



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

VLIV METEOROLOGICKÝCH PODMÍNEK NA VZLET A PŘISTÁNÍ MOTOROVÝCH LETOUNŮ

THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS ON TAKE OFF AND LANDING POWERED
AIRCRAFT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZDENĚK KOUPÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. KAREL KRŠKA, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Zdeněk Koupý

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Profesionální pilot (3708R030)**

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

Vliv meteorologických podmínek na vzlet a přistání motorových letounů

v anglickém jazyce:

The influence of meteorological conditions on take-off and landing powered aircraft

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Příznivé a nepříznivé povětrnostní podmínky pro vzlet a přistání motorových letounů různé hmotnostní kategorie: teplota, tlak a hustota vzduchu, vítr, dohlednost, oblačnost a bouřky. Vliv meteorologických podmínek na stav dráhy. Související úkoly řízení letového provozu.

Cíle bakalářské práce:

Na základě české a zahraniční literatury přehledně pojednejte o všech meteorologických prvcích, jevech a oblačnosti, které mají vliv na jednotlivé fáze vzletu a přistání letadel. Soustřeďte se na účinky teploty a hustoty vzduchu (mj. vztažná teplota letišť ve světě) a charakteristik větru (boční vítr, turbulence, střih větru, propad vzduchu aj).

Seznam odborné literatury:

- Baranov, A. M. - Solonin, S. V.: Aviacionnaja meteorologija. Leningrad 1975.
Daněk, V.: Mechanika letu I. Letové výkony. Brno 2009.
Dvořák, P.: Letecká meteorologie. 2. vyd. Cheb 2010.
Kráčmar, J. - Krška, K. - Sobota, J. - Svatoš, V.: Meteorologie (050 00). Brno 2006.
Nedelka, M.: Prehľad leteckej meteorológie. Bratislava 1984.
OAA. Joint Aviation Authorithes Airlaine Transport Pilot's Licence 050 Meteorology.
Frankfurt 2001.
Příslušné letecké předpisy.

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Karel Krška, CSc.

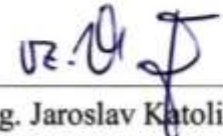
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 25.11.2014





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



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

V této bakalářské práci se pojednává o vlivu různých meteorologických podmínek a jevů na výkony letounů během fáze vzletu a přistání, respektive výkony jejich leteckých pohonných jednotek. V práci jsem se zaměřil na vliv meteorologických prvků (nikoliv jevů) jakožto fyzikálních charakteristik atmosféry včetně větru. Cílem bakalářské práce bylo vytvořit přehledný souhrn meteorologických prvků ovlivňujících výkony letounů během těchto kritických fází letu, a to včetně jejich rozboru, vysvětlení a s tím souvisejících doporučení. Rozbor některých meteorologických prvků obsahuje i data z konkrétních světových letišť.

ABSTRACT

This thesis deals with influence of various meteorological conditions and impact phenomena on aircraft performance during take-off and landing, it means with performance of their air power units. I focused on influence of meteorological elements (not phenomena) like physical characteristics of the atmosphere including wind. The target of this thesis was to create a clear set of meteorological elements which affect the aircraft performance during these critical phases of flight including their analysis, explanation and related recommendations. Analysis of some meteorological elements also contains figures from particular world's airports.

KLÍČOVÁ SLOVA:

meteorologické prvky, vzlet, přistání, pohonné jednotky, výkon leteckých motorů, světová letiště

KEYWORDS:

meteorological elements, take-off, landing, power units, performance of aircraft engines, world's airports

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborných textů a literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 17. 5. 2015

.....
Zdeněk Koupý

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUPÝ, Z. *Vliv meteorologických podmínek na vzlet a přistání motorových letounů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 48 s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Karel Krška, CSc.

PODĚKOVÁNÍ

Chci poděkovat těm, kteří mi pomáhali při tvorbě této bakalářské práce, hlavně vedoucímu své bakalářské práce panu RNDr. Karlu Krškovi, CSc., za jeho mimořádně lidský přístup, vstřícnost, odborné vedení i volný čas, který převyšoval rámec jeho profesních povinností.

Děkuji i členům své rodiny, kteří mi byli oporou, poskytovali zázemí a pochopení.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	VZLET A PŘISTÁNÍ	10
2.1	Fáze vzletu	10
2.1.1	Pozemní část vzletu – rozjezd	11
2.2	Přistání	13
2.3	Mezinárodní standardní atmosféra ICAO.....	14
3	METEOROLOGICKÉ PRVKY OVLIVŇUJÍCÍ VZLET A PŘISTÁNÍ.....	18
3.1	Hustota vzduchu	18
3.2	Teplota vzduchu.....	19
3.3	Vlhkost vzduchu	23
3.4	Tlak vzduchu	23
3.4.1	Souvislost mezi tlakem a hustotou vzduchu.....	26
3.5	Vítr.....	26
3.5.1	Střih větru	29
3.5.2	Propad vzduchu – down burst	32
4	VLIV STAVU A POVRCHU DRÁHY	35
5	ZÁVĚR	41

1 ÚVOD

Za posledních sto let prošlo letectví výjimečně strmým vývojem a zaslouženě dnes patří k nejúžasnějším a nejpozoruhodnějším oblastem lidské činnosti. Vždyť od prvních úspěšných pokusů s letadlem těžším než vzduch uskutečněnými bratry Wrightovými začátkem 20. století doznalo letectví, i díky oběma světovým válkám, nevšedního rozmachu a nevídaného boomu, který si zaslouží obdiv.

Letectví zahrnuje komplexní soubor oborů od předmětů ryze technických, jako je konstrukce letadel, systémů či elektroinstalací a leteckých pohonných jednotek, přes oblast legislativy a předpisů, až po problematiku řešící lidskou výkonnost a omezení. V neposlední řadě musí být pilot velmi dobře seznámen také s problematikou meteorologie a meteorologických jevů, se kterými se setkává při vykonávání profese letce dnes a denně. Technologie v letectví dnes užívané, jej činí nejbezpečnějším druhem dopravy vůbec a čím dál méně závislým na rozmarech počasí a na meteorologických podmínkách. Přesto však stále platí, že příroda má nad člověkem převahu a dokáže let nepříjemně zkomplikovat.

Tato bakalářská práce se zabývá právě problematikou vlivu meteorologických podmínek na nejobtížnější a nejrizikovější fáze letu, a to na vzlet a přistání motorových letadel.

Na doporučení vedoucího bakalářské práce jsem podmínky pro vzlet a přistání motorových letounů omezil na meteorologické prvky, tedy na fyzikální charakteristiky atmosféry, a nepřihlédl jsem k dohlednosti, oblačnosti a bouřkám. Naopak jsem věnoval pozornost stavu dráhy na letový provoz.

2 VZLET A PŘISTÁNÍ

Vzletem lze nazvat zrychlený pohyb letounu, při němž je letoun urychlován z nulové rychlosti na RWY až po bezpečnou rychlost vzletu v určité smluvní výšce. Ta je dána příslušnými předpisy. Říkáme jí výška překážky a značí se h_p . Pro letouny výkonnostní třídy B je výška $h_p = 50$ ft AAL. Pro výkonnostní třídu A je výška $h_p = 35$ ft AAL. Délkou vzletu nazýváme trajektorii letounu promítnutou do horizontální roviny, na které letoun dosáhne předepsané výšky a rychlosti. Vzlet můžeme rozdělit na dvě části – pozemní a vzdušnou.

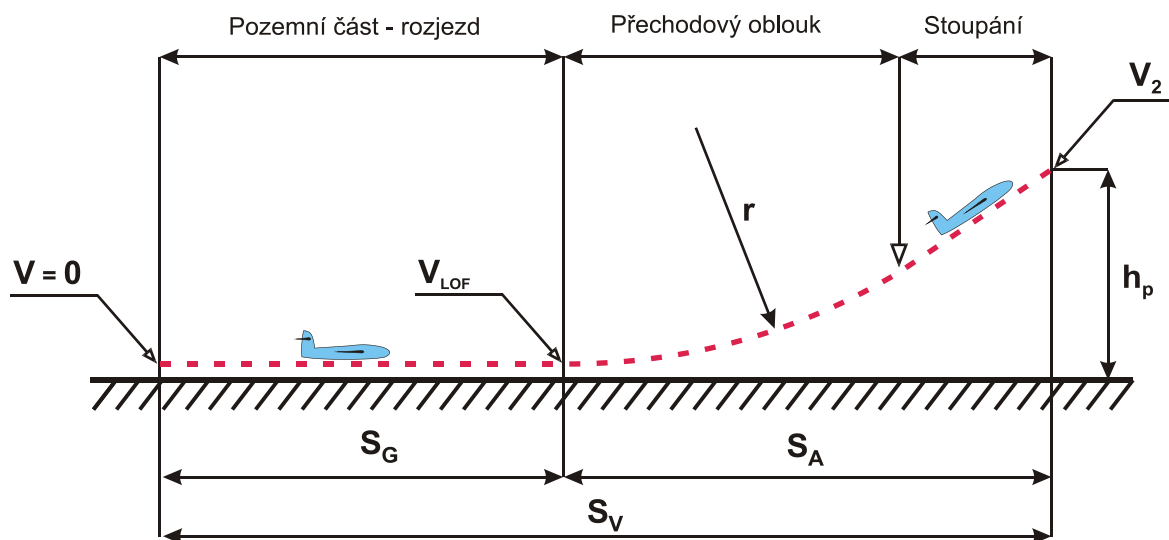
Za letouny výkonnostní třídy B můžeme označit všechny letouny s vrtulovým pohonem, které mají jeden nebo více pístových nebo turbovrtulových pohonných jednotek. MTOM je větší nebo rovna 5700 kg, počet míst pro cestující je menší nebo roven devíti. Zvláštní skupinu tvoří ve výkonnostní kategorii B letouny typu Commuter. Jedná se o letouny se dvěma turbovrtulovými motory. MTOM je zvýšena až do 19000 liber, tedy 8616 kg, včetně. Počet míst pro cestující je zvýšen na devatenáct, včetně.

Letouny výkonnostní třídy A jsou všechny letouny opatřené proudovými motory s libovolnou MTOM. Dále sem patří všechny dvou a více motorové letouny s turbovrtulovými pohonnými jednotkami a MTOM větší než 5700 kg nebo počtem míst pro cestující větší než devět.

2.1 Fáze vzletu

Vzlet lze rozdělit na fázi pozemní a vzdušnou. Pozemní část se odehrává na RWY, během vzdušné části letoun stoupá po přechodovém oblouku až do výšky h_p . Jednotlivé fáze vzletu jsou znázorněny na obr. 1. V_{LOF} (Lift off) je skutečná rychlost odpoutání v hodnotách CAS. CAS je IAS opravená o polohovou chybu. IAS je přístrojová rychlost opravená o přístrojovou chybu. EAS je CAS opravená o vliv stlačitelnosti. TAS je EAS opravená o vliv výšky – hustoty vzduchu. U hladiny moře se EAS rovná TAS, s rostoucí výškou je TAS vyšší, roste TAS, klesá hustota vzduchu.

V_2 je bezpečná rychlost vzletu. Musí být dosažena nejpozději ve výšce h_p .



Obr. 1 Fáze vzletu

2.1.1 Pozemní část vzletu – rozjezd

Rozjezd (S_G) je charakterizován zrychleným pohybem letounu z nulové rychlosti na RWY až do rychlosti odpoutání – V_{LOF} . Během této části vzletu na letoun působí tah vyvíjený pohonnou jednotkou nebo jednotkami. Proti němu působí aerodynamický odpor D zrychlujícího letounu v zemské atmosféře, dále pak vztlak vznikající na nosných plochách letadla s jeho zvyšující se rychlostí, a proti němu působí tíhová síla, která je dána hmotností startujícího letounu. Protože se letoun pohybuje po povrchu RWY, působí na kola podvozku ještě normálová síla N ve směru proti tíhové síle G jako reakce od podložky. S narůstající rychlostí letounu však roste i vztlak na křídlech (L), tedy síla, která působí v opačném směru než tíhová síla $G = mg$. Vztlak snižuje výslednou sílu, kterou kola podvozku letounu působí na podložku. Normálová síla je proto dána vztahem $N = G - L$. V okamžiku odpoutání se vztlak vyrovnal tíhové síle a normálová síla se tedy rovná nule.

