejdokonalejší, je snahou vytvořit kapky co nejmenší, aby se mohly obalit vrstvou vzduchu a co nejdříve vypařit. Samotná tryska musí být chlazena proudem vzduchu, jinak by se komora zanášela sazemi kvůli odkapu na hraně trysky a následnému koksovatění paliva. Tento typ je vývojově nejstarší a vesměs je nahrazen moderními typy.[20]

6.6.2 Prstencová spalovací komora

Označovaná SAC (Single Annular Combustor). Tento typ je výhodnější, protože využívá celý prostor kolem motoru. Skládá se z jednoho prstencového plamence v mezeře mezi vnitřním a vnějším pláštěm. Samotná komora je tvořena vnitřní a vnější stěnou plamence. Má lepší spouštěcí vlastnosti než trubková. Jednou z konstrukčních forem je dvojitá komora (DAC, Double Annular Combustor).[20]

Proudění vzduchu je podobné jako u individuální trubkové komory s tím rozdílem, že komora obsahuje více palivových trysek, a to po obvodu vstupního otvoru. Na výstupu trysek probíhá hoření směsi par paliva a vzduchu. Jednou z hlavních výhod jsou celkové menší rozměry, které vedou k úsporám hmotnosti.[20]

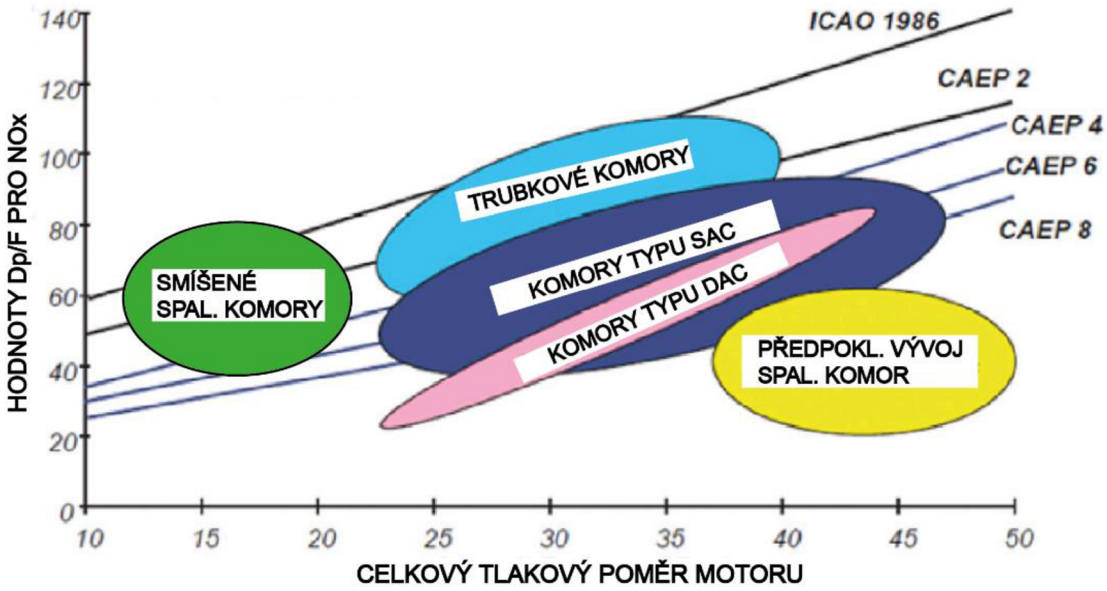
Další výhodou ve srovnání s předešlým typem je mnohem menší plocha stěny plamence. To zaručuje až o 15 % méně spotřeby vzduchu k ochlazování stěn. Snížení spotřeby vzduchu má za následek zvýšení efektivity spalování, tím eliminovat nespálené uhlovodíky a podporovat oxidaci oxidu uhelnatého na oxid uhličitý. Dochází k redukci emisí za udržení stejného výkonu.[28]



Obr. 12 Prstencová spalovací komora [28]

6.6.3 Smíšená spalovací komora

Tento typ komor se vyznačuje tím, že jednotlivé plamence jsou vloženy do mezikruhového prostoru tvořeného vnitřním a vnějším pláštěm. Kombinuje konstrukci trubkové a prstencové komory. Sousední plamence jsou propojeny průšlehovými trubkami a uchyceny do společného difuzoru. Sekundární vzduch proudí mezi plamencem a pláštěm. Toto uspořádání kombinuje jednodušší generální opravy a kompaktní velikost prstence. V současné době je tento typ je hojně rozšířen. Vzhledem k malým rozměrům jsou vhodné pro menší letouny [20][28]



Obr. 13 Pracovní oblasti spal. komor dle typu v závislosti na poměru stlačení a množství NO_X dle standardů CAEP [15]

7 NÍZKOEMISNÍ SPALOVACÍ KOMORY

Během posledních čtyřiceti let bylo dosaženo výrazného snížení znečišťujících látek u komerčních letadel. Byla vyvinuta a zavedena technologie ke snížení emisí oxidu uhličitého a uhelnatého, nespálených uhlovodíků, oxidů dusíku a pevných částic. Díky pokroku v oblasti aerodynamiky a vylepšení pohonných jednotek, systému vstřikování paliva, konstrukce a zlepšení dynamiky hoření došlo k výraznému snížení spotřeby paliva což zásadně napomáhá ke snižování emisí. [31]

Dnešní motory běžně dosahují 30 % spotřeby oproti původním technologiím. Zároveň dokázaly snížit hluk a produkci emisí CO a CH o přibližně 50 až 90 %. Velká část tohoto zlepšení je způsobena materiály a technologiemi chlazení, které umožňují provozovat moderní motory při velmi vysoké teplotě a tlaku. Nicméně vysoké teploty, které poskytují tak širokou škálu přínosů pro životní prostředí, mají také tendenci zvyšovat produkci NO_X. Přestože všechny zkoumané emise se od roku 1970 snižují, produkce emisí NO_X každoročně rostou o 5 až 10 %.[31]

7.1 Stávající metody nízkoemisního spalování

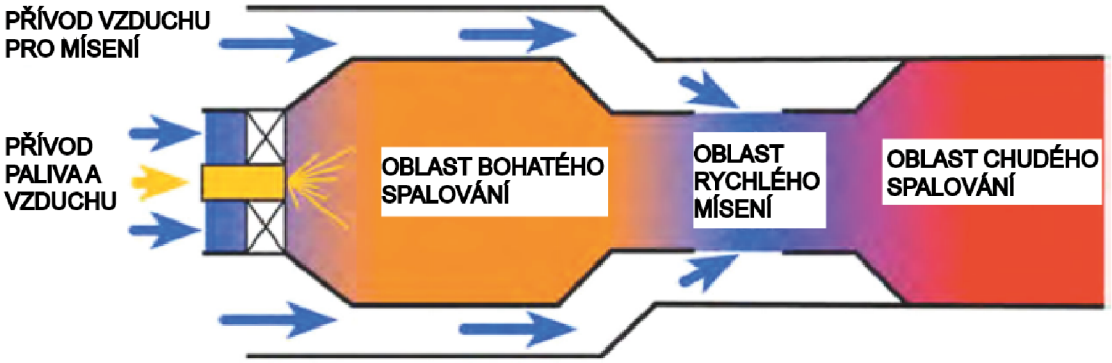
Obecně platí, že snižovat emise NO_X při zachování vysoké účinnosti spalování je velice obtížné. Výrobci hledají řešení, které by splňovalo stabilní spalování směsi, uspokojivou úroveň emisí, minimální tlakovou ztrátu a životnost. Dva nejprimitivnější způsoby snižování emisí jsou vstřikování vodní páry (tzv. mokré spalování) a použití katalyzátoru. [22]

U mokrého spalování se obvykle používá demineralizovaná voda. Množství emisí NO_X rapidně klesá a je řízeno právě množstvím páry přiváděné do spalování. Metoda je také limitována určitým množstvím, kdy při jeho dosažení narůstá produkce CO. Kromě toho příprava a distribuce čisté páry do prostoru spalování zvyšuje provozní náklady. V současné době se mokré spalování neuplatňuje z důvodů vysoké spotřeby vody a snížené účinnosti.

