

## 2 Hustota atmosféry, MSA a meranie výšky.

### Cieľ štúdia témy:

Pochopiť vzťah medzi teplotou tlakom s meniacou sa výškou a využite týchto vzťahov pre letectvo. Poznať konštanty platné pre medzinárodnú štandardnú atmosféru podľa ICAO.

### Na základe tejto témy študent:

- pochopí vzťah medzi teplotou, hustotou a tlakom vzduchu;
- získa vedomosti o priebehu zmien uvedených veličín s meniacou sa výškou;
- získa vedomosti o jednotkách používaných v leteckej meteorológii;
- získa znalosti o odbornej meteorologickej terminológii;
- bude schopný využiť tieto znalosti pre pochopenie vzťahov využívaných pri meraní výšky v letectve;
- získa znalosti o MSA.

### Hlavné body – pojmy k zapamätaniu:

- hustota;
- vzťah tlaku, teploty a hustoty;
- medzinárodná štandardná atmosféra MSA;
- barometrické meranie výšky – princíp.

### Kľúčová slová:

- teplota, tlak, hustota, zmena, MSA.

### 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
- 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

## 2.1 Hustota vzduchu

Hustota vzduchu je pomer hmoty a objemu vzduchu. Základné fakty súvisiace s hustotou vzduchu sú nasledovné:

- Závisí na zložení vzduchu a na jeho teplote a tlaku;
- Hmotnosť atmosféry je  $5,27 \times 10^{15}$  ton;
- Približne 1 milióntina hmotnosti Zeme;
- 50% hmotnosti je do výšky 5,5 km;
- 90% do výšky 16 km;
- 99% do 36 km.

Hustota vzduchu závisí od jeho zloženia ale rozhodujúca je jeho teplota. Hustota sa dá vypočítať zo stavovej rovnice platnej pre ideálny plyn:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Hustota je definovaná ako pomer hmotnosti a objemu:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Kde:

- $\rho$  je hustota plynu;
- $m$  je hmotnosť plynu (uvažujeme o jednotkovej hmotnosti);
- $V$  je objem plynu.

po nahradení objemu v stavovej rovnici pomerom hustoty a hmotnosti dostávame vzťah:

$$p \frac{m}{\rho} = n \cdot R \cdot T$$

odtiaľ dostávame vzťah medzi tlakom, hustotou a teplotou plynu:

$$p = \frac{n \cdot \rho \cdot R \cdot T}{m}$$

Vzhľadom na to, že  $n$  a  $R$  sú konštanty, a u hmotnosti  $m$  sme uvažovali o jednotkovej hmotnosti možno dospieť k zjednodušenému tvaru:

$$p = \rho \cdot T$$

a následne pri vyjadrení hustoty sa dostávame k pomeru:

$$\rho = \frac{p}{T}$$

z toho vyplýva, že **hustota je priamo úmerná tlaku a nepriamo úmerná teplote vzduchu**. Teplejší vzduch je teda redší ako chladnejší. Podľa Archimedovho zákona teda redšie, čiže teplejšie objemy vzduchu ako okolie, stúpajú a naopak, hustejšie, teda chladnejšie objemy vzduchu ako ich okolie klesajú. Pri tej istej teplote je vlhký vzduch ľahší ako suchý vzduch. Vodná para je ľahšia v pomere 0,622:1. Hustota vlhkého vzduchu je teda súčtom hustoty vodnej pary a suchého vzduchu, keďže vodná para môže tvoriť 4 % objemu vzduchu, o to bude vlhký vzduch ľahší, avšak iba nepatrne. Na hustotu vzduchu má rozhodujúci vplyv teplota vzduchu.

### 2.1.1 Tlak vzduchu

Už bolo vysvetlené akým spôsobom spolu súvisia tlak, teplota a hustota vzduchu. Tlak vzduchu závisí od hustoty a hustota sa odvíja od teploty vzduchu. Tlak je definovaný ako pomer sily na plochu:

$$p = \frac{F}{S}$$

v našom prípade tlak vzduchu je daný tiažou vzduchového stĺpca nad istou jednotkovou plochou:

$$p = \frac{G}{S} = \frac{m \cdot g}{S}$$

Kde:

- $G$  je tiaž stĺpca vzduchu;
- $g$  je gravitačné zrýchlenie;
- $S$  je plocha na ktorú tiaž stĺpca pôsobí.

