

3 Vietor

Cieľ štúdia témy:

Oboznámiť s odbornou terminológiou používanou v leteckej meteorológii v súvislosti s vetrom a spôsoby jeho merania. Pochopiť základné dôvody cirkulácie vzduchu, síl pôsobiacich na častice vzduchu pri ich pohybe. Pochopiť základné princípy vzniku nebezpečných javov ako je turbulencie a strih vetra

Na základe tejto témy študent:

- pochopí dôvody nerovnomerného rozloženia tlaku vzduchu;
- dozvie sa o príčinách vzniku vetra, jeho definíciu, spôsoby merania vetra;
- oboznámi sa so základnou terminológiou problematiky merania vetra;
- bude schopný popísať sily pôsobiace na častice vzduchu pri vzniku vetra;
- oboznámi sa s princípmi vzniku turbulencie a strihu vetra.

Hlavné body – pojmy k zapamätaniu:

- definícia;
- meranie, vznik vetra;
- sily pôsobiace pri vzniku vetra - sila gradientu, Coriolisova sila, sila trenia, odstredivá sila;
- geostrofický a gradientový vietor;
- zmena s výškou a teplotou;
- turbulencia;
- stojaté vlny.

Kľúčové slová:

- vietor, tlak, izobary, Coriolisova sila, trecia sila, odstredivá sila, barický gradient, cyklóna, anticyklóna, rotácia.

Základná študijná literatúra:

- Petr Dvořák, Letecká meteorologie
- Sobota: Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů ATPL(A), Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno 2002
- Kulčák a kol.: Učebnice pilota vrtulníku PPL(H) část II, akademické nakladatelství CERM s.r.o Brno, 2009
- ATPL Ground Training Series Meteorology, Book 9, EASA - First Edition Revised for NPA 29, CAE Oxford Aviation Academy (Oxford) Limited 2018
- Kol. autorů: Meteorologický slovník výkladový terminologický, Academia Praha, 1993

3.1 Vietor, definícia a vznik

Vietor je jeden zo základných metodologických prvkov, ktorý popisuje pohyb zvolenej častice vzduchu v určitom mieste atmosféry v danom časovom okamihu. Vietor je určený svojím smerom a rýchlosťou, jedná sa teda o vektorovú veličinu. Vzniká pri rozdielnych tlakoch vzduchu, ktoré sú kvantifikované barickým, alebo tlakovým, gradientom. Horizontálny vietor vzniká pôsobením zložky sily horizontálneho tlakového gradientu a Coriolisovej sily. Uplatňuje sa pri ňom i odstredivá sila a sila trenia. Vertikálny vietor vzniká ako dôsledok prúdenia v cirkulačných a frontálnych systémoch, pri konvekcii a pri obtekaní prekážok. Meteorológia sa zaoberá meraním predovšetkým horizontálneho vetra čiže vodorovného prúdenia vzhľadom k zemskému povrchu. Na vznik vetra je nevyhnutná podmienka existencie tlakových rozdielov.

3.1.1 Tlakové rozdiely

Prúdenie vzduchu úzko súvisí s tlakovým poľom, ktoré súvisí s teplotným rozložením teploty. Rôzne časti povrchov sa ohrievajú rôzne, záleží od ich schopnosti pohlcovať slnečné krátkovlnné žiarenie a meniť ho na dlhovlnné. Túto vlastnosť povrchu nazývame *albedo*. Poznáme denné a ročné kolísania teplôt a tlaku vzduchu. Denné kolísanie tlaku je významné hlavne pre tropické oblasti, zatiaľ, čo pre ročné kolísanie závisí od polohy miesta. Pre kontinenty platí, že maximum tlaku vzduchu pozorujeme v zime a minimum v lete. Súvisí to s teplotou vzduchu, keďže studený vzduch je hustejší a pôsobí na povrch vyšším tlakom ako teplý. Pre maritívne oblasti platia dve maximá v a to v lete a v zime, a dve minimá na jar a v jeseni.

Plochy rovnakého tlaku vzduchu vzhľadom na nerovnomerné ohrievanie atmosféry vždy zvierajú istý, aj keď malý, uhol so zemským povrchom. Priesečníky plôch rovnakého tlaku vzduchu so zemským povrchom nazývame *izobary*. Častice vzduchu sa pri tlakových rozdieloch začnú pohybovať aby vyrovnali tlak a to z miest s vyšším tlakom vzduchu do miest s nižším tlakom. Takto vzniká vietor.

3.1.2 Meranie parametrov vetra

Vietor je meteorologický prvok popísaný dvoma parametrami a to rýchlosť a smer. Rýchlosť vetra meriame v m/s, v letectve používame uzly (kt), iba niektoré krajiny (Rusko, Ukrajina) naďalej používajú základné jednotky m/s. Pre potreby všeobecnej verejnosti sa používajú jednotky km/h, prípadne NM/H alebo M/H (námorná míľa za hodinu, míľa za hodinu, používané v USA)

Prevod medzi jednotkami je nasledujúci:

$$\begin{aligned} 1 \text{KT} &= 1 \text{ NM/h} = 1,855 \text{ km/h} = 0,5 \text{ m/s} \\ 1 \text{ m/s} &= 1,94 \text{ kt} = 3,6 \text{ km/h} \end{aligned}$$

Rýchlosť vetra, niekedy nesprávne používaný výraz sila vetra, sa meria anemometrom, zvyčajne 10 metrov nad povrchom. Podľa predpisu L3 o Leteckej meteorologickej službe rozoznávame nasledovné pojmy:

- **okamžitý vietor** je dvojminútový plávajúci priemer rýchlosti a smeru vetra;
- **priemerný vietor** je 10 minútový plávajúci priemer rýchlosti vetra a smeru;
- **náraz vetra** je krátkodobé zosilnenie rýchlosti vetra najmenej o 10 KT od priemeru.