Použití katalyzátoru je u leteckých motorů nevhodné, vzhledem k obrovskému objemu proudícího vzduchu. Je tedy na místě nalézt vhodné způsoby, které jsou mnohem sofistikovanější a mají lepší výsledky. [22]

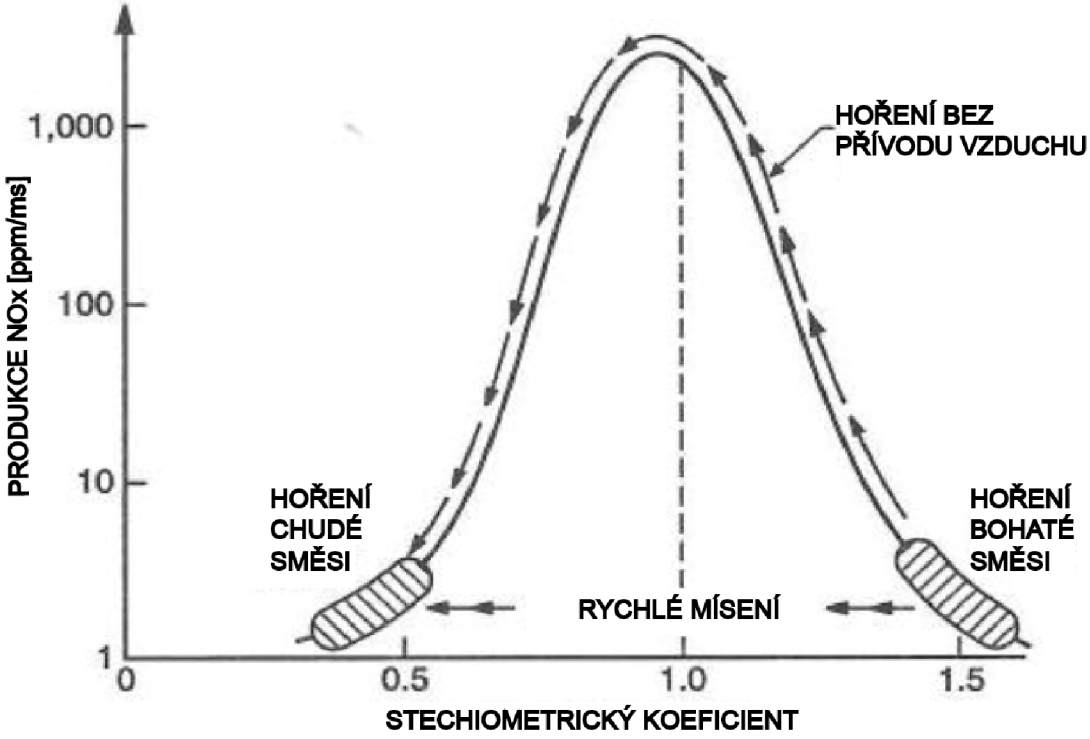
7.1.1 Rich burn, Quick quench, Lean burn

Koncept Rich burn, Quick quench, Lean burn (RQL) je vyvíjen od roku 1980 jako významný krok na cestě ke snížení produkce emisí NO_X. Principem spalovací komory RQL je spalování bohaté palivové směsi, rychlé mísení s přivedeným vzduchem a hoření chudé směsi. Spalováním bohaté směsi je dosaženo nižší teploty než v případě vyváženého poměru vzduchu a paliva, kdy můžeme pozorovat vysokou tvorbu NO_X. Aby se zabránilo vzniku CO, následuje ředění vzduchem, který vstupuje do komory chladícími otvory. Tím se směs mění na chudou a umožní další oxidaci uhlíku na CO_2. V této části je teplota opět nižší než při vyváženém poměru. K vystavení směsi vysokým teplotám tedy dochází po minimální čas, čímž zaručíme významné snížení produkce NO_X. [32]



Obr. 14 Schéma proudění při principu RQL [33]

Nevýhodou této technologie je zvýšená složitost systému. Přiváděný vzduch rychle snižuje teplotu, která musí být dostatečně vysoká k oxidaci CO a CH. Proto musí být směšovací poměr (stechiometrický koeficient) pečlivě zvolen tak, aby vyhovoval všem emisním požadavkům. [33]

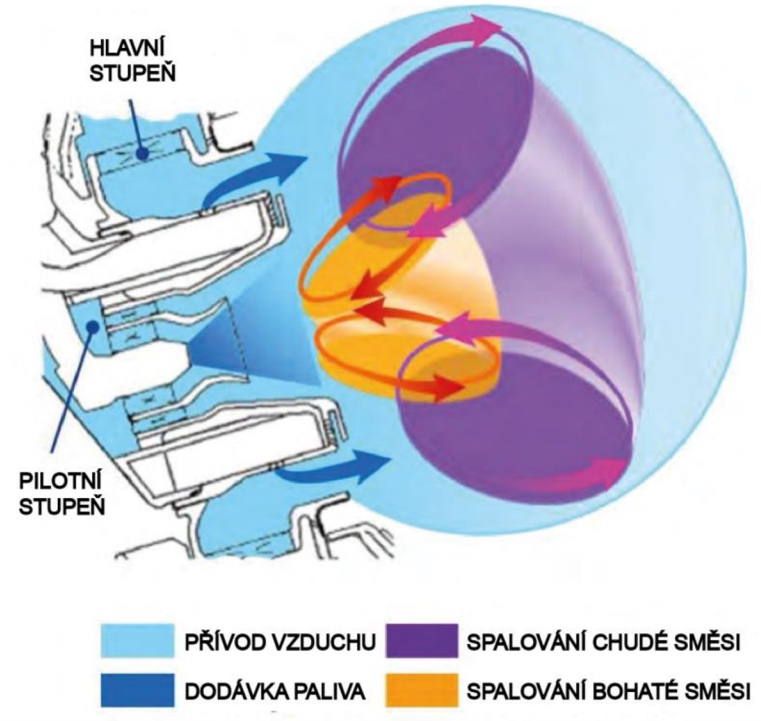


Obr. 15 Princip činnosti RQL [33]

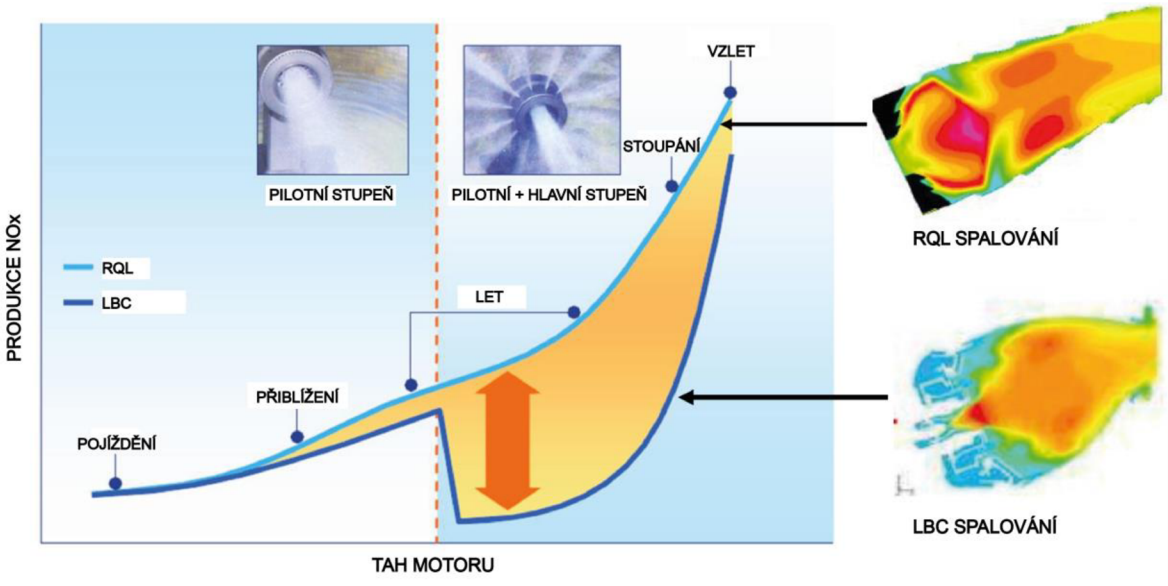
Systém spalování RQL využívají komory rodiny TALON společnosti Pratt & Whitney. Nejnovější model TALON X se úspěšně používá v motorech PW1500 a prokazuje významné snížení emisí NO_X o 25 % vzhledem k jeho předchůdci TALON II. Systém spalování RQL využívá také Rolls-Royce v motorech Trent 700 a CFMI v motorech CFM56. Systém je určený pro malé i velké kategorie motorů s širokým rozsahem tahu a celkového stlačení.[32]

7.1.2 Lean Burn Combustion

Lean Burn Combustion (LBC) využívá hoření stechiometricky chudé palivové směsi ke snížení teploty spalin při vysokých výkonech motoru. V primární zóně spalování se nachází oblast s bohatou palivovou směsí (pilotní stupeň), který pracuje při nízkých výkonech motoru. Při zvýšení výkonu se zapojí oblast hoření chudé palivové směsi (hlavní stupeň), který obklopuje ten pilotní. V okamžiku, kdy dojde k zapojení hlavního stupně do procesu hoření, celková teplota klesne a tím se i rapidně sníží celková produkce částic NO_X. Z grafu jasně vyplývá značný rozdíl v produkci emisí v porovnání se systémem spalování RQL.[31]



Obr. 16 Proces spalování LBC technologií [34]