Proti směru zrychlení společně s aerodynamickým odporem působí ještě třecí síla T , která je dána vztahem $T = f N$, kde f je koeficient smykového tření. Ten je dán povrchem RWY, znečištěním RWY, velikostí stykové plochy pneumatik podvozku s dráhou (podhuštěné pneumatiky mají větší stykovou plochu s dráhou, tudíž vyšší koeficient smykového tření a ve výsledku vyšší odpor letounu při rozjezdu), a další faktory.

Celkový odpor letounu proti tahu motorů během pozemní fáze vzletu je tedy dán vztahem $D_R = D + (G - L)f$. Rozdíl tahu motorů a celkového odporu letounu se během rozjezdu mění, nicméně pořád převládá velikost tahové síly od pohonných jednotek, a tím je letounu udělováno proměnlivé zrychlení a .

Při předletové přípravě musí pilot stanovit, jaké budou charakteristické rychlosti, aby vzlet proběhl bezpečně. Krom vzletové hmotnosti a konfigurace každá rychlost závisí na některých níže uvedených vnějších podmínkách. Jsou to aktuální tlak a teplotu vzduchu, síla a směr větru, vzletová hmotnost, deklarovaná délka konkrétní RWY letiště, atd. Mezi charakteristické rychlosti při vzletu patří:

- V_{S1} - pádová rychlost letounu ve vzletové konfiguraci
 - V_{MCG} - minimální rychlost řiditelnosti na zemi
 - V_1 – rychlost rozhodnutí
 - V_R - rychlost, při níž je již dostatečně účinné výškové kormidlo – rychlost rotace
 - V_{MU} - nejmenší možná rychlost odpoutání letounu od RWY
 - V_{LOF} – skutečná rychlost odpoutání letounu
 - V_{MCA} - minimální rychlost řiditelnosti
 - V_2 - bezpečná rychlosti vzletu
-
- V_{S1} je pádová rychlost letounu ve vzletové konfiguraci.
 - V_{MCG} je minimální rychlost, při které je možno po vysazení kritické pohonné jednotky ovládat letoun a držet jeho směr pouze výchylkami aerodynamických orgánů řízení. Kritickou pohonnou jednotkou se stane motor, jehož případné vysazení způsobí, že druhý, pracující motor, udá letounu větší zatáčivý moment. Kritická pohonná jednotka se stanovuje pouze u vícemotorových vrtulových letounů.
 - V_1 je rychlost, při které se posádka rozhoduje, zda bude pokračovat ve vzletu nebo vzlet přerušit. Nad tuto limitní rychlost již letoun nedokáže bezpečně na dráze za aktuálních podmínek zastavit. Rychlost V_1 se tedy mění při každém vzletu podle vzletové hmotnosti, meteorologických podmínek a podle ASDA konkrétní RWY. Je zde však uvažována i reakční doba pilota, která bere v úvahu dobu rozhodovacího procesu člověka při vzniku potíží právě v rychlosti V_1 . Tato doba je 2 s. V_1 se stanovuje před každým vzletem.
 - V_R je rychlost, při níž je již dostatečně účinné výškové kormidlo. Jeho vychýlením pilot způsobí klopivý moment na ocas a zvedne předové kolo pro odpoutání letounu. V_R se počítá před každým vzletem.
 - V_{MU} je nejmenší možná rychlost odpoutání letadla od RWY. Skutečná rychlost odpoutání se značí V_{LOF} a musí být samozřejmě vyšší než V_{MU} .

- V_2 je bezpečná rychlost vzletu, které musí být dosaženo nejpozději ve výšce překážky h_p a která musí být o určitou zásobu rychlosti vyšší než rychlosti V_{S1} a V_{MCA} . Toto zvýšení rychlosti závisí na druhu a počtu motorů a musí platit následující poměr:

$$V_{MCA} \leq 1,2 V_{S1}$$

kde V_{MCA} ... minimální rychlost řiditelnosti

V_{S1} ... pádová rychlost letounu ve vzletové konfiguraci

- V_{MCA} minimální rychlost, při níž je pilot ještě schopen pomocí orgánů řízení eliminovat zatačivé, klonivé a klopivé momenty při vysazení kritické pohonné jednotky za letu u vícemotorových letadel, při vzletové konfiguraci se zasunutým podvozkem a s maximálním tahem zbývajících pohonných jednotek. Přitom nesmí síly na řídicích prvcích přesáhnout 150 liber a příčný náklon překročit 5° . Toho musí být letoun schopen za nejnepríznivějších podmínek pro vzlet a při všech možných vzletových hmotnostech.

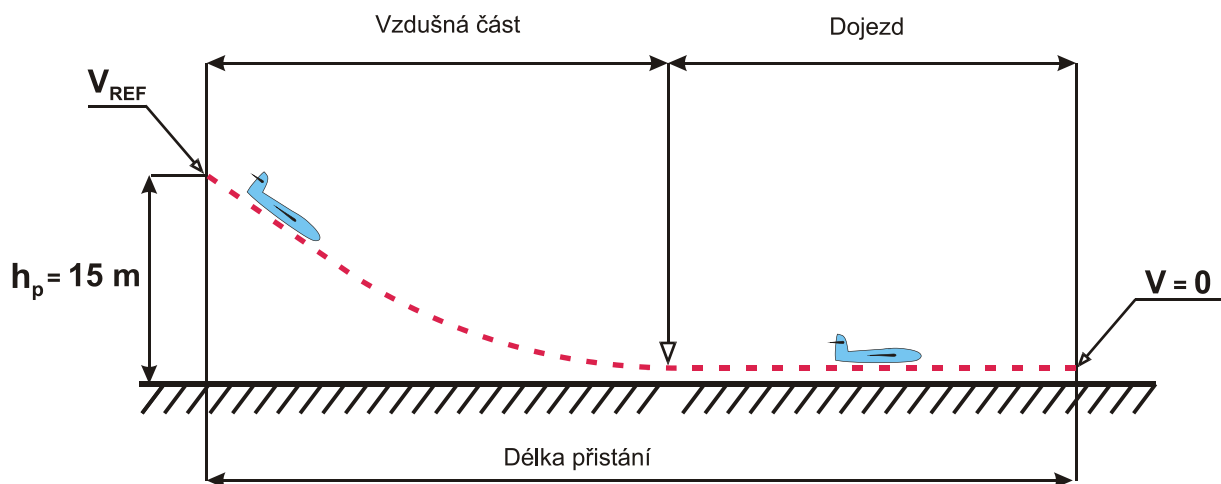
Vzdušná část vzletu (S_A) počíná odpoutáním letounu od RWY při rychlosti V_{LOF} a končí dosažením výšky překážky h_p .

Vzdušná část vzletu se skládá z přechodového oblouku a stoupání.

2.2 Přistání

Přistávací manévr je tvořen dvěma částmi - vzdušnou a pozemní. Přistání začíná v určité smluvně domluvené výšce nad prahem dráhy – většinou v 15 m (50 ft). V tomto okamžiku má letoun tzv. referenční rychlost, která je rovna 1,3 násobku pádové rychlosti letounu v přistávací konfiguraci – V_{S0} . Během vzdušné části se letoun postupně vyrovnává vodorovně s RWY a snižuje svoji rychlost – tzv. přechodový oblouk. K dotyku s RWY dochází kvůli bezpečnosti v rychlosti o 10 - 15% vyšší, než je pádová rychlost v přistávací konfiguraci. Po dosednutí začíná pozemní část přistání, tzv. dojezd. Během dojezdu letoun brzdí a snižuje svoji rychlost až na $V = 0$. Během brzdění je třeba brát v úvahu rychlost V_{MBE} – maximum brake energy speed. To je maximální rychlost, od které jsou brzdy letounu konstrukčně schopny pohltit jeho kinetickou energii po dosednutí do rychlosti $V = 0$. Délka přistání je pak trajektorie letounu z 50 ft do zastavení letounu promítnutá do horizontální roviny.

Přistání rozkreslené do jeho jednotlivých fází je znázorněno na obr. 2.



Obr. 2 Fáze přistání

2.3 Mezinárodní standardní atmosféra ICAO

Na délku vzletu a přistání má vliv několik proměnných veličin. Aby se výkony jednotlivých leteckých pohonných jednotek mohly srovnávat, vznikl model tzv. Mezinárodní standardní atmosféry ICAO (MSA), anglicky ISA – International Standard Atmosphere. Model popisuje charakteristické chování proměnných veličin a to teploty, tlaku a hustoty vzduchu s měnící se nadmořskou výškou. Na hladině moře je model MSA definován následujícími hodnotami:

- teplota vzduchu 15 °C
- tlak vzduchu 1013,25 hPa
- hustota vzduchu 1,225 kg/m³

Teplota vzduchu v troposféře podle MSA klesá o 0,65 °C na 100 m výšky až do výšky 11 000 metrů, v níž je teplota -56,5 °C a tlak vzduchu 226,156 kg/m³.

Mezi 11 a 20 km se teplota vzduchu nemění, od 20 km do 32 km teplota roste o 0,1 °C na 100 m výšky. Vyšší výšky civilní letectví prakticky nezajímají. MSA je homogenní masa ideálního plynu. Platí zde stavová rovnice pro plyn:

$$p V = n R T$$

kde p ... tlak plynu (hPa)

V ... objem plynu

n ... látkové množství

R ... molární plynová konstanta 8,314 4621(75) J·K⁻¹·mol⁻¹

T ... termodynamická teplota

Pro výpočet aktuálních hodnot teploty, tlaku a hustoty vzduchu ve zvolené výšce nad mořem můžeme do 11 km použít následující vzorce:

Teplota vzduchu: $t = 15 - 0,0065 H$

Tlak vzduchu: $p = 1013,25 \left(1 - \frac{H}{44308}\right)^{5,2553}$

Hustota vzduchu: $\rho = 1,225 \left(1 - \frac{H}{44308}\right)^{4,2553}$

kde H ... nadmořská výška (m)

Tabulka 1 znázorňuje hodnoty teploty, hustoty a tlaku vzduchu v závislosti na výšce nad střední hladinou moře (AMSL).

Je tedy zřejmé, že s měnícími se podmínkami v reálné atmosféře se mění hodnoty těchto veličin, a tím i výkony motorů, a délka vzletu a přistání.

Faktory mající vliv na délku vzletu a přistání jsou:

- hustota vzduchu
- vítr
- stav povrchu RWY
- hmotnost letounu při startu
- sklon RWY
- poloha vztlakových klapek
- znečištění povrchu letounu (zhoršuje aerodynamické vlastnosti a zvětšuje odpor letounu)

Podrobněji se budeme zabývat především vlivem hustoty vzduchu a větru na vzlet a přistání.

Informace o aktuálních podmínkách na letišti při vzletu nebo přistání mohou piloti získat z pravidelné letecké meteorologické zprávy METAR. Ta se vydává každých 30 minut na velkých mezinárodních letištích nebo každých 60 minut na méně rušných letištích. Může k ní být připojena přistávací předpověď typu TREND na 2 hodiny dopředu od vydání zprávy METAR.

Ze zprávy posádka dokáže zjistit, jak se aktuální atmosféra liší od MSA. Aktuální hodnoty zaneše do nomogramů určujících délku rozjezdu, vzletu, aktuální MTOM atd. Podobná situace nastává při přistávání a výpočtech všech potřebných délek a výkonů při konečné fázi letu.

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti vzduchu v závislosti na výšce AMSL

Tlak hPa	Letová hladina	Teplota °C	Hustota vzduchu kg/m ³	Výška ft
1013		15	1,225	MSL
1000		14,3	1,212	364
950		11,5	1,683	1773
900		8,6	1,113	3243
850		5,5	1,063	4781
800		2,3	1,012	6394
750		-1,0	0,960	8091
700		-4,6	0,908	9882
650		-8,3	0,855	11780
600	FL140	-12,3	0,802	13801
550		-16,6	0,747	15962
500	FL185	-21,2	0,692	18289
450		-26,2	0,635	20812
400	FL235	-31,7	0,577	23574
350		-37,7	0,518	26631
300	FL300	-44,5	0,457	30065
250	FL340	-52,3	0,395	33999
200	FL385	-56,5	0,322	38662
150	FL445	-56,5	0,241	44647
100		-56,5	0,161	53083

S modelem MSA souvisejí dva významné výškové pojmy. Tlaková a hustotní výška.

- Tlaková výška – Preassure altitude

Výška nad střední hladinou moře opravená o nestandardní tlak. Málokdy je atmosféra na letišti vzletu nebo přistání shodná s modelem MSA. Oprava je nutná vzhledem k tomu, že v reálné atmosféře se tlak vzduchu na letišti mění v závislosti na druzích, polohách a hodnotách tlakových útvarů a při přechodech atmosférických front. Proto je tato výška dle MSA opravena

o odchylku tlaku. Je-li na letišti tlak vzduchu nižší než udává MSA, bude i tlaková výška letiště nižší a naopak.