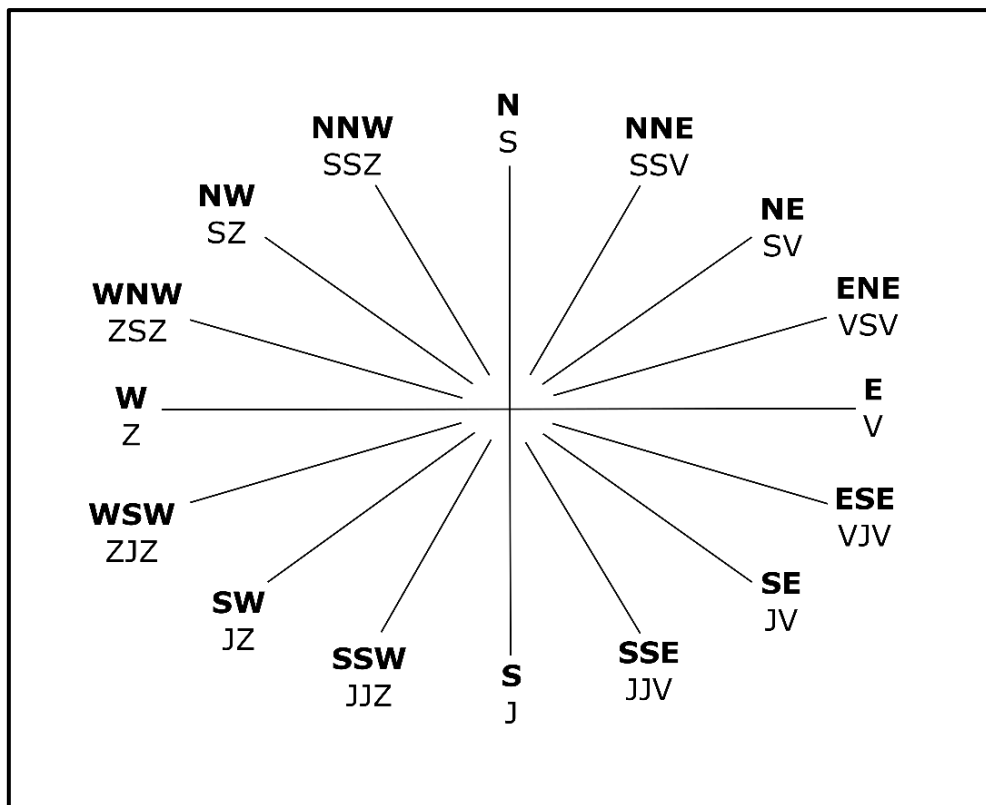


Obrázok 1 Anemometer

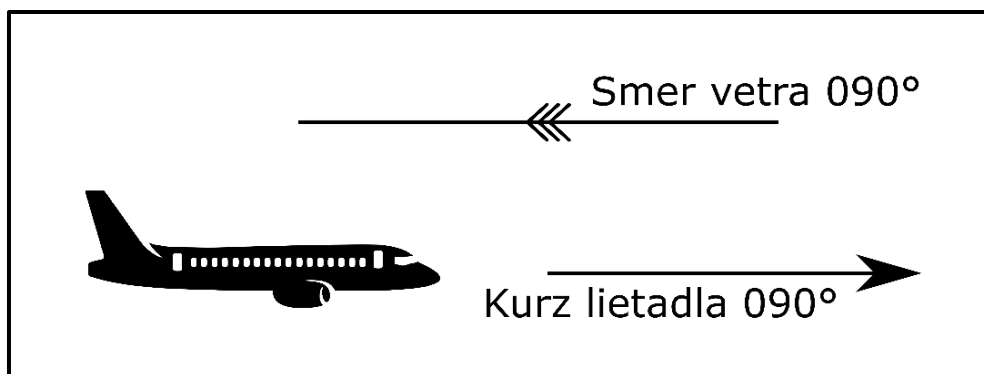
Smer vetra je vektor smerujúci do nižšieho tlaku vzduchu, teda odkiaľ vietor fúka. Smer vetra sa udáva v stupňoch, pričom platí že 360 ° je sever, čiže N a 180 ° je juh, teda S. Niekedy stačí určovať smer vetra pomocou osemdielnej veternej ružice N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. V podmienkach letectva sú požadované presnosti v +/- 2 kt do 20 kt potom 10 % hodnoty rýchlosti vetra. Na presnosť smeru vetra sú nároky +/- 10 °.

Pre klimatologické účely sa smer vetra určuje podľa osemdielnej veternej ružice a rýchlosť vetra sa odhaduje pomocou 12 dielnej Beaufortovej stupnice, ktorá vznikla pôvodne pre potreby moreplavcov a bola definovaná na základe účinkov vetra na plachty plachetníc a stav morskej hladiny.

Fakt, že smer vetra určuje to, odkiaľ fúka má pre letectvo veľmi praktický význam. Je výhodné a bezpečnejšie pristávať proti smeru vetra. Ako ATC, tak posádky lietadiel vedú veľmi rýchlo určiť najvhodnejší smer vzletu a pristátia na základe informácie o vetre. Bez zbytočného prepočítavania sa jedná o ten istý smer vzletu a pristátia ako je smer vetra. Niekedy sa stretneme i s pomenovaním vetra. Vietor dostáva svoje meno podľa toho odkiaľ vane, takže „severák“ je vietor vanúci od severu a „horský vietor“ je vietor vanúci z hôr do údolia .



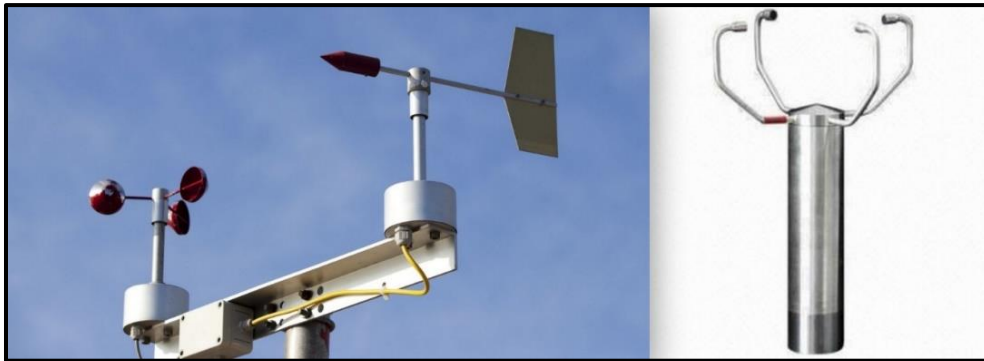
Obrázok 2 Veterná ružica



Obrázok 3 Udávanie smeru vetru odkiaľ fúka má praktický význam pre letectvo. Ak chce posádka letieť proti vetru letí kurzom podľa informácie o smere vetra

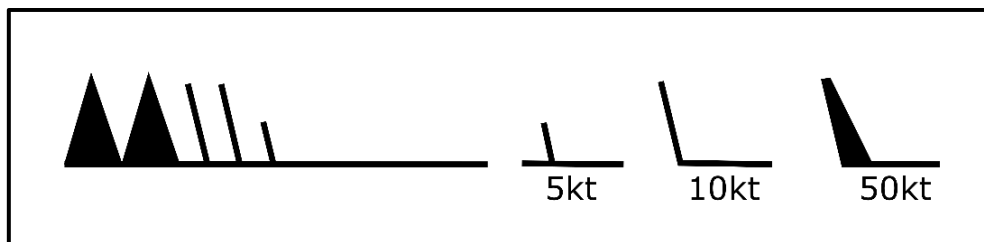
Smer vetra sa určuje veternou smerovkou. Ak je merač vetra kombinovaný, teda smer i rýchlosť vetra zároveň, nazývame ho anemorumbometer. V súčasnosti mechanické anemorumbometre nahrádzajú ultrasonické zariadenia, využívajúc Doplerov efekt.

Anemorumbometre vetra sa umiestňujú tak, aby údaje z merania boli reprezentatívne pre široké okolie, teda mimo prekážok, ktoré by mohli ovplyvniť smer a rýchlosť, prípadne vo vzdialenosti viac ako 30 násobok výšky prekážky. Prízemný vietor sa miera podľa štandardov WMO a ICAO vo výške 10 m nad terénom. Keďže merače vetra z bezpečnostných dôvodov nemôžeme umiestniť priamo na prahu dráhy, musíme pole vetra priemerovať tak, aby sme dostali reprezentatívne hodnoty pre širšie okolie.



