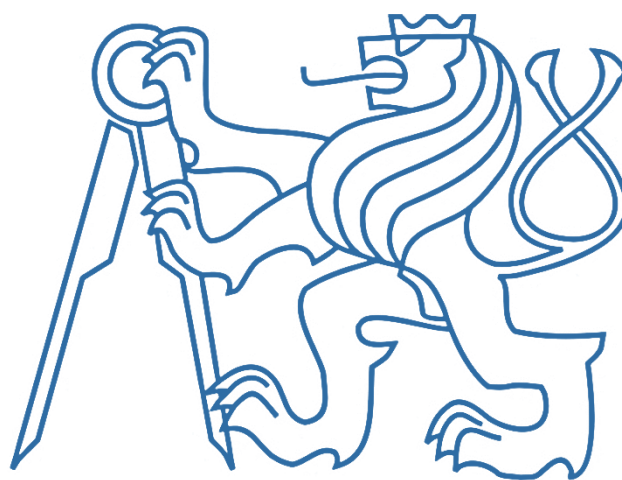


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta dopravní

Ústav letecké dopravy



Vzt'ah meteorologických procesov
a kondenzačných stôp

Bc. Jakub Hrubčo

DIPLOMOVÁ PRÁCA

2016



K621..... Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Jakub Hrubčo

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Vztah meteorologických procesů a kondenzačních stop**

Název tématu (anglicky): Relationship of Meteorological Processes and Contrails

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Kondenzační stopy letounů
- Meteorologické procesy atmosféry z pohledu letectví
- Podmínky a parametry atmosféry nutné pro tvorbu kondenzačních stop
- Vliv provozu letounů na zahřívání planety
- Provozovatelé vs. kondenzační stopy



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Meteorology and Atmospheric Physics
Kenneth B. McCool: Aviation Meteorology Unscrambled
Gossling S.: Climate Change and Aviation: Issues, Challenges and Solutions

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jakub Kraus, Ph.D.**
doc. Ing. Vladimír Němec, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **30. července 2015**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2016**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Stanislav Szabo, PhD. MBA
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek, dr. h. c.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Jakub Hrubčo
jméno a podpis studenta

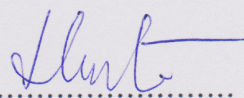
V Praze dne..... 1. července 2016

Čestné prehlásenie

„Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne, a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o etické príprave vysokoškolských záverečných prác.

Nemám závažný dôvod proti užívaniu tohto školského diela v zmysle § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o práve autorskom a o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon)

V Prahe dňa: 30.11.2016



Jakub Hrubčo

Pod'akovanie

Ďakujem Ing. Jakubu Krausovi Ph.D. za vedenie mojej diplomovej práce, jeho trpezlivosť, rady a pripomienky. Ďalej ďakujem Mgr. Ivete Kameníkovej za odborné vedenie práce z pohľadu meteorológie a v neposlednom rade ďakujem svojej rodine a priateľom za podporu pri tvorbe tejto práce.

Jakub Hrubčo

Názov práce: Vzťah meteorologických procesov a kondenzačných stôp
Autor: Jakub Hrubčo
Obor: Letecká doprava
Druh práce: Diplomová práca
Vedúci práce: Ing. Jakub Kraus Ph.D
Ústav letecké dopravy, Fakulta dopravní, České vysoké učení
technické v Praze

Konzultant: Mgr. Iveta Kameníková

Abstrakt: Práca sa zaoberá popisom meteorologických podmienok, ktoré vplývajú na formovanie, životnosť a morfológiu kondenzačných stôp. Obsahuje základné znalosti z meteorológie potrebné k porozumeniu problematiky. Popisuje vplyv emisií leteckého priemyslu na životné prostredie. Definuje prvky a metódy prostredníctvom ktorých môžeme ovplyvniť výskyt kondenzačných stôp a popisuje a hodnotí ich aplikáciu. Tým, že sa práca pohybuje na teoretickej úrovni, vytvára podklad pre ďalšie spracovanie a pochopenie tejto problematiky.

Kľúčové slová: Kondenzačná stopa, Atmosféra, Letecké emisie, Albedo, Radiačné pôsobenie

Title: Relationship of meteorological processes and contrails

Author: Jakub Hrubčo

Abstract: The thesis describes meteorological conditions which have an influence on formation, persistence and spreading of contrails. It also contains basic knowledge of meteorology which is required to understand the issue. The thesis defines elements and methods through which humans can influence an occurrence of contrails and describes pros and cons of their application. This theoretical research should serve as a groundwork for future additional research of the issue.

Key words: Contrail, Atmosphere, Aircraft emissions, Albedo, Radiative forcing

Obsah

| | |
|--|----|
| Obsah | 5 |
| Zoznam použitých skratiek..... | 7 |
| Úvod | 8 |
| 1. Atmosféra Zeme | 10 |
| 1.1 Vlhkosť | 12 |
| 1.2 Oblačnosť..... | 13 |
| 1.2.1 Cumulus (Cu) | 14 |
| 1.2.2 Cumulonimbus (Cb) | 15 |
| 1.2.3 Nimbostratus (Ns) | 15 |
| 1.2.4 Stratus (St)..... | 16 |
| 1.2.5 Altostratus (As) | 17 |
| 1.2.6 Cirrostratus (Cs) | 17 |
| 1.2.7 Stratocumulus (Sc) | 18 |
| 1.2.8 Altocumulus (Ac) | 19 |
| 1.2.9 Cirrocumulus (Cc)..... | 19 |
| 1.2.10 Cirrus (Ci)..... | 20 |
| 1.3 Oblačnosť a žiarenie | 22 |
| 2. Vplyv prevádzky lietadiel na zahrievanie planéty..... | 23 |
| 2.1 Emisie leteckého priemyslu | 24 |
| 2.1.1 Oxidy dusíka..... | 24 |
| 2.1.2 Oxid uhličitý | 25 |
| 2.1.3 Vodná para..... | 25 |
| 2.1.4 Pevné častice..... | 26 |
| 3. Kondenzačné stopy letúnov | 27 |
| 3.1 Kondenzačná stopa | 27 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2 | Contrail cirrus | 29 |
| 3.3 | Aerodynamické kondenzačné stopy | 31 |
| 3.4 | Distrails | 34 |
| 4. | Vzduchové hmoty | 37 |
| 4.1 | Vietor | 37 |
| 4.1.1 | Strih vetra | 39 |
| 4.1.2 | Jet-stream..... | 39 |
| 5. | Tvorba kondenzačných stôp | 43 |
| 5.1 | Vznik a vývoj kondenzačných stôp | 43 |
| 5.2 | Predpoveď kondenzačných stôp | 47 |
| 5.2.1 | Schmidt-Applemanovo kritérium | 47 |
| 5.3 | Mikrofyzikálna štruktúra | 52 |
| 6. | Prevádzkovatelia vs. Kondenzačné stopy..... | 53 |
| 6.1 | Redukovanie kondenzačných stôp..... | 53 |
| 6.1.1 | Prispôsobenie leteckej premávky | 55 |
| 6.1.2 | Technológie motorov a alternatívne palivá | 59 |
| 6.1.3 | Konštrukcia lietadla | 61 |
| 6.1.4 | Externé zariadenia | 61 |
| | Záver..... | 63 |
| | Použité zdroje | 65 |
| | Zoznam obrázkov | 76 |
| | Zoznam tabuliek | 78 |

Zoznam použitých skratiek

| | | |
|-------|---|--|
| Ac | Alto cumulus | vysoká kopa |
| APIP | aircraft-produced ice crystals | efekt produkovania ľadových kryštálov lietadlom |
| As | Alto stratus | vysoká sloha |
| CAT | Clear Air Turbulence | turbulencia v bezoblačnom prostredí |
| Cb | cumulonimbus | dažďová kopa |
| Cc | Cirrocumulus | riasokopa |
| Ci | Cirrus | riasa |
| Cs | Cirrostratus | riasosloha |
| Cu | Cumulus | kopa |
| DMSP | Defense Meteorological Satellite Program | meteorologický obranný satelitný program |
| FAA | Federal Aviation Administration | Federálna letecká správa Spojených štátov amerických |
| ICAO | International Civil Aviation Organization | Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change | Medzinárodný výbor pre zmenu klímy |
| MTOW | Maximum Take-Off Weight | Maximálna vzletová hmotnosť |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration | Národný výbor pre letectvo a kozmonautiku |
| Ns | Nimbostratus | dažďová sloha |
| RWY | Runway | vzletová a pristávací dráha |
| Sc | Stratocumulus | slohokopa |
| St | Stratus | sloha |
| USA | United States of America | Spojené štáty americké |
| USEPA | United States Environmental Protection Agency | Americká agentúra pre ochranu životného prostredia |
| WMO | World Meteorological Organization | Svetová meteorologická organizácia |

Úvod

Štúdium kondenzačných stôp, ich vznik, životnosť, morfológia a premena na contrail-cirrus začal relatívne nedávno. Prvé výskumy začali spolu s druhou svetovou vojnou, kedy schopnosť detekcie lietadla hrala veľmi dôležitú úlohu. Vďaka kondenzačným stopám mohlo byť nepriateľské lietadlo ľahšie spozorovateľné. Na druhej strane, piloti stíhacích lietadiel niekedy využívali kondenzačné stopy na ukrytie sa pred nepriateľom. Kondenzačné stopy takisto občas spôsobovali, že letka mala kvôli zlej viditeľnosti problém udržať sa vo formácii, čo mohlo viesť k zrážkam lietadiel. Po druhej svetovej vojne nastal útlm vo výskume kondenzačných stôp a znovu sa začali skúmať až v deväťdesiatych rokoch dvadsiateho storočia. Tentoraz to už bolo z dôvodu ich vplyvu na životné prostredie.

Dlhú dobu sa vedci a meteorológovia nevedeli zhodnúť, či majú kondenzačné stopy ochladzujúci alebo otepľujúci účinok. Kondenzačné stopy sa totiž veľmi ťažko skúmajú. Niekedy miznú takmer ihneď po ich vzniku, inokedy pretrvávajú na oblohe hodiny aj dni a tým pádom sa zlievajú do seba a je veľmi ťažké, dokonca až nemožné rozlíšiť jednotlivé stopy a z nich vzniknuté cirry od prirodzených cirrov. Po 11.septembri 2001 boli na tri dni zrušené všetky lety nad územím Spojených štátov amerických. Stalo sa tak po prvýkrát v histórii prúdovej leteckej dopravy, že nad takýmto rozsiahlym územím nepremávali takmer žiadne lietadlá. Meteorológovia z NASA si uvedomili, že majú jedinečnú príležitosť zozbierať dáta o „čistom“ ovzduší. David Travis [1] zozbieral dáta z viac ako 4 000 meteorologických staníc po celom území USA a zistil, že rozdiel medzi najvyššou dennou a najnižšou nočnou teplotou bol v týchto troch dňoch približne o 1°C väčší ako dlhodobý priemer v rovnakom čase od roku 1971 do roku 2000. Denné teplotné maximum narástlo, zatiaľ čo nočné teplotné minimum kleslo. Dodal však, že k tomuto relatívne vysokému číslu prispelo aj neobvykle jasné počasie v čase merania. Takisto porovnal aj dáta v intervaloch tri dni pred výlukou a tri dni po výluke, t.j. 8.-11.septembra a 14.-17.septembra s dátami z predchádzajúcich rokov a zistil, že teplotný výkyv bol aj v týchto dňoch oveľa menší, resp. že sa zhodoval s dlhodobým priemerom. S vysokou pravdepodobnosťou tak dokázal vplyv kondenzačných stôp na teplotu na Zemi a tiež uviedol, že kondenzačné stopy majú globálne pravdepodobne otepľujúci efekt.

Doterajšie výskumy boli úzko špecifikované na určitú oblasť skúmania v rámci kondenzačných stôp. Preto sa ako vhodným prínosom práce javilo zosumarizovať

uskutočnené výskumy a v rámci predchádzania alebo znižovania vzniku kondenzačných stôp porovnať jednotlivé metódy a určiť ich výhody a nevýhody, resp. zhodnotiť ich prínos a negatívny dopad.

Ďalším cieľom bolo nájsť medzery v existujúcich výskumoch, resp. určiť čo nám v rámci znalostí o kondenzačných stopách a contrail-cirroch chýba.

S vyššie spomenutým súvisí definovanie alebo identifikácia prvkov, ktoré na formovanie kondenzačných stôp, resp. contrail cirrov pôsobia a určiť akým spôsobom a akou mierou sa na tomto procese podieľajú.

1. Atmosféra Zeme

Kondenzačné stopy vznikajú v určitom prostredí. To prostredie je atmosféra našej Zeme. Preto k pochopeniu kondenzačných stôp, ich vzniku, životnosti, morfológií a vlastností je potrebné porozumieť niektorým parametrom, stavom a javom v atmosfére. Tomuto sa venuje táto kapitola.

Atmosféra je zmes plynov a aerosólov, ktoré tvoria obal Zeme. Tvorí prechodnú vrstvu medzi zemským povrchom a medziplanetárnym priestorom. Hustota atmosféry s nadmorskou výškou klesá, pretože gravitačná sila, ktorou je atmosféra priťahovaná k Zemi, klesá so vzdialenosťou od Zeme. [2]

Vývoj atmosféry do podoby, akú ju poznáme dnes, zatiaľ nebol jednoznačne popísaný. Predpokladá sa, že dnešná atmosféra sa sformovala postupným uvoľňovaním plynov z vnútra planéty a metabolickými aktivitami rôznych foriem života. Jej súčasné molekulárne zloženie je: 78,08% dusík (N_2), 20,95% kyslík (O_2), 0,93% argón (A), 0-4% voda (H_2O), 0,04% oxid uhličitý (CO_2) a stopové množstvá iných plynov, napr. neón (Ne), hélium (He), kryptón (Kr). [2]

Pokles tlaku vzduchu sa s výškou spomaľuje, dá sa to približne popísať exponenciálnou funkciou. Zmena teploty s výškou sa žiadnou jednoduchou funkciou popísať nedá. Podľa zmeny teploty s výškou sa atmosféra vertikálne delí na 5 vrstiev [3] (Obr. 1.1):

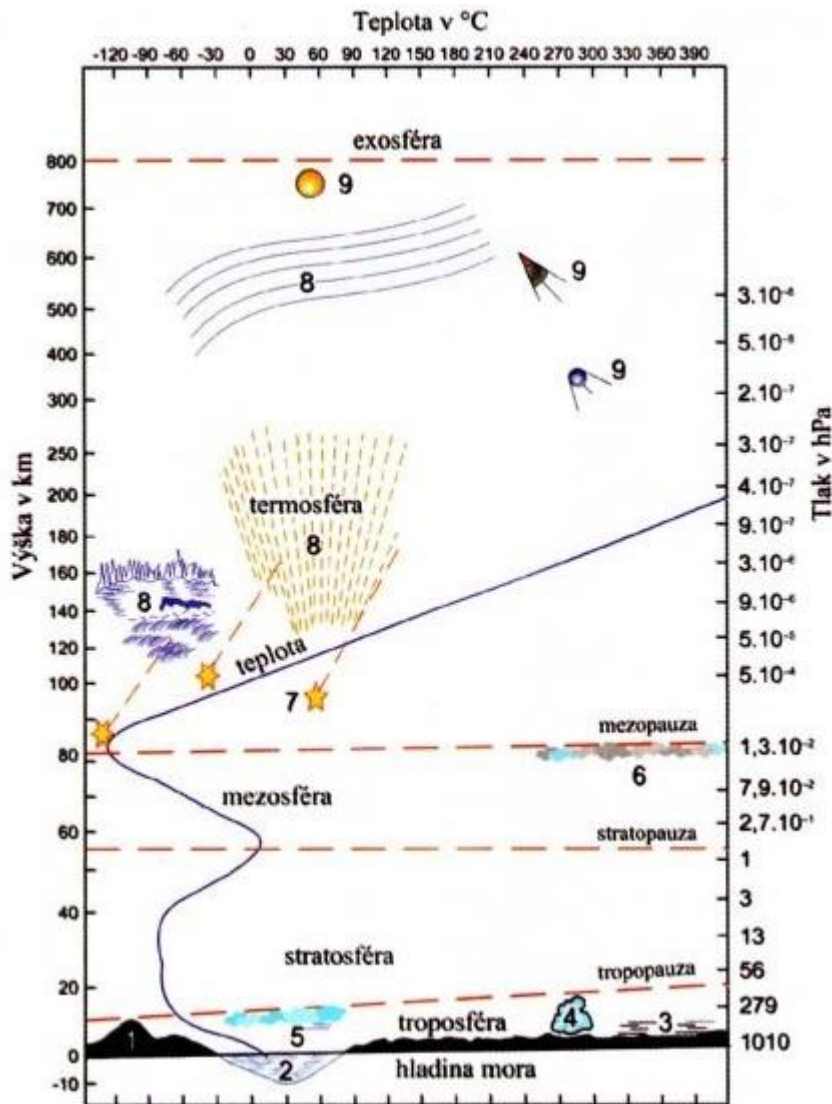
Troposféra sa rozprestiera od zeme do výšky 10 až 11 kilometrov a odohrávajú sa v nej takmer všetky prejavy počasia [4].

Stratosféra nadväzuje na troposféru a siaha do výšky približne 50 kilometrov. Nachádza sa v nej ozónová vrstva, ktorá absorbuje a rozptyľuje ultrafialové žiarenie zo Slnka [4].

Mezosféra začína nad stratosférou a končí vo výške približne 80 kilometrov [4].

Termosféra siaha až do výšky 800 až 1 000 kilometrov. V tejto vrstve sa nachádzajú umelé družice Zeme [4].

Exosféra je vonkajšia vrstva atmosféry a končí približne vo výške 10 000 kilometrov nad povrchom Zeme [5].



Obrázok 1.1: Vrstvy atmosféry delené podľa zmeny teploty s výškou [6].

Teplota atmosféry a Zemskeho povrchu je ovplyvňovaná elektromagnetickým žiarením, ktoré môžeme rozdeliť na dva druhy: žiarenie zo Slnka a žiarenie zo Zeme.

Žiarenie zo Slnka má charakter krátkych vln s vlnovou dĺžkou 1 – 10 μm a nachádza sa v pásme ultrafialového, viditeľného a infračerveného spektra. Časť slnečného žiarenia je absorbovaná atmosférickými plynmi, najmä vodnou parou, a zahrieva tak atmosféru priamo, časť sa odrazí späť do vesmíru a časť dopadá na Zemský povrch. Kvantum žiarenia, ktoré sa dostane až na zem, závisí najmä od množstva oblačnosti. Pri jasnej oblohe dopadne takmer všetko žiarenie na povrch, zatiaľ čo pri prítomnosti mohutných mrakov sa veľké množstvo energie žiarenia (až okolo 80%) odrazí do vesmíru. Časť krátkovlnného žiarenia, ktoré sa odrazí od daného povrchu sa nazýva „albedo“. Napríklad pre čerstvo napadnutý sneh môže mať albedo hodnotu až 0,95. Kvantum žiarenia

dopadnutého na zemský povrch tiež závisí na zemepisnej šírke, ročnom období, dennej dobe a orientácii zemského povrchu voči Slnku [2].

Žiarenie zo Zeme má charakter dlhých vln s vlnovou dĺžkou 4 – 30 μm a dopadá v infračervenej časti spektra [2]. Slnčné žiarenie dopadajúce na zemský povrch spôsobuje, že sa planéta zahrieva dovedy, kým nezačne emitovať rovnaké množstvo energie ako absorbuje od Slnka [7].

1.1 Vlhkosť

Vlhkosť vzduchu je spomedzi troch hlavných faktorov ovplyvňujúcich tvorbu kondenzačných stôp ten najvýznamnejší, preto som sa rozhodol venovať tejto charakteristike ovzdušia samostatný odstavec. Vzduch môžeme charakterizovať ako zmes suchého vzduchu a vodnej pary, ktorej objemový obsah je rôzny podľa danej situácie. Obvykle vzduch obsahuje 0 až 4% objemu vodnej pary. Tento obsah vodnej pary môžeme vyjadriť relatívnou vlhkosťou, ktorá uvádza množstvo vodnej pary vo vzduchu relatívne k vlhkosti vzduchu nasýteného vodnou parou [4]. Molekuly sa v plyne a tekutine pohybujú chaoticky, v pevnej látke pravidelne kmitajú v jej mriežkovej štruktúre. Kinetická energia týchto molekúl odpovedá ich rýchlosti a prejavuje sa teplotou. Tie molekuly, ktoré majú dostatočnú kinetickú energiu k prekonaniu kohéznych síl a ich pohyb smeruje smerom k voľnému povrchu kvapaliny, opúšťajú kvapalinu a dostávajú sa do vzduchu. Tento proces nazývame odparovanie. Kvapalinu teda opúšťajú molekuly s relatívne najvyššou kinetickou energiou, čiže s najvyššou teplotou. Preto sa voda odparovaním ochladzuje. Molekuly však súčasne prechádzajú zo vzduchu do vody a predávajú jej svoju energiu – voda sa zahrieva. Ak je počet molekúl prechádzajúcich z kvapalného do plynného skupenstva rovnaký ako počet molekúl prechádzajúcich z plynného do kvapalného, nazývame to rovnovážny stav a voda ani vzduch tak svoju teplotu nemenia. Ak však nad hladinou fúka vietor, odnáša väčšinu molekúl, ktoré opustili vodu preč. Dochádza tak k úbytku objemu vody a jej ochladzovaniu. Z vody do vzduchu môže pri danej teplote prejsť určitý maximálny počet molekúl. Tento stav sa nazýva nasýtenie a parciálny tlak týchto molekúl je tlak nasýtenej vodnej pary. Ak by sme chceli zvýšiť počet molekúl, ktoré by boli schopné prejsť z vody do vzduchu, museli by sme zvýšiť teplotu vzduchu. Podobný vzťah môžeme popísať aj medzi ľadom a parou.