- Hustotní výška – Density altitude

Jedná se o tlakovou výšku opravenou o nestandardní teplotu vzduchu. Pokud je na letišti naměřená určitá tlaková výška, a přitom teplota vzduchu neodpovídá teplotě podle modelu MSA, neodpovídá ani hustota vzduchu na letišti hustotě vzduchu podle MSA. Je-li tedy vyšší teplota vzduchu, hustota je nižší než podle modelu a hustotní výška je tím vyšší.

Hustotní výška má zásadní a hlavní vliv na výkony letadel při vzletu a přistání. Této výšce v MSA odpovídají jak aerodynamické výkony profilu nosných ploch, tak i výkony pohonných jednotek. Letoun se pohybuje ve vzduchu o určité hustotě, která udává jeho výkony (je ovlivněna aktuálním tlakem vzduchu a teplotou). Tato hustota odpovídá určité výšce v MSA, a to je výše popsána hustotní výška. Tlaková výška tedy poroste se snižujícím se tlakem vzduchu a se zvyšující se teplotou. Nejnižší výkony mají proto letadla při vzletech a přistáních z vysoko položených horských letišť za vysoké teploty vzduchu. Pokud pilot pomocí grafů v letové příručce zjistí, že vzlet za těchto podmínek není možný, ať již kvůli TORA nebo TODA nebo že by nesplnil požadavky na gradienty stoupání po vzletu, nesmí se pokusit o vzlet. Situaci může vyřešit například snížením TOM letounu nebo pilot počká na nižší teplotu okolního vzduchu. I proto se hodně letů obchodní letecké přepravy uskutečňuje v noci nebo časně z rána za nižších teplot.

Tlakovou i hustotní výšku můžeme určit například pomocí letového počítadla FLIGHT COMPUTER.

Nezapomeňme však, že při vzletu a přistání používá pilot stále stejné indikované rychlosti letu, i když provádí vzlet nebo přistání z letišť v různé nadmořské výšce a s odlišnou venkovní teplotou. Tlakem a teplotou v určité nadmořské výšce jsou ovlivněny rychlosti TAS a GS.

3 METEOROLOGICKÉ PRVKY OVLIVŇUJÍCÍ VZLET A PŘISTÁNÍ

3.1 Hustota vzduchu

Vliv hustoty vzduchu na délku vzletu a přistání zahrnuje v sobě vliv teploty, vlhkosti a tlaku vzduchu. S výškou se hustota vzduchu rapidně snižuje a 99% hmotnosti atmosféry se nachází ve výšce do 36 km nad mořem. Hustotu vzduchu lze vypočítat ze stavové rovnice plynu:

$$\rho = \frac{P}{R T}$$

kde P ... tlak vzduchu (hPa)

R ... molární plynová konstanta

T ... termodynamická teplota

Z rovnice vidíme, že hustota stoupá se vzrůstajícím atmosférickým tlakem a klesá s rostoucí teplotou vzduchu. Se vzrůstající výškou tedy klesá hustota vzduchu.

Definujme si nyní pojmy tah a výkon. Tah leteckých pohonných jednotek je síla, která působí proti odporu letounu. Značí se F . Proudové motory vytvářejí tah, který lze fyzikálně popsat třetím Newtonovým pohybovým zákonem akce a reakce. Síla je vyvolána účinkem proudu stlačených plynů proudících z motoru. Pokud je tah větší jako celkový odpor D , který klade prostředí letounu vůči pohybu vpřed, pak letoun v konstantní výšce letu zrychluje.

Platí-li, že $F = D$, potom letoun letí konstantní dopřednou rychlostí v horizontálním směru a naopak, je-li odpor větší než tah, letoun v horizontu zpomaluje.

Výkon motoru je definován jako práce A vykonaná za jednotku času t .

$$P = \frac{A}{t}$$

Práci definujme jako sílu F působící na těleso na určité vzdálenosti S .

$$A = F S$$

Rychlost je definována jako změna dráhy S za čas t .

$$V = \frac{S}{t}$$

Odtud dostáváme vzorec pro výkon leteckých pohonných jednotek $P = F V$.

$$P = \frac{A}{t} = \frac{F S}{t} = F V$$

Výkon motorů je tedy definován jako součin tahu motorů a rychlosti letu.

3.2 Teplota vzduchu

Vzduch o vyšší teplotě má nižší hustotu a proto motory letounu vyvíjejí menší tah, respektive mají nižší výkon. Dalším vlivem vyšší teploty a tedy i nižší hustoty vzduchu je nižší vztlak na křídlech. Zvýšení teploty v určitém objemu vzduchu způsobí nárůst kinetické energie částic, molekul vzduchu, které se začnou rychleji a chaoticky pohybovat. To způsobí zvětšení daného objemu masy vzduchu, což vede ke snížení jeho hustoty.

Vzhledem k významu vlivu teploty a hustoty vzduchu na vzlet a přistání letounů se pro každé letiště stanovuje tzv. vztažná teplota letiště. Je to orientační charakteristika pesimálních podmínek provozu na letištích. Vztažná teplota musí být udána pro každé letiště ve stupních Celsia. Ve Velké Británii a Severním Irsku, v USA a Kanadě ve stupních Fahrenheita.

Dříve se vztažná teplota měřila podle vzorce:

$$T_V = T + \frac{T_M - T}{3}$$

kde T_V ... průměrná vztažná teplota (°C)

T ... průměrná teplota v nejteplejším měsíci v roce (°C)

T_M ... průměr maximálních denních teplot vzduchu v nejteplejším měsíci (°C)

V současné době se za vztažnou teplotu letiště považuje průměr maximálních denních teplot vzduchu v nejteplejším měsíci v roce (měsíc s nejvyšším měsíčním průměrem teplot), která je vypočtená pokud možno za normálové období (třicetiletí 1961 – 1990). V tabulce 2 je přehled vztažných teplot významných letišť v České republice, tabulka 3 pak pro srovnání uvádí přehled vztažných teplot vybraných světových letišť. Výběr obsahuje letiště z různých podnebných pásem a položená v různých nadmořských výškách. Jejich geografické rozložení je znázorněno na obr. 3.

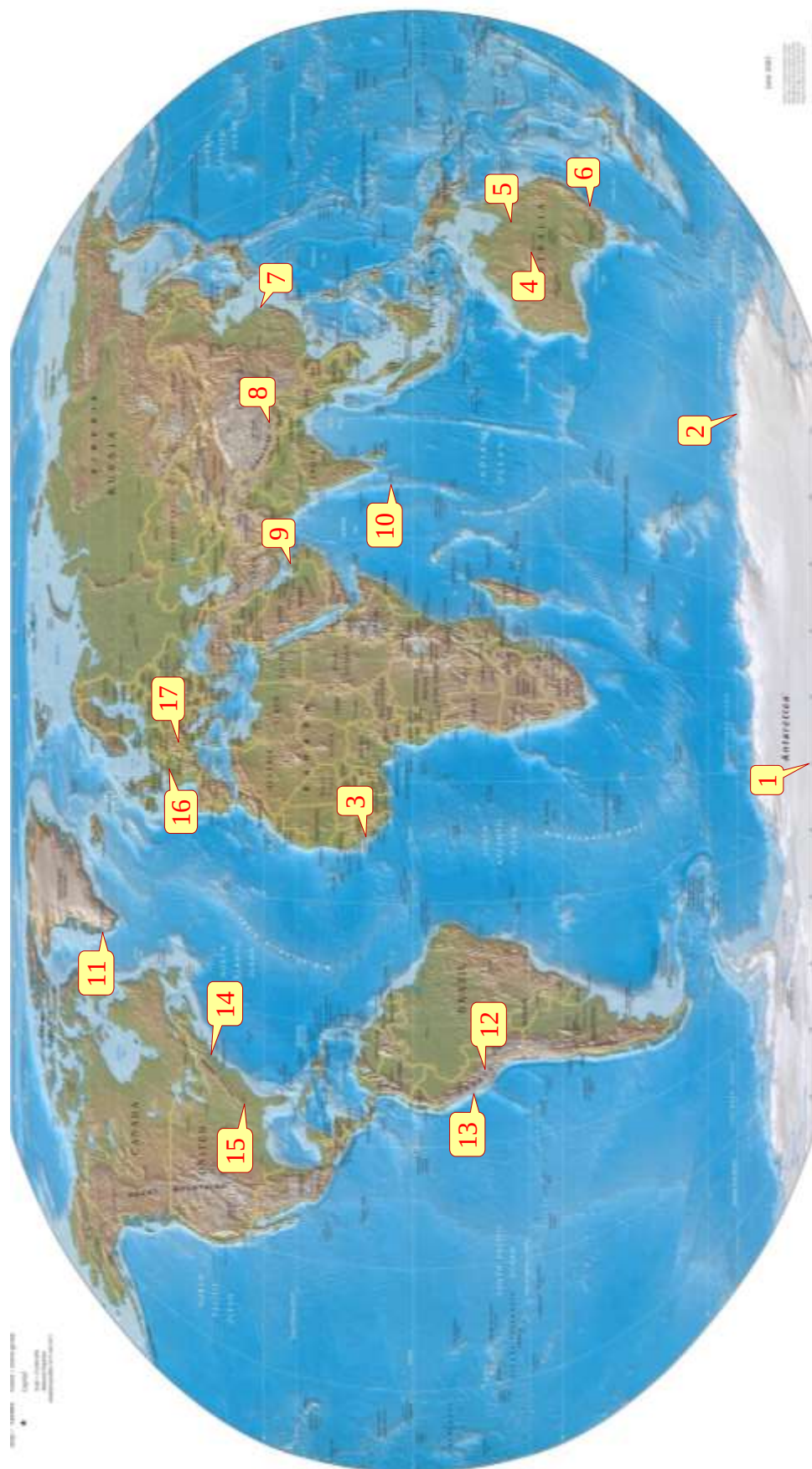
V civilním letectví se užívají dvě základní teplotní stupnice. Celsiova, která je nejrozšířenější, a Fahrenheitoва, která se dodnes používá v USA, Kanadě a Velké Británii a Severním Irsku. Obě stupnice se setkávají na -40 stupních, neboť $-40^{\circ}\text{C} = -40^{\circ}\text{F}$. Vztahy pro převod mezi oběma stupnicemi jsou následující:

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5(^{\circ}\text{F} - 32)}{9} \qquad ^{\circ}\text{F} = \frac{9^{\circ}\text{C}}{5} + 32$$

Tab. 2 Vztažná teplota na vybraných světových letištích podle [9]

	Stát	Letiště	Nadmořská výška m	Vztažná teplota °C	Vztažná teplota °F	Měsíc
1	Antarktida	Amundsen – ScottNZSP	2800	-13,9	7,0	Prosinec
2	Antarktida	Mawson	8	2,9	37,2	Leden
3	Guinea	Conakry CKY	26	33,6	92,5	Duben
4	Australia	Alice Springs YBAS	546	36,2	97,2	Leden
5	Australia	Cloncurry YCCY	189	38,1	100,6	Prosinec
6	Australia	Sydney Airport YSSY	6	26,4	79,5	Leden
7	Čína	Shanghai ZSSS	3	31,6	88,9	Červenec
8	Čína	Lhasa ZULS	3649	22,7	72,9	Leden
9	SAR	Dubai OMDB	5	34,4	93,9	Srpen
10	Maledivy	Male VRMM	2	31,5	88,7	Duben
11	Grónsko	Godthab BGGH	50	10,6	51,1	Červenec
12	Peru	Cuzco SPZO	3312	20,9	69,6	Říjen
13	Peru	Lima SPIM	13	26,8	80,2	Únor
14	USA	New York - La Guardia KLGA	16	28,8	83,8	Červenec
15	USA	Atlanta KATL	338	31,1	88,0	Červenec
16	Francie	Paříž – Le Bourget LFPB	65	23,6	74,5	Červenec
17	Švýcarsko	Curych LSZH	556	22,4	72,3	Červenec

Obr. 3 Geografické rozložení letišť uvedených v tab. 2



Tab. 3 Vztažná teplota na IFR letištích v České republice podle příručky AIP [8]

Letiště	Nadmořská výška Ft	Vztažná teplota °C	Vztažná teplota °F
LKTB	778	24,6	76,3
LKKV	1989	21,9	71,4
LKKB	939	23,3	73,9
LKKU	581	21,0	69,8
LKMT	844	23,5	74,3
LKPD	741	22,2	72,0
LKPR	1234	23,6	74,5
LKVO	919	22,5	72,5

Roční chod teploty je projevem vlastností klimatu, čili souvisí s bilancí záření, cirkulačními poměry a charakterem aktivního povrchu příslušné oblasti.