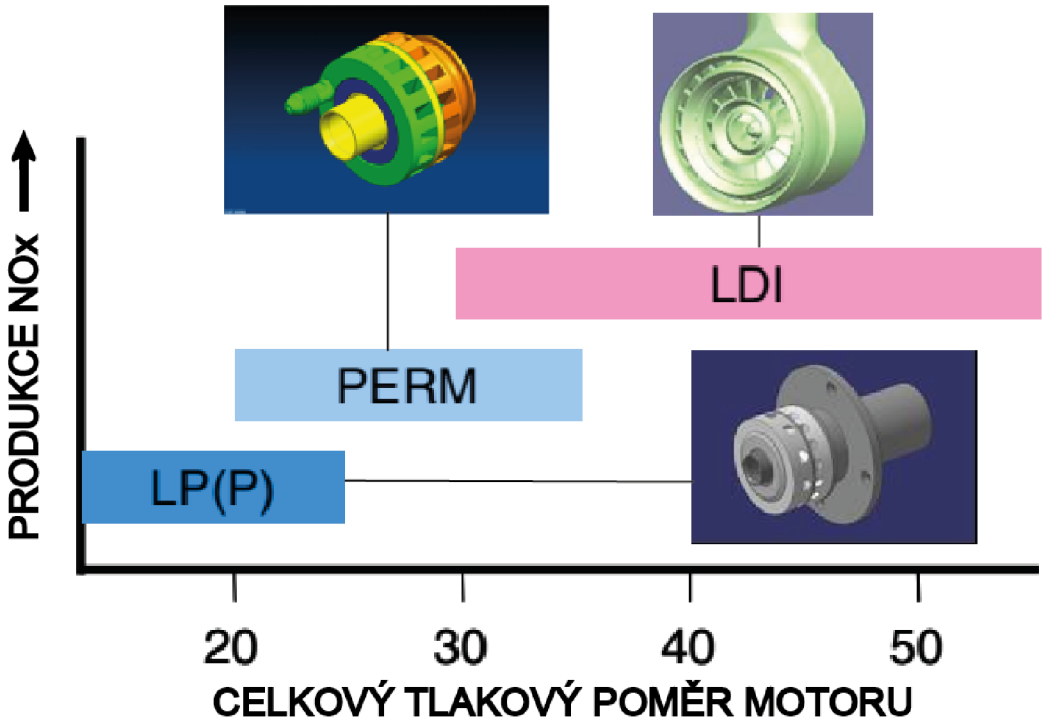


Obr. 17 Produkce NO_X v závislosti na tahu motoru a typu jeho spalování [11][30]

7.2 Vývoj nízkoemisních metod spalování

NEWAC (New Aero Engine Core Concepts) je program Evropské unie pod vedením společnosti MTU Aero Engines. Hlavní evropští výrobci motorů s pomocí univerzit a výzkumných ústavů, celkem 40 partnerů, se soustředí na nové koncepty proudových motorů. V rámci programu NEWAC se vyvíjí a ověřují nové technologie, které pomohou snižovat produkci emisí. Program je garantován ve výši 71 milionů EUR.[35]

Vývoj se zabývá výhradně spalovací komorou SAC, protože její konstrukce je mnohem jednodušší než ostatní typy a z hlediska nákladů, hmotnosti a chlazení výhodnější. Spalovací komora je geometricky rozdělena na nejméně dvě zóny. Každá zóna vzhledem k různému režimu letu může být optimalizována pro určitý požadavek a tím nabídnout dobrou stabilitu hoření při nízkém výkonu. Chudé spalování a dobrá stabilita hoření palivové směsi je klíčem k dosažení nižších teplot plamene, a tudíž ke snížení tepelné tvorby NO_X. V současné době se zkoumají tři metody nízkoemisního spalování, které jsou odstupňovány podle celkového stlačení motoru.[35]



Obr. 18 Vyvíjené koncepty programu NEWAC[35]

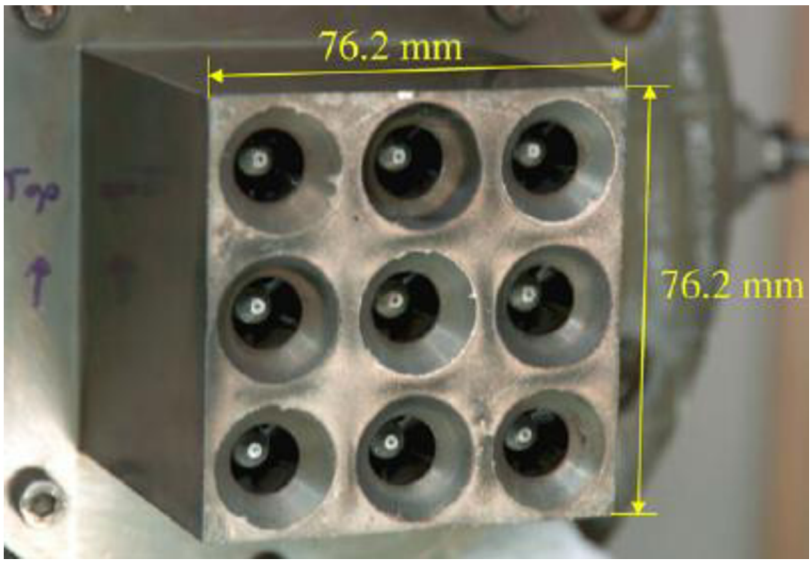
7.2.1 Lean Direct Injection

Systém Lean Direct Injection (LDI) vstřikuje palivo přímo do spalovací komory a rychle ho mísí se vzduchem. Vzhledem k tomu, že moderní motory pracují s čím dál větším kompresním poměrem, výrazně tím zkracují dobu zpoždění zapalování směsi, což představuje komplikaci pro předem smísené spalování. Nedochází tedy k důkladnému promísení směsi, jak tomu bývá u ostatních typů komor. [35]

Tato metoda vyžaduje pro spalování 60 až 70 % vzduchu, což je podstatně více než u jiných typů. Vstřikovací soustava proto musí být schopna toto množství přepravit do primární zóny spalování. Stejně jako TAPS je spalovací komora LDI vybavena kruhovým uspořádáním trysek, které jsou soustředně vybaveny pilotním a hlavním stupněm. Každý stupeň vytváří své tokové pole, které jsou odděleny rozdělovačem. Při nízkém příkonu pracuje jen pilotní stupeň a plamen se stabilizuje v jeho tokovém poli. Při zvýšení výkonu je směs vstřikována i do hlavního průtokového pole ve tvaru kužele o vrcholovém úhlu až 120°. To vede k rychlému odpařování paliva a následně k rychlému hoření tak, aby se za vysokého výkonu zachovaly nízké hodnoty NO_X. Při plném výkonu vstoupí do pilotního stupně přibližně jen 10 % paliva, zbylých 90 % proudí hlavním stupněm. [32]

Přímé vstřikování paliva do spalovací zóny snižuje riziko samovznícení a zpětného vzplanutí. Aby bylo dosaženo rovnoměrné směsi, musí být palivo a vzduch dobře promíseny předtím, než začne hořet. Z toho vyplývá, že celé mísení musí být dosaženo na krátké vzdálenosti, nejlépe okamžitě jakmile palivo opustí injektážní systém. Velká část vzduchu prochází vstřikovací hlavou přes axiální vířící zařízení pro rychlé mísení. Tím vzniká velká stabilní oblast s vysokou teplotou, která tuto teplotu přenáší do stěn plamence. Proto je nutná dobrá tepelná úprava celého zařízení. Na druhou stranu dobré rozložení teploty na výstupu spalovací komory zvyšuje životnost turbíny. Také kvůli značné velikosti a hmotnosti vstřikovačů musí být vyřešeny problémy s vibracemi. Ty ovlivňují celistvost vnějšího pláště, protože musí odolat vyššímu namáhání.