1.2 Oblačnosť

Oblačnosť vyjadruje stupeň pokrytia oblohy oblakmi, pričom charakterizuje nielen celkový ráz počasia, ale nepriamo udáva aj trvanie slnečného svitu. Oblačnosť má zároveň veľký význam pre tepelnú bilanciu zemského povrchu. V klimatológii sa oblačnosť vyjadruje v desatinách pokrytia oblohy [8], v synoptickej meteorológii v osminách [9]. Pre jednotlivé stupne oblačnosti sa v synoptickej meteorológii používajú označenia uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Stupne oblačnosti [8,9].

| oblačnosť v osminách | slovné označenie | symbol |
|----------------------|---------------------------|---|
| 0 | jasno |  |
| 1 | jasno |  |
| 2 | takmer jasno |  |
| 3 | malá oblačnosť |  |
| 4 | polojasno / polooblačno * |  |
| 5 | oblačno |  |
| 6 | oblačno |  |
| 7 | takmer zamračené |  |
| 8 | zamračené |  |

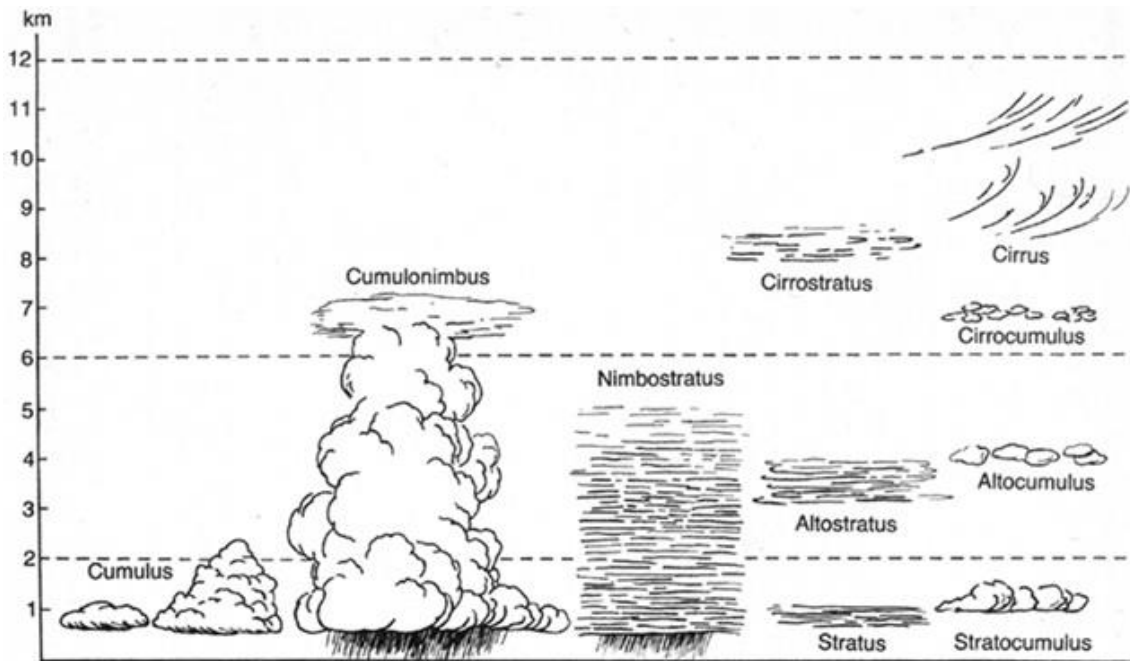
* v závislosti od hustoty oblačnosti

Oblak je viditeľná sústava častíc vody alebo kryštálikov ľadu v atmosfére. Za oblak sa považuje aj hmla, ktorá sa dotýka zemského povrchu. Oblaky sú výsledkom kondenzácie a kryštalizácie vodnej pary v ovzduší a sú v ustavičnom vývoji, nepretržite vznikajú a vyparujú sa. Oblak je len prechodne viditeľnou časťou celkovej hmoty vody, ktorá sa podieľa na atmosférických procesoch.

V miernych zemepisných šírkach sa oblaky vyskytujú približne do výšky 15 km. Podľa výšky rozlišujeme tri druhy oblačnosti (Obr. 1.2):

- nízka oblačnosť, resp. nízke oblaky (od povrchu zeme do výšky 2 km) - stratus, stratocumulus, cumulus
- stredná oblačnosť, resp. stredné oblaky (2 až 7 km) - altocumulus, altostratus
- vysoká oblačnosť, resp. vysoké oblaky (5 až 13 km) - cirrus, cirrostratus, cirrocumulus

Rozpoznávame ešte oblaky vertikálneho vývoja, ktoré zasahujú do viacerých vrstiev: nimbostratus, cumulonimbus



Obrázok 1.2: Vertikálne delenie oblačnosti [9].

1.2.1 Cumulus (Cu)

Cumulus (Obr. 1.3) vzniká v dôsledku vzostupných prúdov v atmosfére. Tvorí ho prevažne osamotené oblaky nápadne vyvinuté do výšky. Jeho obrys je ostro ohraničený, má dobre pozorovateľnú základňu a vrcholky sú tvorené kupolami. Sú to vodné oblaky nezrážkového charakteru a obvykle sprevádzajú teplé slnečné počasie. Výnimku tvoria cumuly dostatočne rozvinuté do výšky, ktoré môžu byť zdrojom zrážok a cumulus sa taktiež môže stať základom pre vznik cumulonimbu [4,10,11].



Obrázok 1.3: Cumulus [11].

1.2.2 Cumulonimbus (Cb)

Cumulonimbus (Obr. 1.4) je búrkový mrak, ktorý rastie do veľkých výšok - okolo 5 000 až 15 000 metrov (v miernom podnebnom pásme). Je veľmi podobný cumulu, ale na rozdiel od neho nezachováva v hornej časti ostré obrysy. Je to typický búrkový mrak sprevádzaný bleskami a často aj krupobitím. Základňa sa nachádza vo výške 300 až 1 500 metrov, je veľmi tmavá, ale nachádzajú sa na nej svetlejšie miesta, ktoré určujú existenciu vertikálneho prúdenia [11,12,13].

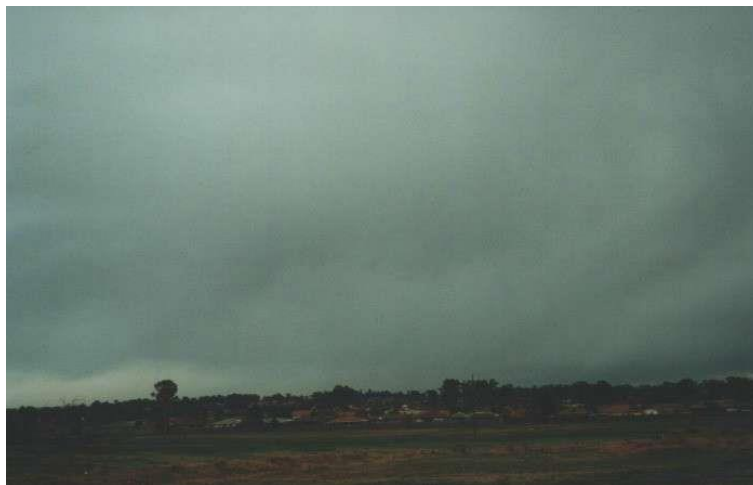


Obrázok 1.4: Cumulonimbus [11].

1.2.3 Nimbostratus (Ns)

Nimbostratus (Obr. 1.5) má horizontálne rozmery tisíce kilometrov, vertikálnu mohutnosť niekoľko kilometrov a je zdrojom trvalých zrážok. Nimbostraty tvoria bez tvarú jednoliatu vrstvu a vzhľadom k ich mohutnosti a hustote cez nich nepresvitá žiadne slnečné svetlo. Vplyvom veľkej vlhkosti z vypadávajúcich zrážok sa pod základňou nimbostratu často

vytvárajú ďalšie oblaky. Je to zmiešaný mrak, čiže v drvivej väčšine ho tvoria ako kvapôčky vody, tak vodné kryštáliky. Len vo výnimočných prípadoch je zložený iba z vodných kvapiek [4,11,12,14].



Obrázok 1.5: Nimbostratus [11].

1.2.4 Stratus (St)

Stratus tvorí (Obr. 1.6) sivú jednoliatu vrstvu s nízkou základňou (do 1 000 metrov, obvykle okolo 600 metrov). Zrážky z neho vypadávajú výnimočne a to v podobe mrholenia alebo mrznúcich kvapiek. Najčastejšie vzniká z hmly, ktorej základňa sa postupne dvihne zo zeme. Obecne sa takejto oblačnosti hovorí nízka inverzná oblačnosť, ktorá sa môže napríklad vplyvom denného chodu teploty vzduchu rozpúšťať a stratus sa môže transformovať na Stratocumulus alebo Cumulus. [4,11,12].



Obrázok 1.6: Stratus [11].

1.2.5 Altostratus (As)

Altostratus (Obr. 1.7) je zložený z vodných kvapiek a ľadových kryštálikov. Tvorí ho kompaktná šedivá alebo modravá vrstva s príznačnou vláknitou štruktúrou. Niektoré jeho časti môžu byť dostatočne tenké, aby prepúšťali slnečný svit. Vyskytuje sa vo výške 2 až 5 kilometrov a môžu z neho vypadávať zrážky. Pretože sa jedná pomerne vodnatý mrak, môže v ňom vznikáť silná námraza na nábežných hranách častí lietadla, prelietavajúceho týmto mrakom. [4,11,12,15].



Obrázok 1.7: Altostratus [11].

1.2.6 Cirrostratus (Cs)

Cirrostratus (Obr. 1.8) je priesvitný plošný amorfný mrak, ktorý nezachytáva väčšinu slnečného žiarenia. Vzniká pozvoľným stúpaním rozsiahlych vrstiev vzduchu do veľkých výšok a je tvorený kryštálkami ľadu a zrážky z neho nevypadávajú. Svetlo, ktoré cez mrak prechádza, a na kryštálikoch láme a rozkladá na farebné spektrálne zložky, preto je sprevádzajúcim javom tohto mraku tzv. slnečné alebo mesačné halo, teda svetelný kruh okolo slnka alebo mesiaca sfarbený dúhovými farbami[4,11,12,16].



Obrázok 1.8: Cirrostratus [11].

1.2.7 Stratocumulus (Sc)

Stratocumulus (Obr. 1.9) je vodný mrak, ale môžu z neho vypadávať aj krúpy, prípadne snehové vločky. Vzniká miešaním teplého vlhkého vzduchu s chladným suchým a jeho následným posunom pod tento teplý. Je tvorený šedivými alebo bielymi chumáčmi. Základňu má položenú nízko, a to 300 až 2 000 m nad zemou. [4,11,12].



Obrázok 1.9: Stratocumulus [11].

1.2.8 Altocumulus (Ac)

Altocumulus (Obr. 1.10) tvoria menšie aj väčšie chumáče bielej až sivej farby usporiadané do radov, niekedy aj vo viacerých vrstvách. Tvoria ho drobné kvapôčky vody, avšak pri veľmi nízkych teplotách môžu vzniknúť ľadové kryštálky. Objavuje sa vo výškach 2 až 6 kilometrov a nikdy nepokrýva celú oblohu. [4,17].



Obrázok 1.10: Altocumulus [11].

1.2.9 Cirrocumulus (Cc)

Cirrocumulus (Obr. 1.11) sa objavuje pomerne zriedka. Skladá sa z ľadu, výnimočne z kvapôčok podchladenej vody, a tvorí súvislú vrstvu drobných usporiadaných mráčikov vo výškach 6 až 10 km. Jednotlivé časti mraku môžu byť oddelené alebo dotýkajúce sa, vyzerajú však ako pravidelne usporiadané. Zo cirrocumulu nevypadávajú zrážky [4,12].



Obrázok 1.11: Cirrocumulus [11].

1.2.10 Cirrus (Ci)

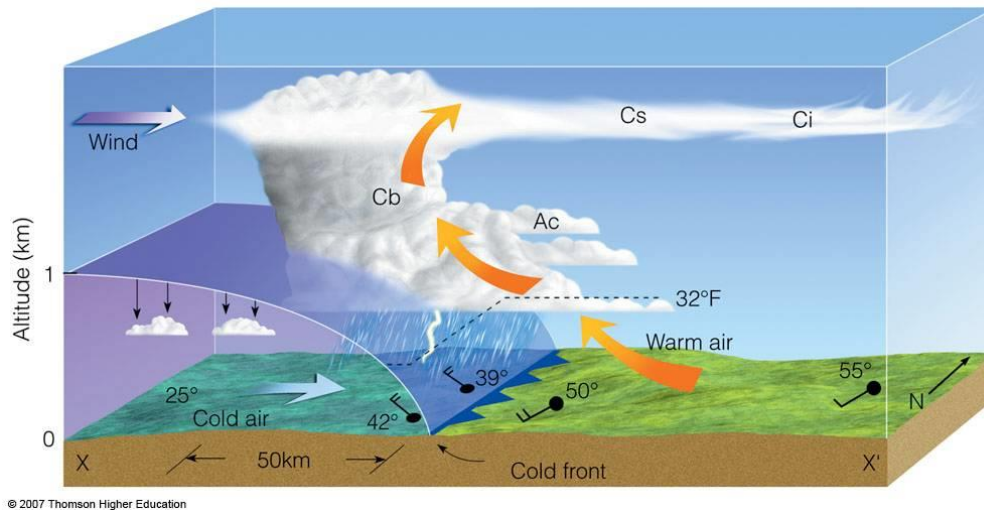
Cirrus (Obr. 1.12) je mrak najvyšších vrstiev, kde sa nachádza minimálne množstvo vodnej pary. Kvôli nízkej teplote (-30 až -60°C) vo vrstvách atmosféry kde sa vyskytuje, je tvorený výhradne kryštálkami ľadu formovaných do jemných bielych vlákien a tým sa odlišuje od väčšiny ostatných mrakov, ktoré sú tvorené hlavne z vodných kvapôčok.

Vyskytuje sa vo výškach okolo 6 až 10 km, často na hornej hranici troposféry, niekedy aj v stratosfére. Je vždy priesvitný pre slnečné alebo mesačné svetlo a má hodvábný lesk a vzhľad. Nikdy z neho nevypadávajú zrážky, ale často je príznakom blížiaceho sa atmosférického frontu. Vzniká najčastejšie výstupným pohybom teplejšieho vzduchu na frontálnom rozhraní s chladnejšou vzduchovou hmotou, a tiež v horných častiach búrkových mrakov (Obr. 1.14).



Obrázok 1.12: Cirrus [11].

Výskyt cirrov na oblohe často znamená predzvesť približujúceho sa teplého frontu. Vlákňité cirry sú príznakom toho, že vo vysokých hladinách troposféry už dochádza k prílivu relatívne teplého vzduchu. Vzhľadom k tomu, že účinne odrážajú dopadajúce slnečné žiarenie, spôsobujú cirry čiastočné utlmenie slnečného svetla a tepla dopadajúceho na zemský povrch. Okrem toho, kryštálky týchto mrakov rozptyľujú slnečné svetlo a vďaka tomu sa znižujú kontrasty v osvetlení krajiny a tiež teplotné kontrasty zemského povrchu zahrievaného Slnkom. [4,12].



Obrázok 1.13: Vznik cirru [18].

Svetová meteorologická organizácia (WMO) definuje cirrus takto: *Oddelené mraky vo forme jemných bielych vlákien alebo bielych alebo prevažne bielych škvŕn alebo úzkych pásov. Tieto mraky majú vláknitý vzhľad alebo hodvábný lesk alebo boje.* Táto definícia je čisto morfológická a je založená na vizuálnom pozorovaní počas denného svetla [19].

Existujú dva špeciálne druhy cirrov. Jeden z nich je takzvaný „*subvizuálny cirrus*“. Tento cirrus je zaujímavý tým, že jeho častice sú tak malé, že nie je viditeľný zo zeme voľným okom a taktiež ho nedokáže objaviť ani väčšina automatických algoritmov pre detekciu mrakov [20]. Navyše, subvizuálne cirry sa väčšinou vytvárajú v tropickom podnebnom pásme blízko tropopauzy, kde sa väčšina prieskumných lietadiel nedostane, preto tieto cirry zatiaľ neboli detailne preskúmané [21]. Objavený bol začiatkom druhej svetovej vojny, keď vojenský piloti letiaci nad trópmi hlásili vizuálnu prítomnosť cirrov, a pritom zo zeme nebola viditeľná žiadna oblačnosť. To bolo potvrdené začiatkom deväťdesiatych rokov 20. storočia, kedy bol skonštruovaný prvý lidar, ktorý zaznamenal overené dáta o týchto cirroch. Lidar je skratka pre „*light detection and ranging*“, čo je technológia merania vzdialenosti pomocou laserového paprsku [22]. V roku 1986 popísal autor A. J. Heymsfield pozorovania nad atolom Kwajalein v Tichom oceáne, kde piloti a dáta z lidar-u jasne potvrdili prítomnosť cirrov, zatiaľ čo merania DMSP („*Defense Meteorological Satellite Program*“) a pozemný personál neidentifikoval žiadne cirry [23]. Vo svojej práci z roku 1992 definovali autori Sassen a Cho subvizuálny cirrus ako cirrus, ktorého častice majú optickú hĺbku menšiu ako 0,03 [24]. Aj napriek jeho mikroskopickej štruktúre má tento cirrus nezanedbateľný vplyv na ohrievanie Zeme a jej atmosféry [21].

Druhým typom je takzvaný „*contrail cirrus*“. Tomu je venovaná samostatná kapitola.

1.3 Oblačnosť a žiarenie

Výskyt a charakteristika mrakov hrajú kľúčovú úlohu v klimatických zmenách. Pomer albeda a skleníkového efektu daného mraku určuje, či daný typ mraku spôsobuje otepľovanie alebo ochladzovanie zemského povrchu, resp. atmosféry. Nízko položené a mohutné mraky, napr. stratocumulus, nimbostratus alebo cumulonimbus, primárne odrážajú slnečné žiarenie a spôsobujú tak ochladzovanie zemského povrchu. Tenké mraky s vysoko položenou základňou, ktorých albedo má veľmi nízku hodnotu, naopak prepúšťajú takmer všetko slnečné žiarenie. Navyše zachytávajú a odrážajú časť zemského infračerveného žiarenia späť na povrch, a tak znásobujú jeho zahrievanie. Intenzita týchto emisií priamo závisí najmä na teplote mraku a tiež na jeho mohutnosti a zložení častíc, ktoré ho tvoria. Vrchná vrstva mraku má zvyčajne nižšiu teplotu ako povrch Zeme. Preto, ak sa vytvorí oblačnosť na predtým jasnej oblohe, táto studená horná vrstva zachytáva časť infračerveného žiarenia zo Zeme a redukuje tak množstvo žiarenia, ktoré je vypustené do vesmíru. Táto zachytená energia zvyšuje teplotu zemského povrchu a atmosféry, až kým sa opäť nevyrovná pomer medzi emitovanými infračervenými vlnami a absorbovanými krátkymi vlnami. Tento proces sa nazýva skleníkový efekt mrakov a spôsobuje zahrievanie zemskej atmosféry. Vo väčšine prípadov platí, že čím vyššie je mrak položený, tým má jeho horná vrstva nižšiu teplotu, resp. tým je rozdiel medzi teplotou jeho hornej vrstvy a teplotou zemského povrchu väčší, a tým pádom je jeho skleníkový efekt výraznejší [7]. Takýto efekt majú najmä cirry, ktorých albedo môže mať hodnotu aj 0,01 [25]. Všeobecne však platí, že celkový priemerný efekt mrakov na teplotu povrchu Zeme je jeho ochladzovanie [7].

2. Vplyv prevádzky lietadiel na zahrievanie planéty

Žijeme v dobe antropocénu. Takto nazval súčasné obdobie americký vedec Eugene F. Stoermer, pretože ľudstvo svojou činnosťou výrazne ovplyvňuje zemský ekosystém. Ako jeden z hlavných dôsledkov v jeho zmenách je zahrievanie planéty, resp. atmosféry, čiže globálne otepľovanie. Vedci už niekoľko desaťročí vyvíjajú riešenia v rôznych oblastiach, ktoré by znížili ľudské emisie a spomalili otepľovanie. Zmeny v prírode však nabrali tempo, s ktorým vedecký pokrok a technológie nestačia držať krok. Preto je potrebné venovať oveľa viac úsilia do vývoja metód a technológií, ktoré by tento proces spomalili, prípadne úplne zastavili. Táto kapitola sa zaoberá popisom vplyvu leteckej prevádzky lietadiel na radiačnú bilanciu, resp. na zahrievanie atmosféry počas ich letovej fázy.

Letecká doprava je dnes síce malý, ale neprehliadnuteľný element, ktorý prispieva k zmene podnebia na Zemi. Vzhľadom k tomu, že letecký priemysel v súčasnosti zaznamenáva rozmach okolo 5 percent ročne, predpokladá sa, že emisie leteckého priemyslu budú mať do roku 2050 podstatný podiel na skleníkovom efekte [26].

Dopad emisií civilného letectva na zemskú atmosféru je predmetom diskusií už nejakú dobu. Pozorovanie tmavých chocholov za prvými prúdovými motormi zvýšilo záujem zaoberať sa miestnou kvalitou ovzdušia a v sedemdesiatych rokoch dvadsiateho storočia to donútilo Americkú agentúru pre ochranu životného prostredia (USEPA) zaviesť legislatívu proti leteckým emisiám. Táto legislatíva dala neskôr základ pri tvorbe ICAO emisných certifikácií lietadlových motorov v rámci produkcie nespálených uhlíkovodíkov, oxidov dusíku a oxidu uhoľnatého.

V druhej polovici sedemdesiatych rokov boli svetu predstavené nadzvukové lietadlá Concorde, ktoré mali lietať v stratosfére. To opäť zvýšilo obavy o zmeny v atmosfére a Crutzen vo svojom výskume [27] vyjadril obavy zo značného poklesu množstva ozónu v stratosfére ako dôsledok produkcie oxidov dusíka.

V poslednej dekáde dvadsiateho storočia sa znovu začal stupňovať záujem o výskum vplyvu leteckých emisií na atmosféru, tentokrát bol však sústredený na podzvukové lietadlá a ich emisie. Spočiatku bola pozornosť zameraná na vplyv emisií oxidov dusíka na produkciu troposférického ozónu. Zatiaľ čo ozón v stredných a horných vrstvách

stratosféry (približne 15 – 50 km) plní ochrannú funkciu pred škodlivým ultrafialovým žiarením, ozón v spodných vrstvách stratosféry a horných vrstvách troposféry pôsobí ako skleníkový plyn a má tak významný vplyv na ohrievanie atmosféry. Neskôr sa hlavná pozornosť presunula k iným javom pôsobiacim na našu atmosféru, a to ku kondenzačným stopám, pretože kondenzačná stopa môže byť základ pre umelo vytvorený cirrus.