S výjimkou rovníkových oblastí má průběh teploty jednoduchý sinusový tvar, u nás s maximem v létě na přelomu července a srpna a s minimem v lednu. Nad oceány a ve vysokých horských polohách se maxima a minima ročního chodu teploty vyskytují zhruba o měsíc později.

Významnou charakteristikou ročního chodu teploty vzduchu je jeho amplituda, kterou rozumíme rozdíl průměrné teplot nejteplejšího a průměr teploty nejchladnějšího měsíce v roce. Na našich letištích dosahuje hodnoty zhruba 20 °C.

Amplituda vzrůstá se zeměpisnou šířkou a s kontinentalitou klimatu. Nejvyšší roční amplituda teploty vzduchu se vyskytuje v severovýchodní Sibiři, kde tamní letiště mají amplitudu kolem 60 °C. Roční chod teploty vzduchu na letištích jižní polokoule je opačný. Léto připadá na leden a únor a nejchladnějšími měsíci je červenec a srpen.

Denní chod teploty vzduchu je mnohem pestřejší než roční chod teploty vzduchu, protože se v něm projevuje celková proměnlivost počasí způsobená změnami v tlakovém poli, zvláště přechody atmosférických front. Přes naše letiště přechází v průměru přibližně 115 front ročně.

Denní chod teploty vzduchu závisí na rychlosti větru, pokrytí oblohy oblačností, poloze místa (slunečná místa v nížinách, nebo horská údolí) a na aktivním povrchu: „Přechodná plocha mezi litosférou nebo hydrosférou a atmosférou (povrch půdy, vody, porostu, popřípadě umělý povrch jako povrch vozovky, střech domů a podobně), na níž dochází k odrazu záření i jeho transformaci v jiné druhy energie (především teplo). Aktivní povrch patří k hlavním klimatickým faktorům“ [7].

Denní chod teploty vzduchu se projevuje do výšky cca 1500 metrů nad zemským povrchem, do které sahá tzv. vrstva tření neboli mezní vrstva atmosféry. Obecně lze říci, že denní maximum teploty vzduchu ve výšce 2 m nad povrchem se vyskytuje kolem 12:30 hod nad oceánem, kolem 14:00 hodiny nad pevninou. Ve městech, kde beton a asfalt vydávají akumulované teplo i později odpoledne, nastává denní maximum teploty až kolem 16:00 hodiny. Teplotní minimum bývá obecně těsně před východem slunce nad ránem. Podobně jako u ročního chodu teploty vzduchu platí, že denní amplituda teploty vzduchu na letišti je vyšší v kontinentálním klimatu než nad oceánem, je větší v létě a naopak klesá se vzrůstající zeměpisnou šířkou. Samozřejmě i tento periodický denní chod teploty může být narušen především přechodem atmosférických front.

3.3 Vlhkost vzduchu

„Vlhkost vzduchu je základní meteorologický prvek popisující množství vodní páry ve vzduchu. V meteorologii se vyjadřuje pomocí vlhkostních charakteristik, jako například absolutní vlhkosti, deficitu teploty rosného bodu, sytostního doplnku, měrné vlhkosti, poměrné vlhkosti, směšovacího poměru, tlaku vodní páry, popřípadě dalších“ [7].

Vlhký vzduch je směsí suchého vzduchu a vodní páry. Vzhledem k tomu, že vodní pára je řidší než suchý vzduch, a to v poměru 0,623 : 1, je hustota vlhkého vzduchu menší než suchého vzduchu.

Absolutní vlhkost vzduchu je množství gramů vodní páry v 1m^3 vzduchu. Poměrná (relativní) vlhkost vzduchu vyjadřuje poměr aktuálního množství vodní páry ve vzduchu a množství vodní páry v nasyceném vzduchu o stejném tlaku a teplotě. Vyjadřuje se v procentech. Vysoký obsah vodní páry v atmosféře snižuje množství vzduchu využitelné pro spalování. Směs paliva se vzduchem se tedy stane příliš bohatá – mnoho paliva vzhledem k nižšímu objemu suchého vzduchu – a motor ztrácí výkon.

Ve srovnání se suchým vzduchem tedy vzduch o větší absolutní vlhkosti obecně snižuje výkony leteckých pohonných jednotek.

3.4 Tlak vzduchu

Tlak vzduchu přímo souvisí s tzv. tlakovou výškou letiště. Platí, že čím výše je letiště položeno, tím menší je tlaková výška tohoto letiště, takže výkony leteckých pohonných jednotek budou nižší, než by tomu bylo na úrovni hladiny moře.

Rozlišujeme statický a dynamický tlak vzduchu. Pokud je vzduch v klidu, působí na jednotku plochy povrchu určitý tlak vzduchového sloupce – statický tlak. Při proudění

vzduchu vzniká dynamický tlak. Z hlediska výkonů leteckých pohonných jednotek nás však zajímá tlak statický. Tím rozumíme „tlak vzduchu“ neboli atmosférický tlak, což je

„...v dané výšce tíha vzduchového sloupce o jednotkovém průřezu, který sahá od dané výškové hladiny až na horní hranici atmosféry“ [7].

Měříme jej nejčastěji rtuťovými tlakoměry. Takzvaný normální tlak (viz definice MSA) je 1013,25 hPa, což odpovídá 760 mmHg (milimetry rtuťového sloupce) neboli torrům. Dnes se však výhradně používá jako jednotka atmosférického tlaku Pascal, v letecké meteorologii pak spíše jeho stonásobek - hektopascal (hPa), neboť Pascal je pro vyjádření tlaku vzduchu jednotka velmi malá ($1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$).

K měření tlaku vzduchu se dají použít i aneroidy, například v leteckých výškoměrech. Jejich princip měření tlaku je založen na deformaci kovových krabic vlivem měnícího se tlaku. V moderních přístrojích se užívá k měření i změna elektrické kapacity čidla tlaku vzduchu. Atmosférický tlak však nezávisí pouze na nadmořské výšce letiště. V rozložení tlaku vzduchu se projevuje také rozdílné ohřívání zemského povrchu a tudíž rozdílné teploty vzduchu nad různými oblastmi a v důsledku toho rozdíly v atmosférickém tlaku, které popisujeme silou tlakového (barického) gradientu. Ten je primární příčinou větru. Vítr vždy vane z oblasti vyššího tlaku vzduchu do oblasti s nižším tlakem.

Na pohybující se vzduch působí ještě další síly (uchylující se síla zemské rotace, třecí síla a odstředivá síla) plus zemský reliéf a vytvářejí se tak tlakové útvary s vyšším či nižším tlakem než je v okolí. Tak vznikají tlakové výše (anticyklony), níže (cyklony), hřebeny vysokého tlaku vzduchu, brázdy nízkého tlaku vzduchu a tlaková (barická) sedla. Ty spolu s nadmořskou výškou udávají konečný atmosférický tlak na letišti.

Obdobně jako u teploty vzduchu můžeme sledovat i u tlaku vzduchu tzv. denní chod. Minimálního tlaku vzduch dosahuje ve 4 a v 16 hodin, maxima se pak vyskytují v 10 hodin dopoledne a ve 22 hodin večer. Tyto rozdíly jsou výraznější v nižších zeměpisných šířkách, kde mohou změny tlaku dosahovat až 4 hPa. Výraznější tlakové rozdíly jsou pak v teplé polovině roku. Spolu s tímto nevýrazným periodickým chodem tlaku vzduchu však musíme počítat s výraznějšími aperiodickými změnami tlaku způsobenými přechodem front a střídáním tlakových útvarů nad letištěm.

Definujme si nyní pojem „barický stupeň“. Jedná se o výškový rozdíl, který je roven změně tlaku o 1 hPa. Při hladině moře je to 8 m výšky, ve FL 500 činí už 16 m.

Pro výpočet výkonů leteckých pohonných jednotek při vzletu a přistání nás vždy zajímá tzv. staniční tlak. To je „tlak vzduchu změřený na meteorologické stanici redukován na teplotu rtuti 0°C a se započtenou přístrojovou opravou“ [7]. Je zřejmé, že níže položené

letišťe bude mít vyšší tlak vzduchu, než letišťe položené například v horách. Aby byly hodnoty tlaků na různých stanicích (letišťích) srovnatelné, musíme provést přepoččet na společnou – stejnou – nadmořskou výšku. Pro tento přepoččet je smluvně dohodnuta společná výška – tzv. střední hladina moře (MSL – Mean Sea Level). Přepoččet ze staničního tlaku na jednotný tlak se provádí přičtením tíže sloupce vzduchu od MSL po nadmořskou výšku letišťe. Ta však záleží na teplotě vzduchu.

Přepoččet (redukce) se provádí dvěma způsoby: podle modelu MSA, nebo podle barometrické formule.

Tlak pro nastavování výškoměrů – QNH je staniční tlak přepočítaný na MSL podle podmínek MSA. Předpokládá, že teplota na hladině moře je vždy 15 °C a teplotní gradient 0,65 °C na 100 m výšky.

Tlak přepočtený podle barometrické formule je označován jako QFF. Barometrická formule říká, že průměrná teplota vrstvy mezi stanicí a MSL se určuje pomocí teploty vzduchu na stanici a pomocí konstantního teplotního gradientu 0,5 °C /100 m výšky.

$$P_0 = P e^{\frac{gH}{287T}}$$

kde P_0 ... tlak přepočtený podle barometrické formule

P ... staniční tlak

e ... Eulerovo číslo 2,71828

g ... tíhové zrychlení 9,81 m/s²

H ... nadmořská výška tlakoměru

T ... termodynamická teplota na stanici (v době pozorování)

Tento postup je doporučen Světovou meteorologickou organizací pro přepoččet tlaku vzduchu ze stanic o výšce do 500 m n.m. Tento tlak QFF je uváděn v meteorologickém kódu SYNOP a zakreslován do přízemních povětrnostních map. Tento přepoččet byl zaveden proto, že zohledňuje reálnou teplotu na stanici a tím je přesnější než výpočet podle modelu MSA.

Se standardním tlakem 1013,25 hPa souvisí kód QNE. Je to výška udávaná v metrech barometrickým výškoměrem při nastavení standardního tlaku.

A v neposlední řadě tlak QFE, za který bývá často používán staniční tlak. Výškoměr nastavený na QFE ukazuje na letišti 0 m výšky.

Z výše uvedených závěrů plyne, že nejvyšší výkon mají motory ve studeném, suchém vzduchu o vysokém tlaku na letištích s malou nadmořskou výškou.

3.4.1 Souvislost mezi tlakem a hustotou vzduchu

Platí, že se zvyšujícím se tlakem vzduchu roste jeho hustota za předpokladu konstantní teploty. Podle modelu MSA, uvedeném výše, je na střední hladině moře normální tlak vzduchu 1013,25 hPa a hustota vzduchu $1,225 \text{ kg/m}^3$. Závislost platí samozřejmě i opačně, a to, že s poklesem tlaku klesá úměrně i hustota vzduchu. To způsobí snížení výkonů letounu během vzletu a přistání na letištích s nízkým tlakem vzduchu, kdy bude třeba počítat s nižším gradientem stoupání po vzletu, delší dráhou nutnou k zastavení letounu při přistání a vyšší rychlostí přiblížení, neboť TAS je vyšší než IAS.

Uvažme vzduch o konstantním tlaku, ale s měnící se teplotou. Roste-li jeho teplota, hustota vzduchu se snižuje a naopak, klesá-li teplota vzduchu, tlak vzduchu se zvyšuje. Proto během horkého letního odpoledne bude pilot muset počítat s potřebnou delší dráhou pro vzlet a nižším gradientem stoupání. Při přistání pak s vyšší přiblížovací rychlostí a delší dráhou nutnou pro zastavení letadla na dráze, ve srovnání se standardními podmínkami MSA.