Hmotnosť vzduchu vieme nahradiť súčinom jeho hustoty a objemu. Dostávame sa ku vzťahu:

$$p = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S}$$

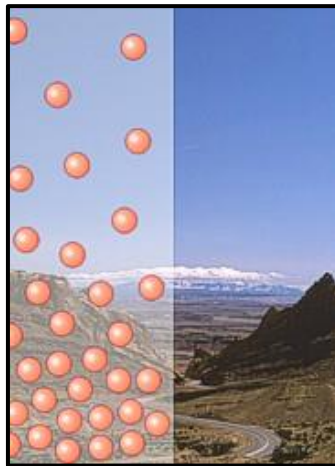
objem vzduchu vypočítame ako súčin plochy  $S$  a výšky vzduchového stĺpca  $h$ , čiže:

$$p = \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot g}{S}$$

a po vykrátení plochy  $S$  v čitateli a menovateli dospievame ku vzťahu:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

**Tlak vzduchu je priamo úmerný jeho hustote.** Uvedený vzťah má ďalší dôsledok. Ak zmenšíme výšku stĺpca  $h$ , tlak sa tiež zmenší. Celkovú výšku vzduchového stĺpca tvorí vzdialenosť od zeme po hornú hranicu atmosféry. Ak teda budeme stúpať, výška stĺpca  $h$  sa bude znižovať, a tlak vzduchu bude následne klesať. S rastúcou výškou tlak vzduchu klesá. V prípade, že by atmosféra bola hustotne homogénna, teda jej hustota by bola konštantná v celom objeme stĺpca, bol by priebeh poklesu tlaku vzduchu lineárny. Hustota však s rastúcou výškou klesá nelineárne v dôsledku stlačiteľnosti vzduchu a zmien teploty s výškou. Pokles tlaku vzduchu s výškou je preto zložitejší a je skôr exponenciálny. Zmeny tlaku vzduchu s meniacou sa výškou sa využívajú pri barometrickom meraní výšok v letectve.



Obrázok 1 Nelineárna zmena hustoty vzduchu s rastúcou výškou

Na meranie tlaku vzduchu sa v meteorológii používajú tlakomery alebo tiež barometre. Na zaznamenávanie priebehu tlaku v čase slúži zariadenie zvané barograf alebo mikrobarograf. V minulosti sa na meranie tlaku vzduchu využívali ortuťové barometre, ktoré zo zdravotných dôvodov nahradili digitálne metódy merania. Ortuťové barometre boli navyše časovo náročné na meranie, z dôvodu prepočítavanie teplotných opráv teplotnej rozpínavosti ortuťového stĺpca v tlakomernej pipete, kedy sa ortuť v tlakomere správala podobne ako v teplomere.

Jednotky tlaku vzduchu sú:

- Pa (Pascal), no častejšie sa využívajú násobky ako hPa( hekto – stovky Pascalov);
- Bar alebo mBar;
- Torr;
- At (Atmosféra);
- inHG (inches of mercury – palce ortuťového stĺpca).

Platí medzi nimi prevodný vzťah:

1 At = 1013,25 hPa = 1013,25 mBar = 760 Torr = 29,92 ihHg

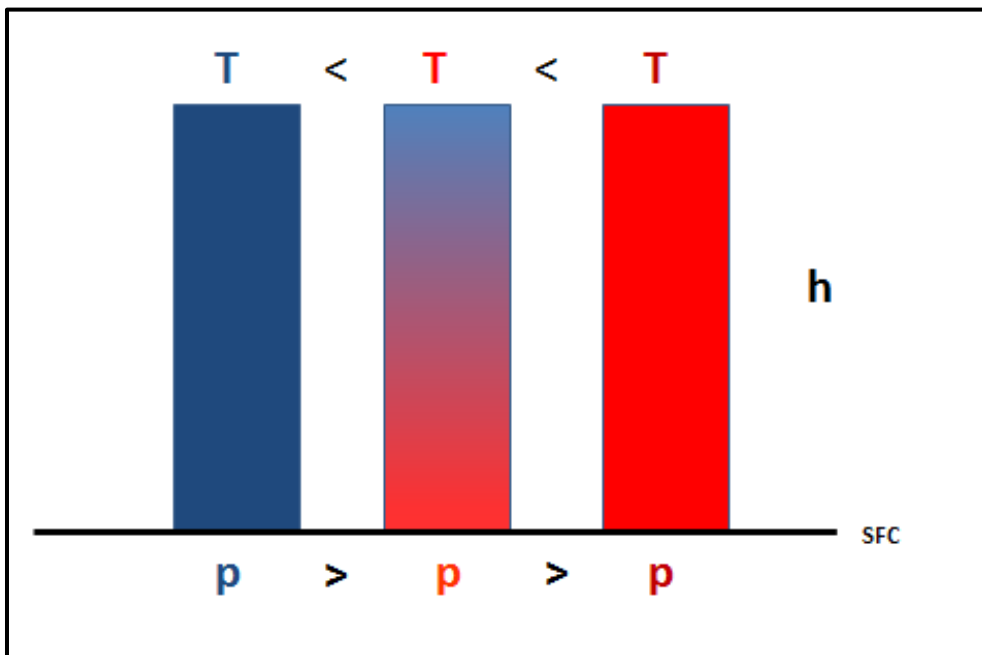
Uvedené hodnoty sú zároveň hodnotami tlaku vzduchu podľa MSA na úrovni mora. Pri tlaku je potrebné zdefinovať si pojem izobara.