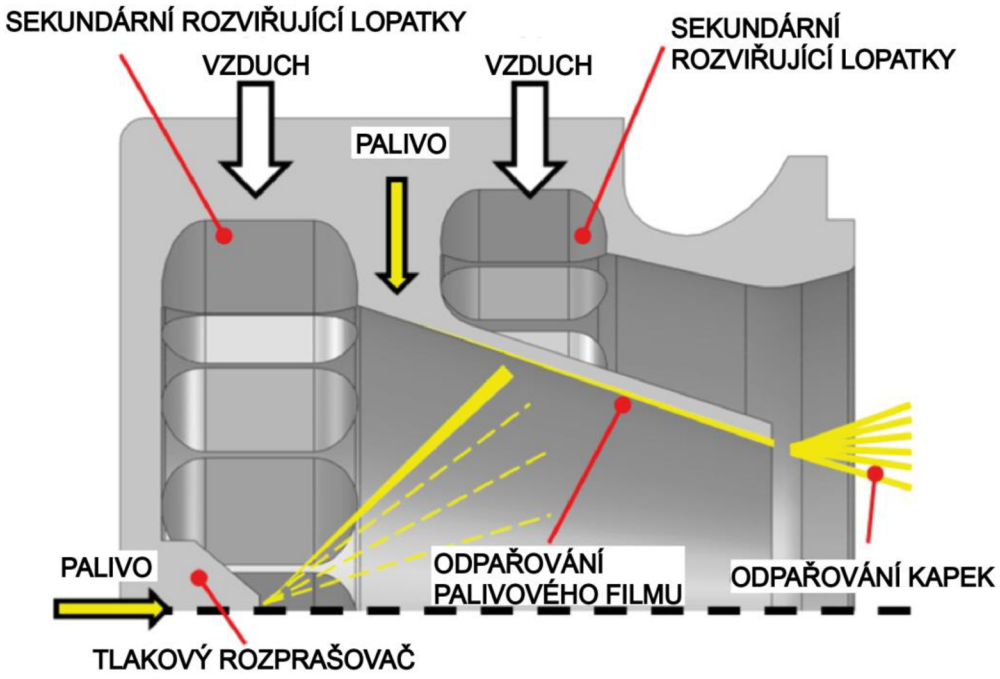
Dosud nebyly vytvořeny žádné certifikované údaje ICAO, ale ze zkoušek vyplývá dosažení 35 až 45 % produkce NO_X ve vztahu k CAEP/6.[32]



Obr. 19 Vstřikovací tryska typu LDI a včetně rozměrů [36]

7.2.2 Partial Evaporation & Rapid Mixing

Partial Evaporation & Rapid Mixing (PERM) představuje koncept částečného odpařování a rychlého mísení paliva. Je založen na funkci dvou rozvířujících lopatek, které míchají vzduch pouze s částí dodávaného paliva. Do vytvořeného proudění je tryskou rozprašována další část paliva za účelem optimálního umístění plamene, stability proudění a chudé palivové směsi. [35]



Obr. 20 Princip spalování metodou PERM [37]

7.2.3 Lean Premixed Prevaporised

Lean Premixed Prevaporised (LPP) je metoda spalování za nízkého poměru stlačení a velmi nízkou produkcí částic NO_X. Palivo se nejprve odpařuje a potom se smíchá s průtokem vzduchu. Díky nízké teplotě plamene a eliminaci horkých míst ve spalovací zóně jsou hodnoty emisí NO_X extrémně nízké. Konstrukce komory s LPP spalováním je rozdělena na 3 oblasti. První slouží pro vstřikování paliva, jeho odpařování a mísení se vzduchem. Druhá slouží pro spalování, kde je plamen v recirkulačních zónách stabilizován a ve třetí se nachází zóna pro ředění spalin se vzduchem.

Nevýhodou je, že poměrně dlouhá doba potřebná k úplnému odpaření a mísení paliva se vzduchu při nižším výkonu může vést k samovznícení nebo zpětnému vzplanutí směsi.

Koncept LPP je od 90. let vyvíjen společnostmi GE a Pratt & Whitney v rámci programu NASA CPC (Critical Propulsion Components). Program se zaměřuje na snížení emisí NO_X při nadzvukových rychlostech. Cílem programu je dosáhnout emisního indexu 5 g/kg při dosažení 99,9 % účinnosti spalování. V současné době metoda LPP dosahuje o 65 % snížená hodnot vzhledem k CAEP/6 a předpokládá se další snížení.[32]

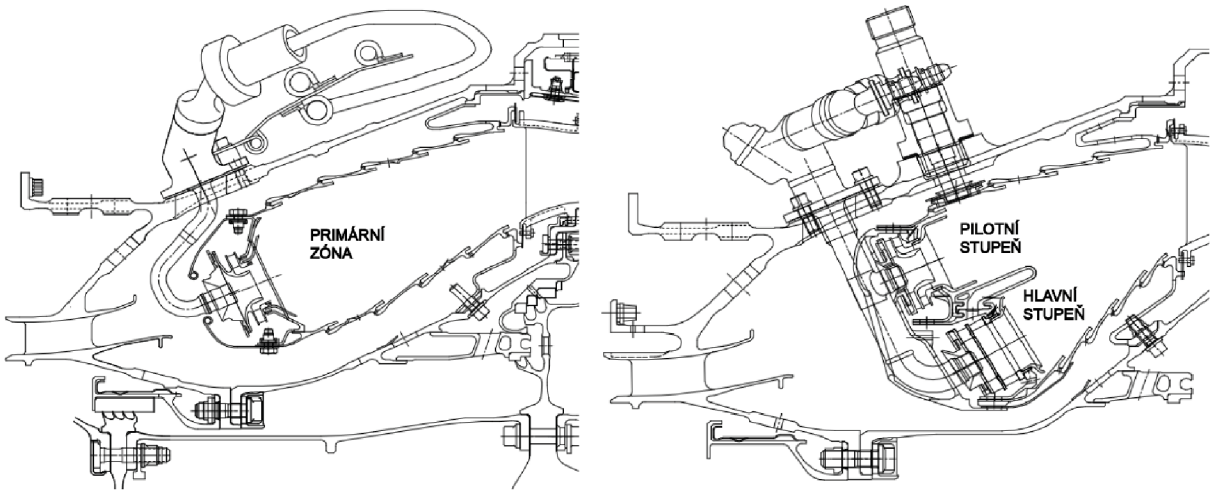
7.3 Nízkoemisní komory

Spalovací komory nové generace (LEC, Low Emission Combustor) budou pracovat při vyšších tlakových poměrech a teplotách. Teplota spalin, která vstupuje na turbínu, je hlavním faktorem, který určuje účinnost, ale i životnost celého systému. Základním požadavkem nového designu spalovací komory je kompromis mezi nízkými emisemi NO_X a vyšší účinností. V této části byla zavedena řada nových spalovacích komor, kde některé z nich lze nalézt na trhu a další jsou ve vývoji. Nejčastějším typem komor, které v současné době zaznamenaly největší pokrok ve vývoji, jsou komory prstencového typu.[33]

7.3.1 Double Annular Combustor

Double Annular Combustor (DAC) je nízkoemisní dvojitá prstencová komora. Jako první s vývojem začala firma CFMI (CFM International) z důvodu stále zvyšujících se nároků v oblasti emisních předpisů.

Nejvýraznějším znakem z pohledu konstrukce je konfigurace radiálně uspořádaných spalovacích zón. Tyto dvě zóny jsou odděleny středovým tělesem, což ve výsledku podstatě pomáhá minimalizovat produkci CO a CH. Při nízkém nastavení výkonu je v provozu jen část vztahující se na pilotní zónu, kde prochází hlavní proud vzduchu. Pilotní zóna má delší stavbu, tím pádem i větší povrch plamence oproti SAC. Poskytuje tak delší dobu pro dokonalé spálení palivové směsi před vstupem do sekundární zóny. Při vysokém výkonu jsou v provozu obě subkomory, tj. pilotní a hlavní stupeň současně. Dochází k proudění vyššího množství vzduchu a tím i vyšší teploty spalování. Přesto, že proudění je asi třikrát rychlejší než u běžných komor, chlazení je velmi účinné. Jednotlivé stupně se spínají v závislosti na provozním stavu motoru, a proto vyžadují řízení pomocí řídící jednotky a také množství kontrolních snímačů. [32]



Obr. 21 Konstrukční řešení komory SAC (vlevo) s jednoduchou primární zónou a komory DAC (vpravo) s pilotním a hlavním stupněm v primární zóně [31]

Toto konstrukční řešení bohužel omezuje další vývoj motorů s velmi vysokým výkonem. Na druhou stranu jednoduché konstrukční řešení, krátká stavební délka a radiální uspořádání umožňuje dosažení lepších výsledků spalování, účinnosti a spotřeby paliva včetně nízkých emisí. Menší délka a hmotnost zabraňují velkým vibracím hřídele, které jsou přímo úměrné délce spalovací komory. [32]

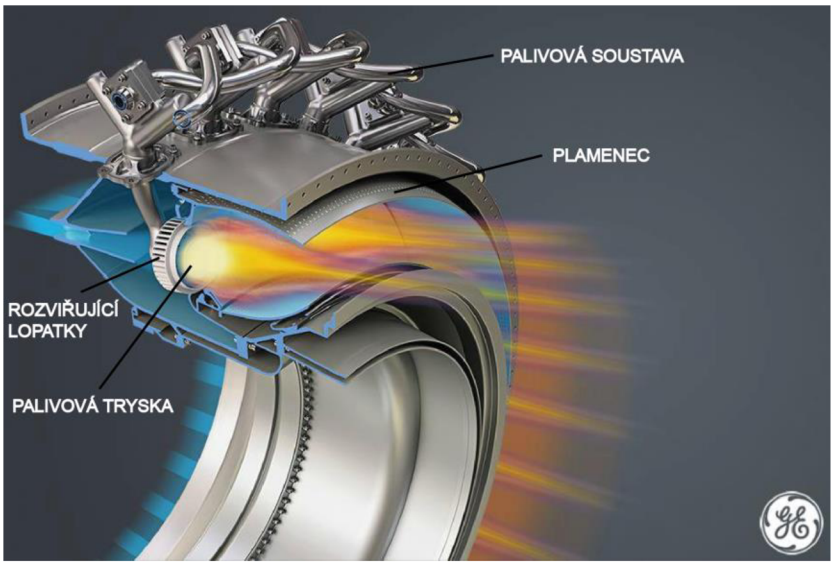
Komory typu DAC jsou ve velkém počtu montovány do motorů řady CFM56 firmy CFMI a motorů GE90 firmy GE, který je největším využívaným motorem pro leteckou dopravu. Motory řady CFM56 využívají hlavně letadla Airbus A320 a A321. GE90 se dodávají pro Boeing 777. Obecně platí, že komory jsou určeny pro motory středních a velkých kategoriích s jmenovitým tahem v rozmezí 102,2 až 504,9 kN.[32]