Tlak vzduchu klesá podle MSA přibližně o 1 hPa na 30 ft výšky. Jednotlivá letiště ve světě jsou položena v různých nadmořských výškách. Například letiště Amsterdam – Schiphol má nadmořskou výšku – 11 ft MSL, naopak letiště Bogota – El Dorado International Airport leží ve výšce 8357 ft MSL. Mají tedy rozdílný tlak vzduchu. Čím výše je letiště položené, tedy s nižším tlakem vzduchu, bude na něm nižší i hustota vzduchu. To způsobí, že kolem křídel proudí ve vzduchu méně molekul a nepříznivě je tedy ovlivněn vztlak na křídlech a také výkon motoru bude nižší, neboť ze vzduchu o nižší hustotě vstupuje do motoru méně vzduchu potřebného pro spalování. Ideální poměr směsi vzduchu s palivem je těmito vlivy narušen. Toto ubývání tlaku a hustoty vzduchu s výškou kompenzují u leteckých pístových motorů turbodmychadla.

U vrtulových pohonů nižší hustota vzduchu snižuje i účinek vrtule samotné, neboť stejně jako u profilu křídla i vrtule je méně účinná v řidším vzduchu.

3.5 Vítr

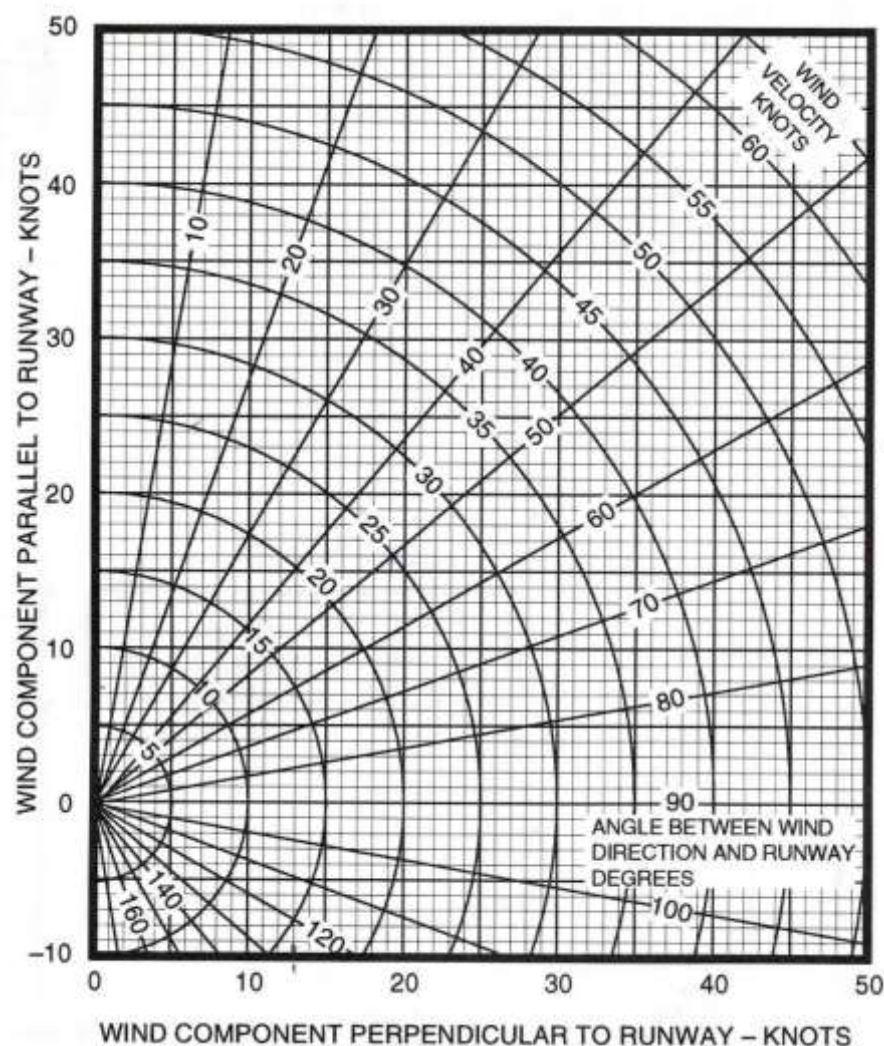
Vítr je nezanedbatelným činitelem, který vstupuje do výpočtů délky vzletu. Platí, že čelní vítr (head wind) snižuje délku vzletu. Naopak vítr do zad (tail wind) délku vzletu výrazně prodlužuje. Tento jev je způsoben tím, že při čelním větru se rychlost obtékání molekul vzduchu okolo profilu křídla letounu skládá ze součtu rychlosti větru a rychlosti startujícího

letadla. Tím se zvyšuje vztlak na křídlech a rychlost letounu vůči zemi potřebná pro jeho odpoutání tedy bude o rychlost větru menší a pro její dosažení je třeba kratší rozjezdová dráha. Při zádovném větru se naopak rychlosti letadla a větru odečítají, a proto, aby letadlo dosáhlo vztlaku potřebného k odlepení od dráhy, musí vůči zemi dosáhnout rychlosti, která je o rychlost větru vyšší, čímž se prodlouží i dráha vzletu. Obdobně to platí i pro délku přistání, kdy vítr vanoucí čelně proti přistávajícímu letadlu umožňuje přistání při nižší rychlosti vůči zemi a v pozemní fázi přistání působí i jeho brzdný účinek na zpomalení letadla, kdežto vítr vanoucí do zad působí na délku přistání opačným efektem.

Podle předpisu PART-FCL 1 například pro letouny výkonnostní kategorie třídy B je možno do výpočtů délek vzletu brát v úvahu 50% čelní složky větru a 150% zadní složky větru. Toto opatření je zavedeno z důvodu možného kolísání rychlosti větru. I když jsou dráhy stavěny s ohledem na převládající směr, ze kterého během roku vítr vane, případně se dráhový systém staví do kříže, málokdy se setkáme s větrem přímo ve směru dráhy. Většinou směr větru svírá se směrem RWY větší či menší úhel. Pro zjištění boční a čelní (případně zadní) složky větru se používají nomogramy podle obr. 4.

Složky větru lze také vypočítat pomocí klasického pravoúhlého trojúhelníka. Informace o směru větru se však v meteorologických zprávách SYNOP, METAR, TAF a SPECI udávají vzhledem k zeměpisnému směru. Informace v ATIS a informace od řídicího letového provozu přes VKV spojení je již vztažena k magnetickému severu, tudíž severu, ke kterému je vztažen i směr RWY. Kalkulujeme-li tedy s informacemi z předpovědí udávající směr větru zeměpisný, musíme nejdříve tento směr opravit o deklinaci v místě letiště, a teprve poté vítr rozkládat na složky podélné a kolmé se směrem dráhy.

Z výše uvedeného lze konstatovat, že vzlet a přistání se vždy provádí pokud možno proti větru, neboť dosáhneme potřebné rychlosti letounu vůči vzduchu, a tudíž potřebného vztlaku na křídlech, při menší rychlosti letadla vůči zemi. Tím se snižuje délka pozemní části vzletu, respektive i celková délka vzletu. Vzlety se zadní složkou větru délku vzletu výrazně prodlužují a snažíme se jim vyhnout.



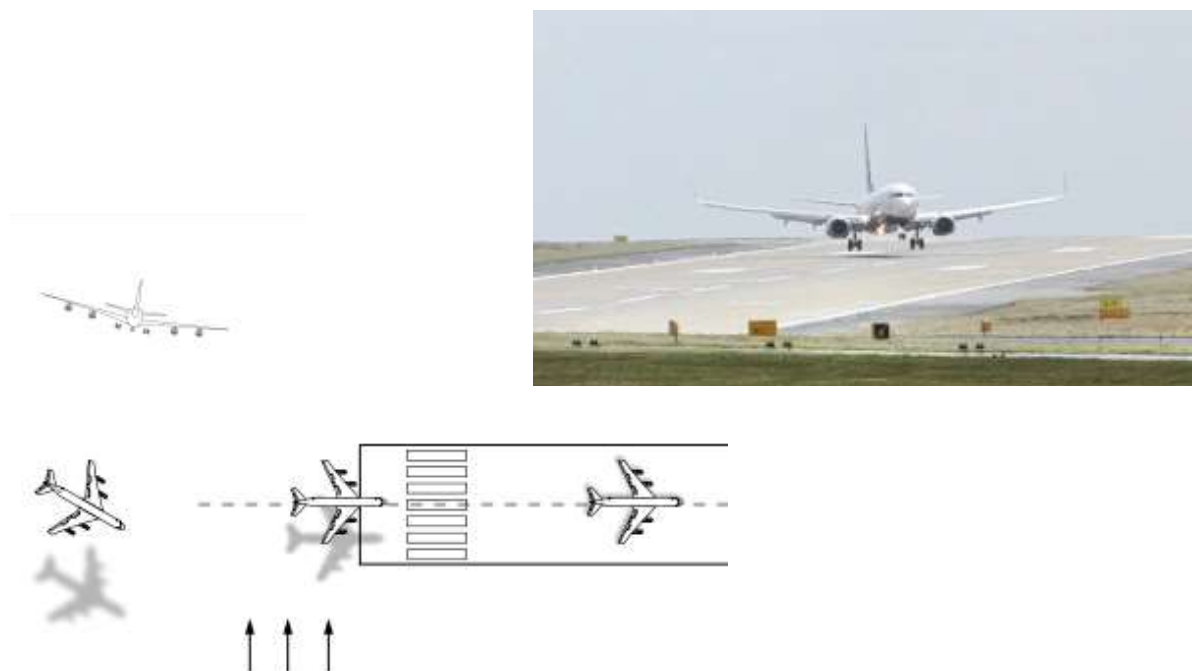
Obr. 4 Nomogram pro určení složek větru

Velmi nepříjemný je pro pilota boční vítr (cross wind) respektive jeho složka. Pro každé letadlo je v letové příručce vydané výrobcem udaná maximální složka bočního větru. Při jejím překročení nesmí být vzlet ani přistání provedeno. Boční složka větru se opírá do mohutné plochy svislých ocasních ploch (SOP), tedy kýlové plochy a směrovky. Pokud je letadlo všemi třemi body (hlavní i příďový podvozek) na zemi, koriguje pilot směr akcelerujícího letounu příďovým podvozkem. Ten má v této části vzletu funkci stabilizační. Dále již od zahájení rozjezdu musí pilot vychýlit křídélka proti směru bočního větru, aby tak eliminoval rozdíly vztlaků na křídlech. Tato výchylka musí být celkem značná a s rostoucí rychlostí, tudíž vztlakem na křídlech, se postupně zmenšuje. Jakmile je dosažena rychlost V_R – rychlost rotace, nadzdvihne pilot příďový podvozek za účelem odpoutání letounu. V tom okamžiku se plně projeví síla bočního větru na SOP a dojde k zatáčivému momentu směrem

proti bočnímu větru. Pokud navíc letíme s vrtulovým letadlem, může se nepříznivě projevit i reakční moment vrtule, který způsobuje zatáčivý moment.

Na tyto síly musí pilot okamžitě reagovat vyslápnutím směrového kormidla proti směru zatáčení letounu a pomocí orgánů řízení (křídélka a směrovka) udržuje směr osy RWY.

Způsob přistání dopravního letounu při vanoucím bočním větru lze vidět na obr. 5.



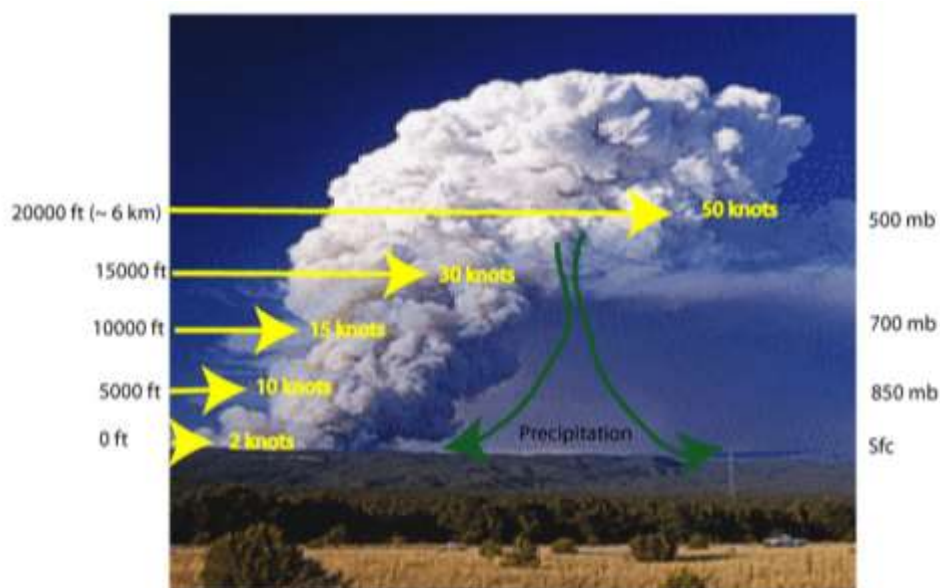
Obr. 5 Přistání letounu při bočním větru

3.5.1 Střih větru

Střih větru (wind shear) se řadí mezi další z faktorů nepříznivě ovlivňujících vzlet a přistání motorových letadel. Střih větru je obecně považován za nebezpečný jev ohrožující letadla nejvíce právě při letech blízko země. Je definován jako:

„Prostorová změna vektoru rychlosti proudění připadající na jednotkovou vzdálenost. Nejčastěji se uvažuje tzv. vertikální střih větru, který definujeme jako parciální derivaci vektoru rychlosti proudění podle vertikální souřadnice. Pod pojmem horizontální střih větru rozumíme změnu vektoru rychlosti proudění v určitém směru horizontální roviny připadající na jednotku vzdálenosti, čili analogicky parciální derivaci vektoru rychlosti proudění v daném horizontálním směru. V případech, kdy uvažujeme jen rychlost proudění bez ohledu na směr, hovoříme o gradientu rychlosti proudění, slangově gradientu větru, který vyjadřujeme v případě vertikální změny v m.s^{-1} na 100 m, či na 1000 m nebo v uzlech na 1000 stop. V případě horizontální změny v m.s^{-1} nejčastěji na 100 km“ [7].