Medzinárodný výbor pre zmenu klímy (IPCC) vydáva od roku 1990 hodnotiace správy, ktoré sú zamerané na vedecké zhodnotenie zmeny klímy, dopady týchto zmien a spôsoby ich mitigácie. V roku 1999 IPCC vydal špeciálny report [28], v ktorom poukazuje na potenciálny vplyv leteckej dopravy na vrchné časti atmosféry. Tento report bol akýmsi medzníkom v pochopení ako vplývajú rôzne letecké emisie na zahrievanie planéty a tiež popisuje spôsoby ako tento dopad znížiť. Okrem reportov IPCC boli realizované ďalšie výskumy ohľadom pôsobenia leteckého priemyslu na stav atmosféry [26, 29, 30].

2.1 Emisie leteckého priemyslu

Emisie produkované lietadlami zahŕňajú oxid uhličitý, vodnú paru, oxidy dusíku, sírové častice a rôzne iné plyny a pevné častice. Tieto emisie od podzvukovej leteckej premávky spôsobujú antropogénne zmeny klímy zvyšovaním množstva ozónu a oblačnosti v horných častiach troposféry a následné stupňovanie skleníkového efektu.

2.1.1 Oxidy dusíka

Oxidy dusíka NO_x sú produkované v motoroch lietadiel pri vysokej teplote a vysokom tlaku reakciou kyslíka s atmosférickým dusíkom. Katalyzujú produkciu krátkodobého ozónu (O_3), ktorý patrí medzi skleníkové plyny. Oxidy dusíka produkované lietadlami zvyšujú množstvo ozónu v hornej troposfére, ale ničia ozón v spodných vrstvách stratosféry [31]. Tvorba O_3 závisí na koncentrácii NO_x a to tak, že nižšia koncentrácia vedie k tvorbe ozónu a vyššia k jeho ničeniu, preto vplyv na tvorbu ozónu pre každý let závisí od stavu atmosféry, v ktorej lietadlo letí. Vo vysokých výškach sú priaznivejšie podmienky pre tvorbu O_3 , pretože je tam silnejšie UV žiarenie a to vedie k zvýšenému radiačnému pôsobeniu. Formovanie ozónu v horných vrstvách troposféry a spodných vrstvách stratosféry je obzvlášť citlivé na prítomnosť oxidov dusíka. Ďalej ozón v subtropických a tropických pásmach má väčšie radiačné pôsobenie ako vo vyšších zemepisných šírkach, takže efekt ozónu závisí aj od geografickej polohy daného letu.

Emisie NO_x prostredníctvom tvorby O_3 taktiež nepriamo vedú k ničeniu metánu (CH_4). Metán je silný skleníkový plyn, ktorého životnosť je približne 12 rokov [31], ale nie je prítomný vo veľkých množstvách oproti ostatným skleníkovým plynom. Pri tvorbe O_3 sa vytvárajú hydroxylové radikály OH, ktoré rozkladajú CH_4 na CO_2 a H_2O , čo sú o niečo slabšie skleníkové plyny ako metán, avšak čo do objemu ich je oveľa väčšie množstvo.

2.1.2 Oxid uhličitý

Dopad emisií CO_2 produkovaného lietadlami je jednoduchšie odhadnúť ako dopad ostatných emisií, pretože množstvo vyprodukovaného CO_2 je jednoduchou funkciou množstva spáleného paliva [32]. Navyše medzi emisiami CO_2 produkovaného lietadlami a akýmkoľvek iným zdrojom nie je žiadny rozdiel, pokiaľ ide o radiačné pôsobenie. Množstvo emisií oxidu uhličitého produkovaného lietadlami bol v roku 1992 0,14 Gt/rok [28]. V roku 2015 to bolo 0,78 Gt/rok [33] a niektoré odhady uvádzajú, že v roku 2100 sa hodnota emisií oxidu uhličitého môže pohybovať až okolo 5,07 Gt/rok [34]. V relatívnom množstve tvoria emisie leteckej prepravy 2% z celkovej produkcie CO_2 na Zemi a 12% v rámci celosvetového dopravného priemyslu [33].

2.1.3 Vodná para

Vodná para je relatívne silný skleníkový plyn. Bez nej by teplota na Zemi dosahovala hodnoty, ktoré by neboli priaznivé pre život. Troposféra obsahuje relatívne vysokú koncentráciu vodnej pary a to vďaka prirodzenému kolobehu vody. Horné vrstvy troposféry a spodná stratosféra sú suchšie a stredná a horná stratosféra je veľmi suchá. To znamená, že každé zvýšenie prítomnosti vodnej pary v stratosfére má za následok ohrievanie atmosféry [32]. Väčšina emisií vodnej pary podzvukových lietadiel je uvoľnená v troposfére, z ktorej rýchlo zmizne v podobe zrážok behom jedného až dvoch týždňov. Malá časť týchto emisií sa však hromadí v spodných vrstvách stratosféry, kde zotrváva dlhší čas. Z tohto dôvodu má vodná para produkovaná lietadlami iba minimálny priamy vplyv na tepelné zmeny atmosféry oproti iným leteckým emisiám ako oxid uhličitý a oxidy dusíka [28].

2.1.4 Pevné častice

Medzi pevné častice alebo aerosóly v rámci leteckých emisií patrí síra, resp. sírany a sadze. Tieto drobné častice ovplyvňujú ovzdušie nepriamo tým, že plnia funkciu kondenzačných jadier na ktorých kondenzuje vodná para a následne sa tvoria kondenzačné stopy a oblaky. Tomuto budú však podrobnejšie venované ďalšie kapitoly tejto práce.

3. Kondenzačné stopy letúnov

Pri jasnom alebo takmer jasnom počasí môžeme na oblohe pozorovať biele čiary, ktoré „kreslia“ lietadla počas svojho letu. Sú to tzv. kondenzačné stopy, angl. contrails. Kapitola sa zaoberá definovaním a rozdelením kondenzačných stôp. Z kondenzačnej stopy môže vzniknúť tzv. contrail cirrus, čo je nežiaduce. Tento umelo vzniknutý cirrus je taktiež popísaný vo svojej kapitole. Ďalej sú v kapitole charakterizované špeciálne vzácne druhy kondenzačných stôp – aerodynamické kondenzačné stopy a akýsi opak kondenzačných stôp – tzv. distrails.

3.1 Kondenzačná stopa

Kondenzačné stopy sú viditeľné líniové oblaky formujúce sa za lietadlami, ktoré prelietavajú cez oblasť atmosféry s priaznivými podmienkami pre ich vznik [35]. Je to prirodzený jav, ktorý vzniká ako dôsledok spaľovania leteckého paliva dopravným lietadlom vo výškach okolo osem až dvanásť kilometrov nad zemským povrchom. Pri spaľovaní leteckého benzínu sa do okolitej atmosféry uvoľňuje veľké množstvo vodnej pary a mikroskopických pevných častíc. Tieto drobné čiastočky slúžia ako tzv. kondenzačné jadrá, na ktorých kondenzuje vodná para produkovaná motormi lietadla a vodná para nachádzajúca sa v okolitom priestore [36]. Skondenzovaná vodná para vďaka veľmi nízkym teplotám rýchlo zamrzne a vytvoria sa malé kryštálky ľadu, ktoré, ak sú dostatočne veľké, sú pozorovateľné voľným okom. Formovanie kondenzačných stôp je spôsobené zvýšením relatívnej vlhkosti okolitého vzduchu. Zmena relatívnej vlhkosti je spôsobená zmiešaním teplých výfukových plynov s vysokou vlhkosťou a chladného suchého okolitého vzduchu [35]. Pri vhodných meteorologických podmienkach sa môžu kondenzačné stopy rozvinúť a vytvoriť tzv. contrail cirrus, ktorý je nerozoznatelný od prirodzene vzniknutého cirru. Cirry všeobecne podporujú skleníkový efekt a tým pádom majú vplyv na zahrievanie planéty [35].



Obrázok 3.1: Krátkodobá kondenzačná stopa (fotené v oblasti Praha-Zličín).

Prvé kondenzačné stopy boli pozorované za vrtuľovými lietadlami v roku 1915 [19]. Kondenzačné stopy možno rozdeliť podľa doby ich existencie nasledovne:

- krátkodobé (*temporary*) (Obr. 3.1)
- dlhodobé nerozširujúce sa (*persistent non-spreading*) (Obr. 3.2a))
- dlhodobé rozširujúce sa (*persistent spreading*) (Obr. 3.2b))



a) nerozširujúca sa stopa

b) rozširujúca sa stopa

Obrázok 3.2: Dlhodobé kondenzačné stopy [37,38].

Špeciálnym druhom kondenzačných stôp sú aerodynamické kondenzačné stopy, ktorým sa budem venovať v samostatnej kapitole, a taktiež spomeniem aj takzvané „*distrails*“, čo sú vlastne „diery“ alebo „tunely“ v mrakoch spôsobené preletom lietadla, takže akýsi opak kondenzačných stôp.

Existencia krátkodobých kondenzačných stôp sa pohybuje rádovo v sekundách až minútach. Sú veľmi tenké a niekedy prerušované. Ich krátka životnosť je spôsobená stavom vzduchovej masy, ktorou lietadlo prelieta, tzn. vlhkosť a teplota dostatočná pre vznik ľadových kryštálikov, zároveň však nízka pre ich zotrvanie. Vzniknuté ľadové častice teda veľmi rýchlo sublimujú a kondenzačná stopa zaniká.

Dlhodobé nerozširujúce sa stopy sú dlhé niekoľko kilometrov a ich životnosť sa pohybuje rádovo v desiatkach minút. Sú jasne identifikovateľné s ostro ohraničenými okrajmi.

Dlhodobé rozširujúce sa stopy vznikajú pri podmienkach, kedy je vzduchová masa presýtená vodnými parami a kryštáliky ľadu vzniknuté po prelete lietadla ďalej rastú a rozširujú sa. Tento proces trvá niekoľko hodín až dní a vďaka vetru sa môžu sťahovať na veľké vzdialenosti a pokryť územia o rozlohe tisícov kilometrov. Vtedy sa stávajú nerozlišiteľnými od cirrov.

3.2 Contrail cirrus

Kondenzačné stopy, ktoré sú produktom emisií lietadlových motorov v hornej časti troposféry pri teplotách okolo -40°C , patria k najnápadnejším a najviditeľnejším znakom, ktoré pripomínajú zásah leteckej dopravy do atmosféry Zeme. Vo svojej počiatočnej fáze existencie sa mikrofyzikálne zloženie a vlastnosti kondenzačných stôp značne líšia od zloženia prirodzeného cirru, avšak s pribúdajúcim časom môžu kondenzačné stopy strácať svoj tvar a stať sa vizuálne a pravdepodobne aj svojou mikrofyzikálnou štruktúrou nerozoznatelnými od prirodzených cirrov. Či sa kondenzačná stopa rozplynie alebo z nej vznikne „*contrail cirrus*“ závisí na okolitej relatívnej vlhkosti a prítomnosti dostatočného množstva častíc ľadu [36].

Ak dôjde ku kondenzácii, závisí ďalší osud (a teda vzhľad) vzniknutej kondenzačnej stopy na viacerých meteorologických faktoroch – relatívna vlhkosť okolitého vzduchu, turbulencie a vertikálne pohyby okolitej atmosféry. Ak je okolitá atmosféra relatívne suchá, môžu sa vzniknuté kvapôčky veľmi rýchlo vypariť a kondenzačná stopa tak zaniká pomerne krátko po prelete lietadla. Pri vyššej relatívnej vlhkosti však k výparu kvapôčok nedôjde a vzhľadom k veľmi nízkym teplotám okolitého vzduchu (okolo -40°C až -60°C) veľmi rýchlo mrznú a vytvárajú drobné ľadové kryštáliky. Tie môžu ďalej slúžiť ako kryštalizačné jadrá, na ktorých ďalej kondenzuje a kryštalizuje vodná para z ich okolia. Tým pádom vznikajú kryštáliky blízke svojim vzhľadom kryštálikom prirodzených cirrov,

od ktorých ich voľným okom nie je možné odlišiť. V takýchto prípadoch môže kondenzačná stopa prežívať po výrazne dlhšiu dobu, pričom s rastúcou vzdialenosťou za lietadlom (resp. dobou od preletu lietadla) sa postupne rozširuje a deformuje v závislosti na okolitom prúdení vzdušných mäs (Obr. 3.3). V extrémnych prípadoch sa potom úplne „roztečie“ do okolia, až je nakoniec veľmi ťažké, niekedy až nemožné, odlišiť oblačnosť kondenzačnej stopy od prirodzených cirrov. V niektorých prípadoch sa spojí viacero rozptýlených kondenzačných stôp a vytvoria tak súvislú vrstvu umelo vytvoreného cirru [36].



Obrázok 3.3: Contrail cirrus [39].

Lietadlový motor môže ovplyvniť formovanie oblačnosti priamo v mieste preletu lietadla okamžitým vznikom kondenzačnej stopy a následným formovaním contrail cirru alebo aj nepriamo, a to v prípade, kedy sa vypustené uhlíkové sadze, prach a kovové čiastočky vďaka pohybu vzdušných mäs dostanú z miesta preletu lietadla, kde nie sú vhodné podmienky pre formovanie kondenzačnej stopy do miest, kde tieto podmienky sú a častice tam slúžia ako kondenzačné jadrá [19].

3.3 Aerodynamické kondenzačné stopy

Kondenzačné stopy vznikajúce vplyvom výfukových plynov na atmosféru nie sú jediným druhom kondenzačných stôp, ktoré dokáže lietadlo vytvárať. Kondenzácia sa podľa Bernoulliho zákona všeobecne vyskytuje v urýchlených vzdušných prúdoch, kde teplota lokálne klesne vďaka zachovaniu energie pri takmer adiabatických podmienkach. V blízkosti zeme a pri takmer nasýtenom stave ovzdušia môžeme pozorovať formovanie krátkodobej oblačnosti, ktorá sa vytvára vplyvom vírov, vztlakových prúdov a transsonických prúdov.



a)

b)

Obrázok 3.4: Aerodynamické kondenzačné stopy [40,41].

Kondenzácia vzniknutá vplyvom vírov a vztlakových prúdov je spôsobená manévrami lietadiel s vysokým preťažením, pri ktorých sú dostatočne urýchlené vzdušné prúdy a nastáva ich prudké ochladenie. Silné vírivé prúdy vznikajú na koncoch krídel, klapkách alebo iných ostrých hranách draku lietadla (Obr. 3.4a)), dokonca aj na koncoch vrtule lietadla alebo helikoptéry (Obr. 3.4b) Tieto lietadlové časti podľa Kutta-Žukovského rovnice silovo pôsobia na okolitý vzduch a to má za následok tvorbu vírivých prúdov [42]. V oku víru klesá teplota a tlak, čo vedie ku kondenzácii. Tento jav sa taktiež vyskytuje aj pri prelete lietadla mrakmi s veľmi nízkou teplotou. Vtedy aerodynamický efekt spôsobí takzvaný APIP (*aircraft-produced ice crystals*) mechanizmus [43].

Kondenzácia pri transsonických rýchlostiach (t.j. keď sú podzvukové prúdy vplyvom lietadlových častí urýchlené na nadzvukovú rýchlosť) sa nazýva Prandtl-Glauertova kondenzácia, ktorá je odvodená z Prandtl-Glauertovej singularity. Tá popisuje jav, pri ktorom sa zvukové vlny emitované lietadlom, ktoré prechádza z podzvukovej rýchlosti do

nadzvukovej akumulujú v kuželi za lietadlom (Obr. 3.5). V tomto kuželi stlačeného vzduchu následne kondenzuje vodná para a vytvárajú sa kvapky.



Obrázok 3.5: Prandtl-Glauertova kondenzácia [44,45].

Aerodynamické kondenzačné stopy sú známe už dlhšiu dobu, avšak ich výskyt je sporadický. Zvyčajne ich je možné pozorovať pri vysokej vlhkosti blízko zeme a ich existencia je krátkodobá. Formujú sa pri obtekaní vzduchu okolo krídel a trupu lietadla pri podzvukových rýchlostiach. Počas krátkej adiabatckej expanzie vďaka vysokej presýtenosti vzduchu začnú zamrzáť tekuté čiastočky aerosólu a v okolí krídel sa tak formujú ľadové kryštáliky. Pre hrubú predstavu si uveďme veľmi zjednodušený príklad. Priemerný rozdiel tlakov nad a pod krídlom generuje silu, ktorá udržiava lietadlo v horizontálnom ustálenom lete. Ak hmotnosť lietadla označíme W a plochu krídla A , potom je rozdiel tlakov Δp daný vzťahom $\Delta p = - (W \cdot g) / A$, kde $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ je tiažové zrýchlenie v tiažovom poli Zeme. Pre lietadlo B747 je táto hodnota približne -70 hPa , čo je pomerne vysoké číslo v rámci meteorologických hodnôt. Ďalej predpokladajme, že táto zmena tlaku v prúde vzduchu prebieha ideálne adiabatcky. Potom je zmena teploty daná vzťahom $\Delta T/T = [(\gamma-1)/\gamma](\Delta p/p)$, kde $\gamma = c_p/c_v$ je Poissonova konštanta a pre vzduch má hodnotu 1,4. Pre podmienky v blízkosti zeme (t.j. $T = 288 \text{ K}$ a $p = 1014 \text{ hPa}$) je zmena teploty $\Delta T \approx -6 \text{ K}$, ale pre typické podmienky v letovej hladine (t.j. $T = 219 \text{ K}$ a $p = 240 \text{ hPa}$) dostaneme hodnotu približne $\Delta T = -18 \text{ K}$. Celý výpočet je uvedený v Príklade 1 na konci tejto kapitoly. V skutočnosti je táto zmena teploty ešte výraznejšia, pretože v zjednodušenom výpočte sme predpokladali, že zmena tlaku nastane len nad krídlom. Reálne je však prúd vzduchu obtekajúci krídlo urýchlený aj na spodnej strane krídla. Čiže aj v tomto prúde nastáva dekompresia a tým pádom pokles teploty, ktorý je však výrazne nižší, ako v prúde nad krídlom. Najprv zamrznú malé čiastočky, pretože sa najrýchlejšie dostanú do rovnovážneho stavu. Okolité teplota je najdôležitejší faktor, ktorý má vplyv na budúce vlastnosti vzniknutej kondenzačnej stopy. Tá sa stáva viditeľná len pri tepote

vyššej ako približne 232 K, ale jej optická hĺbka je veľmi nízka [46]. Tieto teploty patria k najvyšším teplotám, ktoré vôbec dosahujú horné časti troposféry v tropickom podnebnom pásme. V chladnejších zemepisných šírkach sú aerodynamické kondenzačné stopy neviditeľné a vzniknuté veľmi malé ľadové častice sa rýchlo vyparia. To vysvetľuje prečo je pozorovanie týchto kondenzačných stôp také vzácne. [46]

Aerodynamické kondenzačné môžu rovnako ako „klasické“ kondenzačné stopy existovať dlhší čas v prípade, že je okolitá atmosféra nasýtená s ohľadom na ľad a takisto sa môžu rozširovať a vytvárať cirry. [47]

Príklad 1: Zmena teploty pri adiabatickej expanzii:

V tomto výpočte boli uvažované hodnoty pre lietadlo Boeing 747-8 [84].

Úloha je zistiť zmenu teploty vzdušného prúdu nad krídlom lietadla pri ustálenom horizontálnom lete. Ako hmotnosť lietadla som počítal s hodnotou $W = 4 \cdot 10^5$ kg, čo je o 42 ton menej ako jeho MTOW (Maximum Take-Off Weight) a plochu krídel $A = 554$ m². Zmena teploty je pre ideálny adiabatický dej je daná vzťahom

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \frac{\Delta p}{p}$$

kde γ je Poissonova konštanta a pre vzduch má hodnotu 1,4. T a p sú hodnoty teploty a tlaku v daných podmienkach. Pri horizontálnom ustálenom lete je veľkosť vztlakovej sily rovná tiaži lietadla a vztlaková sila je daná rozdielom tlakov nad a pod krídlom. Z toho vyplýva nasledujúca rovnica:

$$W \cdot g = -\Delta p \cdot A \Rightarrow \Delta p = -\frac{W \cdot g}{A}$$

Po dosadení a úprave dostaneme

$$\Delta T = T \cdot \frac{\gamma - 1}{\gamma} \cdot \left(-\frac{W \cdot g}{A}\right) \cdot \frac{1}{p}$$

Prípad 1: Let v blízkosti zeme.

V rámci medzinárodnej štandardnej atmosféry (ISA) je v nulovej nadmorskej výške daná teplota vzduchu $T = 288,15$ K a tlak $p = 1\,013,25$ hPa.

$$\Delta T = 288,15 \cdot \frac{1,4 - 1}{1,4} \cdot \left(-\frac{4 \cdot 10^5 \cdot 9,81}{554}\right) \cdot \frac{1}{1013,25 \cdot 10^2}$$

$$\Delta T \approx -5,8 \text{ K}$$

Prípád 2: Let v letovej hladine.

Pre výpočet som uvažoval podmienky ISA v nadmorskej výške 35 000 ft, čiže $T = 219$ K a $p = 240$ hPa.

$$\Delta T = 219 \cdot \frac{1,4 - 1}{1,4} \cdot \left(-\frac{4 \cdot 10^5 \cdot 9,81}{554} \right) \cdot \frac{1}{240 \cdot 10^2}$$
$$\Delta T \approx -18,5$$

3.4 Distrails

Opakom kondenzačných stôp sú takzvané „*dissipation trails*“, skrátene „*distrails*“. Sú to diery v mrakoch, ktoré vytvárajú lietadlá pri prelete tenkou vrstvou oblačnosti, napríklad cez altocumuly.

Zvyčajne majú kruhový alebo elipsovitý tvar a objavujú sa v cirrocumuloch a altocumuloch (Obr. 3.6). Vznikajú v podmienkach, keď sa voda obsiahnutá v mraku nachádza v podchladenom stave, t.j. má teplotu pod bodom mrazu, ale stále sa nachádza v kvapalnom skupenstve. Táto voda sa vyparuje a vzhľadom k tomu, že rovnovážny stav tlaku vodnej pary vzhľadom k ľadu je nižší ako vzhľadom k tekutej vode, tvoria sa ľadové kryštáliky na úkor podchladených kvapôčok vody. Tento jav sa nazýva Bergeronov proces a je považovaný za primárny proces vzniku zrážok. Kvôli nedostatku častíc v okolitom prostredí, ktoré by slúžili ako jadrá pre tvorbu ľadových kryštálikov je tento proces veľmi pomalý. Ak sa však do oblasti s týmito špecifickými podmienkami dostanú z akéhokoľvek dôvodu častice, na ktorých môže okolitá vodná para zamŕzať, vznikne dominový efekt, ktorý urýchli Bergeronov proces [48]. Keď ľadové kryštáliky nadobudnú dostatočné rozmery a hmotnosť, začnú padať k zemi, a tak vznikne v mraku diera.