7.3.2 Twin Annular Premixing Swirler

Spalovací komora Twin Annular Premixing Swirler (TAPS) se vyvíjela na základě poznatků získaných při vývoji a provozu spalovací komory DAC. Vývoj byl zahájen firmou General Electric v roce 1995 a prvně použit u motoru GEnx (v rámci programu NextGen), který je v současné době nejpoužívanějším motorem vyrobený společností GE.[38]

Koncepce spalovací komory TAPS je založena na principu spalování chudé palivové směsi (LBC). Každá palivová tryska obsahuje pilotní stupeň na hrotu a hlavní stupeň v radiálním směru. Centrální pilotní stupeň produkuje bohatou palivovou směs, který pracuje pouze u nižších výkonů. Při vyšším výkonu je palivo rozděleno mezi oba stupně, přičemž způsobí hoření i chudé směsi. Palivová směs je rozprášena zcela rovnoměrně, a to díky speciálním rozvířujícím lopatkám, které jsou obklopeny palivovými tryskami.

Tato koncepce je revoluční tím, že jako první začala využívat hoření bohaté palivové směsi obklopené hořící chudou směsí, což na počátku vývoje přineslo řadu problémů. Tento způsob spalování musí zajistit úspěšné fungování od startu až po maximální výkon, kdy dochází ke značnému poklesu tlaku. Přestože spalovací komora nedisponuje chladícími ani ředícími otvory, musí zajistit poměrně nízkou teplotu na výstupu, nicméně tato skutečnost má pozitivní vliv na životnost turbíny.[31]

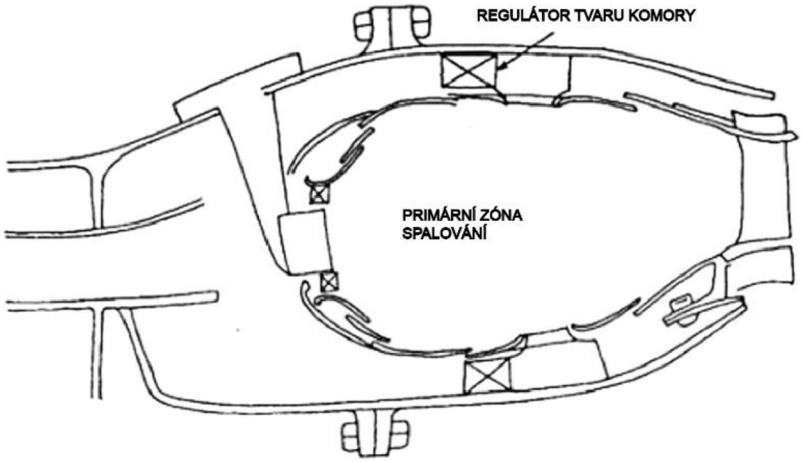


Obr. 22 Spalovací komora typu TAPS od firmy GE [39]

Komory typu TAPS produkují nejmenší množství ze všech sériově vyráběných nízko-emisních komor. Jejich hodnota se pohybuje kolem 56 % procent vzhledem ke standardu CAEP/6. Dále poskytuje o 15 % nižší úsporu paliva vzhledem k typu SAC, přičemž představuje přibližně stejné snížení emisí CO a CH.[34]

7.3.3 Variable geometry combustors

Komora s měnitelnou geometrií (VGC, Variable geometry combustors) je vyvíjena společností NASA ve spolupráci s Pratt & Whitney. Jedná se o systém s měnitelným spalovacím prostorem v závislosti na výkonu motoru. Komora tak dokáže regulovat množství vzduchu přiváděného do primární zóny spalovaní, tím přímo měnit stechiometrický koeficient. Množství vzduchu je řízeno hydraulicky tzv. regulátory vzduchu, které se pohybují translačně ve směru osy komory. Při nižších výkonových podmínkách jsou regulátory téměř uzavřené, čímž se snižuje stechiometrický koeficient a rychlost proudění. Jak se zvyšuje výkon, regulátory se otevírají a zavádí do primární zóny více vzduchu tak, aby bylo dosaženo chudého spalování za účelem snížení emisí NO_X a kouře. Další forma řízení proudícího vzduchu zahrnuje použití vířičů s proměnlivou plochou. Podle změny výkonu je řízeno vířivé proudění vzduchu, které ovlivňuje směšovací poměr v primární zóně spalování.[32]

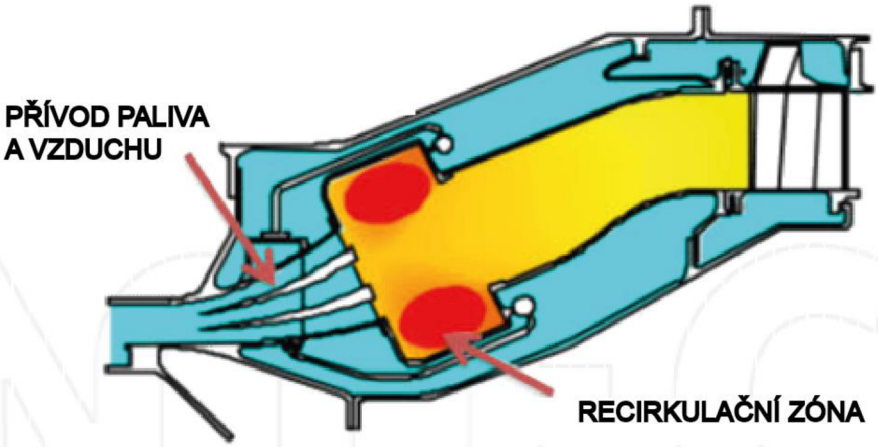


Obr. 23 Spal. komora s proměnlivou geometrií [22]

Velká výhoda spočívá v poměrně přesné regulaci produkovaných emisí NO_X, CO a CH, které je možné dosáhnout jen změnou stechiometrického koeficientu a regulací průtoku vzduchu bez ohledu na výkonnostní podmínky. Jedna z hlavních nevýhod spalovací komory s proměnlivou geometrií je zvýšená složitost v řízení a problematická zpětná vazba mechanismu. Z toho důvodu je tento koncept stále ve vývoji a jeho komerční využití se plánuje až kolem roku 2020.[22]

7.3.4 Trapped vortex combustion

Vírová spalovací komora (TVC, Trapped vortex combustion) je považována za slibnou technologii pro nízkou tvorbu znečišťujících látek. Koncepce je vyvíjena společností GE ve spolupráci s AFRL (Air Force Research Laboratory) od roku 1996. Úkolem je vyvinout komoru s vysokou účinností, nízkou produkcí škodlivin a malou ztrátou tlaku. Činnost TVC je založena na vstřikování paliva do míst, kde vzduch vytváří turbulentní víření. Aby se zajistilo kvalitní mísení vzduchu s přívodem paliva a následná stabilita plamene, vyskytují se ve spalovací komoře tzv. recirkulační zóny. Vzhledem k tomu, že část spalování nastává už v recirkulační zóně, lze dosáhnout typicky bezplamenného režimu. Účinnost spalování dosahuje až 96 %. Přestože některé výsledky nejsou uspokojivé, předpokládá se, že v reálných podmínkách při vyšší vstupní teplotě a tlaku bude účinnost spalování vyšší.[40]



Obr. 24 Schéma spalovací komory typu TVC [33]

Zaváděná vírová technologie nabízí několik výhod. V prvé řadě je možné spalovat řadu paliv se střední a nízkou výhřevností. Emise NO_X dosahují poměrně nízkých hladin, a to i bez zředění. Ve srovnání s normami CAEP/6 jsou sníženy o 45 %. Do budoucna se počítá se snížením o dalších 10 až 40 %. Práce, které v současné době probíhají, jsou zaměřeny na vývoj této technologie primárně pro letecké motory a dále se uvažuje o použití u plynových turbín v energetice. [30]

7.4 Zhodnocení a vývoj nízkoemisních komor

Spalovací komory hodnotíme podle několika parametrů. Jsou to účinnost spalování, míra tlakových zttrát a v poslední dekádě množství produkovaných emisí.