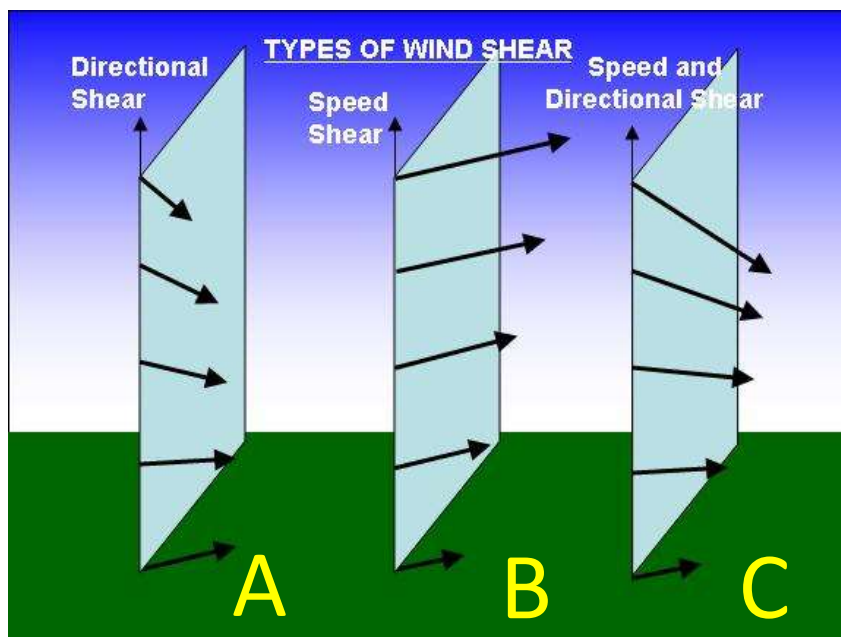
Obr. 7 ukazuje, že stříhem větru můžeme rozumět jak významnou změnu směru (A), velikost rychlosti (B), nebo obou charakteristik větru (C).



Obr. 6 Vertikální stříh větru

Z hlediska naší problematiky nás zajímá stříh větru v tzv. vrstvě tření, která sahá přibližně do 2000 ft nad zemský povrch. V ní můžeme ještě rozlišit tzv. přízemní mezní vrstvu, kterou definujeme do výšky cca 100 m nad povrchem. V těchto výškách je proudění vzduchu silně ovlivněno třením o zemský povrch a stříh větru v těchto výškách nazýváme nízkohladinový stříh větru (low level wind shear). Ke stříhu větru v přízemní mezní vrstvě dochází z několika příčin. Může se tak stát například kvůli teplotní inverzi, kdy nad povrchem kvůli tření vzduch stagnuje a nad vrstvou tření má vzduch dostatečnou rychlost. Tento přechod je poměrně prudký a způsobuje stříh větru, ve kterém se rychlost proudění vzduchu může změnit až o 70 km/h a směr větru stočit až o 90 stupňů. Tento jev se vyskytuje za bezvětrných nocí při situaci tzv. radiační inverze. Na vertikální stříh větru se mohou vydávat výstrahy uváděné jako dodatky v pravidelné letištní meteorologické zprávě METAR.

„Informace o stříhu větru se zařazují, pokud se wind shear vyskytuje v prostoru mezi úrovní RWY a výškou 500 m nad RWY a pokud jsou tyto údaje k dispozici ať už získané měřením nebo pozorováním jevu posádkou letadla. Pokud se vyskytne wind shear jak ve fázi stoupání (TKOF), tak i při přiblížení na přistání (LDG), zařazují se obě skupiny; jinak jen příslušná jedna skupina. Samotná formulace má fixní tvar; mění se jen označení dráhy“ [4].



Obr. 7 Typy stříhu větru

Další možností vzniku stříhu větru je vliv terénu a překážek v okolí dráhy. Tento jev lze velmi dobře pozorovat například na mezinárodním letišti ve Funchalu na Madeiře. Tam hornatý terén na jedné straně a otevřený oceán na druhé straně letiště způsobují v okolí RWY stříhy větru, na které musí být piloti připraveni. I kvůli dalším vlastnostem je letiště ve Funchalu považováno z hlediska vzletu a přistání pro piloty za obtížné a piloti musí být na toto letiště speciálně školeni.

Důsledky nezvládnutého přistání letounu způsobeného stříhem větru ilustruje obr. 8.

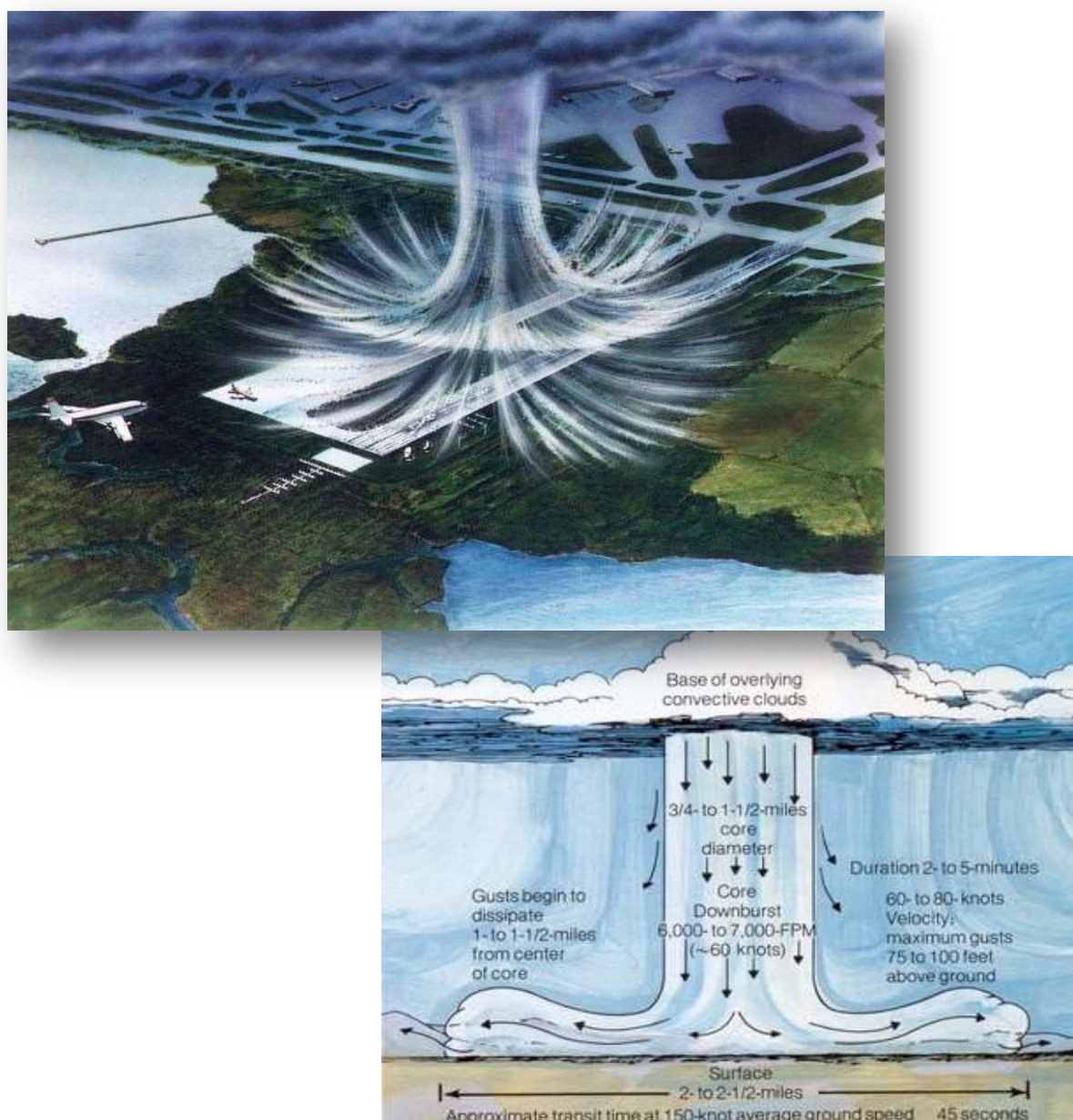


Obr. 8 Nehoda letounu způsobená stříhem větru

3.5.2 Propad vzduchu – downburst

Příčinou stříhu větru je také bouřková činnost v blízkosti letiště a s ní související jevy, jako například húlava.

Příčinou stříhu větru může být i propad studeného vzduchu (downburst). Vzniká, když z vertikálně mohutného kupovitého oblaku vytékají k zemskému povrchu proudy studeného vzduchu, které se ohýbají, roztékají do stran a způsobují například výše zmíněnou húlavu. Schéma vzniku a průběhu jevu downburst je znázorněno na obr. 9. Podle mohutnosti a délky trvání jevu rozlišujeme macroburst a microburst.



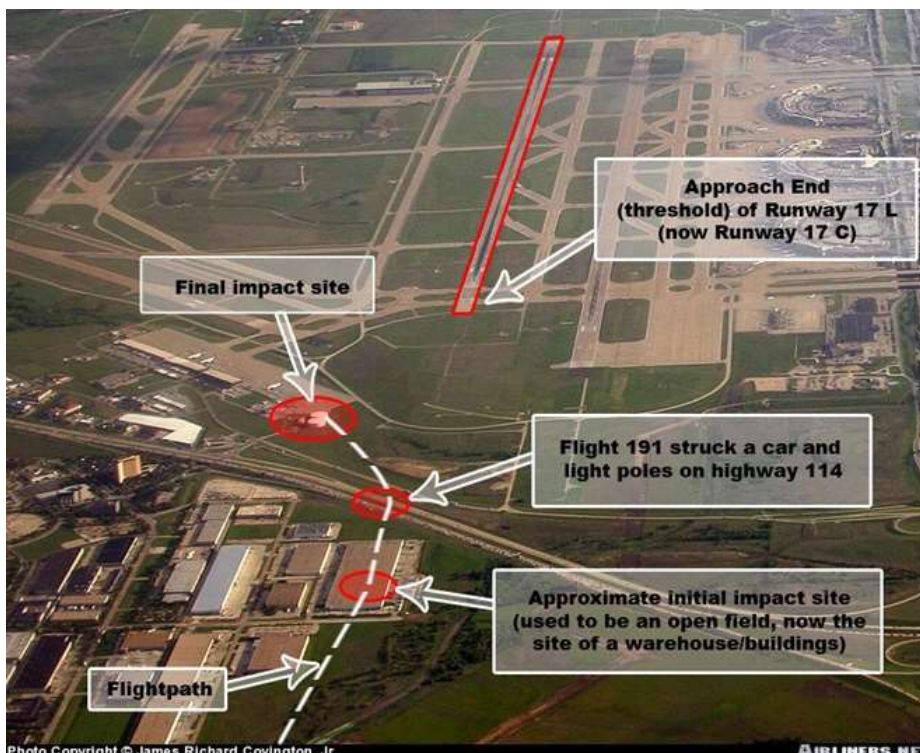
Obr. 9 Propad vzduchu a schéma jeho vzniku

V jevu macroburst rychlost větru může dosáhnout až 60 m/s. Plošný průměr tohoto jevu je větší než 4 km a doba trvání je 5 – 30 minut.