Obrázok 4 Vľavo mechanický, vpravo ultrasonický anemorumbometer

Smer a rýchlosť vetra je možné vyjadriť i graficky pre potreby tvorby grafických meteorologických materiálov, tzv. „Weather Charts“. Smerovka vetra znázorňuje z akej svetovej strany fúka a rýchlosť je vyjadrená dielikmi po 10 kt a plnými trojuholníkmi, ktoré značia 50 kt.



Obrázok 5 Grafické znázornenie smeru a rýchlosti vetra

Grafické vyjadrenie smeru a rýchlosti vetra umožňuje vytvorenie si ucelenej predstavy o veterných pomeroch na rozsiahlejšom území a to i vo vyšších hladinách. Z tohto dôvodu sa pomerne často využíva v mnohých meteorologických mapových materiáloch.

3.1.3 Sily pôsobiace pri vzniku vetra

Pri vzniku vetra možno popísať niekoľko síl, ktorých výslednica sa podieľa na jeho konečnom smere a rýchlosti:

- sila barického gradientu;
- Coriolisova sila;
- Odstredivá/dostredivá sila;
- sila trenia.

Sila barického gradientu

Impulzom pre pohyb častíc vzduchu je *sila barického gradientu*. Vzniká pri tlakových rozdieloch. Pôsobí z miesta s vyšším tlakom do miesta s nižším tlakom. Barický gradient možno vypočítať pomocou vzťahu:

$$G = -\frac{dp}{dn}$$

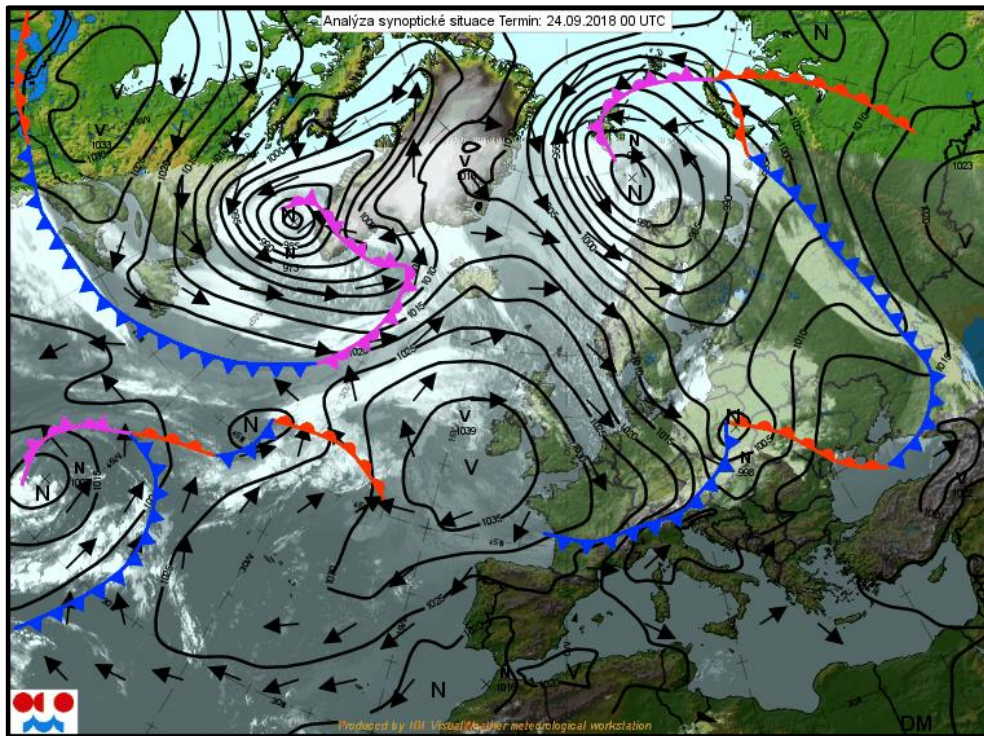
Kde:

- dp je rozdiel tlakov;
- dn je vzdialenosť zodpovedajúca príslušným tlakom, pričom n je normála k izobare (pri vzniku vetra sa o vertikálnych pohyboch častíc neuvažuje).

Pri určovaní veľkosti gradientu sa berie zmena tlaku na istú vzdialenosť, v meteorológii je to spravidla poludníkový stupeň (111 km).

Príklad: izobary sú od seba 250 km a rozdiel medzi nimi je 5 hPa

Odповeď: $G = -dp/dn = (-5 \times 111)/250 = 2,2$ hPa na stupeň



Obrázok 6 Príklad tlakového poľa

Čím hustejšie tlakové pole, t.j. čím viac izobár je na jednotku vzdialenosti, tým väčší je tlakový gradient a následne možno očakávať vyššie rýchlosti vetra. *Sila gradientu* pôsobiaca na časticu vzduchu sa meria samotným gradientom vzhľadom na hmotnosť častice vzduchu.

$$G = -\left(\frac{1}{\rho}\right) \cdot \frac{dp}{dn}$$

Kde:

- ρ je hustota vzduchu;
- dp je rozdiel tlakov;
- dn je vzdialenosť zodpovedajúca príslušným tlakom, pričom n je normála k izobare (pri vzniku vetra sa o vertikálnych pohyboch častíc neuvažuje).

Zrýchlenie ktoré udeľuje sila gradientu vzduchovým časticiam je veľmi malé, rádovo stotiny až desatiny $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ výraznejšie horizontálne sily v atmosfére nie sú. Coriolisova sila a dostredivá sila či trenie vyvolávajú zrýchlenie rádovo rovnako veľké ako sila G . Pri predpoklade, že rýchlosť vetra je určená len vplyvom sily G , čiže v smere gradientu, potom by jej rýchlosť v dôsledku neustáleho gradientového zrýchlenia rástla do veľkých hodnôt. Navyše v praxi málokedy pozorujeme prízemný vietor silnejší ako 25 m/s. (najsilnejší vietor mimo tornáda bol pozorovaný na hore Mount Washington New Hampshire 1917 m.n.m. 12.4.1934 a to 103 m/s). Tlakové rozdiely by sa pri priamom prúdení rýchlo vyrovnali a vietor by ustal. V praxi však pozorujeme, že vietor nevanie priamo podľa vektora sily gradientu ale jeho dráha sa zakrivuje a to na severnej pologuli na pravo od pohybu a na južnej na ľavo. Je to v dôsledku *Coriolisovej sily*, ktorá spolupôsobí na každé teleso v pohybe a tvorí sa na všetkých objektoch ktoré rotujú.

Coriolisova sila

Táto sila je tiež známa ako uchylujúca sila alebo Coriolisov efekt a vyskytuje sa na všetkých rotujúcich telesách. Jej efekt možné pozorovať i na iných planétach s atmosférou. Na našej planéte teda hovoríme o uchylujúcej sile zemskej rotácie a platí:

$$C = -2 \cdot m \cdot \vec{\omega} \times \vec{v}$$

Kde:

- m je hmotnosť častice;
- ω je uhlová rýchlosť (pre Zem, je to $7,29 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$);
- v je rýchlosť telesa v rotujúcej vzťažnej sústave;
- \times je vektorový súčin.