### 2.1.2 Vzťah medzi hustotou teplotou a tlakom

Tlak vzduchu je priamo úmerný jeho hustote. Keďže hustota vzduchu je nepriamo úmerná jeho teplote bude pri porovnávaní stĺpcov vzduchu s rovnakou výškou platiť, že:

- **chladnejší vzduch je hustejší a tlak vzduchu v ňom je vyšší;**
- **teplejší vzduch je redší a tlak vzduchu je v ňom nižší .**

Dôsledkom rozdielnej hustoty vzduchu sa z termických príčin budú v chladnejšom vzduchu tvoriť oblasti s vyšším tlakom tzv. tlakové výše, a naopak pre teplejšie oblasti bude charakteristický nižší tlak vzduchu alias tlakové nize. Tieto oblasti v meteorológii nazývame tlakové útvary.

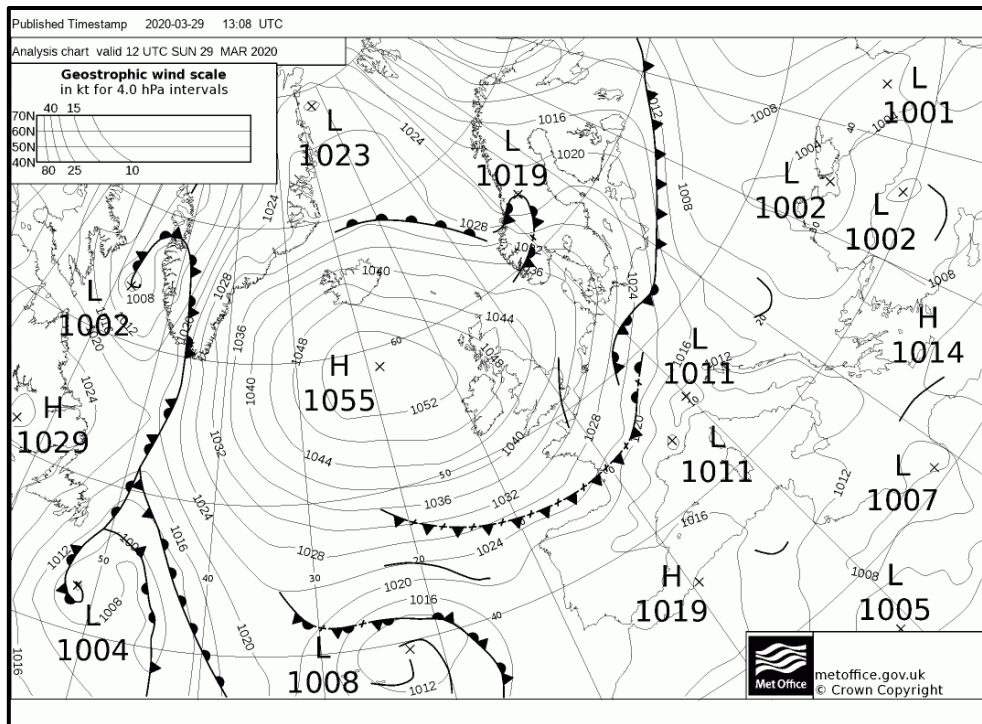


Obrázok 2 Vplyv rôznej teploty vzduchu na tlak vzduchu pri tej istej výške vzduchového stĺpca h