7.4.1 Účinnost spalování

Významným parametrem z hlediska hodnocení moderních spalovacích komor je účinnost spalování, která se běžně pohybuje mezi 98 až 99,5 %. Například komory se systémem spalování RQL dosahují účinnosti až 98,5 % při všech letových podmínkách. Jiné koncepty jsou schopny dosáhnout účinnosti ještě vyšší. Celková účinnost je hlavně založena na kvalitní přípravě paliva, tedy co nejrychlejšího mísení se vzduchem. Nejlepších výsledků dosahují zpravidla koncepty TAPS a LDI, protože díky vícebodovému vstřikování je palivová směs šířena s vysokou mírou rovnoměrnosti.[32]

Další metoda LPP je založena na přípravě palivové směsi ještě před vstupem do plamence. Tím odpadá problém s rychlostí reakce v samotném komoře. Dosahuje účinnosti spalování až 99,5 %, což tento systém řadí mezi komory s nejvyšším nízkoemisním potenciálem.[32]

Vedle projektů, které již zaznamenali komerční úspěch a sériovou výrobu, existují další, které zatím nejsou technologicky připraveny na provoz. Je to například komora typu VGC. Díky své proměnlivé geometrii dokáže celkem přesně měnit regulovat množství proudícího vzduchu a tím i požadovaný stechiometrický koeficient. Z hlediska účinnosti spalování a produkce všech emisí dosahuje nejlepších výsledků. Bohužel v současné době je tato technologie velice nespolehlivá. Její komerční užití je však jen otázkou vývoje.

7.4.2 Tlakové ztráty

Míra tlakových ztrát během provozu je důležitým parametrem každé komory. Tlakové ztráty přímo závisí na použité technologii, fázi letu a spotřebě paliva. Všechny technologie, které jsou v současné době vyvíjeny, dosahují obvykle 4 až 6 % tlakových ztrát. Největším výzvám oproti ostatním technologiím čelí opět komora VGC, neboť segmenty se musí pohybovat v krajních polohách tak, aby byly uspokojeny všechny požadavky v širokém rozsahu provozních podmínek. Každé další zakřivení komory a ovlivnění proudění vzduchu představuje nárůst tlakových ztrát. Například metoda LDI tento problém řeší použitím velkého počtu trysek. Přípustná tlaková ztráta tedy ovlivňuje účinnost smísení paliva a vzduchu.[32]

7.4.3 Vývojové projekty

Organizace ICAO vydala v roce 2008 obsáhlou zprávu nezávislých expertů (ICAO Doc 9887), v níž jsou představeny střednědobé a dlouhodobé cíle pro snižování produkce emisí NO_X. Jako referenční bod byl zvolen standard CAEP/6. Všechny vyrobené motory po roce 2016 musí splňovat 45 % snížení hodnot škodlivin NO_X a po roce 2026 dokonce 60 % snížení vzhledem k tomuto předpisu.[32]

Existuje několik projektů, které určují strategie při vývoji s cílem těmto požadavkům dospět. Na Evropském kontinentu je to program NEWAC, jehož dílčí výsledky ve vývoji nových metod spalování, zejména LDI a LPP jsou velice nadějné. Obě metody dosahují až 65 % snížení produkce NO_X vzhledem k CAEP/6.

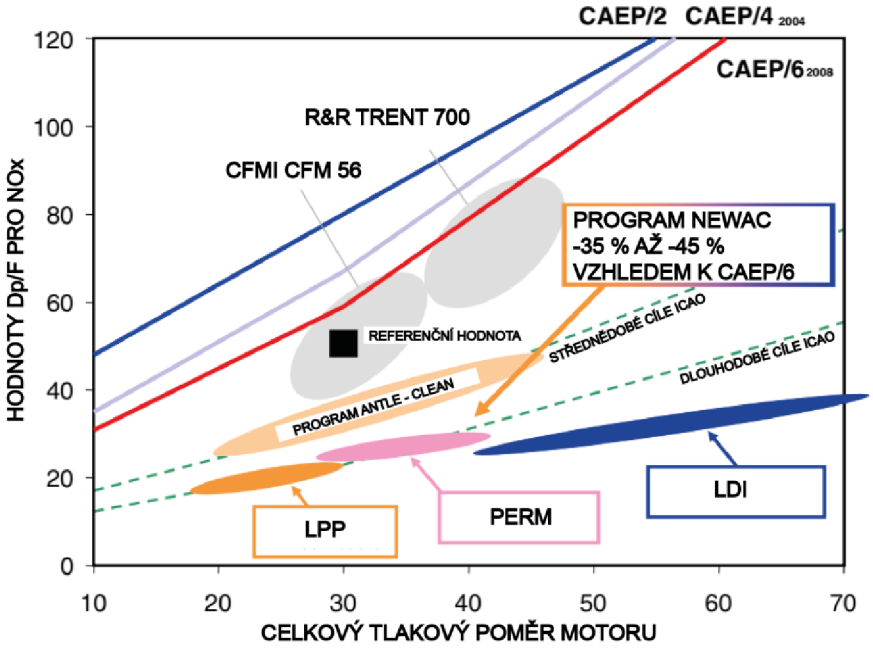
Vedle úspěšného projektu NEWAC je dalším výzkumným programem ANTLE (Affordable Near-Term Low Emissions) společnosti Rolls-Royce, který financuje ACARE (Advisory Council of Aeronautic Research in Europe) prostřednictvím projektu EEFAE (Efficient & Environmentally Friendly Aero-Engine).

ACARE je Poradní rada pro letecký výzkum a inovace vedená Evropskou komisí. Stanovila dva dílčí cíle pro snížení emisí, které mají být dosaženy v časovém horizontu 2020 až 2050. Pro rok 2020 se počítá s 60 % snížením produkce emisí všech motorů, které budou v provozu, vzhledem k CAEP/6 a pro 2050 dokonce 75 %.

ANTLE je jeden ze dvou experimentálních motorů financovaných z EEFAE. Druhým je CLEAN (Component Validator of Environmentally Friendly Aero-Engine), jehož cílem je dlouhodobě demonstrovat nízkou emisní technologii.

Všichni hlavní evropští výrobci motorů se účastní EEFAE, jehož představa je snížit množství produkovaného CO_2 o 12 % a NO_X o 60 %. Kromě emisí jde také o snížení pořizovací ceny, nákladů a zvýšení spolehlivosti nových motorů.[41][35]

Také na americkém kontinentu došlo k představení určitých strategií. S cílem vyvinout ekonomicky udržitelnou dopravu s nízkoemisními technologiemi stanovila NASA dvě prognózy. Do roku 2020 předpokládá snížení produkce NO_X o 75 % a do roku 2025 o 80 % vzhledem ke standardu CAEP/6. V oblasti zájmu jsou hlavně dva celosvětově nejpoužívanější motory. CFM56-7B pro Boeing 737 GE-90 pro Boeing 777.[32]



Obr. 25 Pracovní oblasti nových koncepcí v závislosti na poměru stlačení a množství produkce NO_X dle standardů CAEP [41]

Tab. 6 Shrnutí základních vlastností nízkoemisních komor

Technologie	TALON X	DAC	TAPS	LDI	LPP	VGC	TVC
metoda spalování	RQL	LBC/RQL	LBC	LBC	LBC	LBC	LBC
stabilita spalování	vysoká	mírná	mírná	mírná	nízká	mírná	mírná
riziko zpětného vzplanutí	nízké	nízké	mírné	nízké	vysoké	nízké	vysoké
účinnost spalování (vysoký výkon)	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	mírná
účinnost spalování (nízký výkon)	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	nejlepší	vysoká
tlakové ztráty	mírná	mírná	mírná	mírná	mírná	vysoké	vysoké
produkce NO_X během LTO	nízká	nízká	velmi nízká	velmi nízká	nejnižší	nízká	velmi nízká
produkce CO během LTO	mírná	velmi vysoká	vysoká	vysoká	vysoká	nízká	mírná
produkce CH během LTO	mírná	vysoká	nízká	nízká	nízká	nízká	mírná
kouřové číslo	vysoké	mírné	nízké	nízké	nízké	nízké	velmi nízké
technologická připravenost [%]	90	90	90	70	50	50	50
plnění norem NO_X vzhledem k CAEP/6 [%]	65	60	56	35	35	~50	55

8 ZÁVĚR

Tato práce podává ucelený přehled o problematice spalovacích komor, zejména nízkoemisních. Popisuje současné i vyvíjené typy spalovacích komor a veškeré děje, které se v komoře odehrávají. Jedná se hlavně o proudění, dodávku a mísení paliva a také o mechanismus tvorby jednotlivých emisí. Studie, která by se zajímala problematikou podobně komplexního rozsahu, zatím neexistuje.