Obrázok 3.6: Distrails a ich vývin [49,50].

Prelet prúdového lietadla mrakom s takýmito meteorologickými podmienkami urýchlí Bergeronov proces nielen tým, že lietadlový motor vypúšťa do ovzdušia častice, ale tiež zahrieva okolitý vzduch a urýchlí tak vyparovanie vodných kvapôčok v mraku.

Diery v mrakoch (angl. *fallstreak holes*) sú pozorované viac ako 70 rokov, avšak spočiatku ich tvorba, vývoj, trvanie, zánik a vplyv neboli preskúmané. V štyridsiatych rokoch 20. storočia sa vedci začali zaoberať príčinami vzniku dier v mrakoch. Predložili niekoľko rôznych teórií o spojitosti ich vzniku s leteckou dopravou od akustických vln od lietadiel, cez lokálne zahrievanie vzduchu pozdĺž letových trás až po formovanie ľadových častíc pozdĺž kondenzačných stôp. Tieto prvé výskumy však uvažovali len lietadlá s prúdovými motormi. Nikoho nenapadlo, že diery môžu spôsobovať aj vrtuľové lietadlá.

V osemdesiatych rokoch 20. storočia si výskumníci všimli, že aj pri prelete vrtuľových lietadiel mrakmi sa z podchladených kvapôčok vody tvoria ľadové kryštáliky a v deväťdesiatych rokoch odštartovali prvé výskumy tohto fenoménu. Až do roku 2007 však nikto nespozoroval snehové zrážky ako dôsledok preletu lietadla. Podarilo sa to americkému výskumníkovi A. Heymsfieldovi a jeho tímu, ktorý uskutočnil prieskumný let altocumulami západne od Medzinárodného letiska Denver s množstvom prístrojov. Posádka si najprv počas letu nevšimla nič zvláštne. Až neskôr pri analýze dát z pozemného radaru bolo zistené, že pásmo zrážok sa vyvinulo veľmi rýchlo a získalo nezvyčajný tvar. Výskumníci na to nemali uspokojivé vysvetlenie, a tak sa pustili do študovania dát a videozáznamov z ich lietadla. Všimli si dieru v inak nenarušenej vrstve altocumulov a tiež sneh, ktorý dopadol na zem. A preto, že diera bola orientovaná v smere štandardných letových tratí komerčných letov, Heymsfield sa domnieval, že lietadlo letiace cez mrak nejakým spôsobom zapríčiňuje vznik ľadových častíc a ich následné vypadávanie z mraku, resp. sneženie, a tak zanecháva pozdĺž svojej letovej cesty v mraku dieru. Záznamy letov od FAA ukázali, že turbovrtuľové lietadlá dvoch spoločností letiace po štandardnej letovej trati spôsobili sneženie pozdĺž trate. Snehové vločky začali padať zhruba päť minút po prelete druhého lietadla a sneženie trvalo okolo 45 minút. Zasnežené pásmo bolo približne 32 kilometrov dlhé a 4 kilometre široké a nasnežilo 5 centimetrov snehu. Tím tiež preskúmal dáta z palubných spektrometrov. Tieto dáta dokázali fakt, že snehové vločky, ktoré dopadli na zem pod dierou, boli výrazne tvorené inovaťou¹⁾ (angl. *rime*), zatiaľ čo ľadové častice v mraku nevykazovali takmer žiadnu inovať. Mraky v okolí Denveru obsahovali podchladené kvapôčky vody, ktoré ostávali v kvapalnom skupenstve aj pri teplotách okolo -34°C . Keď turbovrtuľové lietadlo preletí cez takýto mrak, konce jeho

vtúl' spôsobia adiabatickú expanziu vzduchu a podobne, ako bolo spomenuté vyššie v prípade expanzie nad profilom krídla, sa vzduch prudko ochladí a vodné kvapôčky zamrznú a vypadávajú z mraku v podobe zrážok. Tento dej sa odohráva aj nad spomínaným krídlom prúdového lietadla, avšak v tomto prípade musí byť teplota mraku nižšia ako v prípade vrtule, pretože vzduch okolo krídla expanduje menej.

Modelové simulácie ukázali, že vznik ľadových častíc vedie k vertikálnym pohybom vzduchových mäs, ktoré môžu trvať aj viac ako hodinu. Tieto pohyby potom spôsobujú rozširovanie dier a kanálov v mrakoch [52]. Z globálneho hľadiska má tento jav minimálny dopad, avšak regionálne v okolí hlavných letísk môže spôsobovať zvýšený úhrn zrážok. Zrážky spôsobené lietadlami sú najfrekvencovanejšie na severozápadnom pobreží USA a Kanady a v západnej časti Európy kvôli častému výskytu oblačnosti s podchladenými kvapôčkami vody [53].

¹⁾ Mraky sú tvorené z malých kvapôčok vody. Kvapôčky, ktoré zmrznú na malé ľadové kryštáliky sa nazývajú inovat' (*rime*) [51].

4. Vzduchové hmoty

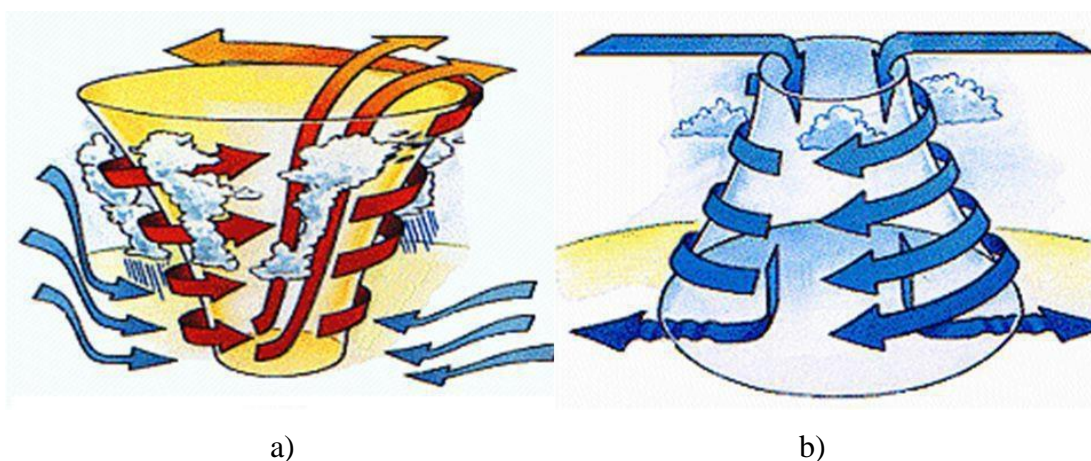
Vzduchové hmoty sú rozsiahle objemy vzduchu, v ktorých má počasie typický charakter. Ich horizontálne rozmery sú stovky až tisíce kilometrov, vertikálne jednotky kilometrov. Vlastnosti vzduchových hmôt závisia najmä na zemskom podklade (púšte, stepi, lesy, vodné plochy atď.) a na zemepisnej šírke. Vzduchová hmota nadobudne určité vlastnosti dané zemským povrchom, ak zotrvá dlhšiu dobu nad jedným územím. Vďaka prúdeniu sa vzniknuté vzduchové hmoty presúvajú na iné miesta a spôsobujú tak zmenu počasia. Rozhranie medzi dvoma vzduchovými hmotami sa nazýva atmosférický front. Na každej pologuli poznáme obecné vzduchovú hmotu arktickú (resp. antarktickú), polárnu, tropickú a ekvatoriálnu. Vzduchové hmoty však nemusia byť oddelené atmosférickým frontom, môžu plynulo prechádzať jedna do druhej. [4]

Pohyb vzduchových hmôt je základným činiteľom, ktorý vplýva na morfológiu kondenzačnej stopy. Aby sme jasne pochopili kapitolu o jej vzniku a vývoji, potrebujeme rozobrať tento pohyb, čo je vlastne vietor a jeho druhy, ktoré najviac ovplyvňujú rast a tvar kondenzačných stôp, resp. cirrov, ktoré z nich vznikajú.

4.1 Vietor

Vietor je jedným z najvýznamnejších meteorologických prvkov. Je to horizontálny pohyb vzduchu v atmosfére vznikajúci v dôsledku rozdielov tlaku vzduchu (tlakového gradientu) a rotácie Zeme. Vzduch je akcelerovaný silou horizontálneho tlakového gradientu v smere z miesta s vyšším tlakom vzduchu do miest s tlakom nižším. Akonáhle sa vzduch dá do pohybu, začne naňho pôsobiť Coriolisova sila – na severnej pologuli kolmo vpravo, na južnej kolmo vľavo. Pohybujúce sa častice vzduchu sa začnú stáčať a zrýchľujú sa. Stáčajú sa tak dlho, kým nie je v rovnováhe sila horizontálneho barického gradientu a Coriolisova sila. Po dosiahnutí tohto stavu sa častice pohybujú rovnomerným pohybom rovnobežne s izobarami, resp. s izohypsami v prípade vetru vo vyšších polohách. Toto správanie vetru je idealizované a takto vyjadrený vietor sa nazýva geostrofický. Skutočný vietor sa od idealizovaného líši tým, že je ovplyvnený trením, najmä vo vrstve atmosféry blízkej k zemskému povrchu. V takomto prípade hovoríme o vetre s ageostrofickou zložkou. Tretia sila najviac pôsobí medzi vzduchom a zemským povrchom a s rastúcou výškou nad zemou vplyv zemského povrchu slabne. Nad medznou vrstvou (1 000 – 2 000 metrov nad

zemou) je trenie vzduchu o zemský povrch zanedbateľné [4]. Vďaka trecej sile sa rýchlosť vetra znižuje a to vedie k zníženiu Coriolisovej sily a k vzniku nerovnováhy medzi silou horizontálneho barického gradientu a Coriolisovou silou. Sila barického gradientu prevláda, takže na severnej pologuli mení vektor prúdenia vzduchu smer viac doľava. Vďaka tomuto javu je vzduch prinášaný do tlakových níž a odvádzaný z tlakových výš. V tlakovej výši sa prúdnicie špirálovito rozbiehajú v smere otáčania hodinových ručičiek a v prízemných hladinách sa vzduch rozteká do strán a je nahradzovaný vzduchom z vyšších vrstiev. V tlakovej níži majú prúdnicie opačný smer a vzduch je privádzaný do stredu tlakovej níže (Obr. 4.1). V tlakovej níži je teda vzduch nakoniec nútený vystupovať do výšky. To spôsobuje vznik veľkopriestorových vertikálnych pohybov vzduchu zodpovedných za vznik oblačnosti, prípadne za vznik či zánik zrážok.



Obrázok 4.1: Prúdenie vzduchu v tlakovej níži a) a tlakovej výši b) [54].

Pri popise vetru nás zaujíma jeho smer, rýchlosť a ochladzovací účinok. Rýchlosť a smer vetru sa merajú pomocou anemometru, smer vetru sa udáva podľa azimutu odkiaľ vietor fúka ($0 - 360^\circ$) [55].

Na vertikálnu mohutnosť kondenzačnej stopy má samozrejme vplyv vertikálny pohyb vetra, ktorý nazývame strih vetra (angl. wind shear). Pri premiestňovaní pevných častíc, ktoré majú vplyv na vznik stopy a premiestňovaní samotných častíc stopy hrá bezpochyby veľkú úlohu horizontálny vietor. Najvýznamnejší horizontálny vietor v atmosfére je tzv. jet stream.

4.1.1 Strih vetra

Strih vetra je v meteorológii definovaný ako zmena smeru a/alebo rýchlosti vetra v priestore vrátane zostupných a vzostupných prúdov. Z leteckého hľadiska sa za strih vetra považuje zmena vektoru vetra pozdĺž trajektórie lietadla, ktorá má za následok náhlu zmenu smeru alebo rýchlosti lietadla od zamýšľanej dráhy. Za nízkohladinový strih vetra sa považuje strih vetra na dráhe konečného priblíženia, pozdĺž RWY a v oblasti počiatočného stúpania. Strih vetra má zložku vertikálnu a zložku horizontálnu. [55]

Vertikálny strih vetra je definovaný ako zmena horizontálneho vektoru vetra s výškou. Môže byť pozorovaný na silných inverzných alebo frontálnych plochách. Ďalej môže byť indukovaný orograficky (zrýchlenie prúdenia medzi budovami alebo horskými hrebeňmi). Riziko môže predstavovať aj stromoradie v blízkosti malých letísk. [55]

Horizontálny strih vetra je definovaný ako zmena horizontálneho vektoru vetra v rovine. [55]

Dlhodobé kondenzačné stopy spravidla udržiavajú tvar, aký získali pár sekúnd po ich vzniku, resp. po prelete lietadla. Jeden z procesov spôsobujúcich zmenu ich tvaru je práve strih vetra [56].

4.1.2 Jet-stream

Jet-stream vzniká, keď sa do vzájomnej blízkosti dostanú dve teplotne výrazne odlišné vzduchové hmoty a vzhľadom k tomu, že v teplejšom vzduchu klesá tlak s rastúcou výškou pomalšie ako v studenom vzduchu, dochádza ku skokovitému posunu izobary (určitá tlaková hladina sa v teplej vzduchovej hmote nachádza vyššie ako v studenej). Čím väčší je rozdiel teplôt týchto vzduchových mäs a čím sú bližšie pri sebe, tým je vertikálny sklon izobary väčší a tým väčšiu zmenu barometrickej výšky by sme pri horizontálnom prelete tejto oblasti zaznamenali. A keďže atmosféra sa snaží dostať do stavu rovnováhy, vzniká tak silné prúdenie, ktoré nazývame jet-stream. Jet-stream je definovaný izotachou 30 ms^{-1} alebo vyššou [4], takže oblasť, v ktorej fúka vietor s touto alebo vyššou rýchlosťou, je oblasť jet-streamu. Takýto vietor vanie spravidla v koryte dlhom až niekoľko tisíc kilometrov, širokom niekoľko sto kilometrov a vertikálne mohutnom niekoľko kilometrov. Tieto korytá sa meandrovito tiahnu nad časťami Zeme, niekedy dokonca obopínajú i celú

Zem. V tomto prípade hovoríme o planetárnom jet-streame. Niekedy sa môže deliť na viac vetiev, ktoré sa neskôr môžu zase spájať.

V oblasti jet-streamu sa často vyskytuje silná dynamická turbulencia. Ak je táto turbulencia v bezoblačnom prostredí, označuje sa ako CAT (Clear Air Turbulence). Častejšie je však toto prúdenie sprevádzané cirrovitou oblačnosťou v tvare vláken, ktoré sú pretiahnuté v smere prúdenia. [4]

Jet-stream teda úzko súvisí s frontálnym rozhraním a jeho výškovou frontálnou zónou. Dve hlavné frontálne rozhrania sa nachádzajú medzi polárnou a Ferrelovou bunkou a medzi Ferrelovou a Hadleyovou bunkou.

Hadleyova bunka

George Hadley bol Anglický právnik a amatérsky meteorológ, ktorý pri snahe o vysvetlenie pasátov popísal cirkuláciu vzduchu medzi rovníkom a tridsiatym stupňom zemepisnej šírky [57]. Tento vzduch sa ohrieva od zeme a v oblasti rovníku prúdi smerom nahor. Deje sa tak na severnej aj na južnej pologuli a preto sa tieto dva vzdušné prúdy navzájom vytláčajú smerom k pólu a vytvárajú v okolí rovníka oblasť s nízkym tlakom vzduchu. Ako sa vzduch pohybuje smerom k pólom, ochladzuje sa a približne v oblasti tridsiatich stupňov zemepisnej šírky klesá naspäť k zemi a vytvára oblasť s vysokým tlakom. Potom sa opäť popri zemi vracia späť k rovníku. Výška do ktorej vystúpi teplý vzduch pri rovníku závisí od ročného obdobia, keďže v zime sa ohreje od povrchu menej a v lete viac. Preto je mohutnosť Hadleyovej bunky v zime väčšia na južnej pologuli, v lete zas na severnej. [58,59,60]

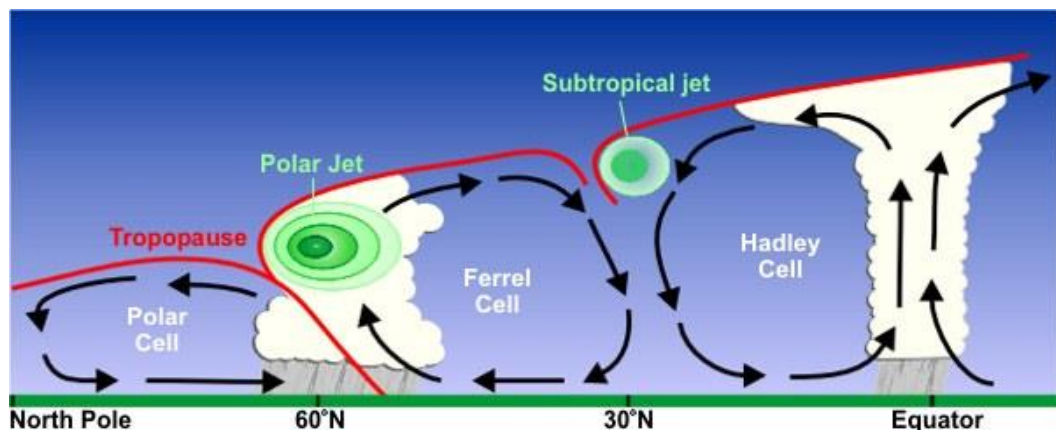
Ferrelova bunka

William Ferrel bol Americký meteorológ, ktorý detailne popísal atmosférickú cirkuláciu vzduchu v stredných zemepisných šírkach [61]. Časť stúpajúceho vzduchu na šesťdesiatej rovnobežke smeruje smerom k rovníku, kde sa približne na tridsiatej rovnobežke vo vysokej výške zráža so vzduchom z Hadleyovej bunky. Tam klesá a prispieva k vysokému tlaku. Polárna a Hadleyova bunka majú spoločné to, že existujú priamo v dôsledku zmien teplôt povrchu Zeme. Na rozdiel od nich, vzduch vo Ferrelovej bunke je poháňaný práve cirkuláciou vzduchu vo vedľajších bunkách, teda stúpajúcim vzduchom bunky Polárnej a klesajúcim vzduchom bunky Hadleyovej. Je to teda sekundárna cirkulácia, ktorej existencia závisí na Hadleyovej a polárnej bunke. [58,59,60]

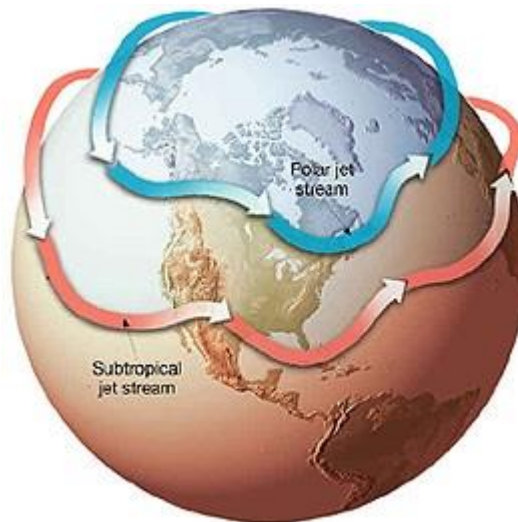
Polárna bunka

Vzduch je v polárnej bunke relatívne suchý a studený. Približne na šesťdesiatich stupňoch zemepisnej šírky vzduch tejto vzduchovej hmoty stúpa až k hraniciam troposféry a pohybuje sa smerom k pólom. Tam sa ochladzuje, klesá k zemi a vytvára oblasť vysokého tlaku. Potom zase popri zemi postupuje smerom k šesťdesiatej rovnobežke, a tak je jeho cirkulácia uzavretá. [58,59,60]

Na frontálnom rozhraní medzi polárnou a Ferrelovou bunkou teda vzniká polárny jet-strem a na rozhraní medzi Ferrelovou a Hadleyovou bunkou subtropický jet-strem (Obr. 4.2). Pohyb vzduchu v atmosfére je obecné ovplyvňovaný Coriolisovou silou. Tá vplýva aj na cirkuláciu vzduchu vo všetkých bunkách. Vzduch je pri svojom pohybe na severnej pologuli stáčaný doprava, na južnej zase doľava. Čiže vzduch prúdiaci od rovníka k pólom „zatáča“ na východ a vzduch prúdiaci od pólom k rovníku zase na západ. Tento jav vysvetľuje smer prúdenia hlavných globálnych jet-streamov a s tým súvisí aj pohyb počasia a oblačnosti na našej planéte (Obr. 4.3).

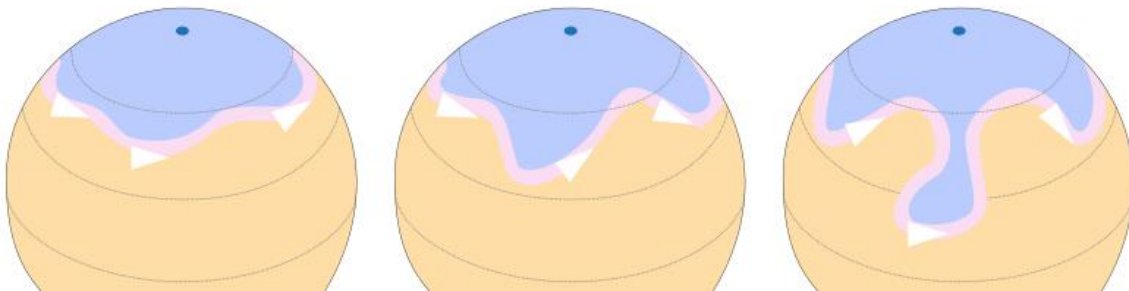


Obrázok 4.2: Priečný rez globálnych jet-streamov a poludníkových pohybov vzduchových hmôt [62].



Obrázok 4.3: Globálne jet-streamy na severnej pologuli [63].