ďalej sa dá odvodiť:

$$C = 2m\omega v \sin\varphi$$

Kde:

- φ je zemepisná šírka.

Z tohto vzťahu vyplýva, že na rovníku je $C = 0$, a maximálna je na pólach. C je priamo úmerná zemepisnej šírke a rýchlosti telesa v rotujúcej vzťažnej sústave, a pôsobí vždy kolmo na smer pohybu na severnej pologuli vpravo a na južnej vľavo od smeru pohybu. Zrýchlenie C je rádovo približne rovnaké ako sila G .

Odstredivá sila

Pri pohybe častice po zakrivenej dráhe pôsobí na ňu odstredivá sila, a to von od stredu zakrivenia pohybu, pričom platí:

$$O = \frac{mv^2}{r}$$

Kde:

- O je odstredivá sila;
- m je hmotnosť častice;
- v je rýchlosť častice;
- r je polomer zakrivenia dráhy.

Pre jednotkovú hmotnosť častice vzduchu platí zjednodušený vzťah:

$$O = \frac{v^2}{r}$$

čiže odstredivá sila rastie kvadraticky s rýchlosťou a so znižujúcim sa polomerom. V bežných podmienkach našich zemepisných šírok je zanedbateľná, nemá teda vplyv na rýchlosť prúdenia iba na jeho smer. V tropických cyklónach pri malom polomere a vyšších rýchlostiach prúdenia O prevyšuje 40 násobok C výrazne mení rýchlosti vetra v týchto oblastiach. Odstredivá sila vždy pôsobí smerom von z tlakových útvarov.

Dostredivá sila

Je rovnako veľká ako sila opačného smeru, teda ako sila odstredivá.

$$D = \frac{mv^2}{r}$$

Sila trenia

Trenie ovplyvňuje pohyb vzduchu do 1000 – 1500 m AGL v tzv. vrstve trenia. Táto sila bude pôsobiť proti pohybu. Je empiricky zistené, že trecia sila nepôsobí presne proti pohybu ale pod uhlom okolo 38° proti smeru hodinových ručičiek. Je úmerná drsnosti povrchu ktorý označujeme koeficientom k .

$$R = -k \cdot v$$

Sila trenia spôsobuje zmenu smeru a rýchlosti vetra. S narastajúcou výškou sa smer stáča v smere hodinových ručičiek a naopak. Samotný vplyv zeme na vysvetlenie nestačí. Brzdíaci účinok sa prejavuje v takmer celej vrstve trenia a prenáša sa postupne od spodných vrstiev smerom hore. Toto spomalenie sa vysvetľuje tzv. vnútorným trením, ktoré rozdeľujeme na trenie molekulárne a virtuálne.

Melekulárne trenie

Molekulárne trenie je vysvetľované ako prechod molekúl vzduchu z jednej vrstvy do druhej pričom tieto vrstvy majú rôznu rýchlosť. V skutočnej atmosfére pozorujeme ale trenie až 100 000 krát väčšie ako by malo byť vplyvom molekulárnej súdržnosti. Dochádza totiž k výmenám celých dávok vzduchu nie len molekúl a to i vo vertikálnom smere. Vertikálne premiešavanie vzduchu sa nazýva turbulencia. Vnútorne trenie skutočne pozorované a podmienené turbulenciou sa nazýva *trenie virtuálne*. Záporné zrýchlenie vplyvom trecej sily sa pohybuje stotinami až desatinami $\text{cm}\cdot\text{s}^{-2}$ pričom s výškou klesá a už od výšky 600 – 1000 m AGL je zanedbateľná.

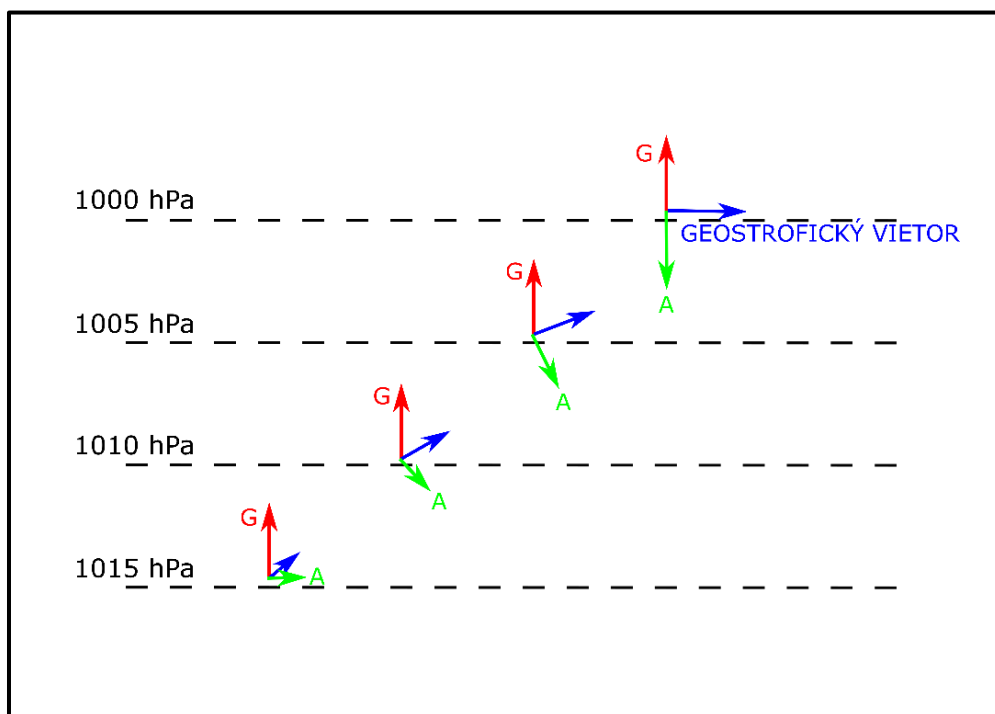
3.1.4 Geostrofický a gradientový vietor

Geostrofický vietor je charakterizovaný ako rovnovážny stav medzi silou barického gradientu a Coriolisovou silou

$$\vec{G} = -\vec{C}$$

Výslednicou síl pôsobiacich na časticu je priamočiary pohyb pozdĺž priamkových izobár. Tu sa uplatňuje zákon zachovania hybnosti, konkrétne lineárnej hybnosti (linear momentum). V literatúre sa najčastejšie uvádza vzťah na výpočet rýchlosti geostrofického vetra:

$$v = 4,8 \frac{G}{\sin\varphi}$$



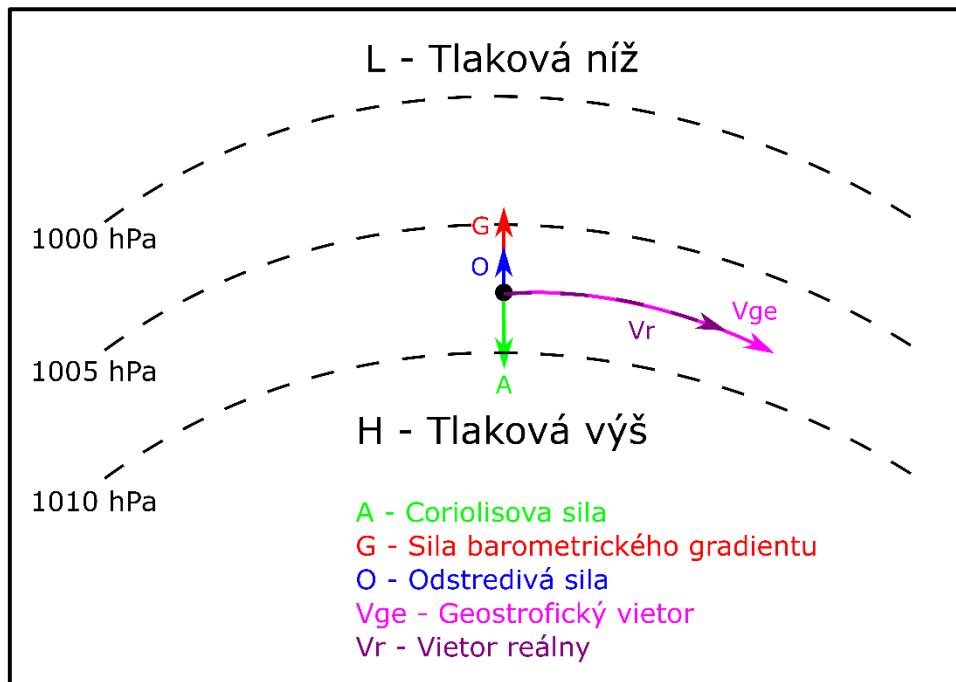
Obrázok 7 Sily pôsobiace na pohybujúcu sa časticu pri geostrofickom vetre, Coriolisov sila s označením A

Rýchlosť je teda priamo úmerná barickému gradientu a nepriamo úmerná zemepisnej šírke. V prírode sa však priamky vyskytujú vzácne, preto sa skôr stretneme so zakrivenými izobarami. Vtedy hovoríme o **Gradientovom vetre**. (geostrofický je teda zvláštny prípad gradientového vetra kde $r = \infty$). Pri zakrivenom pohybe vstupuje do rovnováhy síl medzi gradientovou silou a coriolisovou ešte aj odstredivá sila. Tiež sa aplikuje zákon o zachovaní uhlovej hybnosti (angular momentum). V tlakovej výši platí pre pôsobiace sily C, G a O vzťah:

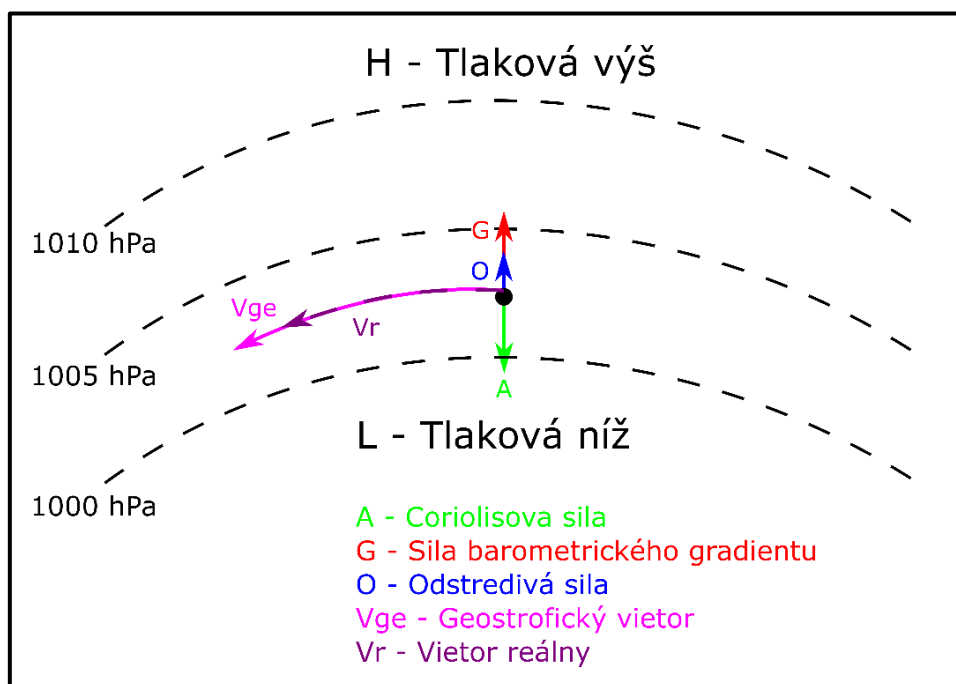
$$C = G + O$$

Odstredivá sila spolu so silou barického gradientu pôsobí von z tlakového útvaru a sú v rovnováhe s Coriolisovou silou. V tlakovej níži platí pre pôsobiace sily vzťah:

$$G = C + O$$



Obrázok 8 Rozloženie pôsobiacich síl v tlakovej výši



Obrázok 9 Rozloženie pôsobiacich síl v tlakovej níži

Odstredivá sila spolu s Coriolisovou silou pôsobia von z tlakového útvaru a sú v rovnováhe so silou barického gradientu, ktorá pôsobí do stredu tlakového útvaru. Z uvedených vzťahov vyplýva, že barický gradient v cyklóne je väčší ako v anticyklóne. To popisuje hustota izobár v okolí tlakových útvarov. Anticyklóna má hustotu izobár menšiu ako cyklóna a vietor v cyklóne dosahuje vyšších hodnôt ako v anticyklóne. Súvisí to aj s úbytkom hmoty smerom von od stredu anticyklóny. Ak častica smeruje k okraju tlakovej výše, odoberá masu vzduchu od stredu,

a teda tlaková výš sa vyplňa a barický gradient sa znižuje. To vysvetľuje pomerne riedke tlakové pole od stredu k okraju anticyklón. U cyklóny so zvyšujúcim barickým gradientom narastá rýchlosť častice okolo cyklóny, no súčasne rastie odstredivá sila, čo má za následok ďalší nárast barického gradientu. Častice vzduchu tak teoreticky môžu dosahovať neobmedzených rýchlostí, čo v prírode nie je možné v dôsledku molekulárneho trenia. Tento zosilňovací efekt rýchlosti prúdenia možno pozorovať v tlakových nížach, kde sú rýchlosti vetra značne väčšie ako v anticyklónach. Značne silné rýchlosti vetra možno pozorovať i u tropických cyklón a vo vnútri tornád.