Medzi tlakovými útvarmi sa tvoria tlakové kontrasty kvantifikované ako rozdiel tlaku na jednotku vzdialenosti. Tento tlakový rozdiel nazývame **horizontálny tlakový gradient**. Má významnú úlohu pri tvorbe vetra. Je to vektorová veličina a smeruje vždy do oblasti s nižším tlakom vzduchu kolmo na izobary. Pri zmenách tlaku vzduchu vo vertikálnom smere hovoríme o vertikálnom tlakovom gradiente. Obrátenou hodnotou zmeny tlaku vzduchu na jednotku vzdialenosti je **barický stupeň**. Vyjadruje vzdialenosť potrebnú na zmenu tlaku o jeden stupeň, zvyčajne o jeden hektopascal. Pre malé výšky je hodnota barického stupňa 8 výškových metrov. Tento fakt sa využíva v letectve na meranie výšky.

### 2.1.3 Tlakové útvary

V princípe rozoznávame dva druhy tlakových útvarov. Cyklóny alebo tlakové nize a anticyklóny zvané i tlakové výše. **Cyklóna** je tlakový útvar v ktorej strede je tlak najnižší smerom od stredu tlak narastá. Celý útvar rotuje na severnej pologuli proti smeru hodinových ručičiek. V samotnom tlakovom útvaru prevládajú vzostupné prúdy, ktoré podporujú vznik oblačnosti a zrážok. Tlakové nize sú nositeľmi nestabilného počasia. Odvođeným útvarom je brázda nízkeho tlaku vzduchu. Opak je **anticyklóna** alebo tlaková výš. V strede sa nachádza oblasť s najvyšším tlakom vzduchu, ktorý smerom k okraju útvaru klesá. V anticyklóne prevládajú zostupné prúdy, ktoré zamedzujú tvorbu oblačnosti. Celý tlakový útvar rotuje na severnej pologuli v smere hodinových ručičiek. Anticyklóny sú nositeľmi stabilného počasia s malou oblačnosťou a bez zrážok. Odvođeným tlakovým útvarom je hrebeň vyššieho tlaku vzduchu. Tlakové útvary sú vyjadrené na mapách prízemnej analýzy tlaku vzduchu izobarami, podobne ako sú na fyzicko-geografických mapách vyjadrené pohoria a údolia.



Obrázok 3 Analýzy tlaku vzduchu pri zemi. H – High, tlaková výš, L – Low, tlaková níž

Izobary pritom predstavujú vrstevnice. Každá izobara na svete je kontinuálna, no keď zobrazíme iba výrez istej časti zeme, na okrajoch mapy izobary končia alebo do mapy vstupujú. Hrebene a brázd na takejto mape nadobúdajú i vizuálny zmysel podľa svojho pomenovania.

## 2.2 Medzinárodná štandardná atmosféra ICAO

Z dôvodu, že tlak a teplota sú premenlivé veličiny v čase a priestore bolo pre letectvo potrebné prijať jednotný etalón, podľa ktorého by bolo možné kdekoľvek na svete:

- jednotne kalibrovať letecké prístroje pracujúce na princípe barometrickej metódy;
- navrhovať a testovať nové lietadlá;
- porovnávať letové výkony lietadiel.

Medzinárodná štandardná atmosféra (MSA) je vypočítaný statický model vertikálneho rozloženia tlaku, teploty, hustoty suchého vzduchu. V leteckej meteorológii je používaná štandardná atmosféra ICAO, ktorá bola po prvý krát schválená v roku 1952. V roku 1993 bol prijatý aktualizovaný model. Vyjadruje vzťah medzi výškou a tlakom za určitých podmienok. ICAO prijala aktualizovaný model MSA v roku 1993. Matematický model MSA podľa ICAO siaha od výšky – 5 km do 80 km. Z praktických dôvodov uvažujeme o MSA od výšky 0 MSL do 20 km.

### 2.2.1 Vlastnosti MSA v nulovej nadmorskej výške sú:

- teplota  $T = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- Tlak  $p = 1013,25 \text{ hPa}$ ;
- hustota  $\rho = 1225 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;
- teplota mrznutia vody  $273,15 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ;
- vertikálny teplotný gradient  $0,65 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$  do výšky 11 km;
- od 11 km do 20 km teplota konštantná  $-56,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- výška tropopauzy je 11 km.