Vonkajšie prúdy polárnej bunky vytvárajú veľmi dlhé vlny známe ako Rossbyho vlny. Vytvárajú tak meandre, pozdĺž ktorých je usmerňovaný tok prúdenia polárneho jet-streamu a taktiež spôsobujú pohyb studeného polárneho vzduchu smerom k nižším zemepisným šírkam a naopak (Obr. 4.4). [64]



Obrázok 4.4: Rossbyho vlny na severnej pologuli [64].

Doterajší výskum sa nezaoberal vplyvom jet-streamu na tvorbu, resp. tvar a životnosť kondenzačných stôp a z nich tvoriacich sa cirrov, hoci by tento jav mohol mať na kondenzačné stopy výrazný účinok, keďže hrá jednu z najvýznamnejších rolí pri presunoch vzduchových hmôt a počasia a je sprevádzaný práve cirrovitou oblačnosťou.

5. Tvorba kondenzačných stôp

Táto kapitola vysvetľuje princípy vzniku kondenzačných stôp, faktory, ktoré ovplyvňujú ich rôznorodý tvar, životnosť a spôsob predpovedania ich tvorby.

5.1 Vznik a vývoj kondenzačných stôp

Kondenzačné stopy sú najjasnejším indikátorom prítomnosti leteckej dopravy. Aj laik si všimne, že kondenzačné stopy niekedy miznú ihneď, niekedy zotrúvajú na oblohe aj niekoľko hodín a inokedy sa dokonca vôbec nevytvárajú. Tvorbu kondenzačných stôp ovplyvňujú tri hlavné parametre: množstvo vodnej pary uvoľnenej zo spaľovacej komory, teplota okolitého prostredia a relatívna vlhkosť [65].

Spaľovaním leteckého paliva sa do ovzdušia uvoľňuje vodná para, ktorá veľmi rýchlo kondenzuje na časticiach nachádzajúcich sa vo vzduchu (tzv. kondenzačných jadrách) a následne vplyvom nízkej teploty v hornej časti troposféry a spodnej časti stratosféry zmrzne [19]. Množstvo vodnej pary je jednoduchou funkciou množstva spáleného paliva v letovej výške [65]. Ak je relatívna vlhkosť atmosféry dostatočne vysoká, resp. vzduch je presýtený vodnými parami, potom sú zabezpečené vhodné podmienky pre vznik dlhodobých kondenzačných stôp. Ak je relatívna vlhkosť nízka, tak sa kondenzačná stopa veľmi rýchlo vyparí alebo vôbec nevznikne.

Taktiež teplota výstupných plynov, ktorá sa mení v závislosti od typu motora, má vplyv na to, či sa kondenzačná stopa v daných podmienkach vytvorí alebo nie, pretože tieto plyny zvyšujú (aj keď len krátkodobo) teplotu v oblasti za motorom lietadla. Samozrejme, samotné vlastnosti ovzdušia majú prvoradý a najvýznamnejší vplyv na tvorbu a životnosť kondenzačných stôp [65].

Kondenzačná stopa sa obvykle tvorí vo vzdialenosti do 30 metrov od motora lietadla, kde turbulentné zmiešavanie dostatočne zníži teplotu zmesi plynov. V niekoľkých výskumoch [19, 66, 67] sa zistilo, že k počiatočnej kondenzácii podchladených kvapôčok vody dochádza na rôznych časticiach, vrátane produktov spaľovania paliva v motore lietadla, ako aerosóly síranu, sadze a kovové častice a tak isto na okolitých aerosóloch minerálov. V čase, keď je kondenzačná stopa stará jednu minútu, jej stredný polomer je okolo 2 μm a narastie na 3-4 μm počas nasledujúcich troch minút. Pri pozorovaniach bolo tiež zistené,

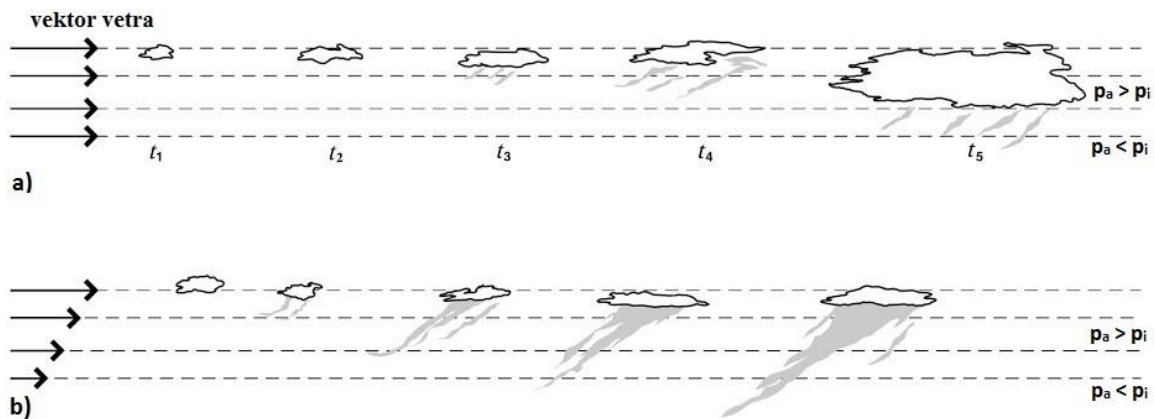
že častice nadobúdajú rôzne tvary, napríklad šesťuholníkové kvádre alebo dosky, trojuholníky, nepravidelné tvary a elipsoidy. Mladé kondenzačné stopy zvyknú mať pílovitý tvar alebo bunkovú štruktúru. Spôsobujú to turbulentné prúdy za lietadlom (Obr. 5.1). Pár turbulentných vírov spôsobuje vertikálne rozširovanie kondenzačnej stopy, ktorá tak nadobúda svoj charakteristický tvar a zmiešavaním s okolitým vzduchom sa urýchľuje ochladzovanie skondenzovaných častíc.

Rovnakým spôsobom ako prirodzený cirrus, kondenzačná stopa sa po svojom vzniku môže rozširovať alebo môže zanikať. Rast a rozširovanie kondenzačnej stopy závisí na hrúbke presýtenej vrstvy, stupni presýtenia, charaktere turbulencie a na rýchlosti a smere vetra. Ak je kondenzačná stopa dlhodobá, jej častice typicky dorastajú do veľkosti 30 až 1 000 μm , čo je veľkosť častíc charakteristická pre cirrus. Čím viac je prostredie presýtené, tým rýchlejší rast častice zaznamenávajú a môžu narásť do veľkosti, pri ktorej začnú vypadávať. Vypadávanie častíc z veľkej miery závisí na prítomnosti strihu vetra.



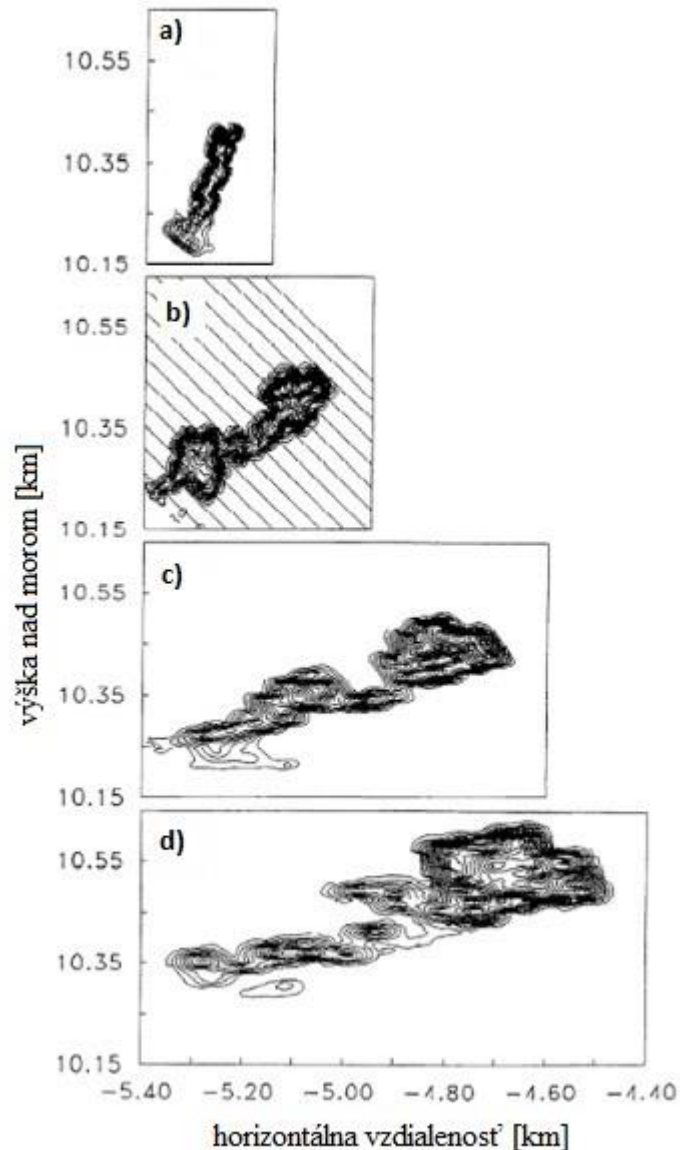
Obrázok 5.1: Turbulentné prúdenie za lietadlom [68].

Na obrázku 5.2a) vidíme priečny rez vývoja hypotetickej dlhodobej kondenzačnej stopy bez prítomnosti strihu vetra. Keď je prítomný strih vetra (Obr. 5.2b)), vypadávanie častíc je mohutnejšie. Ak kryštáliky spadnú do nižších vrstiev s presýteným vzduchom, ďalej rastú, prípadne sa rozdelia a rastie ich počet. Lineárny tvar kondenzačnej stopy sa narúša a kondenzačná stopa začína pre pozorovateľa vyzerat' ako cirrus.



Obrázok 5.2: Schematický priečný rez vývinu kondenzačnej stopy pri prítomnosti horizontálneho prúdenia bez strihu vetra a) a so strihom vetra b) [69].

Príklad vplyvu strihu vetra je zobrazený na obrázku 5.3, ktorý zobrazuje rast kondenzačnej stopy v priečnom reze. Tento jav bol pozorovaný a zdokumentovaný pomocou pozemného lidar [28]. Počas prvých 1,1 minúty (4a)), kedy tvar kondenzačnej stopy ovplyvňuje turbulencia, priemerná šírka stopy je približne 160 metrov, zatiaľ čo jej vertikálna hĺbka je okolo 260 metrov. Postupne s pribúdajúcim časom narastá predovšetkým jej horizontálny rozmer a po 14 minútach má hodnotu až 1 km (4d)). Ako sa rozširuje, tak sa spodná časť stopy začína vyparovať v suchšej vrstve pod výškou 10,35 km. Vrečná vrstva sa dvíha vďaka vztlaku, ktorý vznikne pri uvoľňovaní latentného tepla vznikajúceho pri procese kondenzácie a mrznutia pri tvorbe ľadových častíc. Vertikálna zložka strihu vetra mala v tomto prípade rýchlosť okolo 4 ms^{-1} .



Obrázok 5.3: Priečný rez kondenzačnej stopy a jej rozširovanie [69].

Kondenzačné stopy staré niekoľko hodín sú často nerozoznateľné od prirodzene vzniknutého cirru, bez ohľadu na strih vetra. Väčšina výskumov tvrdí, že počet ľadových častíc v kondenzačnej stope je v podstate konštantný po ich vzniku v presýtenom prostredí, t.j. ďalšie častice sa už nevytvárajú. Čiže, ak začnú zo stopy vypadávať zrážky, znižuje sa počet častíc a stopa by mala postupne miznúť. Keď je parciálny tlak vodnej pary tesne nad bodom presýtenia, rast ľadových kryštálikov je obmedzený, a tak vzniká len veľmi malé množstvo zrážok. V tomto prípade sa kondenzačná stopa môže rozťahovať len pomaly a zachováva si svoj lineárny tvar po relatívne dlhý čas. Pretože kryštály rastú naberaním nových vrstiev, množstvo vody vo forme ľadu v stope stúpa, až kým častice nezačnú vypadávať alebo nastane rovnovážny stav medzi množstvom ľadu a tlakom nasýtenia

vzhľadom na ľad. Takýto rovnovážny stav zvyčajne netrvá veľmi dlho a kondenzačná stopa nakoniec zmizne.

5.2 Predpoveď kondenzačných stôp

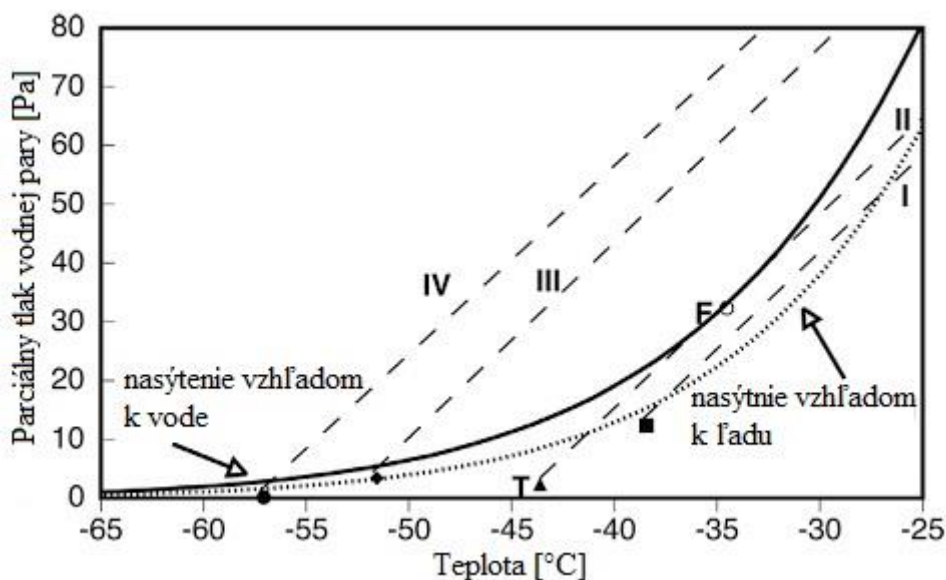
Ako bolo spomenuté vyššie, cirry, ktoré vzniknú ako produkt kondenzačných stôp, majú významný vplyv na zmeny podnebia. So zvyšujúcou sa hustotou leteckej dopravy sa zvyšuje aj množstvo kondenzačných stôp, a preto je potrebné lepšie porozumieť ich tvorbe a vedieť predpovedať ich výskyt. Za týmto účelom bolo vyvinutých niekoľko techník a modelov pre predpoveď (dlhodobých) kondenzačných stôp.

5.2.1 Schmidt-Applemanovo kritérium

Mnoho techník pre predpoveď kondenzačných stôp je založených na Schmidt-Applemanovom kritériu, ktoré definuje meteorologické podmienky potrebné k vzniku dlhodobých kondenzačných stôp. Táto teória vypočítava teoretickú kritickú teplotu, pri ktorej zmes výfukových plynov lietadlového motoru a okolitého vzduchu dosahuje nasýtenia s ohľadom na vodu. Kritická teplota je funkciou okolitej teploty a účinnosti spaľovania paliva motorom. Schmidt-Applemanova teória predpokladá, že výfukové plyny a okolitý vzduch sa zmiešavajú adiabaticky a izobaricky [70]. Ak sa teplota a vlhkosť v oblasti za lietadlovým motorom zmiešavajú rovnomerne, môže byť tento proces znázornený na diagrame závislosti tlaku vodnej pary na teplote ako priamka (priamka zmiešavania) (Obr. 5.4). Sklon tejto priamky je daný účinnosťou spaľovania daného lietadlového motora. Kritická teplota môže byť následne určená porovnaním polohy priamky zmiešavania a derivácie krivky tlaku nasýtenej vodnej pary podľa teploty v diagrame tlak-teplota. Ak je okolitý tlak vodnej pary vyšší alebo rovný ako tlak nasýtenej vodnej pary s ohľadom na ľad, vytvorí sa dlhodobá kondenzačná stopa pri teplotách nižších alebo rovných vzhľadom k príslušnej priamke zmiešavania. Preto je vznik dlhodober kondenzačnej stopy pri konštantnej účinnosti pohonnej jednotky zdanlivo určený len okolitou teplotou a vlhkosťou. V rámci prevádzky predpovede kondenzačných stôp, kde rozlíšenie dát o teplote a vlhkosti je rádovo v desiatkach až stovkách kilometrov, sú hodnoty teploty a vlhkosti veľmi nepresné. To je nevýhodou Schmidt-Applemanovho kritéria, ktoré vyžaduje presnejšie a konzistentnejšie dáta pre stanovenie prítomnosti, resp. neprítomnosti dlhodobých kondenzačných stôp. Tento nedostatok limituje presnosť

predpovede založenej výhradne na Schmidt-Aplemanovom kritériu. Meteorologické dáta skresľuje bias a náhodné chyby merania, takže pred tým, ako je aplikovaná Schmidt-Aplemanova teória, musia byť dáta o tieto chyby opravené.

Ďalší faktor, ktorý komplikuje predpoveď výskytu dlhodobých kondenzačných stôp je vplyv ďalších premenných (vrátane vertikálnej rýchlosti prúdenia vzduchových hmôt a teplotného gradientu atmosféry) na ich formovanie. Autori David P. Duda a Patrick Minnis vo svojom výskume [71] spojili niekoľkomesačné štatistiky výskytu kondenzačných stôp získané z pozorovaní zo Zeme a zo satelitov s viacerými meteorologickými premennými (napr. vlhkosť v hornej časti troposféry, vertikálne prúdenie, strih vetra atď.) do dvoch numerických analýz počasia. Po skúmaní vzťahu medzi výskytom kondenzačných stôp a štatistikami získanými z týchto analýz boli určené priaznivé podmienky pre vznik dlhodobých kondenzačných stôp. Ukázalo sa, že najdôležitejší faktor ovplyvňujúci ich životnosť je vlhkosť prostredia, a že proces horizontálneho rozťahovania sa kondenzačných je najčastejšie podmienený kladným vertikálnym prúdením vzduchových hmôt. Tieto faktory však nie sú zahrnuté v Schmidt-Aplemanovej teórii, pretože tá sa zaoberá len vznikom kondenzačných stôp a nie ďalším vývinom dlhodobých kondenzačných stôp.



Obrázok 5.4: Grafické znázornenie Schmidt-Aplemanovej teórie [69].

Priamky zmiešavania na obrázku 5.4 schematicky znázorňujú proces vzniku kondenzačných stôp v niekoľkých rôznych prípadoch. Body na spodnom konci priamok

indikujú hodnoty okolitej teploty T_a a parciálny tlak vodnej pary p_a . Každá priamka začína v bode teploty T_e a tlaku plynov p_e (ležia mimo grafu) vystupujúcich z výfuku motora a tieto hodnoty postupne, ako sa plyny zmiešavajú s okolitým vzduchom, kopírujú priamku až kým nedosiahnu okolité podmienky. V prípade priamok I, II a IV je konečný stav okolitého tlaku vodnej pary nižší ako parciálny tlak nasýteného vzduchu vzhľadom na ľad p_i a v prípade III zase vyšší.

V prípade I parciálny tlak počas zmiešavania prekročí hodnoty nasýtenia vzhľadom na ľad, ale nikdy nedosiahne hodnoty tlaku nasýtenia vzhľadom na vodu. Tým pádom nevzniknú žiadne kvapôčky vody, ktoré by mohli zamrznúť, takže nevzniká žiadna kondenzačná stopa.

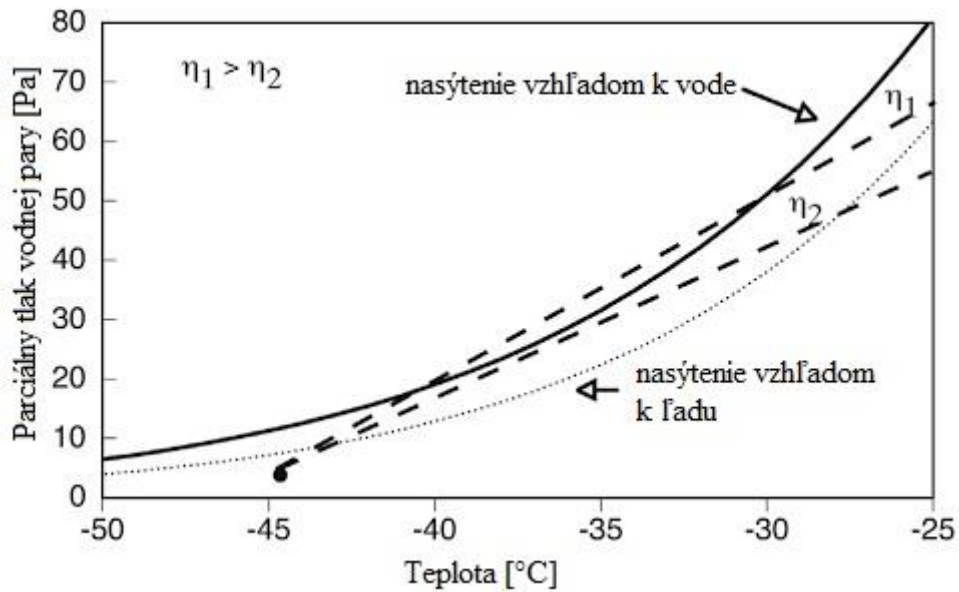
V prípade II sa vytvorí krátkodobá kondenzačná stopa, pretože v bode F hodnoty zmesi plynov a okolitého vzduchu nachvíľu dosiahnu tlak a teplotu pri nasýtení vzhľadom na vodu. Vtedy voda obsiahnutá vo vzduchu skondenzuje a vzniknuté kvapôčky vplyvom nízkej teploty zamrznú. Vzhľadom k tomu, že stav saturácie vzhľadom k vode bol dosiahnutý len na veľmi krátku dobu, nestihnú zamrznúť všetky vzniknuté kvapôčky. Tie, ktoré nestihli zamrznúť sa vyparia. Vzniknuté ľadové kryštáliky existujú až do bodu, kedy priamka prekročí prerušovanú krivku. Potom vďaka poklesu tlaku pod hodnotu tlaku nasýtenia vzhľadom k ľadu začnú sublimovať a kondenzačná stopa zaniká pri teplote približne -42°C .

Dlhodobá rozširujúca sa kondenzačná stopa sa vytvorí v prípade III, pretože priamka zmiešavania sa veľmi dlhý čas nachádzala v podmienkach presýtenia vzhľadom k vode, to znamená, že vzniklo veľké množstvo vodných kvapiek. V momente, keď priamka prekročí krivku nasýtenia vzhľadom k vode, začnú vodné kvapky zamŕzať. Konečný stav okolitého vzduchu má hodnotu tlaku vyššiu ako je hodnota saturácie vzhľadom na ľad, a tak sú zabezpečené vhodné podmienky pre zotrvanie a rast ľadových kryštálikov.