Sledují se zejména čtyři hlavní znečišťovatelé. Oxidy dusíku, uhlíku, nespálené uhlovodíky a kouř. Během postupného vývoje leteckých motorů, který trvá od padesátých let minulého století, se podařilo redukovat množství produkovaného kouře a nespálených uhlovodíků na naprosté minimum. Oxidy uhlíku zastupují oxid uhličitý, který není zvlášť nebezpečný, ale za určitých podmínek způsobuje skleníkový efekt a globální oteplování, a oxid uhelnatý, který zabraňuje přenosu kyslíku v krvi, a tudíž je poměrně nebezpečný. Největší snahou všech vývojářů je zejména snižovat produkci NO_X.

Existuje několik organizací, které emisní legislativu upravují. Tou nejvýznamnější je Mezinárodní organizace pro civilní letectví ICAO, která omezuje nadměrné vypouštění emisí prostřednictvím standardů. Další organizace jako je EASA (pro Evropu) a EPA (pro USA) následně tyto standardy zpřísňují.

Letecký průmysl se v posledních 60 letech zaznamenal značný rozvoj. Předpokládá se, že celosvětová letecká doprava bude růst přibližně 5 % ročně a že počet cestujících se v příštích 20 letech zdvojnásobí.

Díky pokroku ve vývoji materiálů a výrobních postupů dokážeme důsledky těchto prognóz poměrně úspěšně řešit. V současné době běží několik programů na vývoj nízkoemisních spalovacích komor. Některé jako třeba TAPS, DAC a TALON X již našli komerční využití. Jiné projekty, například komory programu NEWAC a ANTLE se blíží ke konci svého vývoje a svými kladnými výsledky způsobí doslova revoluci v oblasti nízkoemisního provozu letadel. Všechny současné koncepty byly popsány a dílčí výsledky zaznamenány v tabulce 6. Existují i jiné projekty, které se snaží tuto problematiku řešit. Společnost WheelTug, spadající pod korporaci Chorus Motors vyvinula elektromotor, který může být využit na popojíždění letadel na rampách, není tedy potřeba využívat tahače a letadlo nemusí mít nastartované motory. Na druhou stranu elektromotor představuje nezanedbatelnou část hmotnosti letadla. Efektivní využití nastane teprve tehdy, pokud čas pojíždění letadla po ranveji přesáhne 5 minut, aby nedošlo vinnou větší hmotnosti k nárůstu spotřeby. I přes pozitivní výsledky tato technologie nezaznamenala celosvětové rozšíření. [42]

Celá problematika emisí i tato práce se zabývá pouze dopravním sektorem. Dopravní letadla však nejsou jedinými létajícím prostředky v naší atmosféře. Jsou zde i letadla vojenská nejrůznějších typů, která se v armádách některých států počítají na stovky až tisíce. Vzhledem ke speciálním úkolům, která tato letadla plní, nelze snižování produkce emisí jejich motorů řešit, ani nad ním uvažovat. Veškerá snaha snižovat emise se tedy zabývá pouze civilním sektorem.

Vzhledem k exponenciálnímu růstu letecké dopravy a přes veškerou snahu leteckých výrobců se bohužel touto cestou nepodaří emise v dlouhodobém časové horizontu snižovat. Na řadu tedy přichází alternativní paliva, kterým se tato práce věnuje také. Jediné palivo, které by dokázalo dostatečně uspokojit požadavky leteckého odvětví na tvorbu nežádoucích emisí je vodík a elektrická energie. Projekty, které se těmito zdroji energie zabývají, zatím nedosahují uspokojivých výsledků. Je více než pravděpodobné, že s postupem času se vývoj spalovacích komor začne ubírat tímto směrem.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] MALCOLM V. LOWE. *Svět letectví - historie a současnost*. B.m.: Rebo, 2009. ISBN 978-80-255-0018-7.

[2] EASA. *Emise z letecké dopravy* [online]. [vid. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/cs/articles/emise-z-letecke-a-vodni-dopravy

[3] ICAO. *Foundation of the International Civil Aviation Organization* [online]. 2017 [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: https://www.icao.int/about-icao/pages/foundation-of-icao.aspx

[4] ICAO. *Úmluva o mezinárodním civilním letectví - Doc 7300* [online]. [vid. 2018-03-11]. Dostupné z: https://www.icao.int/publications/Pages/doc7300.aspx

[5] ICAO. *About ICAO* [online]. 2016 [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx

[6] ICAO. *ICAO Environmental Report 2016* [online]. B.m., 2016 [vid. 2018-02-10]. ICAO. Dostupné z: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO Environmental Report 2016.pdf

[7] ICAO. *CAEP* [online]. [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: https://www.icao.int/ENVIRONMENTAL-PROTECTION/Pages/CAEP.aspx

[8] ICAO. *Aircraft Noise Technology and International Noise Standards* [online]. nedatováno [vid. 2018-05-22]. Dostupné z: https://www.icao.int/Meetings/EnvironmentalWorkshops/Documents/2014-Kenya/3-2_NoiseTechnology_notes.pdf

[9] ICAO. *Technologické standardy ICAO* [online]. [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/technology-standards.aspx

[10] EASA. *European Aviation Safety Agency* [online]. nedatováno [vid. 2018-02-09]. Dostupné z: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Opinion No 09-2017.pdf

[11] REDDY, D R, Chi-Ming Lee. *Overview of Low Emission Combustion Research at NASA Glenn Impacts* [online]. 2017 [vid. 2018-02-07]. Dostupné z: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170001633.pdf

[12] EASA. *Evropská agentura pro bezpečnost letectví (EASA)* [online]. [vid. 2018-02-09]. Dostupné z: https://europa.eu/european-union/about-eu/agencies/easa_cs

[13] EASA. *Agentura EASA* [online]. [vid. 2018-02-07]. Dostupné z: https://www.easa.europa.eu/the-agency/the-agency

[14] ŘÍZENÍ LETOVÉHO PROVOZU. *Ochrana životního prostředí* [online]. [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: http://www.rlp.cz/spolecnost/odpovednost/Stranky/ozp.aspx

[15] CUMPSTY, Nick a Andrew HEYES. *Jet Propulsion* [online]. 2015 [vid. 2018-03-31]. Dostupné z: ftp://nozdr.ru/biblio/kolxo3/P/PC/PCfm/Cumpsty N. Jet Propulsion (CUP, 2003)(ISBN 9780521833561)(O)(321s)_PCfm_.pdf

[16] ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ. *SVAZEK II - EMISE LETADLOVÝCH MOTORŮ* [online]. 2015. Dostupné z: https://lis.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-16/L-16ii/data/print/L16-ii_cely.pdf

[17] ICAO. *Local Air Quality-LTO* [online]. [vid. 2018-02-14]. Dostupné z: https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/local-air-quality.aspx

[18] HOSPODKA JAKUB a Pleninger STANISLAV. *Vliv letecké dopravy na atmosféru*. Praha: ČVUT Praha, 2015. ISBN 978-80-01-05824-4.

[19] MINISTERSTVO DOPRAVY. *Vývoj emisí z letecké dopravy a jejích přepravních výkonů|Ročenka dopravy 2016* [online]. 2016 [vid. 2018-04-25]. Dostupné z: http://www.sydos.cz/cs/rocenka-2016/rocenka/htm_cz/cz16_814000.html

[20] KOCÁB JINDŘICH, Adamec Josef. *Letadlové motory*. Praha: Kant, 2000. ISBN 80-902914-0-6.

[21] KOZUBEK, ERVÍN, Jan TRŽIL a Jaroslav ULLRYCH. *Základy chemie*. Ostrava: VŠB Ostrava, 1999. ISBN 80-7078-553-5.

[22] KHANDELWAL, Bhupendra. *DEVELOPMENT OF GAS TURBINE COMBUSTOR* [online]. B.m., 2012 [vid. 2018-04-30]. CRANFIELD UNIVERSITY. Dostupné z: https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/9157/Khandelwal_B_Thesis_2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[23] LEFEBVRE, A, H. *Fuel effects on gas turbine combustion - Liner temperature, pattern factor and pollutant emissions* [online]. 1984. Dostupné z: doi:10.2514/3.45059

[24] RIZK, N. a H. MONGIA. *Emissions predictions of different gas turbine combustors* [online]. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1994 [vid. 2018-05-14]. Dostupné z: doi:10.2514/6.1994-118

[25] ODGERS, J a D KRETSCHMER. *The Prediction of Thermal NOx in Gas Turbines* [online]. 1988 [vid. 2018-05-14]. Dostupné z: http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2239806

[26] MACEK, Jan a Bohuslav SUK. *Spalovací motory I*. Praha: ČVUT Praha, 1996. ISBN 80-01-00919-X.

[27] *Evropský boj s emisemi, aneb co je EU ETS a kam směřuje? (1. díl)* [online]. [vid. 2018-05-15]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/evropska-unie/eu-ets-evropsky-system-obchodovani-s-emisemi/

[28] ROLLS-ROYCE. *The jet engine*. Fift. 1996. ISBN 0902121235.