Okrem letectva má MSA využitie v meteorológii pri porovnávaní a integrovaní meteorologických meraní, modelovaní atmosférických dejov a pri prepočtoch tlaku vzduchu na hladinu mora podľa MSA, známy ako tlak QNH, ktorý je dôležitý pre správne meranie výšky letu.

## 2.3 Meranie výšky

Meranie výšky v letectve má zásadný význam pre bezpečnosť. Výškomer je jedným zo základných prístrojov potrebných pre pilotáž, ktorý sa používa vo všetkých lietajúcich aparátoch od balónov po nadzvukové lietadlá. Informácia o výške musí byť čo najpresnejšia a je jednou z najdôležitejších informácií pre pilota alebo autopilota pre zabezpečenie bezpečnosti letu. Správnym určením výšky letu sa eliminuje kolízia s výškovými prekážkami a pomocou neho sa dodržiava minimálna bezpečnostná výška. Meranie výšky je nepostrádateľné pri zabezpečení výškových rozstupov medzi lietadlami. Čím hustejšia je letecká doprava, tým väčší dôraz je kladený na správne meranie výšky. Výšku možno merať niekoľkými spôsobmi, využívajúce rôzne princípy i konštrukčné riešenia:

- Rádiovýškomerom;
- GPS;
- barometrickým výškomerom.

Rôzne spôsoby meranie výšky majú svoje výhody i nedostatky. Rádiovýškomer možno použiť v malých výškach pri konečnej fáze letu. Je veľmi presný, meria výšku nad terénom, ktorá je vo fáze priblíženia sa na pristátie dôležitejšia ako nadmorská výška. Pilot vie okamžite bez prepočítavania svoju výšku nad úrovňou pristávacej dráhy a má možnosť vykonania potrebných manévrov na korekcie rýchlosti klesania a správne tak upravil rozpočet na pristátie. Rádiovýškomeri však nie sú vybavené všetky lietadlá, pre jeho hmotnosť technickú náročnosť. Navyše pri lete vo veľkých výškach a veľkých rýchlostiach by toto zariadenie nepracovalo správne a informácie z neho by boli ťažko čitateľné, pre ich značnú premenlivosť v čase.

### 2.3.1 Meranie výšky pomocou GPS

Meranie výšky pomocou GPS zariadenia je náročné na presnosť použitého prijímača a náchylné na rušenie či už z kozmického priestoru alebo pozemnými rušičkami. Nie všetky lietadlá majú možnosť inštalovania týchto zariadení do palubnej dosky a nie je zaručená jednotná kalibrácia všetkých zariadení tak potrebná pre zabezpečenie výškových rozstupov medzi lietadlami. Preto sa využíva skôr na športové účely.



Obrázok 4 GPS prijímač

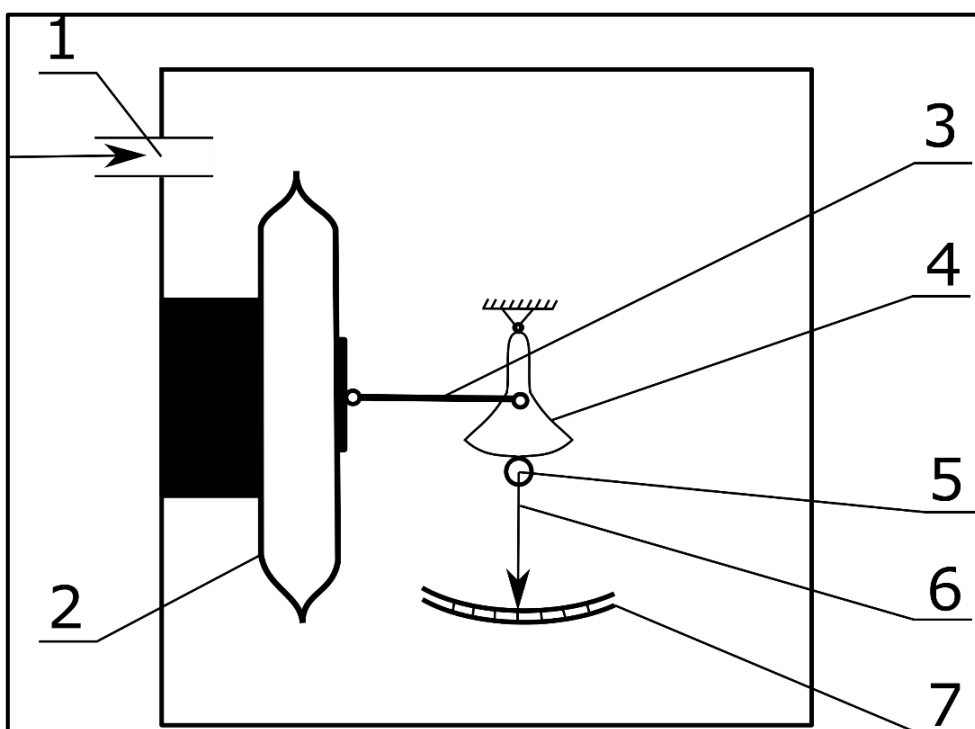
### 2.3.2 Barometrické meranie výšky – princíp