Microburst naopak trvá pouze do 5 minut, vítr v něm dosahuje rychlosti až 75 m/s a plošný rozsah jevu nepřesahuje 4 km. Mohou jej doprovázet vydatné srážky nebo se může vyskytovat i zcela beze srážek. Kvůli malému plošnému rozsahu je obtížně detekovatelný pozemními prostředky.

Kvůli propadu vzduchu se již ve světě stalo mnoho leteckých nehod. Jako příklad můžeme uvést nehodu letu 191 společnosti Delta Air Lines na trase z Fort Lauderdale-Hollywood International Airport na Floridě do Dallas / Fort Worth International Airport.

2. srpna 1985 se letoun L-1011 Tri Star dostal při přiblížení na dráhu 17 do oblasti lokálních bouřek. Posádka se i přesto rozhodla pokračovat v přiblížení. Ve výšce asi 800 ft AGL letoun zasáhl downburst. Nejprve jeho rychlost narostla z přibližovací rychlosti 149 kt na asi 173 kt. Kapitán upozornil prvního důstojníka, aby si hlídal rychlost, neboť rozpoznal silný stříh větru a čekal, že vzápětí dojde opět ke ztrátě rychlosti. Najednou rychlost klesla až na 133 kt. První důstojník přidal plný plyn, aby nabral potřebnou rychlost zpět. Avšak v kombinaci se silným zádovým větrem a sestupným proudem vzduchu o rychlosti až 30 ft za sekundu se již pilotům nepodařilo letoun stabilizovat a opakovat okruh. Zřítili se asi 1900 metrů severně od dráhy. Všichni lidé na palubě zahynuli.



Obr. 10 Konečné přiblížení letu 191

Po této havárii začala NASA testovat na svém B 737-200 palubní dopplerovský radar, který je schopen detekovat stříh větru a případný downburst, na což tehdejší palubní povětrnostní radary nestačily. Detekovaly pouze bouřky, nikoli stříhy větru.

4 VLIV STAVU A POVRCHU DRÁHY

Povrch dráhy dělíme z hlediska meteorologické situace na dráhu suchou, vlhkou a kontaminovanou, neboli znečištěnou. Jakékoliv znečištění RWY způsobuje přídavný odpor pro akcelerující či decelerující letoun. Třecí síla $T = f N$, vysvětlená v kapitole 2.1.1., pozemní část vzletu – rozjezd, se tak značně zvýší. To se projeví v delší TOR (délce rozjezdu), což je délka pozemní části vzletu. Dále se zvýší TODR – požadovaná délka vzletu, celková TOD – délka vzletu do výšky překážky a naroste ASDR – požadovaná délka přerušného vzletu. Při přistání jsou pak důsledkem znečištěné dráhy horší brzdné účinky a delší LDR – požadovaná délka přistání.

Dráha je považována za znečištěnou, je-li její povrch pokryt z více než 25% určitým nánosem. Za nános v tomto lze považovat:

- stojící vodu o hloubce 3 mm a více, či rozbředlý nebo suchý sníh o výšce odpovídající 3 mm stojící vody
- udusaný neboli uježděný sníh, který pod koly již odolává dalšímu stlačování
- led či mokrý led

Dalšími znečišťujícími prvky jsou písek, hlína, bláto, zbytky pneumatik v dotykové zóně (touch – down) zóně a další.

Znečištěná dráha vykazuje horší brzdné účinky ovlivňující délky ASD – použitelná délka přerušného vzletu a LD – délka přistání, konkrétně její pozemní část, tzv. dojezd. Brzdné účinky se měří speciálně upraveným automobilem nebo zařízením pro měření brzdných účinků na RWY (CFME – continuous friction measuring equipment). Tyto přístroje měří brzdné účinky průběžně po celé délce dráhy a výsledky jsou proto tak přesnější než při použití automobilu, který měří brzdné účinky vždy po třetinách dráhy.

Brzdné účinky se vyjadřují tzv. koeficientem tření mezi dráhou a pneumatikou. Koeficient tření se měří, pokud se dráha stává kluzkou, a to v případě sněhu či ledu na dráze. Pokud je dráha pokryta stojící vodou – viz body výše – nepovažuje se za kluzkou a brzdné účinky se neměří a nepublikují. Aktuální koeficient tření na znečištěné dráze a jim odpovídající předpokládané brzdné účinky může pilot získat ze zprávy METAR a ATIS. Dále se měří hloubka nánosu na dráze a délka a šířka očištěné plochy.

Ve zprávě METAR jsou tyto informace popsány 8 čísly a popsány např. v literatuře [6]. První dvě čísla uvádějí číslo dráhy, další pak nános na dráze (type of deposit), rozsah

znečištění (contamination), tloušťku nánosů (depth) a koeficient tření nebo brzdný účinek (braking action).

Runway deposit (nános na dráze):

- 0 clear and dry (čistá a suchá)
- 1 damp (mokrá)
- 2 wet or water patches (mokrá nebo mokré pásy)
- 3 rime or frost covered, depth normally less than 1 mm (pokrytá jinovatkou nebo ledem, tloušťka pod 1mm)
- 4 dry snow (suchý sníh)
- 5 wet snow (mokrý sníh)
- 6 slush (rozbředlý sníh)
- 7 ice (led)
- 8 compacted or rolled snow (ztvrdlý a uježděný sníh)
- 9 frozen ruts or rimes (zmrzlé koleje a rýhy)
- / type of deposit not reported (typ nánosů není hlášen, např. kvůli probíhajícímu čištění dráhy)

Contamination (rozsah znečištění):

- 1 less than 10 % runway covered (méně než 10 % dráhy znečištěno / pokryto)
- 2 11 ÷ 25 % runway covered (11 ÷ 25 % dráhy znečištěno / pokryto)
- 5 26 ÷ 50 % runway covered (26 ÷ 50 % dráhy znečištěno / pokryto)
- 9 51 ÷ 100 % runway covered (51 ÷ 100 % dráhy znečištěno / pokryto)
- / not reported (rozsah znečištění není hlášen)

Depth of deposit (tloušťka nánosů):

- 00 less than 1 mm (méně než 1 mm)
- 01 1 mm
- 02 2 mm
- etc.
- 89 89 mm
- 90 90 mm
- 91 not used
- 92 10 cm

- 93 15 cm
 94 20 cm
 95 25 cm
 96 30 cm
 97 35 cm
 98 40 cm and more (40 cm a více)
 99 runway closed due to snow / slush / ice / large drift or cleaning (dráha mimo provoz kvůli sněhu, rozbředlému sněhu, ledu, velkým závějím nebo čištění
 // not measured or operationally not important (tloušťka nánosu neměřitelná nebo provozně nevýznamná)

Braking action (brzdňý účinek):

Measured fiction coefficient (naměřený koeficient tření)	Estimated braking action (odhadovaný brzdňý účinek)	code (kód)
0,40 and above (a více)	Good (Dobrý)	5
0,39 to 0,36	Medium to good (Střední až dobrý)	4
0,35 to 0,30	Medium (Střední)	3
0,29 to 0,26	Medium to poor (Střední až špatný)	2
0,25 and below (a méně)	Poor (špatný)	1

Ve zprávě ATIS si po naladění správného kmitočtu mohou piloti odposlechnout stejné informace, které jsou obsaženy ve zprávě METAR. Řídící letového provozu pak informuje posádku po rádiu o tomtéž, kromě rozsahu znečištění.

V zimním období se můžeme setkat v našich zeměpisných šířkách i se zprávami typu SNOWTAM. Ty obsahují podrobné informace o kontaminaci dráhy sněhem, ledem, stojící vodou o hloubce alespoň 3 mm či kombinací těchto faktorů. Platnost zprávy SNOWTAM může být až 24 hodin, pokud se podmínky na letišti zásadně nemění. Existují přesná pravidla, kdy je potřeba zprávu aktualizovat. Pracovník letiště provede výše uvedená měření na koeficient tření, hloubku nánosu a rozměry očištěné části RWY a vyplní formulář SNOWTAM, který je následně publikován pro potřeby posádek. Je v něm uvedeno datum a čas vydání zprávy, číslo dráhy, k níž se informace vztahují, délka a šířka očištěné dráhy v metrech jsou-li tyto rozměry menší než jsou deklarované rozměry v AIP, průměrná výška nánosu v každé třetině RWY, koeficienty tření pro jednotlivé třetiny a čím byly koeficienty

měřeny. Dále zde mohou být informace o zakrytí dráhových světél sněhem, kdy se bude RWY znovu upravovat, jaké jsou podmínky na TWY - pojížděcí dráhy, na odbavovacích plochách, kdy bude provedeno další měření a případně další informace.

Během provozu z kontaminované dráhy hrozí také jev nazývaný aquaplaning. Je to situace, kdy kvůli stojící vodě na RWY, sněhové břečce nebo sněhu dojde ke ztrátě přilnavosti pneumatiky k povrchu dráhy. Znečišťující materiál se kvůli špatnému či nedostatečnému odvodu pneumatikou dostane mezi podložku a pneumatiku a ta se pak nedotýká povrchu RWY, ale klouže po kontaminátu. Dochází tím ke ztrátě ovladatelnosti letounu na dráze a hrozí vyjetí letounu z RWY. Rozlišujeme tři typy aquaplaningu.

Viskózní, který hrozí při nižších rychlostech a na hladkém povrchu, jako je asfalt případně v zóně dotyku, kde je RWY znečištěná zbytky pneumatik. V tom případě stačí velmi slabá vrstva vody, ne více než 0,25 mm, pneumatika nemůže proniknout vrstvičkou nánosu a dochází ke klouzání pneumatiky po této vrstvičce.



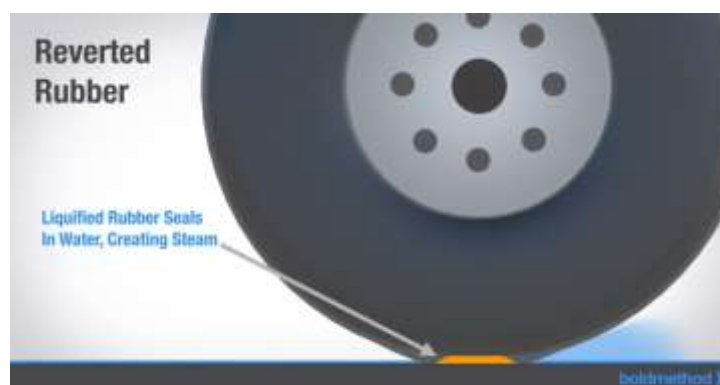
Obr. 11 Viskózní aquaplaning

Dynamický aquaplaning hrozí při výrazně vyšších rychlostech při hloubce nánosu alespoň 2,5 mm vody. Se vzrůstající rychlostí letounu již pneumatika nedokáže odvádět vodu, nadzvedne se nad podložku a začne po vodě klouzat. Dynamický aquaplaning je závislý na nafouknutí pneumatik, které jsou plněny dusíkem.

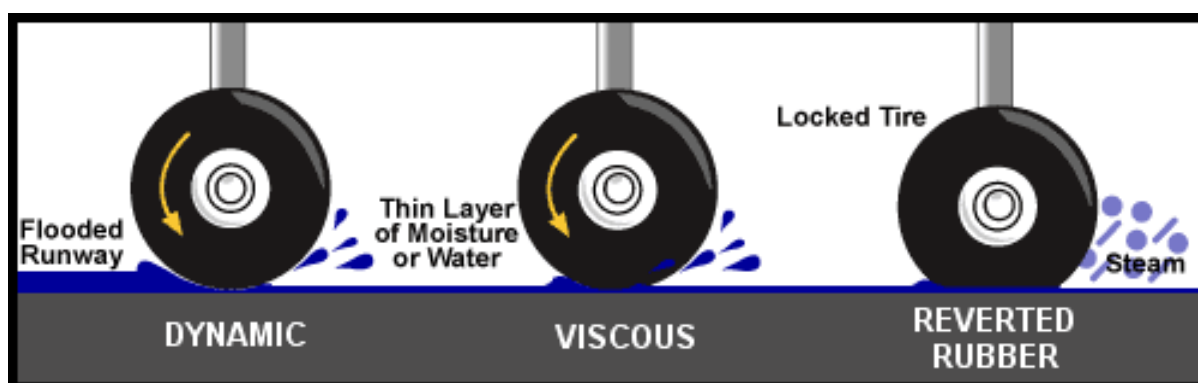


Obr. 12 Dynamický aquaplaning

Poslední typ aquaplaningu, tzv. blokační, vzniká při intenzivním brzdění a jeho důsledkem je zablokování kol. V tomto případě stačí opět velmi slabá vrstva vody. Tření zablokované pneumatiky o povrch dráhy vytváří teplo, které mění vodu pod pneumatikou na páru. Ta vytváří polštář, po němž pneumatika klouže.