[29] LEWANDOWSKI, Clare M. *Pushing the Envelop: A NASA Guide to Engines* [online]. 2015 [vid. 2018-04-12]. Dostupné z: https://er.jsc.nasa.gov/seh/ANASAGUIDETOENGINES[1].pdf

[30] CHANG, Clarence T. *NASA Low-Emissions Research* [online]. B.m., 2016 [vid. 2018-03-31]. b.n. Dostupné

z: https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170004752.pdf

[31] MONGIA, Hukam a Willard DODDS. *Low Emissions Propulsion Engine Combustor Technology Evolution Past, Present and Future* [online]. B.m., nedatováno [vid. 2018-04-30]. b.n. Dostupné z: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2004/PAPERS/609.PDF

[32] LIU, Yize a Xiaoxiao SUN. *Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines* [online]. B.m.: Pergamon. 2017 [vid. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037604211630118X

[33] KHOSRAVY, M. *Review of the New Combustion Technologies in Modern Gas Turbines* [online]. 2013 [vid. 2018-04-30]. ISBN 978-953-51-1166-5. Dostupné z: http://www.intechopen.com/books/progress-in-gas-turbine-performance/review-of-the-new-combustion-technologies-in-modern-gas-turbines

[34] RICK STICKLES, Jack Barrett. *TAPS II Combustor Final Report* [online]. 2013 [vid. 2018-05-01]. Dostupné z: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/research/aircraft_technology/cleen/reports/media/TAPS_II_Public_Final_Report.pdf

[35] WILFERT, Günter a Joerg SIEBER. *New Environmental Friendly Aero Engine Core Concepts* [online]. B.m., 2007. b.n. Dostupné z: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.619.6911&rep=rep1&type=pdf

[36] *NASA-nine-element-LDI* [online]. [vid. 2018-05-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Jay_Gore/publication/230912359/figure/fig1/AS:300477800566784@1448650898168/NASA-nine-element-top-hat-lean-direct-injection-LDI-assembly.png

[37] ANDREINI, Antonio a Gianluca CACIOLLI. *Experimental Investigation of the Flow Field and the Heat Transfer on a Scaled Cooled Combustor* [online]. 2014 [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: http://turbomachinery.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4028330

[38] GE. *Výrobce leteckých motorů | GE Aviation* [online]. [vid. 2018-03-18]. Dostupné z: https://www.geaviation.cz/

[39] GE AVIATION. *GE90 Commercial Aircraft Engine* [online]. 2015 [vid. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www.geaviation.com/commercial/engines/ge90/

[40] JIN, Yi a Xiaomin HE. *Design and performance of an improved trapped vortex combustor* [online]. B.m.: Elsevier. 2012 [vid. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936111604561

[41] STEPHAN, Servaty. *New Aero engine Core Concepts for an environmentally friendly air traffic of the future NEWAC Coordinator* [online]. nedatováno [vid. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.cdti.es/recursos/doc/eventoscdti/aerodays2011/5c2.pdf

[42] ČAPKOVÁ, Markéta. *EMISE V LETECKÉ DOPRAVĚ EMISION IN AIR*

TRAFFIC [online]. 2009 [vid. 2018-02-06]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/15_2009/Capkova1.pdf

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ACARE	Advisory Council of Aeronautic Research in Europe (Poradní rada pro letecký výzkum a inovace v Evropě)
AFRL	Air Force Research Laboratory (Výzkumná laboratoř vzdušných sil)
ANTLE	Affordable Near-Term Low Emissions (Program pro vývoj cenově dostupných technologií použitých v krátkodobém horizontu)
ATAG	The Air Tactical Assault Group (Skupina leteckých dopravců)
CAEP	The Committee on Aviation Environmental Protection (Výbor pro ochranu životního prostředí)
CFMI	CFM International
CLEAN	Component Validator of Environmentally Friendly Aero-Engine (Vývojový program komponentů pro nízkoemisní motory)
CO	oxid uhelnatý
CO_2	oxid uhličitý
CPP	Critical Propulsion Components (Výzkum kriticky namáhaných komponentů pohonných jednotek)
DAC	Double Annular Combustor (dvojitá prstencová spalovací komora)
EASA	European Aviation Safety Agency (Evropská agentura pro bezpečnost letectví)
EEFAE	Efficient & Environmentally Friendly Aero-Engine (Vývojový program nízkoemisních motorů s vysokou účinností)
EFTA	European Free Trade Association (Evropské sdružení volného obchodu)
EPA	Environmental Protection Agency (Agentura pro ochranu životního prostředí)
EU ETS	European Union Emmision Trading Systém (Evropský systém obchodování s emisemi)
GE	General Electric Company
CH	skupina nespálených uhlovodíků
IATA	International Air Transport Association (Mezinárodní asociace leteckých dopravců)

ICAO	International Civil Aviation Organization (Mezinárodní organizace pro civilní letectví)
LBC	Lean Burn Combustion (hoření stechiometricky chudé směsi)
LDI	Lean Direct Injection (Systém s přímým vstřikováním paliva)
LEC	Low Emission Combustor (nízkoemisní spalovací komora)
LPP	Lean Premixed Prevaporised (Systém mísení a odpařováním paliva před vstupem do plamence)
LTO	Landing and Take-Off (Cyklus vzletu a přistání)
NEWAC	New Aero Engine Core Concepts (Nové vývojové koncepty leteckých motorů)
NO_X	skupina oxidů dusíku
O_3	ozón
PERM	Partial Evaporation & Rapid Mixing (Systém s částečným odpařováním a rychlým mísením)
PICAO	The Provisional International Civil Aviation Organization (Prozatímní mezinárodní organizace pro civilní letectví)
ppm	parts per million (počet částic na milion)
ppm/ms	parts per million/milliseconds (počet částic na milion za milisekundu)
R&R	Rolls-Royce
RQL	Rich burn, Quick quench, Lean burn (hoření bohaté směsi, rychlé mísení se vzduchem, hoření chudé směsi)
SAC	Single Annular Combustor (prstencová spalovací komora)
SARP	Standards And Recommended Practices (normy a doporučené postupy)
TAPS	Twin Annular Premixing Swirler (dvojitá pstencová spalovací komora s tvorbou chudé směsi)
TVC	Trapped vortex combustion (Vírová spalovací komora)
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
VGC	Variable geometry combustors (spalovací komora s měnitelnou geometrií)

11 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tab. 1 Pro výpočet údajů o plynných emisí musí být dodrženy následující hodnoty:
Tab. 2 V uvedených vztazích se vyskytují tyto veličiny
Tab. 3 Souhrn veličin užitých ve vzorcích vyjadřující tvorbu škodlivin NO_X
Tab. 4 Souhrn veličin užitých ve vzorcích vyjadřující tvorbu škodlivin CO
Tab. 5 Souhrn veličin užitých ve vzorcích vyjadřující tvorbu škodlivin CH
Tab. 6 Shrnutí základních vlastností nízkoemisních komor

Obr. 1 Struktura podvýboru CAEP [8]
Obr. 2 Vývoj standardů CAEP s dílčími snižovanými hodnotami produkce NO_X [11]
Obr. 3 Postup měření cyklu vzletu a přistání (LTO) [17]
Obr. 4 Množství všech emisí vyprodukovaného leteckou dopravou [19]
Obr. 5 Předpokládaný vývoj spotřeby alternativního
Obr. 6 Trubková spalovací komora [20]
Obr. 7 Proudění ve spalovací komoře [28]
Obr. 8 Závislost směšovacího poměru na oblasti stabilního spalování a jeho účinnosti [26]
Obr. 9 Vznik jednotlivých emisí na fázi letu [20]
Obr. 10 Oblasti vzniku jednotlivých emisí uvnitř plamence [30]
Obr. 11 Základní typy spalovacích komor [20]
Obr. 12 Prstencová spalovací komora [28]
Obr. 13 Pracovní oblasti spal. komor dle typu v závislosti na poměru stlačení a množství NO_X dle standardů CAEP [15]
Obr. 14 Schéma proudění při principu RQL [33]
Obr. 15 Princip činnosti RQL [33]
Obr. 16 Proces spalování LBC technologií [34]
Obr. 17 Produkce NO_X v závislosti na tahu motoru a typu jeho spalování [11][30]
Obr. 18 Vyvíjené koncepty programu NEWAC[35]
Obr. 19 Vstřikovací tryska typu LDI a včetně rozměrů [37]
Obr. 20 Princip spalování metodou PERM [38]
Obr. 21 Konstrukční řešení komory SAC (vlevo) s jednoduchou primární zónou a komory DAC (vpravo) s pilotním a hlavním stupněm v primární zóně [31]
Obr. 22 Spalovací komora typu TAPS od firmy GE [39]
Obr. 23 Spal. komora s proměnlivou geometrií [22]
Obr. 24 Schéma spalovací komory typu TVC [33]
Obr. 25 Pracovní oblasti nových koncepcí v závislosti na poměru stlačení a množství produkce NO_X dle standardů CAEP [36]