Najpoužívanejšou metódou stále pretrvávajúca barometrický princíp pre jeho spoľahlivosť, konštrukčnú nenáročnosť a možnosťou kalibrácie podľa MSA na všetkých typoch lietadiel na celom svete. História konštrukčného riešenia barometrického výškomera možno vystopovať do roku 1928, kedy si Paul Kollsman, americký vedec nemeckého pôvodu nechal patentovať prvý výškomer založený na barometrickej metóde. Následne na to v roku 1929, presnejšie 24. septembra, uskutočnil gen. Doolittle prvý IFR let na svete za využitia, okrem iných prístrojov, tohto výškomera.



Obrázok 5 Barometrický výškomer

Barometrický výškomer je v podstate tlakomer, ktorý sa líši stupnicou. Namiesto tlaku sa odčíta priamo výška. Pri barometrickej metóde sa využíva zmena tlaku s výškou.



Obrázok 6 Konštrukčný princíp barometrického výškomera

Kde:

- 1 – prívod statického tlaku;
- 2 – tlakomerná krabica;
- 3 – prevodové tiahlo;
- 4 – segment s ozubením;
- 5 – pastorček ručičky;
- 6 – ručička;
- 7 – stupnica.

Tlak vzduchu s rastúcou výškou klesá. Meraním zmien tlaku oproti referenčnej hodnote teda možno dospieť k výške, ktorej tlak vzduchu prislúcha. Výšku na základe zmeny tlaku možno vypočítať podľa Laplaceovej formuly:

$$z_2 - z_1 = \frac{R}{g} \times \bar{T} \times \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Kde:

- $z_2$  a  $z_1$  znamenajú horná a dolná hranica vzduchovej vrstvy;
- $p_2$  a  $p_1$  sú tlaky prislúchajúce hornej a dolnej hranici vzduchovej vrstvy;
- $R$  je plynová konštanta;
- $g$  je gravitačné zrýchlenie;
- $\bar{T}$  je priemerná teplota vzduchovej vrstvy.

Túto formulu je možné slovne vyjadriť: „Rozdiel výšok je úmerný logaritmu obráteného pomeru rozdielu tlakov vzduchu“. Na základe rozdielu tlakov medzi hornou a dolnou hladinou vzduchovej vrstvy je možné zistiť výšku vzduchovej vrstvy od referenčnej hladiny. Na to je ale potrebné správne nastavenie výškomera. Podľa toho aký referenčný tlak je nastavený bude výškomer uvádzať výšku nad týmto tlakom. Ak na výškomere nastavíme tlak prepočítaný na hladinu mora, bude ukazovať výšku nad morom alebo ak nastavíme tlak nameraný v konkrétnej lokalite, výškomer bude ukazovať výšku nad touto lokalitou. Od nastavenia výškomera sa odvíjajú rôzne hodnoty výšok používané v letectve.

### 2.3.3 Barometrické meranie výšky – nastavenie výškomera

Výškomer svojim konštrukčným riešením umožňuje nastavenie rôznych hodnôt referenčného tlaku od hodnoty ktorej bude určovať výšku. Poznáme nasledovné možné nastavenia výškomera:

- QFE - lokálny tlak na letisku;
- QNH – tlak prepočítaný na hladinu mora podľa MSA;
- QNE – nastavenie na tlak 1013,25 hPa.

Pri nastavení výškomera na tlaku QFE, čiže tlak nameraný na letisku, bude referenčná hladina  $z_1$  nadmorská výška letiska a referenčný tlak  $p_1$  (symboly z Laplaceovej formule), tlak nameraný na letisku. Výškomer tak bude ukazovať výšku nad letiskom.