Obr. 13 Blokační aquaplaning



Obr. 14 Typy aquaplaningu

Při všech typech aquaplaningu hrozí ztráta kontroly nad letounem. Jedná se o velmi nebezpečný jev, který byl v minulosti příčinou mnoha leteckých nehod. Zmíníme například

nehodu letu American Airlines 1420 z 1. 7. 1999. Letoun MD-82 přistával v noci za bouřky v Little Rock National Airport. Kvůli vodě na dráze a aquaplaningu po započetí brzdění vyjel z dráhy a 11 pasažérů přišlo o život.

Opatření obecně spočívá v provedení pozitivního dotyku a ihned jakmile dosedne předové kolo na dráhu, je třeba aplikovat středně silné brzdění. Při prvních náznacích ztráty přilnavosti (adheze) pneumatiky musí pilot povolit brzdu, aby umožnil kolu i nadále se protáčet. Směrové řízení by mělo být co nejdéle prováděno pokud možno směrovým kormidlem.

5 ZÁVĚR

V reálné atmosféře neustále dochází ke změně jejích fyzikálních charakteristik. Děje se tak na základě střídání ročních období, střídání denní doby, tvoření, přechodu a zanikání různých vzduchových hmot a s nimi spojených atmosférických front apod. Změny fyzikálních prvků mají výrazný vliv na výkony leteckých pohonných jednotek během jejich provozu obecně a ovlivňují významně i vzlet a přistání letounu. Náhlá změna atmosférických podmínek především v těchto kritických fázích letu může vzlet nebo přistání značně ztížit a v důsledku může vést i k nehodě letounu, jak bylo popsáno v kapitolách věnovaných vlivu větru na vzlet nebo přistání. Pilot musí během letu s nepříznivými atmosférickými jevy počítat a přizpůsobit jim řízení letounu. Svoji roli zde hrají nejen znalosti vlivu atmosférických podmínek a jevů na chování letadla a jeho pohonných jednotek, ale i zkušenosti pilota a jeho rychlá reakce především při nepředvídané náhlé změně podmínek. V bakalářské práci jsem pojednával o fázi vzletu a přistání.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AAL	Above aerodrome level	Nad úrovní letiště
AGL	Above grand level	Nad zemským povrchem
AIP	Aeronautical Information Publication	Letová informační příručka
AMSL	Above mean sea level	Nad střední hladinou moře
ASD	Accelerate stop distance	Délka přerušeného vzletu
ASDR	Accelerate stop distance required	Požadovaná délka přerušeného vzletu
ATIS	Automatic terminal information service	Automatická informační služba koncové řízené oblasti
°C	Degree Celsius	Stupeň Celsia
CAS	Calibrated airspeed	Kalibrovaná vzdušná rychlost
CFME	Continuous fiction measuring equipment	Zařízení pro měření brzdných účinků na RWY
EAS	Equivalent air speed	Ekvivalentní vzdušná rychlost
°F	Degree Fahrenheit	Stupeň Fahrenheita
FL	Flight level	Letová hladina
ft	Foot	Stopa
GS	Ground speed	Rychlost vůči zemi
IAS	Indicated air speed	Indikovaná vzdušná rychlost
ICAO	Internation Civil Aviation Organization	Mezinárodní organizace pro civilní letectví
IFR	Instrument flight rules	pravidla pro let podle přístrojů
ISA	International Standard Athmosphere	Mezinárodní standardní atmosféra
K	Kelvin	Kelvin
km	Kilometer	Kilometr
kt	Knot	Uzel
LD	Landing distance	Délka přistání
LDR	Landing distance available	Použitelná délka přistání
LKKB	Airport	Letiště Praha Kbely
LKKU	Airport	Letiště Kunovice
LKKV	Airport	Letiště Karlovy Vary
LKMT	Airport	Letiště Ostrava Mošnov
LKPD	Airport	Letiště Pardubice
LKPR	Airport	Letiště Praha Ruzyně
LKTB	Airport	Letiště Brno-Tuřany
LKVO	Airport	Letiště Vodochody
m	Meter	Metr
METAR	Meteorological aviation report	Pravidelná letecká (letištní) meteorologická zpráva
mm	Milimeter	Milimetr
MSA		Mezinárodní standardní atmosféra
MSL	Mean Sea Level	Střední hladina moře
MTOM	Maximum take off mass	Maximální vzletová hmotnost
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Národní úřad pro letectví a Kosmonautiku
PART-FCL 1		Letecký předpis

QFE	Atmospheric preassure at aerodrome elevation or at runway treshold	Atmosférický tlak vztažený k výšce letiště nad mořem nebo prahu dráhy
QFF	Atmospheric preassure reduced to mean sea level according to barometric formula	Tlak vzduchu redukováný na hladinu moře podle barometrické formule
QNE		Výška určité hladiny v mezinárodní standardní atmosféře ICAO
QNH	Atmospheric preassure reduced to mean sea level	Tlak vzduchu redukováný na hladinu moře podle mezinárodní standardní atmosféry ICAO
RWY	Runway	Dráha
SOP		Svislá ocasní plocha
SPECI	Aerodrome special meteorological report	Zvláštní letištní meteorologická zpráva
SYNOP		Zpráva o přízemních meteorologických pozorováních z pozemní stanice
SNOWTAM		Zpráva o stavu povrchu vzletové a přistávací dráhy
TAS	True air speed	Pravá vzdušná rychlost
TAF	Terminal aerodrome forecast	
TOD	Take off distance available	Délka vzletu
TODA	Take off distance available	Použitelná délka vzletu
TODR	Take off distance required	Požadovaná délka vzletu
TOM	Take off mass	Vzletová hmotnost
TOR	Take off run	Délka rozjezdu
TORA	Take off run available	Požadovaná délka rozjezdu
TREND	TREND forecast	Předpověď TREND
TWY	Taxi way	Pojezdová dráha
UTC	Universal Time Coordinated	Světový koordinovaný čas
V _{LOF}	Lift off speed	Rychlost odpoutání
VKV		Velmi krátké vlny
V _{MCA}	Minimum control speed	Minimální rychlost říditelnosti
V _{MCG}	Minimum control speed on the ground	Minimální rychlost říditelnosti na zemi
V _{MU}	Minimum calibrated air speed at which can aircraft lift off	Nejmenší možná rychlost odpoutání
V _R	Rotation speed	Rychlost rotace
V _S	Stall speed	Pádová rychlost
V _{S0}	Stall speed in landing configuration	Pádová rychlost letounu v přistávací konfiguraci
V _{S1}	Stall speed in take off configuration	Pádová rychlost letounu ve vzletové konfiguraci
V ₁		Rychlost rozhodnutí
V ₂	Take off safety speed	Bezpečná rychlosti vzletu

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AIP ČR
- [2] Daněk, V. – Filakovský, K.: Základy letu (081 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL-1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 315 s.
- [3] Daněk, V.: Mechanika letu I – Letové výkony. Brno: Akademické Nakladatelství CERM, 2009, 293 s.
- [4] Daněk, V.: Výkonnost (032 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL-1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 145 s.
- [5] Dvořák, P.: Letecká meteorologie, 1. Vydání. Cheb: Svět křídel, 2010. 481 s.
Daněk, V.: Mechanika letu I – Letové výkony. Brno: Akademické Nakladatelství CERM, 2009, 293 s.
- [6] Frynta, J. – Loubal, J. – Schoř, J.: Plánování letu a monitorování letu (033). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL-1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 189 s.
- [7] Holub, J.: Meteorologické kódy. 2. část (letecké). Brno: Univerzita obrany, 2007. 103 s.
- [8] Karas, P. – Zárybnická, A. – Míková, T.: Skoro jasno. Praha: Česká televize, 2007, 208 s.
- [9] Klimatické normály 1961 – 1990 vydané Světovou meteorologickou organizací v Ženevě
- [10] Krška, K. – Kráčmár, J. – Sobota, J. – Svatoš, V.: Meteorologie (050 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL-1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 305 s.
- [11] Letecký předpis Zkratky a kódy L8400. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, Úřad pro civilní letectví, 2008.
- [12] Nedělka, M. a kol.: Slovenský letecký slovník terminologický a výkladový. Bratislava: Magnet – Press Slovakia, 1998. 494 s.
- [13] Nedelka, M.: Organizácia zabezpečovania leteckej činnosti a základná letecká meteorologická správa. Metar 93. Bratislava: Slovenský hydrometeorologický ústav, Letecká meteorologická služba, 1993. 43 s.

- [14] Nedelka, M.: Prehľad leteckej meteorologie. Bratislava: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatury, 1984. 222 s.
- [15] Sobíšek, B. a kol.: Meteorologický slovník výkladový a terminologický. Praha: Academia + Ministerstvo životního prostředí ČR, 1993. 594 s.
- [16] Učebnice pilota 2008. Cheb: Svět křídel, 2008, 708 s.

SEZNAM VYOBRAZENÍ

str. 11 obr. 1 Fáze vzletu

Daněk, V.: Výkonnost (032 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL-1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006.
145 s.

str. 14 obr. 2 Fáze přistání

Daněk, V.: Výkonnost (032 00). Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL-1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006.
145 s.

str. 21 obr. 3 Geografické rozložení letišť uvedených v tab. 2

www stránky:

<http://mapaonline.cz/mapa-sveta/>

http://mapaonline.cz/pictures/35_o.jpg

str. 28 obr. 4 Nomogram pro určení složek větru

www stránky:

<http://www.mtc.gob.pe/>

http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/aereo/examenes_licencias/examenes/diagramas/31_2.jpg

str. 29 obr. 5 Přistání letounu při bočním větru

www stránky:

http://fr.wikipedia.org/wiki/Atterrissage_par_vent_de_travers

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/92/Crosswind_landing_sideslip-notext.svg/470px-Crosswind_landing_sideslip-notext.svg.png

www stránky:

<http://forums.flyer.co.uk/viewtopic.php?f=1&t=82791>

http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2013/04/18/article-2311018-195ED53C000005DC-56_634x389.jpg

str. 30 obr. 6 Vertikální střih větru

www stránky:

http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m302/Tornado_Topics_pastF14.html

http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m302/Severe_Illustrations/VerticalWindShear.jpg

- str. 31 obr. 7 Typy stříhu větru
www stránky:
http://www.weatherquestions.com/What_is_wind_shear.htm
http://www.weatherquestions.com/wind_shear.jpg
- str. 31 obr. 8 Nehoda letounu způsobená stříhem větru
www stránky:
http://article.wn.com/view/2015/05/15/Dramatic_video_filmed_from_cockpit_shows_terrifying_moment_p/
<http://i.ytimg.com/vi/dOx5Knk6S9I/0.jpg>
- str. 32 obr. 9 Propad vzduchu a schéma jeho vzniku
www stránky:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Microburst>
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4e/Microburstnasa.JPG>
- str. 33 obr. 10 Konečné přiblížení letu 191
www stránky:
http://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=1&LLID=32&LLTypeID=2
http://lessonslearned.faa.gov/DeltaL1011/DFW_Airport.jpg
- str. 38 obr. 11 Viskózní aquaplaning
www stránky:
<http://www.boldmethod.com/blog/2014/04/hydroplaning/>
<http://www.boldmethod.com/images/blog/2014/04/hydroplaning/viscous-hydroplaning.jpg>
- str. 39 obr. 12 Dynamický aquaplaning
www stránky:
<http://www.boldmethod.com/blog/2014/04/hydroplaning/>
<http://www.boldmethod.com/images/blog/2014/04/hydroplaning/dynamic-hydroplaning.jpg>
- str. 39 obr. 13 Blokační aquaplaning
www stránky:
<http://www.boldmethod.com/blog/2014/04/hydroplaning/>
<http://www.boldmethod.com/images/blog/2014/04/hydroplaning/reverted-rubber.jpg>

str. 39 obr. 14 Typy aquaplaningu

www stránky:

https://www.faa.gov/gslac/ALC/course_content.aspx?cID=34&sID=171&previous=true

https://www.faa.gov/files/gslac/FTB/Maneuvering/3_types_hydroplaning.gif