3.1.5 Buys-Ballotov zákon

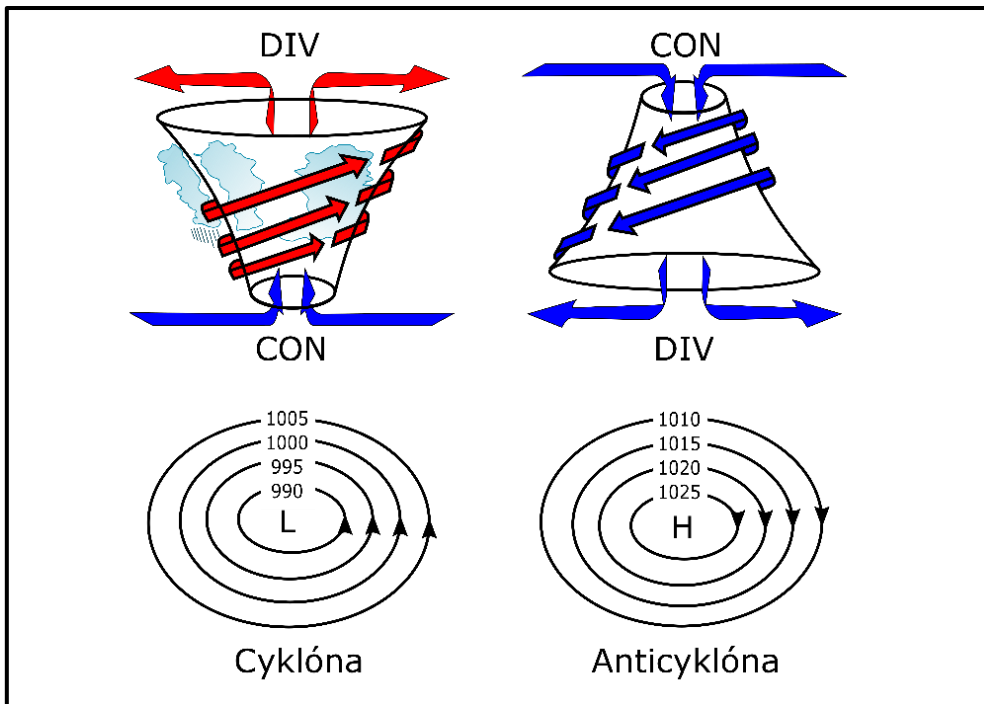
Na pohybujúce sa častice v rotujúcej sústave pôsobí Coriolisova sila, ktorá vychýľuje pohyb častice na severnej pologuli vpravo a na južnej vľavo. Častice vzduchu budú mať tendenciu vždy postupovať z oblasti s vyšším tlakom do oblasti s tlakom nižším. Nie priamočiaro, ale vychýľované Coriolisovou silou. Výslednou trajektóriou častice bude špirálovitý pohyb do vnútra tlakovej níže proti smeru otáčania hodinových ručičiek. Naopak v tlakovej výši sa častice vzduchu budú pohybovať špirálovite von z tlakového útvaru v smere otáčania hodinových ručičiek.

V strede tlakovej níže pri zemskom povrchu nastáva zbiehanie častíc – *konvergentné prúdenie*. Častice sú v tlakovej níži dynamicky nútené vystupovať do vyšších vrstiev, čo vytvára pre tlakovú níž typický komínový efekt. Vo vyšších vrstvách atmosféry sa nad tlakovou nížou prúdenie opäť rozbieha a vytvára tak výškovú divergenciu. Naopak v strede tlakovej níže nastáva pri zemskom povrchu rozbiehanie prúdenia – *divergentné prúdenie*. Chýbajúce objemy vzduchu sú nahradzované padavým prúdením v centre tlakovej výše čo vytvára tzv. „damper“ efekt (z anglického damper – tlmič). Úbytok objemov vzduchu nad tlakovou vo výškach je kompenzovaný zbiehaním prúdenia. Nad tlakovými výšami sa takto vytvára výšková konvergencia. Vznik výškových divergencií alebo konvergencií vplyvom rôznych smerov prúdenia dáva dynamický predpoklad tvorby tlakových útvarov pri zemskom povrchu a tak môže výškové prúdenie ovplyvňovať ráz počasia nad dotknutou oblasťou. Pre identifikáciu oblastí s vyšším a nižším tlakom vzduchu na základe prízemného pozorovania smeru vetra možno využiť Buys-Ballotov zákon:

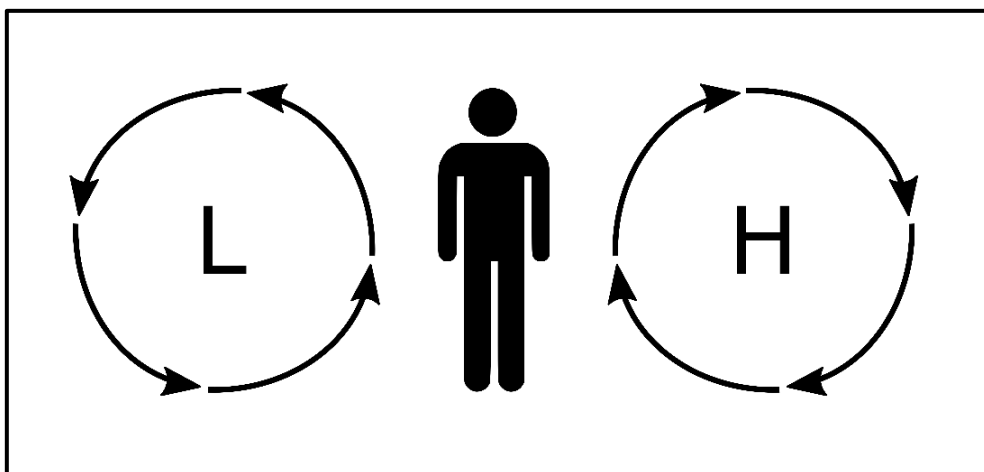
„Na severnej pologuli pri zemi vane vietor od vysokého tlaku vzduchu k nízkemu tak, že necháva oblasť vyššieho tlaku po pravej strane a nízky tlak po ľavej. Pretína pritom izobary po uhle v priemere približne 30 °“.

alebo:

„Vietor vane pri zemi tak, že sa odchyľuje od gradientu na severnej pologuli vpravo a na južnej vľavo. Pretína pritom izobary pod približným uhlom 60 °“.



Obrázok 10 Horizontálne a vertikálne prúdenie v rámci tlakových útvarov



Obrázok 11 Buys-Ballotov zákon

Buys-Ballotov zákon vychádza z princípu pôsobiacej Coriolisovej sily na pohybujúce sa častice vzduchu v rotujúcej sústave ktorou je Zem, z miest z vyšším tlakom do miest s tlakom nižším. Možno ha aplikovať na miestach bez výraznejších horských prekážok, kde je smer prízemného prúdenia do značnej mieri ovplyvňovaný konfiguráciou terénu.