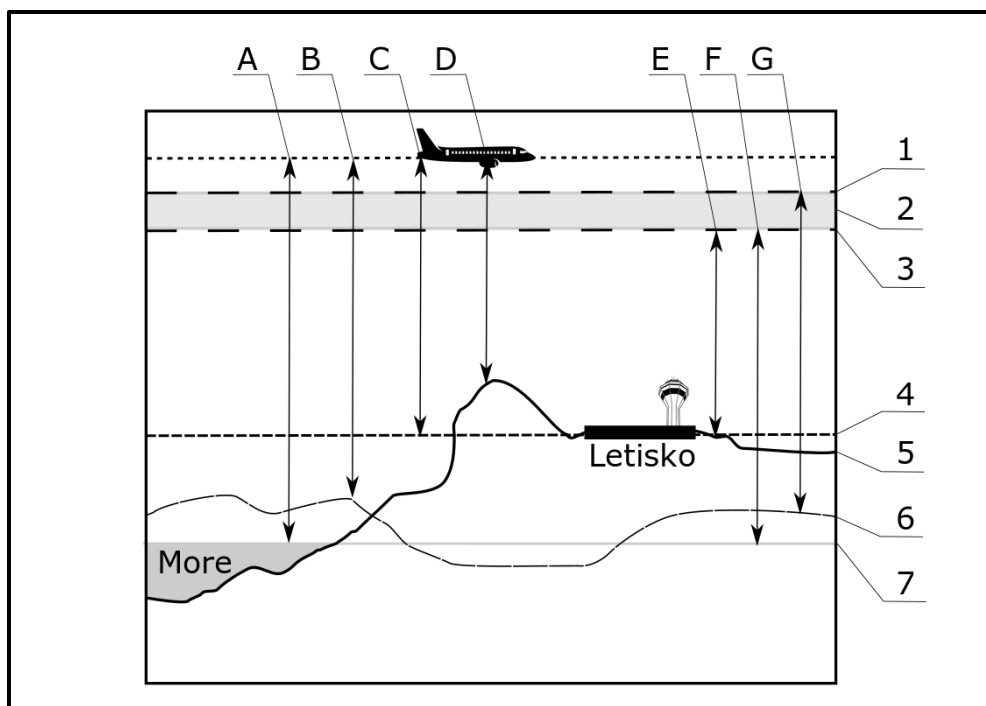
Ak na výškomere nastavíme tlak QNH, čiže tlak prepočítaný na hladinu mora podľa MSA, referenčná hladina  $z_1$  bude nulová výška nad morom a tlak  $p_1$  bude tlak na hladine mora. Pri tomto nastavení bude výškomer ukazovať nadmorskú výšku. Informáciu o hodnote tlaku na hladine mora dostane posádka lietadla od ATC.

Pri nastavení výškomera na fixný tlak 1013,25 bude výškomer ukazovať výšku nad hladinou prislúchajúcou tomuto tlaku, nezávisle na reálne nameranom tlaku meteorologickou službou. Toto nastavenie výškomera nazývame QNE. Posádky toto nastavenie používajú pri letoch v letových hladinách. Pri letoch na veľké vzdialenosti je výhodné použiť nastavenie na QNE z dôvodu značnej premenlivosti tlaku QNH pri ich prekonávaní. Je potrebné si uvedomiť, že pri letoch nad oceánom alebo nad riedko osídleným územím ako sú púšte alebo Sibír, údaje o nameranom tlaku úplne absentujú z dôvodu malého množstva meteorologických staníc v podobných oblastiach. Je ale nutné zabezpečiť bezpečné výškové rozstupy lietadiel. Na to je potrebné aby všetky lietadlá mali výškomery nastavené rovnako. To je dôvod, na používanie fixného tlaku od istej výšky ktorú nazývame prevodná hladina.

Výškomery sa ciachujú podľa zmien tlaku s výškou v podmienkach MSA.

- tlak a teplota pri strednej hladine mora zodpovedajú MSA;
- vertikálny teplotný gradient podľa MSA.