V prípade IV vzniká dlhodobá nerozširujúca sa kondenzačná stopa, pretože zmes vzduchu a výfukových plynov je v stave presýtenia vzhľadom k vode veľmi dlhý čas a konečný stav má hodnotu tlaku blízko k hodnote saturácie vzhľadom na ľad, takže ľadové kryštáliky sublimujú veľmi pomaly. [69]

Kritická teplota T_T je definovaná ako najvyššia teplota, pri ktorej dochádza k formovaniu kondenzačnej stopy pri daných hodnotách tlaku vodnej pary okolitého vzduchu a tlaku a teploty výstupných plynov z motoru lietadla. Posledné dve menované veličiny určujú

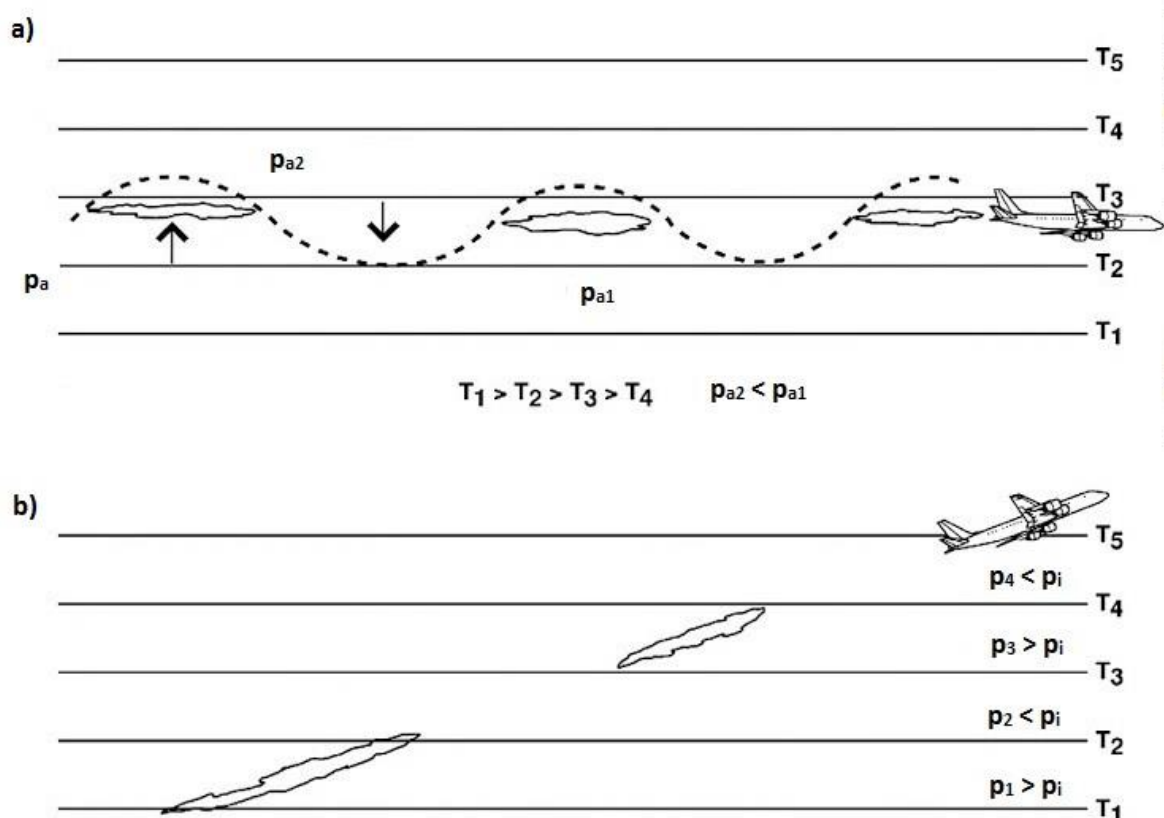
sklon, resp. smernicu priamky zmiešavania G a ich hodnoty závisia na type motora, prevádzkových podmienkach a druhu paliva, zatiaľ čo tlak vodnej pary môže byť určený z vertikálneho profilu atmosférických teplôt a teplôt rosného bodu [69]. V prípade II je okolitá teplota v bode T kritická teplota pre danú hodnotu p_a a G . Kritická teplota T_T je jedinečná pre každú kombináciu hodnôt p_a a G . Vznik kondenzačnej stopy závisí od vzájomnej polohy T_T a T_a . V prípadoch III a IV je hodnota T_T vyššia ako T_a , preto sa kondenzačná stopa vytvorí. V prípade I je T_T nižšia ako T_a a kondenzačná stopa nevznikne.



Obrázok 5.5: Schmidt-Applemanovo kritérium pre motory s rôznou účinnosťou spaľovania [69].

Smernicu priamky zmiešavania primárne určuje celková účinnosť motoru. Každý typ motoru má menovitú účinnosť, ktorá je určená v stacionárnych prevádzkových podmienkach. Celková účinnosť sa však môže líšiť aj v rámci motorov jedného typu, kvôli ich použitiu na rôznych drakoch lietadla, rôznej údržbe a rôznych prevádzkových podmienkach. Obrázok 5.5 zobrazuje dopad účinnosti motora pri daných okolitých podmienkach. V tomto prípade je účinnosť η_2 o niečo nižšia než η_1 , čo má za následok vznik kondenzačnej stopy v prípade motora s účinnosťou η_1 a žiadnu kondenzačnú stopu v prípade motora s účinnosťou η_2 . To znamená, že dve lietadlá letiace v rovnakom prostredí môžu, ale nemusia vytvárať kondenzačnú stopu. Takisto lietadlo, ktoré klesá, môže produkovať kondenzačnú stopu a lietadlo, ktoré stúpa, nemusí. Záleží to od vplyvu akcelerácie na účinnosť motora.

Keďže vodná para a teplota nie sú v atmosfére homogénne distribuované, môžu vznikáť prerušované kondenzačné stopy, ktorých jednotlivá dĺžka sa môže pohybovať aj okolo 100 m [69]. Napríklad, keď lietadlo prelieta cez vlhkú vrstvu, ktorá je zvlnená vplyvom vertikálneho prúdenia ako na obrázku 5.6a). Táto vrstva môže byť v extrémnych prípadoch zvlnená aj vplyvom turbulencií od lietadla. Kondenzačná stopa sa tvorí v konkávných častiach vlny, kde je okolitá teplota pod kritickou teplotou a vytvárajú sa ľadové kryštáliky. V konvexných častiach sa stopa nevytvorí, pretože vzduch je tam teplejší a suchší. Podobný úkaz môže nastať pri stúpaní alebo klesaní lietadla cez vrstvy, ktorých parametre sú vhodné pre formovanie kondenzačnej stopy, ale sú oddelené vlhkými vrstvami ako na obrázku 5.6b). Životnosť kondenzačnej stopy, resp. jej „útržkov“ závisí na relatívnej hodnote p_a vzhľadom k p_i pozdĺž stopy. Čiže časti kondenzačnej stopy môžu rýchlo zmiznúť alebo sa vôbec nevytvorí a iné časti môžu zotrvať alebo dokonca rásť. Lokálne turbulencie indukované drakom lietadla, stabilita atmosféry a smer a rýchlosť vetra taktiež prispievajú k morfológii stopy [69].



Obrázok 5.6: Schematické znázornenie vzniku prerušovanej kondenzačnej stopy [69].

5.3 Mikrofyzikálna štruktúra

Vznik častíc kondenzačných stôp je komplexný mikrofyzikálny proces. Množstvo ľadových častíc, ktoré sa vytvoria za lietadlom závisí na okolitej vlhkosti a teplote atmosféry, množstve uvoľnených iónov a pevných častíc, obsahu síry v palive, relatívneho množstva síry v palive, ktorá zoxидуje na kyselinu sírovú a ďalších mikrofyzikálnych procesoch [66].

Ľadové častice sa môžu tvoriť homogénne alebo heterogénne. Pri homogénnej nukleácii vodná kvapka zamrzne samovoľne, bez interakcie s ďalšou látkou [72]. Tento jav je typický pre aerodynamické kondenzačné stopy. Heterogénna nukleácia vyžaduje prítomnosť kondenzačných jadier, čo sú rôzne pevné častice vo forme aerosólu. Či ide o homogénnu alebo heterogénnu nukleáciu, častice kondenzačných stôp sa najprv formujú ako vodné kvapôčky. Tieto kvapôčky musia následne zmrznúť do 0,1 sekundy od svojho vzniku. Ináč vzniknuté ľadové častice nebudú dostatočne veľké na to, aby vytvorili viditeľnú kondenzačnú stopu [67]. Drvivá väčšina častíc klasickej kondenzačnej stopy vznikne heterogénnou nukleáciou [19]. V bežných podmienkach je množstvo častíc v okolitej atmosfére, ktoré môžu slúžiť ako kondenzačné jadrá príliš nízky na to, aby sa vytvorila viditeľná kondenzačná stopa 10-30 metrov za výfukom motora. Avšak pri spaľovaní paliva motorom sa uvoľňujú častice, ktoré zvyšujú výskyt kondenzačných jadier v oblasti za motorom a to umožňuje vznik tzv. ihneď sa tvoriacich kondenzačných stôp. Počet týchto drobných častíc v priestore za motorom lietadla môže byť meraný pomocou počítadla kondenzačných jadier, ktoré počíta počet častíc v nasýtenom prostredí vo vnútri prístroja. Tieto častice musia byť dostatočne opticky veľké na to, aby boli zistiteľné. Hranica zistiteľnosti sa pri týchto prístrojoch pohybuje od 3 do 20 nm [19]. Heymsfield však vo svojom výskume [73] ukázal, že takéto merania môžu byť dosť nepresné, pretože sú ovplyvnené samotnou konštrukciou prístroja a drakom lietadla. Väčšie častice sa môžu rozbiť o steny prístroja a tieto nepresnosti potom znemožňujú spoľahlivo určiť, či sa jedná o prirodzený cirrus alebo contrail-cirrus. Taktiež poukázal na to, že doterajšia znalosť vlastností pevných častíc, ktoré produkuje motor lietadla, nie je dostatočná na určenie, prečo sú niektoré častice aktívnejšie a iné menej v rámci ich funkcie kondenzačných jadier.

6. Prevádzkovatelia vs. Kondenzačné stopy

Aby bolo dosiahnuté spomalenie v otepľovaní zemskej atmosféry, musí k tomu určitou formou prispieť každé odvetvie, ktoré ho spôsobuje. V rámci leteckej dopravy je jeden z takýchto javov vznik kondenzačných stôp. Preto je potrebné určiť metódy a riešenia, ktoré sa budú zaoberať znižovaním ich množstva alebo mitigáciou ich vplyvu. Táto kapitola identifikuje prvky, ktoré majú vplyv na ich vznik a rozoberá a porovnáva metódy ich redukovania.

6.1 Redukovanie kondenzačných stôp

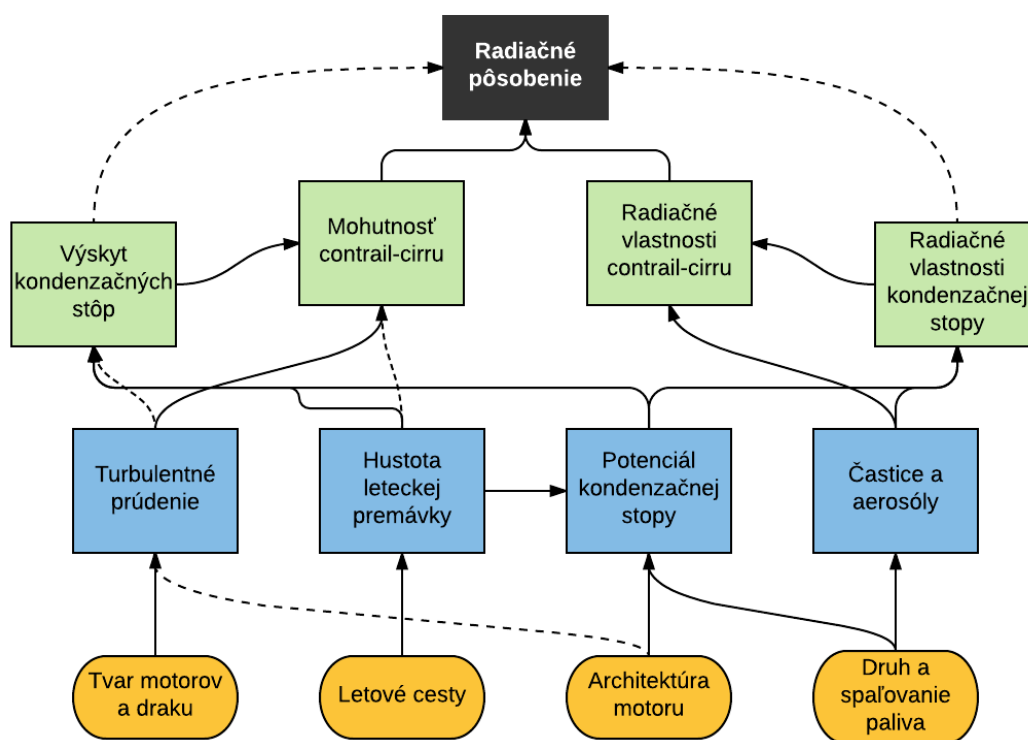
Existujú dva hlavné dôvody prečo sa snažiť obmedziť tvorbu kondenzačných stôp. Jeden dôvod sú vojenské účely. Kondenzačná stopa, ktorú vytvára vojenské lietadlo nad nepriateľským územím umožňuje toto lietadlo jednoduchšie spozorovať. Tento problém sa špeciálne týka utajených lietadiel ako napr. F-22 Raptor alebo B-2 Spirit a špionážnych lietadiel ako SR-71 Blackbird alebo Lockheed U-2, ktoré by za normálnych okolností neboli spozorované. Z vojenského hľadiska sú preto problémom aj krátkodobé kondenzačné stopy. Dizajnéri lietadla Lockheed U-2 riešili tento problém najjednoduchším, nie však optimálnym spôsobom. Na kabínu umiestnili malé spätné zrkadlo (Obr. 6.1), pomocou ktorého si mohol pilot všimnúť tvoriacu sa kondenzačnú stopu za lietadlom a zmeniť letovú hladinu tak, aby sa stopa nevytvárala.



Obrázok 6.1: Lockheed U-2 so spätným zrkadlom zistenie vzniku kondenzačnej stopy za lietadlom [74].

Z hľadiska životného prostredia má zmysel zaoberať sa dlhodobými rozširujúcimi sa stopami.

K identifikácii ovplyvniteľných technologických a prevádzkových prvkov (t.j. prvkov, ktoré môžeme meniť či už technologicky alebo prevádzkovo), ktoré majú vplyv na tvorbu kondenzačných stôp a následnú zmenu radiačného pôsobenia, bola z dostupnej literatúry vytvorená štruktúra prvkov a ich vzájomných vzťahov (Obr. 6.2). Štruktúra má štyri úrovne, identifikované pomocou spätnej analýzy: Radiačné pôsobenie ← Výskyt kondenzačných stôp/contrail-cirrov a ich Radiačné vlastnosti (zelená) ← Fyzikálne princípy (modrá) ← Technologické a prevádzkové prvky (oranžová). Šípky s plnou čiarou predstavujú silné väzby, s prerušovanou slabé väzby.



Obrázok 6.2: Štruktúra prvkov a vzťahov, ktoré sa podieľajú na formovaní kondenzačných stôp a zmene radiačného pôsobenia.

Radiačné pôsobenie je definované ako rozdiel medzi množstvom energie absorbovanej Zemou a množstvom energie Zemou vyžiarenej späť do vesmíru. Množstvo absorbovanej energie závisí na intenzite slnečného žiarenia. Ak je tejto energie viac, než dokáže Zem vyžiarit' späť, hovoríme o kladnom radiačnom pôsobení a atmosféra sa zahrieva.

Výskyt kondenzačných stôp označuje počet dlhodobých kondenzačných stôp, ktoré sa v jednom čase vyskytujú nad sledovaným územím. Na toto číslo má vplyv najmä **Hustota**

leteckej premávky v danej oblasti a **Potenciál kondenzačnej stopy**, ktorý predstavuje priaznivost' okolitého ovzdušia pre vznik kondenzačnej stopy. Výskyt kondenzačných stôp prirodzene vplýva na **Mohutnosť contrail-cirru** v prípade, že sa tento formuje. Najvýraznejším faktorom, ktorý ovplyvňuje tvar, resp. rozpínanie kondenzačnej stopy a teda vznik a mohutnosť cirru je **Turbulentné prúdenie. Radiačné vlastnosti contrail-cirru** prirodzene plynú z **Radiačných vlastností kondenzačnej stopy**, resp. stôp, z ktorých vznikol. Tieto vlastnosti závisia na množstve pevných častíc v okolitom vzduchu (**Častice a aerosóly**), ktoré plnia funkciu kondenzačných jadier a výrazným spôsobom tak napomáhajú formovaniu ľadových kryštálikov.

Identifikované boli tieto štyri ovplyvniteľné prvky:

Tvar motorov a draku – všetky zmeny a inovácie vo fyzickej forme motorov a draku lietadla.

Letové cesty – dočasné alebo globálne zmeny v trajektóriách letu/letov

Architektúra motoru – zmeny v princípe fungovania pohonnej jednotky

Druh a spaľovanie paliva – obmedzovanie emisií, rôzne energetické zdroje využívané k poháňaniu motora

6.1.1 Prispôsobenie leteckej premávky

Z prevádzkového hľadiska môžeme dosiahnuť zníženie tvorby kondenzačných stôp tromi spôsobmi, a to časovou reguláciou letov, priestorovou reguláciou letov a zmenou letových hladín.

6.1.1.1 Časová regulácia letov

Prispôsobenie času letov má za cieľ vyhnúť sa časom, kedy sa tvoria dlhodobé kondenzačné stopy alebo lietať vtedy, keď majú kondenzačné stopy minimálny vplyv na radiačné pôsobenie.

Radiačné pôsobenie kondenzačných stôp je rozdielne cez deň a v noci. Kondenzačné stopy a contrail-cirru cez deň odrážajú časť krátkovlnného žiarenia zo Slnka, zatiaľ čo v noci bránia vo vyžarovaní dlhých vln zo Zeme. Preto stav, keď sa cez deň kondenzačné stopy netvoria a v noci áno, môžeme považovať za najvýraznejší z pohľadu kladného radiačného pôsobenia. Vo výskume [75] autori tvrdia, že nočné lety v zime sú najviac zodpovedné za radiačné pôsobenie kondenzačných stôp a vo výskume [76] sa uvádza, že zvýšením

hustoty leteckej premávky v čase západu a východu slnka sa obmedzí radiačné pôsobenie od kondenzačných stôp. Aj keď je tento prístup ohľaduplný k životnému prostrediu, z praktického a ekonomického hľadiska je obmedzenie letov na vymedzené časy nepraktické. Letecká doprava je v súčasnosti prevádzkovaná počas celého dňa a jej obmedzenie len na určité časové úseky by sa stretlo s odporom leteckých prepravcov a tiež by v týchto úsekoch nastávali preťaženia vzdušného priestoru a letísk.

6.1.1.2 Priestorová regulácia letov

Podobne ako časová regulácia má priestorová regulácia letov cieľ vyhnúť sa miestam s vysokou pravdepodobnosťou tvorby dlhodobých kondenzačných stôp, resp. lietať v miestach, kde prítomnosť týchto stôp má minimálny vplyv na radiačné pôsobenie.

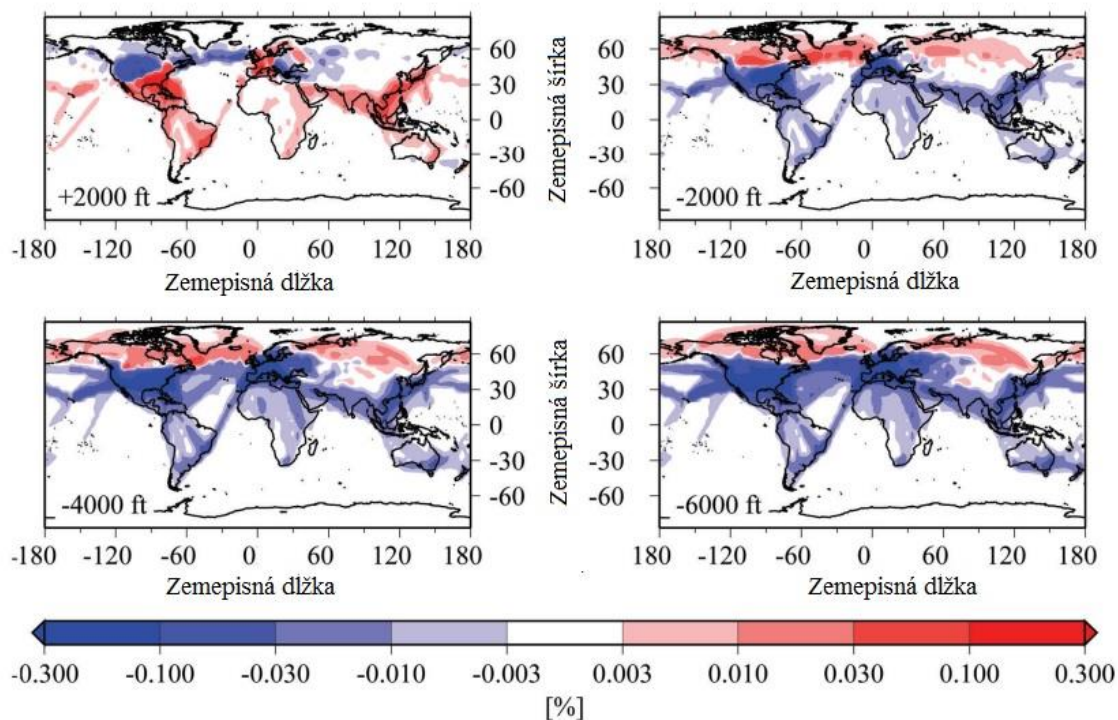
Ako prvotná myšlienka sa javí regulovať lety tak, aby čo najviac letov, pri ktorých sa formujú kondenzačné stopy, bolo uskutočňovaných nad zemským povrchom s nízkym albedom a naopak, vyhýbať sa miestam, kde nadobúda albedo zemského povrchu vysoké hodnoty. Táto myšlienka je limitovaná tým, že by sa výrazne obmedzil počet letových tratí, čo zase súvisí s kapacitou vzdušného priestoru. Navyše, ak sa v okolí letiska, kde je vysoká hustota leteckej premávky, nenachádzajú oblasti s nízkym albedom, tak je tento prístup neuskutočniteľný. Ďalší problém spočíva v tom, že kondenzačné stopy môžu vplyvom vzdušných prúdov a pohybov vzdušných mäs „cestovať“ na relatívne veľké vzdialenosti a aj keď boli formované nad územím s nízkym albedom, môžu sa presunúť nad územie s vysokým albedom. Zmena letových tratí z pohľadu albeda tiež vo väčšine prípadov spôsobí jej predĺženie, takže sa zvýši spotreba paliva a s tým súvisiace emisie oxidu uhličitého a zvýšia sa náklady na povolenky CO₂.