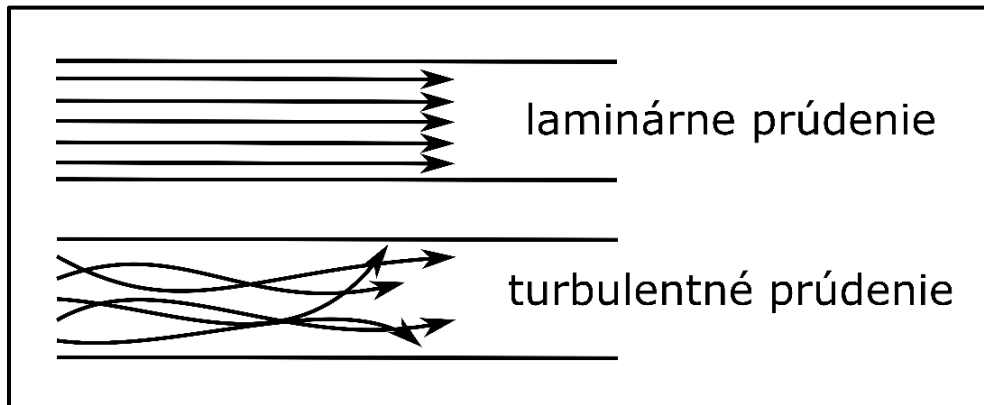
3.1.6 Zmena s teplotou a výškou

Pri prehľbovaní teplotných kontrastov sa zvyšuje i tlakový kontrast, čiže narastá barický gradient. V podinverzných vrstvách, kde sú teplotné kontrasty malé a barický gradient je slabý, napr. v oblasti tlakovej výše je vietor slabý, dosahuje malých rýchlostí. Počas dňa kedy sa rozdielny povrch ohrieva rôzne efektívne narastá barický gradient a prízemný vietor silnie. Za bežného dňa má smer a rýchlosť vetra po desiatej hodine dopoludnia typický charakter pre zvyšok dňa. Pri prízemnom vetre sa teda prejavuje denný chod. Vo veľkej miere sa uplatňujú miestne podmienky ako sú kopce, vodné plochy blízkosť mora. Denný chod vetra sa prejavuje iba v prípade ustáleného počasia vo vnútri vzduchových hmôt. Zmena vetra nad vrstvou trenia je zložitejšia. Platí

pravidlo, že pri zmenách smeru vpravo, v smere hodinových ručičiek, ide o teplé stáčanie (teplá advekcia vo výškach - veering) pri zmenách vľavo, proti smeru hodinových ručičiek, ide o studené stáčanie (advekcia chladného vzduchu - backing). S rastúcou výškou sa znižuje trenie o zemský povrch. Sila trenia pri zemskom povrchu vychýľuje prúdenie približne o 38 ° PSHR (backing), pričom záleží od drsnosti povrchu. S výškou sa teda vietor stáča v smere hodinových ručičiek a zvyšuje sa rýchlosť prúdenia (veering).

3.1.7 Turbulencia

Turbulentné prúdenie je neusporiadaný pohyb častíc plynu alebo kvapaliny. Je opakom laminárneho prúdenia. Pri laminárnom prúdení sa všetky častice pohybujú po paralelných alebo rovnobežných dráhach jedná sa teda o usporiadaný pohyb. Turbulencia je jav trojrozmerný, náhodný vo forme vírov a vln.



Obrázok 12 Rozdiel medzi laminárnym a turbulentným prúdením

Opakom turbulentného prúdenia je prúdenie homogénne, nazývané *laminárne prúdenie*. Turbulenciu označujeme Q-kódom **QFT** a v letectve je zaužívaný výraz v angličtine *turbulence* so skratkou **TURB**.

Druhy turbulencie

Turbulencia je považovaná za nebezpečný poveternostný jav a rozdeľujeme ju na tri základné typy:

- Termická;
- Dynamická;
- Mechanická.

Termická turbulencia je dôsledkom nerovnomerného ohrevu vzduchu od rôzneho typu podložja a instabilné zvrstvenie atmosféry. Vyskytuje sa takmer vždy, má svoj denný chod, podobne ako vietor alebo teplota. Minimum je dosahované večer a v noci, maximum sa vyskytuje počas dňa pri prehriatí prízemných vrstiev vzduchu.

Dynamická turbulencia sa tvorí v dôsledku kontrastu v poli fyzikálnych parametrov vetra ako sú horizontálny strih vetra a rýchlostný strih vetra. Nebezpečné fenomény pre letectvo s pohľadu dynamickej turbulencie rozdeľujeme na:

- LLWS (Low Level Wind Shear);
- LLJS (Low Level Jetstream);
- CAT (Clear Air Turbulence);
- JTS (Jetstream).

Impulzom pre vznik dynamickej turbulencie je konvergentné alebo divergentné prúdenie, JTS, vysoké hory, búrková oblačnosť typu Cumulonimbus (CB). Turbulencia sa ďalej šíri priestorom buď vo forme dynamicky stabilných alebo dynamicky labilných vln, ktoré budú popísané v časti „Stojaté vlny“.

Mechanická turbulencia sa tvorí trením o zemský povrch resp. prúdením cez prekážky na zemskom povrchu ako sú pásy krovísk, stromoradie, budovy prípadne, horské prekážky. Súvisí s rýchlosťou prízemného vetra, prítomnosťou prekážok a ich vhodnou orientáciou vzhľadom na smer vetra.

Intenzita turbulencie

Podľa preťaženia a účinkov, ktorým sú lietadlo a posádka počas letu vystavené turbulenciu rozlišujeme na:

• Slabá	do 0,2 g	LGT	Light
• Mierna	0,2 – 0,5 g	MOD	Moderate
• Silná	0,5 – 1,0 g	SEV	Severe
• Veľmi silná nad	1,0 g	EXT	Extreme

Hodnoty preťaženia môžu byť získavané z údajov akcelerometrov. Pre lepšiu predstavu intenzite turbulencie je vhodnejšia klasifikácia podľa účinkov turbulencie na posádku, ovládateľnosť lietadla a predmety na palube:

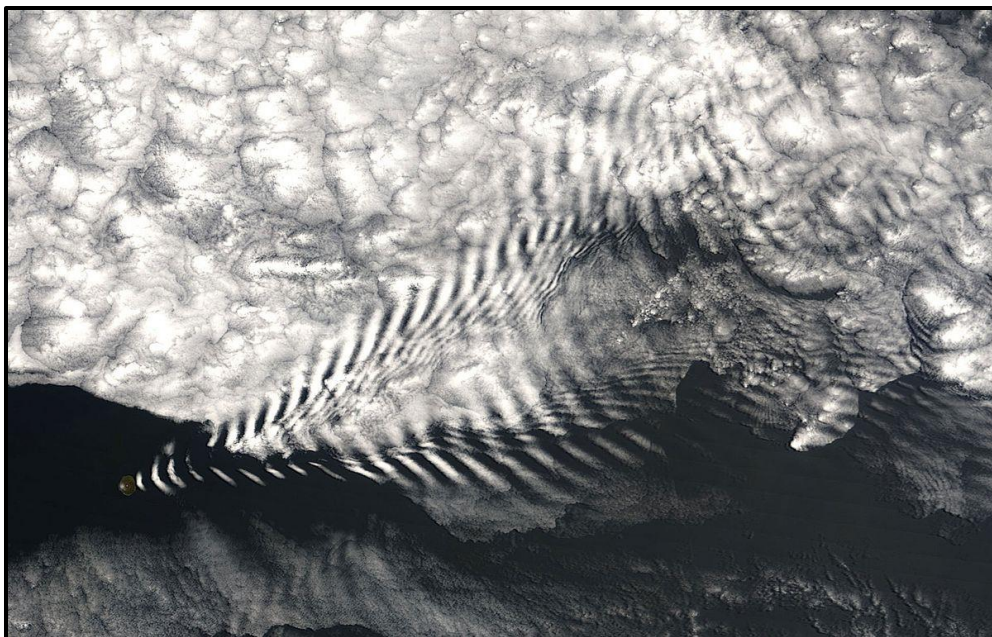
- *Slabá*: malé alebo nepravidelné zmeny vo výške alebo rýchlosti letu. Posádka môže pociťovať malý odpor oproti upínacím pásom, voľné predmety sa môžu triasť alebo trochu pohybovať. Podmienky letu sú podobné jazde autom po nespevnenej alebo hrboľatej ceste.
- *Mierna*: Lietadlo je si udržiava dobrú ovládateľnosť, sú potrebné malé zásahy do riadenia na udržanie výšky a smeru letu. Voľné predmety sa pohybujú, posádka zreteľne pociťuje odpor oproti upínacím pásom. Podmienky letu sú porovnateľné jazde autom po ceste plnej dier s občasným rýchlostným spomaľovačom
- *Silná*: Posádka môže stratiť kontrolu nad letom na krátke časové úseky, sú potrebné neustále zásahy do riadenia na udržanie výšky a smeru letu. Posádka je tlačaná do upínacích pásov pomerne silne až divoko. Voľné predmety v kabíne začínajú poletovať. Možné sú štrukturálne poškodenia draku lietadla.
- *Extrémna*: Let je nekontrolovateľný, objavujú sa silné štrukturálne poškodenia lietadla s veľkou pravdepodobnosťou končiace haváriou.

Na prevenciu pred turbulenciou je potrebný kvalitný meteorologický brífing s identifikáciou rizikových oblastí a hladín, s následným výberom vhodnejšej trasy alebo výšky letu. Veľmi užitočné sú hlásenia od iných posádok počas letu, ktoré výskyt turbulencie potvrdia alebo negujú. Je preto veľmi dôležité hlásiť výskyt turbulencie pri jej identifikácii počas letu iným posádkam, prípadne ATC.

3.1.8 Stojaté vlny

Stojaté vlny majú súvis s fenoménom CAT (Clear Air Turbulence). Jedná sa o rozvlnenie stabilných vrstiev vzduchu v dôsledku vertikálnych, či horizontálnych strihov vetra. Podmienkou je existencia niekoľko stoviek metrov tenkých stabilných vrstiev v atmosfére tzv. listov (odtiaľ i pojem listová štruktúra atmosféry) pozdĺž ktorých sa tvoria vlny šíriace sa ďaleko od miesta vzniku. Môžu sa vyskytovať i v bezoblačnom priestore. Ďalšou príčinou rozvlnenia stabilných vrstiev môže byť i prúdenie cez horkú prekážku vysokými rýchlosťami.

Dynamicky stabilné vlny sa šíria od zdroja vlnenia s nemennou amplitúdou. V inom prípade je rozvlnenie atmosféry identifikovateľné tvarom oblačnosti, ktoré pripomínajú rozvlnenú vodnú hladinu.



Obrázok 13 Príklad dynamicky stabilných vln, ktoré sa vytvorili v dôsledku prúdenia za horskou prekážkou, ktorú tvorí sopečný ostrov

Dynamicky labilné vlny sa šíria s narastajúcou amplitúdou, až sa rozpadnú a vzniká náhodný rad vírov. Pri veľmi silnom tryskovom prúdení budú vzniknuté vlny na stabilných vrstvách nestabilné s vírovým efektom. Tvarovo zvláštnou oblačnosťou, ktorá svojim zjavom napovedá výskyt turbulencie v danej vrstve je oblačnosť spojená s Kelvin-Helmholtzovými vlnami.

Jedná sa o situáciu, kedy sa vo vrstve nad oblačnosťou vyskytuje výrazne silnejší vietor ako vo vrstve pod oblačnosťou, smer rýchlejšieho i pomalšieho prúdenia je identický. Vtedy hovoríme o *rýchlostnom strihu vetra*. Pomalšia vrstva pôsobí odporom voči rýchlejšej vrstve a vzájomne sa na styčnej ploche premiešavajú vo forme pravidelne sa opakujúcich vln. Tento efekt možno prirovnať k rozvlneniu vodnej hladiny pri silnejšom náraze vetra, kedy sa vytvorí množstvo malých vlniek kolmo na prúdenie. V oblasti tvorby Kelvin-Helmholtzových vln možno očakávať výskyt extrémnej turbulencie. Stojaté vlny patria do kategórie dynamickej turbulencie, teda javu, ktorý nevzniká z mechanických príčin, obtekaním prekážok. Vzniká v dôsledku nehomogenity poľa vetra, či už z hľadiska jeho smeru alebo rýchlosti.

Turbulenciu spôsobujú rotory (víry) ktorých intenzita závisí od pomeru vlnovej dĺžky vln a rozmerov lietadla. Ak je tento pomer príliš malý, čiže lietadlo preletí vlnami rýchlo, efekt turbulencie sa prejaví predovšetkým otrasom podobne ako pri jazde autom po mačacích hlavách. V prípade vlnových dĺžok značne presahujúcich rozmery lietadla dochádza k plynulým zmenám výšky letu. Najhorší prípad nastáva pri porovnateľných rozmeroch dĺžky jednotlivých vln a rozmerov lietadla, kedy je efekt turbulencie najsilnejší a môže mať za následok prejavu miernej až silnej turbulencie.



Obrázok 14 Tvar oblačnosti popisuje spôsob rozvlnenia vrstiev atmosféry



Obrázok 15 Helmholtzove vlny

Kontrolné otázky a úlohy overujúce pochopenie témy:

- Definujte pojem vietor.
- Aké parametre vetra pozorujeme? Akým smerom fúka vietor?
- Popíšte pojem barický gradient.
- Prečo vznikajú na oblasti s rôznou hodnotou tlaku vzduchu?
- Aké sily pôsobia na časticu vzduchu pri jej pohybe?
- Aký je rozdiel medzi geostrofickým a gradientovým vetrom?
- Aký vplyv má na smer a rýchlosť vetra blízkosť zemského povrchu?
- Ako sa mení smer vetra pri zmenách teploty s výškou?
- Vysvetlite pojmy turbulentné a laminárne prúdenie
- Aké druhy turbulencie podľa jej vzniku poznáme?
- Ako rozdeľujeme turbulenciu podľa jej intenzity?
- Aké sú účinky turbulencie na posádku, ovládateľnosť a predmety na palube pri rôznych stupňoch intenzity turbulencie?
- Ako možno predísť turbulencii?
- Aký je rozdiel medzi dynamicky stabilnými a dynamicky labilnými vlnami?
- Kedy majú vlny v atmosféry najväčšie účinky na lietadlo?