6.1.1.3 Zmena letovej hladiny

Hlavnou myšlienkou ako predchádzať vzniku dlhodobých kondenzačných stôp je vyhýbanie sa oblastiam, ktoré majú potenciál pre ich vznik a to najmä zmenou letovej hladiny. Teoreticky sa dá predpokladať, že v stredných zemepisných šírkach je efektívnejšie posunúť letové hladiny vyššie, pretože viacero lietadiel by letelo v suchej stratosfére, zatiaľ čo v tropickom podnebnom pásme je výhodnejšie lietať v nižších letových hladinách, pretože vzduch tam má vyššiu teplotu a to znemožňuje tvorbu kondenzačných stôp. Lietanie v nižších hladinách v stredných zemepisných šírkach by taktiež viedlo k redukcii kondenzačných stôp, ale objavujú sa tu ďalšie problémy. Aby bol dosiahnutý požadovaný efekt, letová výška by v zimnom období musela byť obmedzená na

približne 10 000 ft [77]. Toto obmedzenie by so sebou nieslo negatívny dopad v podobe vyššieho množstva spáleného paliva v dôsledku vyššej hustoty a teda odporu vzduchu a dlhšieho času letov. Obmedzenie maximálnej letovej hladiny by spôsobilo zhustenie letovej premávky a tým pádom väčšie zaťaženie jej riadenia. Pri nižších letoch sa lietadlo tiež častejšie nachádza v turbulentnom prostredí, čo negatívne pôsobí na komfort cestujúcich a, čo je dôležitejšie, viac by bola namáhaná konštrukcia lietadla, z čoho by vyplývali vyššie nároky na materiály a konštrukčné riešenia draku a krídel a s tým súvisiace vyššie náklady pre výrobcov a prevádzkovateľov.

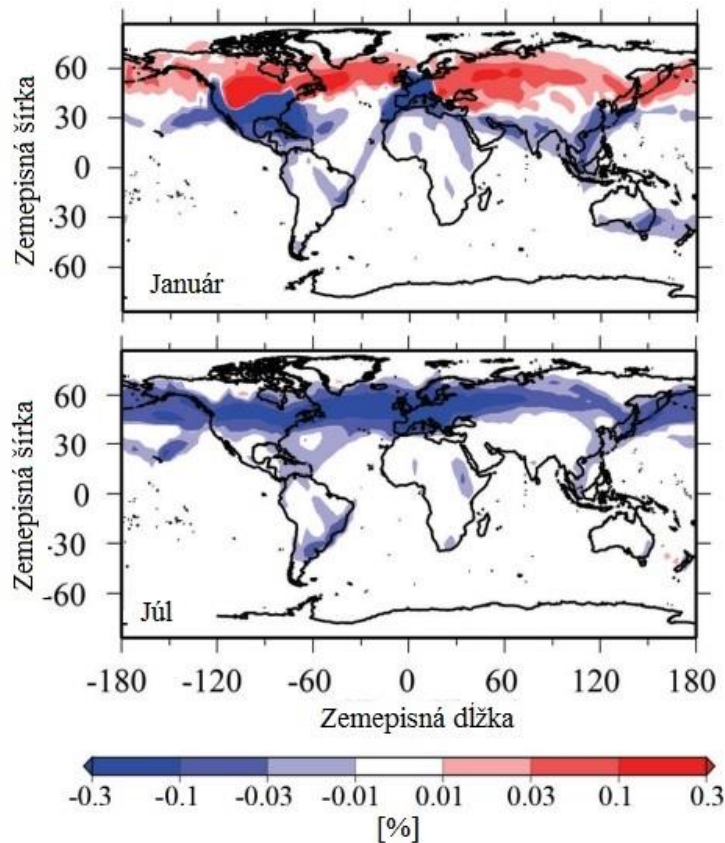
Autori výskumu [78] simulovali tvorbu kondenzačných stôp pri globálnom znížení letových hladín o 2 000 ft, 4 000 ft a 6 000 ft. Prišli na to, že pokrytie kondenzačnými stopami klesalo s výškou takmer lineárne a pri maximálnom znížení (6 000 ft) bola jeho priemerná hodnota o približne 45% nižšia. Naopak, celkové zvýšenie všetkých letových hladín o 2 000 ft. by malo za následok približne o 6% väčšie priemerné ročné pokrytie kondenzačnými stopami. Globálne radiačné pôsobenie zapríčinené stopami sa menilo takmer úmerne s pokrytím. Treba podotknúť, že z lokálneho hľadiska sa výskyt stôp menil s výškou rôzne, t.j. zmena pokrytia stopami v jednotlivých regiónoch sa značne líšila, ako je to vidieť na obrázku 6.3. Všeobecne sa dá povedať, že pre všetky tri prípady zníženia letových hladín platí, že v tropickom podnebnom pásme sa pokrytie kondenzačnými stopami znížilo a mimo trópop bola táto hodnota zase vyššia. V trópop sú totiž letové trate umiestnené relatívne nízko pod tropopauzou. Ak sa letecká premávka presunie nižšie, teplota a vlhkosť nebudú nadobúdať hodnoty vhodné pre tvorbu dlhodobých stôp. Pri posunutí o 6000 ft nadol sa pri simuláciách nevytvorili takmer žiadne stopy v oblasti medzi tridsiatimi stupňami severnej zemepisnej šírky a rovníkom. V miernom podnebnom pásme je vhodné rozdelenie oblastí na medzikontinentálne (napr. severoatlantický koridor) s dlhými letmi, ktoré prebiehajú vo vysokých letových hladinách a kontinentálne (napr. v rámci Európy), ktoré vo väčšej miere obsahujú letové trate v nízkych hladinách. Tieto hladiny sú dostatočne nízko na to, aby ich posunutím o 2 000 ft nadol sa lietadlá vyhli podmienkam priaznivým pre vznik trvalých kondenzačných stôp. V prípade dlhých letov sa veľká časť tratí nachádza v suchých a studených spodných vrstvách stratosféry. Ich posunutím o 2 000 ft by sa dosiahlo to, že trate by viedli v horných vrstvách troposféry, kde sú podmienky oveľa priaznivejšie pre dlhodobé stopy. Ďalšie posunutie tratí nadol o 4 000 ft a 6 000 ft zase spôsobí to, že letové trate sa dostanú do oblasti, ktorá nie je vhodná pre vznik stôp.



Obrázok 6.3: Priemerná ročná zmena pokrytia kondenzačnými stopami pri posune letových hladín o 2 000 ft vyššie (vľavo hore), o 2 000 ft nižšie (vpravo hore), o 4 000 ft nižšie (vľavo dole) a o 6 000 ft nižšie (vpravo dole) [78]

Zvýšenie letových tratí o 2 000 ft viedlo k väčšiemu pokrytiu kondenzačnými stopami v oblasti tróпов, pretože lety by sa presunuli do vrchnejších častí troposféry, ktorá je chladnejšia a stále dostatočne vlhká. Takisto sa viac stôp vytváralo nad kontinentálnym územím, kde sa trate presunuli z nízkych hladín nevhodných pre vznik stôp do hladín s vhodnými podmienkami. Naopak v stredných zemepisných šírkach v prípade dlhých letov vo vysokých hladinách sa množstvo kondenzačných stôp znížilo, pretože drvivá väčšina letov sa presunula do stratosféry, kde nie sú vhodné podmienky pre ich formovanie.

Taktiež bolo zistené, že zmena pokrytia kondenzačnými stopami v dôsledku posunu letových hladín výrazne závisí aj na ročnom období. Zatiaľ čo v zime je situácia pri posunutí o -6 000 ft podobná ako v prípade ročného priemeru popísaného vyššie, v lete sa pri rovnakom posunutí vyskytuje menej kondenzačných stôp vo všetkých regiónoch (Obr. 6.4). Nastáva tak v dôsledku vyšších letných teplôt v troposfére na severnej pologuli. Podobný, hoci menej výrazný scenár sa odohráva aj pri posune o -4 000 ft a -2 000 ft.



Obrázok 6.4: Zmena v pokrytí kondenzačnými stopami pri posune letových hladín o 6 000 ft nadol v januári a v júli [78].

Kvôli rozdielom v jednotlivých regiónoch a závislosti na ročnom období sa globálny posun letových hladín zdá byť nevhodným riešením. Lepšia stratégia pre redukcii dlhodobých kondenzačných stôp sa javí operatívne prispôsobovanie letov zemepisnej šírke, ročnému obdobiu a ideálne aj krátkodobým zmenám v parametroch ovzdušia. Letecký prepravcovia však nie sú žiadnymi prostriedkami nútení, resp. motivovaní meniť trasy svojich letov tak, aby sa priestorom s vhodnými parametrami pre tvorbu kondenzačných stôp vyhýbali. Ako riešenie ponúkol zaujímavú myšlienku Hospodka vo svojej habilitačnej prednáške [72]. Navrhol, že dopravcovia by mohli byť odmeňovaní za vyhýbanie sa miestam s potenciálom pre vznik dlhodobých kondenzačných stôp získaním bezplatných povoleniek CO₂, pretože sa zdá, že emisie CO₂ majú globálne menší vplyv na atmosféru ako kondenzačné stopy.

6.1.2 Technológie motorov a alternatívne palivá

Medzinárodný výbor pre zmenu klímy uvádza v reporte [28], že zvyšovanie účinnosti motorov síce znižuje spotrebu paliva a množstvo vypúšťaných emisií, ale mohlo by viesť

k väčšej tvorbe kondenzačných stôp, pretože je vypúšťané väčšie množstvo vodnej pary. Z toho vyplýva, že v budúcnosti by formovanie kondenzačných stôp mohlo rásť rýchlejšie ako množstvo spaľovaného paliva práve kvôli predpokladu, že spaľovanie lietadlových motorov bude čím ďalej tým účinnejšie. Vo vzdialenejšej budúcnosti sa dokonca uvažuje nad použitím tekutého vodíka ako pohonnej látky. Jeho spaľovanie je síce „čisté“, čiže bez vypúšťania akýchkoľvek pevných častíc, ale produkuje až 2,6 násobne viac vodnej pary ako ekvivalentné lietadlo poháňané leteckým petrolejom [79]. Z toho sa dá predpokladať, že hoci bude atmosféra „oslobodená“ od pevných častíc a aerosólov vznikajúcich pri spaľovaní paliva, tak bude obsahovať oveľa väčšie množstvo vodnej pary. Takže síce nebude prítomné také množstvo kondenzačných jadier ako doteraz, ale relatívna vlhkosť bude oveľa vyššia, a ľadové kryštáliky by mohli vznikáť homogénnou kryštalizáciou. To znamená, že v budúcnosti by sme mohli byť svedkami častejších výskytov aerodynamických kondenzačných stôp. Navyše, vodná para má sama o sebe funkciu silného skleníkového plynu, takže jej zvýšené množstvo bude prispievať k ohrievaniu atmosféry bez ohľadu na formovanie kondenzačných stôp.

V práci [80] bola preskúmaná možnosť použitia prísad do pohonných hmôt s cieľom eliminovať tvorbu kondenzačných stôp. Prišlo sa na to, že by to nebolo užitočné riešenie. Použitie prísad do pohonných hmôt kvôli zníženiu schopnosti častíc sadze viazať na seba vodu by síce viedlo k zníženiu počtu vzniknutých častíc kondenzačnej stopy, ale tieto častice by boli väčšie. Ak stopa obsahuje menej častíc, ktoré sú ale väčšie, tak je pravdepodobné, že jej radiačné pôsobenie bude slabšie. Avšak výsledný efekt by nebol taký výrazný, lebo voda môže kondenzovať aj na iných časticách a pridávaním prísad do paliva by sa zvýšili jeho náklady, takže z celkového hľadiska sú prísady zatiaľ bezpredmetné.

V súčasnosti neexistujú žiadne predpisy, ktoré by mali za cieľ regulovať tvorbu kondenzačných stôp. Tieto predpisy by okrem iného určili, akým smerom sa bude uberať vývoj konštrukcie motorov. Napríklad v prípade, že by boli zavedené reštrikcie v letových hladinách, ako bolo spomenuté vyššie, malo by to negatívny vplyv na spotrebu paliva súčasných lietadiel a s tým nepriamo súvisiacich nákladov na povolenky CO₂. Preto by konštruktéri boli nútení navrhnuť motory, ktorých optimálne výkonové vlastnosti by boli dosiahnuté práve v letových hladinách, ktoré by sa používali.

6.1.3 Konštrukcia lietadla

Vo všeobecnosti sú lietadlá navrhované aby splnili požiadavky konkrétnych trhov a maximalizovali zisk. Konštrukciu lietadlá ovplyvňujú faktory ako maximálne platiace zaťaženie, dolet, stávajúca infraštruktúra a rôzne iné faktory, ktoré zabezpečia konkrétnemu lietadlu výhodu oproti konkurencii. Proces navrhovania lietadla je akýmsi kompromisom požiadaviek na bezpečnosť, výkon a vplyvu na životné prostredie. V poslednej dobe sa zdôrazňuje práve vplyv na životné prostredie a to najmä v otázke kondenzačných stôp. Geometria lietadla má vplyv na dynamiku turbulentných prúdov. Tie podľa výskumu [81] ovplyvňujú kondenzačné stopy tromi spôsobmi: majú na svedomí horizontálne a vertikálne rozširovanie kondenzačných stôp, v strede víru dochádza k poklesu tlaku a zvýšeniu relatívnej vlhkosti a prudký útlm turbulencie spôsobí vďaka adiabatickej kompresii sublimáciu niektorých ľadových kryštálikov. Podľa prvých dvoch spomenutých vplyvov by zmena konfigurácie lietadla tak, aby vznikla väčšia medzera medzi výfukmi motorov a koncami krídel lietadla mohla znížiť mieru rozptylu kondenzačných stôp a zabezpečiť, aby sa menšie množstvo výfukových plynov dostalo do stredu turbulentného víru kde je vyššia vlhkosť. Tým pádom by bola znížená pravdepodobnosť vzniku stopy a contrail cirru. Na druhej strane, umiestnenie výfukov bližšie ku koncom krídel by mohol spôsobiť to, že vplyvom adiabatickej kompresie sublimuje väčšie množstvo vzniknutých kryštálikov a tým pádom by sa tak isto znížila pravdepodobnosť vzniku stopy.

6.1.4 Externé zariadenia

Predchádzajúce stratégie mitigácie kondenzačných stôp sú priamo spojené so zásahmi do motorov alebo lietadla ako takého. Objavuje sa však aj možnosť dodatočnej inštalácie externého zariadenia na lietadlo, ktoré by potlačilo vznik kondenzačných stôp. Boli patentované dve takéto zariadenia. Jedno z nich je zariadenie [82], ktoré dokáže pomocou elektromagnetického vlnenia spôsobiť vyparovanie vody. Ak elektromagnetické vlnenie nastavíme na budiacu frekvenciu vody, vlnenie je absorbované ľadovými časticami a premenené na teplo, čo by spôsobilo roztopenie ľadu a následné vyparovanie vody. Muselo by to byť však dosiahnuté takým spôsobom, aby vodná para opäť neprekročila krivku presýtenia vzhľadom na vodu v Schmidt-Applemanovom grafe. Ináč by zase skondenzovala a zamrzla. Druhé zariadenie [83] by malo zase dokázať zvýšiť teplotu

častíc, ktoré slúžia ako kondenzačné jadrá. Uhlíkové aj sírové častice majú dobrú schopnosť absorbovať elektromagnetické vlny, preto by malo postačovať menšie množstvo energie na ich zohriatie.

Záver

Táto práca sa zaoberá identifikáciou prvkov, ktoré zapríčiňujú tvorbu najmä dlhodobých kondenzačných stôp a ich následný vplyv na celkové radiačné pôsobenie a teda zahrievanie planéty. K tomuto bolo potrebné porozumieť atmosférickým javom, ktoré na formovanie a existencie kondenzačných stôp vplyvajú. Z dostupnej literatúry boli popísané prvky týkajúce sa stavu a parametrov atmosféry, a tiež boli identifikované prvky prevádzkového a technologického rázu. Parametre atmosféry nemôžeme meniť, zatiaľ čo technologické a prevádzkové prvky áno. Keďže vo všeobecnosti majú kondenzačné stopy negatívny vplyv na životné prostredie, t.j. celkovo zvyšujú hodnotu radiačného pôsobenia, práca popisuje metódy, ako sa vyhýbať ich tvorbe, či obmedziť tvorbu kondenzačných stôp. Toto je možné dosiahnuť prispôbením prevádzkových a technologických prvkov prvkom atmosférickým. Týmto sa zaoberala kapitola o redukovaní kondenzačných stôp, kde bola vytvorená a popísaná štruktúra prvkov a vzťahov, ktoré vplyvajú na celkové radiačné pôsobenie. Bol pri tom použitý online softvér pre tvorbu grafov *Lucidchart* (<https://www.lucidchart.com/>).

Ďalším cieľom práce bolo zhodnotiť spôsoby potlačenia tvorby kondenzačných stôp alebo spôsoby mitigácie ich vplyvu z rôznych hľadísk. V tejto práci a zatiaľ ani v žiadnej dostupnej literatúre nebol identifikovaný žiadny všeobecný vzorec, podľa ktorého by globálna zmena v prevádzke dosiahla pozitívny efekt. Preto sa zatiaľ ako najlepšie riešenie javí operatívne prispôbovanie jednotlivých letov stavu atmosféry v čase a mieste ich výskytu. Najvhodnejším prispôbením je zmena letovej hladiny tak, aby sa lietadlá vyhýbali hladinám s vhodnými podmienkami pre vznik kondenzačných stôp, a to najmä vrchným častiam troposféry, ktorá je veľmi vlhká a studená.

Z technologického hľadiska je všeobecný trend zvyšovať účinnosť lietadlových motorov, čo má ale za následok častejší výskyt kondenzačných stôp kvôli väčšiemu množstvu vznikajúcej vodnej pary. Do budúcnosti sa plánuje vývoj motorov, ktoré ako pohonné médium budú využívať tekutý vodík. Pri jeho spaľovaní síce nedochádza k vypúšťaniu pevných častíc, ale enormne narastie produkcia vodnej pary, takže toto riešenie sa tiež nezdá byť vhodným, ak chceme eliminovať skleníkový efekt. Aby sme sa vyhli obmedzovaniu letových hladín, ktorých kapacita je už dnes často vyčerpaná, ideálnym riešením by bolo vývoj úplne nových typov motorov a palív. To je však technologicky

a ekonomicky veľmi náročné riešenie, preto to pre prepravcov a výrobcov nie je zaujímavé.

Zaujímavým riešením ako potlačiť tvorbu kondenzačných stôp bez výrazných zásahov do prevádzky či technológií leteckej dopravy je použitie externých zariadení. Dve z nich sú stručne opísané v poslednej kapitole.

Ďalší cieľ bolo nájsť medzery vo výskumoch, ktorých realizácia by mohla prispieť k hlbšiemu pochopeniu vzniku kondenzačných stôp a faktorov, ktoré tento proces ovplyvňujú. Nájdené medzery popisujú nasledujúce odstavce

V rámci merania počtu častíc v jednotke objemu cirru boli zatiaľ použité prístroje, ktoré nedosahujú potrebnú presnosť na to, aby sme mohli spoľahlivo pochopiť vznik a rast ľadových kryštálikov a identifikovať tak prirodzene vzniknutý cirrus a contrail-cirrus. Preto by bolo potrebné uskutočniť merania s modernejšími prístrojmi, ktoré eliminujú chyby a nepresnosti z predchádzajúcich meraní.

Ďalším prínosným výskumom k bližšiemu pochopeniu správania sa kondenzačných stôp by mohlo byť pozorovanie formovania častíc kondenzačnej stopy v ich ranej fáze vzniku, t.j. tesne za výfukom motora, kde hrá významnú úlohu turbulentné prúdenie. Bolo by totiž užitočné zistiť, aká časť ľadových kryštálikov „prežije“ turbulenciu od lietadlových častí a ako vplyvom turbulentných prúdov rastú a pohybujú sa. Toto meranie je však veľmi ťažko uskutočniteľné a otvára sa tak možnosť vyvinúť vhodnú a spoľahlivú metódu pre jeho realizáciu.

Najväčšou medzerou, ktorá bola zaznamenaná, sú chýbajúce výskumy jet-streamu a jeho vplyvu na vznik contrail cirrov. Tento fenomén je jedným z hlavných činiteľov zmien počasia, pohybu vzdušných mäs a vytvárania oblačnosti. Sprevádza ho najmä cirrovitá oblačnosť a pohyb vzdušných hmôt je azda najpodstatnejší faktor ovplyvňujúci tvar a životnosť kondenzačných stôp a z nich tvoriacich sa contrail cirrov. Napriek týmto predpokladom sa nepodarilo nájsť žiadny výskum, ktorý by sa týmto zaoberal. Preto bol jet-stream podrobnejšie rozobraný v kapitole o vetre a ponúka sa tak možnosť výskumu práve tohto fenoménu.

Použité zdroje

- [1] TRAVIS, D., A. CARLETON, and R. LAURITSEN, Regional Variations in U.S. Diurnal Temperature Range for the 11–14 September 2001 Aircraft Groundings: Evidence of Jet Contrail Influence on Climate. *Journal of Climate*, Vol. 17 [online], s. 1123–1134, DOI: 10.1175/1520-0442(2004)017<1123:RVIUDT>2.0.CO;2. 1.3.2004 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C1123%3ARVIUDT%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442(2004)017%3C1123%3ARVIUDT%3E2.0.CO%3B2)
- [2] PIELKE, Roger A., Atmosphere. *Britannica Academic* [online]. Encyclopædia Britannica. last modified on 2.12.2015 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: fond NTK
- [3] Atmosféra Zeme. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 16.11.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://sk.wikipedia.org/wiki/Atmosf%C3%A9ra_Zeme#Delenia
- [4] DVOŘÁK P., *Letecká Meteorologie: Učebnice meteorology pro piloty kvalifikace UL, GLD, PPL, CPL, ATPL a všechny ostatní, kteří potřebují odborné znalosti letecké meteorologie*. Cheb: Svět křídel, 2010. ISBN 978-80-86808-85-7.
- [5] ZELL, H., Earth's Atmospheric Layers. Earth. *NASA* [online]. last modified on 31.7.2015 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: http://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/atmosphere-layers2.html
- [6] JALOVIAŘOVA, A., Vrstvy atmosféry. Fyzika – Meteorológia. *weblahko.sk* [online]. [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://www.andreajaloviarova.wbl.sk/Fyzika---Meteorologia.html>
- [7] GRAHAM, S., Clouds & Radiation. *NASA Earth Observatory* [online]. last modified on 1.3.1999 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Clouds/>
- [8] Oblačnost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 6.12.2015 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Obla%C4%8Dnost>

- [9] MATEJOVIČ P., Priebežne aktualizovaná meteorologická a klimatologická terminológia. *nun.sk* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: http://www.nun.sk/terminologia_O.htm
- [10] Cumulus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 18.3.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Cumulus>
- [11] Mraky. Meteorologie. *holagarta.wz.cz* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.holagarta.wz.cz/metodika/mraky.html>
- [12] Formování oblačnosti – typy mraků. *Euromarina* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.euromarina.cz/pocasi/meteorologie/formovani-oblacnosti.htm>
- [13] Cumulonimbus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 30.7.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Cumulonimbus>
- [14] Nimbostratus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 10.5.2015 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Nimbostratus>
- [15] Altostratus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 19.10.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Altostratus>
- [16] Cirrostratus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 26.10.2015 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Cirrostratus>
- [17] Altocumulus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 21.4.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Altocumulus>
- [18] Weather associated with a depression. *fransweather* [online]. ©2007 Thomson Higher Education. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://sites.google.com/site/fransukweather/weather-associated-with-a-depression>

- [19] LYNCH, David K., K. SASSEN, David O' C STARR, G. STEPHENS. *Cirrus*. Oxford University Press [online]. Oxford University Press, Inc. ©2002. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=sk&lr=&id=58v1fg4xeo8C&oi=fnd&pg=PR13&dq=cirrus+lynch+david+sassen&ots=_OrNgL2sMF&sig=1LvTQgmgIFoEXdc72CEPsXhL6y0&redir_esc=y#v=onepage&q=cirrus%20lynch%20david%20sassen&f=false
- [20] LYNCH, David K., Subvisual Cirrus: What It Is and Where You Find It. *The Aerospace Corporation, November 1994, SPIE Vol. 1934* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a289329.pdf>
- [21] FLORES, J. MICHEL, D. BAUMGARDNER, G. KOK, G. RAGA and R. HERMANN. Tropical Subvisual Cirrus and Contrails at -85°C. January 2006 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/112323.pdf>
- [22] Lidar. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 26.11.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- [23] SASSEN, K., B. S. CHO. Subvisual-Thin Cirrus Lidar Dataset for Satellite Verification and Climatological Research. AMS 1992. *J. Appl. Meteor., Vol 31* [online]. s. 1275-1285, DOI: 10.1175/1520-0450(1992)031<1275:STCLDF>2.0.CO;2. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450\(1992\)031%3C1275%3ASTCLDF%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450(1992)031%3C1275%3ASTCLDF%3E2.0.CO%3B2)
- [24] HEYMSFIELD, A., Ice Particles Observed in a Cirriform Cloud at -83°C and Implications for Polar Stratospheric Clouds. AMS 1986. *Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 43* [online], s. 851-855, DOI: 10.1175/1520-0469(1986)043<0851:IPOIAC>2.0.CO;2. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469\(1986\)043%3C0851%3AIPAIAC%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(1986)043%3C0851%3AIPAIAC%3E2.0.CO%3B2)
- [25] KIDDER, Stanley Q., A measurement of the albedo of thick cirrus clouds at 3.9 μm. *Geophysical Research Letters, May 2012, Vol. 29, No. 10* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001GL014041/full>

- [26] DALEY, B., *Air Transport and the Environment*. [online]. Ashgate Publishing Limited. ISBN: 978-0-7546-9089-4 (e-book). [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=sk&lr=&id=W3d6BgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT13&dq=Air+Transport+and+the+Environment&ots=5zQQptAie_&sig=I_KHqaVm543gBCTJa2276T_NyFs&redir_esc=y#v=onepage&q=Air%20Transport%20and%20the%20Environment&f=false
- [27] CRUTZEN, Paul J., *A Pioneer on Atmospheric Chemistry and Climate Change in the Anthropocene* [online], © 2016 Springer. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=TJoFDAAAQBAJ&pg=PA22&lpg=PA22&dq=reduction+of+stratospheric+ozone+by+nitrogen+oxide+catalysts+from+supersonic+transport+exhaust&source=bl&ots=NkI7_pzc6d&sig=2emfb4A8erxdmEyps7kAGWQn70w&hl=sk&sa=X&ved=0ahUKEwiv9qKB75TQAhUJXBQKHZ8vA6QQ6AEILDAC#v=onepage&q=reduction%20of%20stratospheric%20ozone%20by%20nitrogen%20oxide%20catalysts%20from%20supersonic%20transport%20exhaust&f=false
- [28] IPCC, *Aviation and the Global Atmosphere: A Special Report of IPCC Working Groups I and II*. [online]. © 1999, Intergovernmental Panel on Climate Change. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/av-en.pdf>
- [29] SCHUMANN, U., On the effect of emissions from aircraft engines on the state of atmosphere. *Annales Geophysicae, Vol. 12, No. 5* [online]. s. 365-384. DOI: 10.1007/s00585-994-0365-0. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00585-994-0365-0>
- [30] BRASSEUR, G. P., R. A. COX, D. HAUGLUSTAINE, I. ISAKSEN, J. LELIEVELD, D. H. LISTER, R. SAUSEN, U. SCHUMANN, A. WAHNER and P. WIESEN, European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. *Atmospheric Environment, Vol. 32, No. 13* [online]. s. 2329-2418. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://elib.dlr.de/10047/1/at-env-2329-1998.pdf>
- [31] Indirect Impacts from Aviation: Nitrogen Oxides, Ozone and Methane. Aviation Information. *Stockholm Environment Institute* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.co2offsetresearch.org/aviation/IndirectEmissions.html>

- [32] UPHAM, P., J. MAUGHAN, D. RAPER and C. THOMAS, Towards Sustainable Aviation. *Earthscan Publication Ltd* [online], London: 2013. [cit. 2016-10-15]. Dostupné z: fond NTK
- [33] Facts & Figures. *atag.org* [online]. May 2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.atag.org/facts-and-figures.html>
- [34] OWEN, B., D. S. LEE and L. LIM, Flying into the Future: Aviation Emissions Scenarios to 2050. *Environmental Science and Technology*, Vol. 44., No. 7 [online], s. 2255–2260. 12.3.2010 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es902530z>
- [35] SCREEN, J. A. and MacKENZIE, A. R., Aircraft condensation trails and cirrus. *Weather*, May 2004, Vol. 59, No. 5 [online], s. 116–121 [cit. 2016.11.27]. DOI: 10.1256/wea.140.03. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1256/wea.140.03/abstract>
- [36] SETVÁK, M., Kondenzační stopy za letadly. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. last modified on 7.8.2009 [cit. 2016.11.27]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/aktualni-situace/aktualni-stav-pocasi/informace-a-zajimovosti/kondenzacni-stopy>
- [37] Contrails – Persistent. The Contrail Education Project. NASA [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://science-edu.larc.nasa.gov/contrail-edu/contrails-persistent.php>
- [38] Geoengineering the Scuppernong. Scuppernong Springs Nature Trail. *scuppernongspringsnaturetrail.com* [online]. 15.1..2013 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://scuppernongspringsnaturetrail.com/2013/11/15/geoengineering-the-scuppernong/>
- [39] Complications in the sky. Cirrocumulus clouds, Cirrus clouds, Contrails, Ice Crystals, Ice optics. *cloud-maven.com* [online]. 2.3.2011 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://cloud-maven.com/complications-in-the-sky/>
- [40] SMITH, R., “Rainbow”-contrail. *Atmospheric Phenomena* [online]. *WordPress.com*. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://atoptics.wordpress.com/tag/contrail-colours/>

- [41] Low pressures cause condensation to forming off the tips of spinning propellers. *imgur.com* [online]. 26.5.2014 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://imgur.com/gallery/1vLQ1vj>
- [42] LANDAU, L. D. and E.M. LIFSHITZ, Fluid Mechanics. Third revised English Edition. *Course of Theoretical Physics Volume 6* [online]. Institute of Physical Problems. USSR Academy of Sciences. Pergamon Press Ltd. ©1959. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <https://ia600306.us.archive.org/3/items/FluidMechanics/LandauLifshitz-FluidMechanics.pdf>
- [43] SASSEN, K., Aircraft-produced Ice Particles in a Highly Supercooled Altocumulus Cloud. AMS 1991. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol. 30* [online], s. 765–775, DOI: 10.1175/1520-0450(1991)030<0765:APIPIA>2.0.CO;2. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450\(1991\)030%3C0765%3AAPIPIA%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0450(1991)030%3C0765%3AAPIPIA%3E2.0.CO%3B2)
- [44] UDRIS, A., How Contrails Form. *boldmethod.com* [online]. 17.6.2014 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.boldmethod.com/learn-to-fly/weather/contrails/>
- [45] Braking the Sound Barrier. *IAMCHAITANYA* [online]. 31.1.2016. Dostupné z: <https://iamchaitanya.wordpress.com/2016/01/31/sound-barrier/>
- [46] KÄRCHER, B., B. MAYER, K. GIERENS, U. BURKHARDT, H. MANNSTEIN, and R. CHATTERJEE, Aerodynamic Contrails: Microphysics and Optical Properties. AMS 2009. *Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 66* [online], s. 227–243, DOI: 10.1175/2008JAS2768.1. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008JAS2768.1>
- [47] GIERENS, K., B. KÄRCHER, H. MANNSTEIN, and B. MAYER, Aerodynamic Contrails: Phenomenology and Flow Physics. AMS 2009. *Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 66* [online], s. 217–226, DOI: 10.1175/2008JAS2767.1. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2008JAS2767.1>
- [48] Fallstreak hole. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 10.11.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fallstreak_hole

- [49] DEVLIES, D., Distrail, Hole Punch Cloud and Fallstreak Over Belgium. *Earth science picture of the day* [online]. 15.11.2015 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://epod.usra.edu/blog/2015/11/distrail-hole-punch-cloud-and-fallstreak-over-belgium.html>
- [50] BARTON, D., Fallstreak Hole: Photographers capture rare cloud formation in Victoria's east. *abc.net.au* [online]. 3.11.2014 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.abc.net.au/news/2014-11-03/photographers-catch-rare-fallstreak-cloud-formations-in-victoria/5863482>
- [51] Basic Snowflake Forms. *SnowCrystals.com* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/pdf/183517main_snowcrystals.pdf
- [52] HEYMSFIELD, A., G. THOMPSON, H. MORRISON, A. BANSEMER, R. M. RASMUSSEN, P. MINNIS, Z. WANG, D. ZHANG, Formation and Spread of Aircraft-Induced Holes in Clouds. AAAS 2011. *Science, Vol. 333, No. 6038* [online], s. 77-81. DOI: 10.1126/science.1202851. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://science.sciencemag.org/content/333/6038/77>
- [53] Aircraft cause precipitation, hole-punch clouds. *National center for atmospheric research/university corporation for atmospheric research* [online]. 14.6.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://www.eurekalert.org/pub_releases/2010-06/ncfa-acp061410.php
- [54] BLÁHA, R., Česká republika – klima. *slideplayer.cz* [online]. Gymnázium, Obchodní akademie a Jazyková škola s právem státní jazykové zkoušky Hodonín. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2784020/>
- [55] SEKAL O., Škola pilotů: Základy meteorologie. *Czech Airlines Virtual* [online]. 1.11.2014. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiRyfWx6N_PAhUBIBQKHVswCX8QFggrMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.csavirtual.cz%2Fcs%2Fmedia%2Fdownload%2Fcategory%2F5-tutorialy%3Fdownload%3D114%253A%2Fzklady-leteck-meteorologie&usg=AFQjCNFhIOIRQC7ewxSryPCvkNvbY5JPBw&sig2=E7eXX0QbDP669lw3klwHgg

- [56] JENSEN, E. J., A. S. ACKERMAN, D. E. STEVENS, O. B. TOON, and P. MINNIS, Spreading and growth of contrails in a sheared environment, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, No. D24 [online], s. 31557–31567, DOI:10.1029/98JD02594. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/98JD02594/pdf>
- [57] Georg Hadley. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 25.7.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/George_Hadley
- [58] Atmospheric circulation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 21.10.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_circulation
- [59] KUSHNIR, Y., General Circulation and Climate Zones. The Climate System. *Columbia.edu* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: http://eesc.columbia.edu/courses/eesc/climate/lectures/gen_circ/index.html
- [60] General Circulation of the Atmosphere. *Climate Education for K-12* [online]. 1.8.2013 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: http://climate.ncsu.edu/edu/k12/.atmosphere_circulation
- [61] William Ferrel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 9.9.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/William_Ferrel
- [62] The Jet Stream. National Weather Service. *National Oceanic and Atmospheric Administration* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.srh.noaa.gov/jetstream/global/jet.html>
- [63] Jet Streams. *Climate Education for K-12* [online]. 9.8.2013 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://climate.ncsu.edu/edu/k12/.JetStreams>
- [64] Rossby wave. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 11.10.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Rosby_wave

- [65] LEE, D. S., P. E. CLARE, J. Haywood, B. Kärcher, R. W. Lunn, I. Pilling, A. Slingo and J.R. Tilston. Identifying the uncertainties in radiative forcing of climate from aviation contrails and aviation-induced cirrus. *DERA* [online]. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/ozone-uv/Contrail_Uncertainties.pdf
- [66] YU, F., Richard P. TURCO. Contrail formation and impacts on aerosol properties in aircraft plumes: Effects of fuel sulfur content. *Geophysical Research Letters*, February 1998, Vol. 25, No. 3 [online]. s. 313-316. [cit. 2016.11.27]. Dostupné z: <http://www.albany.edu/~yfq/papers/YuTurcoContrail97GL03695.pdf>
- [67] KULMALA, M., P. E. WAGNER. Nucleation and Atmospheric Aerosols 1996. *Elsevier Science Limited* [online], ©1996. Redwood Books. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=sk&lr=&id=NtoEz62LIAQC&oi=fnd&pg=PA296&dq=schumann+particle+formation+in+jet+aircraft&ots=dhzUnBvAbH&sig=-MkAPMpqLf1Ezg8df85zJUNsJIs&redir_esc=y#v=onepage&q=schumann%20particle%20formation%20in%20jet%20aircraft&f=false
- [68] Procedures and Airport Operations: Wake Turbulence. Learn to fly. *learntoflyblog.com* [online]. 15.8.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://learntoflyblog.com/2016/08/15/procedures-and-airport-operations-wake-turbulence/>
- [69] MINNIS, P., Contrails. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences: Second Edition* [online]. ©2015 Elsevier Ltd. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=8lpzAwAAQBAJ&pg=RA1-PA123&lpg=RA1-PA123&dq=wind+shear+contrails&source=bl&ots=ZFQOaelIZI&sig=C5F0MUuMOj7Ez3N4c_s1uIDREnE&hl=sk&sa=X&ved=0ahUKEwjEsdbx8OHPAhVCJ5oKHbiRD6YQ6AEILDAC#v=onepage&q=wind%20shear%20contrails&f=false
- [70] DUDA, D. and P. MINNIS, Basic Diagnosis and Prediction of Persistent Contrail Occurrence Using High-Resolution Numerical Weather Analyses/Forecasts and Logistic Regression. Part I: Effects of Random Error. AMS 2009. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 48 [online], s. 1780–1789, DOI: 10.1175/2009JAMC2056.1. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009JAMC2056.1>

- [71] DUDA, D. and P. MINNIS, Basic Diagnosis and Prediction of Persistent Contrail Occurrence Using High-Resolution Numerical Weather Analyses/Forecasts and Logistic Regression. Part II: Evaluation of Sample Models. AMS 2009. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 48 [online], s. 1790–1802, DOI: 10.1175/2009JAMC2057.1. [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/2009JAMC2057.1>
- [72] HOSPODKA J., *Kondenzační stopy*. Praha, 2016. Habilitační přednáška. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní. ISBN 978-80-01-05965
- [73] HEYMSFIELD, A. J., On measurements of small ice particles in clouds. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34 [online], DOI:10.1029/2007GL030951. 11.12.2007 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL030951/full>
- [74] Lockheed U-2. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida): Wikipedia Foundation, 11.12.2006, last modified on 27.11.2016 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lockheed_U-2
- [75] STUBER, N. and P. FOSTER, The Impact of diurnal variations of air traffic on contrail radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 7 [online]. s. 3153-3162. 2007 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.atmos-chem-phys.net/7/3153/2007/acp-7-3153-2007.pdf>
- [76] STORDAL, F., G. MYHRE, E. J. G. STORDAL, W. B. ROSSOW, D. S. LEE, D. W. ARLANDER and T. SVENDBY, Is there a trend in cirrus cloud cover due to aircraft traffic?. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 5 [online]. s. 2155-2162. 2005 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.atmos-chem-phys.net/5/2155/2005/acp-5-2155-2005.pdf>
- [77] WILLIAMS, V., R. B. NOLAND, R. TOUMI, Air Transport Cruise Altitude Restrictions to Minimize Contrail Formation. *Climate Policy*, Vol. 3, No. 3 [online]. 15.6.2003 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: http://www.ltrc.lsu.edu/TRB_82/TRB2003-000376.pdf
- [78] FICHTER, C., S. MARQUART, R. SAUSEN and D. S. LEE, The impact of cruise altitude on contrails and related radiative forcing. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 14, No. 4 [online], s. 563-572. August 2005 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://elib.dlr.de/19556/1/mz.pdf>

- [79] STRÖM, L. and K. GIERENS, First simulations of cryoplane contrails. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. D18 [online], DOI: 10.1029/2001JD000838. 19.9.2002 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2001JD000838/pdf>
- [80] GIERENS, K., Are fuel additives a viable contrail mitigation option?. *Atmospheric Environment*, Vol. 41, No. 21 [online]. s. 4548-4552. July 2007 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://elib.dlr.de/48447/1/sdarticle.pdf>
- [81] LEWELLEN, D. C., S. LEWELLEN, The effects of Aircraft Wake Dynamics on Contrail Development. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 58 [online], s. 390–406, DOI: 10.1175/1520-0469(2001)058<0390:TEOAWD>2.0.CO;2. 15.2.2001 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469\(2001\)058%3C0390%3ATEOAWD%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(2001)058%3C0390%3ATEOAWD%3E2.0.CO%3B2)
- [82] NOPPEL, F. G., R. SINGH and M. D. TAYLOR, *Method and apparatus for suppressing aeroengine contrails*. US Patent 8,402,736. 2013-03-26. Dostupné z: <http://www.google.ch/patents/US8402736>
- [83] TAYLOR, M., F. NOPPEL and R. SINGH, *Gas turbine engine*. US Patent App.11/797,442. 2008-03-27. Dostupné z: <https://www.google.ch/patents/US20080072577>
- [84] More power / Fewer emissions. Premiere of Boeing 747-8 Intercontinental. *Lufthansa Group* [online]. last modified on 13.2.2011 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: http://wayback.archive.org/web/20121230173833/http://konzern.lufthansa.com/en/t_hemen/boeing-747-8-roll-out.html

Zoznam obrázkov

Obrázok 1.1: Vrstvy atmosféry delené podľa zmeny teploty s výškou

Obrázok 1.2: Vertikálne delenie oblačnosti

Obrázok 1.3: Cumulus

Obrázok 1.4: Cumulonimbus

Obrázok 1.5: Nimbostratus

Obrázok 1.6: Stratus

Obrázok 1.7: Altostratus

Obrázok 1.8: Cirrostratus

Obrázok 1.9: Stratocumulus

Obrázok 1.10: Altocumulus

Obrázok 1.11: Cirrocumulus

Obrázok 1.12: Cirrus

Obrázok 1.13: Vznik cirru

Obrázok 3.1: Krátkodobá kondenzačná stopa

Obrázok 3.2: Dlhodobé kondenzačné stopy

Obrázok 3.3: Contrail cirrus

Obrázok 3.4: Aerodynamické kondenzačné stopy

Obrázok 3.5: Prandtl-Glauertova kondenzácia

Obrázok 3.6: Distrails a ich vývin

Obrázok 4.1: Prúdenie vzduchu v tlakovej níži a tlakovej výši

Obrázok 4.2: Priečny rez globálnych jet-streamov a poludníkových pohybov vzduchových hmôt

Obrázok 4.3: Globálne jet-streamy na severnej pologuli

Obrázok 4.4: Rossbyho vlny na severnej pologuli

Obrázok 5.1: Turbulentné prúdenie za lietadlom

Obrázok 5.2: Schematický priečný rez vývinu kondenzačnej stopy pri prítomnosti horizontálneho prúdenia bez strihu vetra a so strihom vetra

Obrázok 5.3: Priečný rez kondenzačnej stopy a jej rozširovanie

Obrázok 5.4: Grafické znázornenie Schmidt-Applemanovej teórie

Obrázok 5.5: Schmidt-Applemanovo kritérium pre motory s rôznou účinnosťou spaľovania

Obrázok 5.6: Schematické znázornenie vzniku prerušovanej kondenzačnej stopy

Obrázok 6.1: Lockheed U-2 so spätným zrkadlom zistenie vzniku kondenzačnej stopy za lietadlom

Obrázok 6.2: Štruktúra prvkov a vzťahov, ktoré sa podieľajú na formovaní kondenzačných stôp a zmene radiačného pôsobenia

Obrázok 6.3: Priemerná ročná zmena pokrytia kondenzačnými stopami pri posune letových hladín

Obrázok 6.4: Zmena v pokrytí kondenzačnými stopami pri posune letových hladín o 6 000 ft nadol v januári a v júli

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Stupne oblačnosti