Kde:

- 1 – Previdná hladina;
- 2 – Previdná vrstva;
- 3 – Previdná výška;
- 4 – QFE – Tlak nameraný na letisku;
- 5 – Terén;
- 6 – QNE – 1013,25 hPa;
- 7 – QNH – Tlak prepočítaný na strednú hladinu mora podľa MSA;
- A – Výška absolútna (Altitude) - barometrickým výškometerom QNH;
- B - Letová hladina (Flight level) – meraná barometrickým výškometerom pri QNE;
- C – Výška relatívna (High) – meraná barometrickým výškometerom podľa QFE;
- D – Výška skutočná (True Altitude) – meraná rádiovýškometerom;
- E – Previdná výška (Transition High) – určená podľa QFE;
- F – Previdná výška (Transition Altitude) – určená podľa QNH;
- G – previdná hladina (Transition Level) – určená podľa QNE.

V letectve sú zavedené nasledovné pojmy v súvislosti s výškou:

- *Barometrická výška* je výška meraná barometrickým výškometerom. Atmosférický tlak je vyjadrený výškou ktorá jej odpovedá v MSA;
- *Letová hladina* výška udávaná barometrickým výškometerom nastaveným na hodnotu tlaku 1013 hPa. V letectve je zavedený pojem Flight Level (FL);
- *Hustotná výška* je výška nad strednou hladinou mora v ktorej sa daná atmosférická hustota vyskytuje v MSA;
- *Absolútna výška* je výška nad úrovňou mora. V letectve je zaužívaný pojem *Altitude*. Výškometer je nastavený na tlak QNH;
- *Relatívna výška* je výška nad istým referenčným bodom, zvyčajne nad úrovňou letiska, v tomto prípade je výškometer je nastavený na tlak QFE daného letiska;
- *Skutočná výška* je výška vyjadrená výškometerom opravená o chyby merania výškometra. V letectve je zavedený pojem True Altitude;
- *Výška nad terénom* je kolmá vertikálna vzdialenosť lietadla od zemského povrchu. Je možné ju merať za využitia rádiovýškometra nejedná sa teda o druh barometrickej výšky. V prípade, že sa lietadlo nachádza nad morom je možné túto výšku považovať súčasne za nadmorskú výšku (s malými odchýlkami, pretože nadmorská výška sa odvíja od strednej hladiny mora).

### 2.3.4 Chyby merania výšky

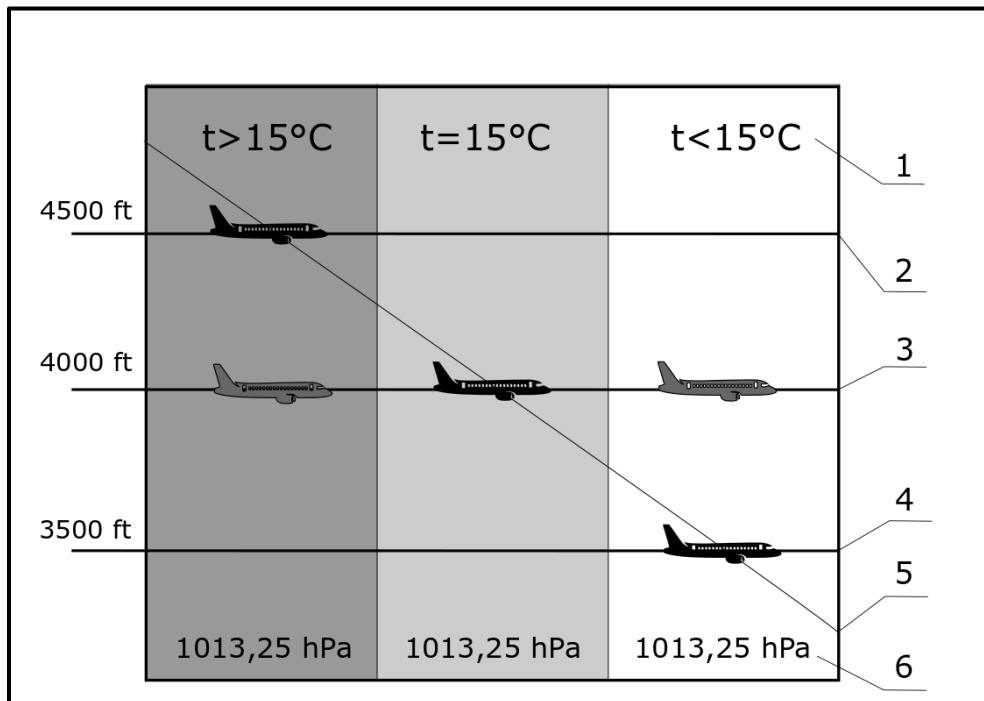
Výškomery sú kalibrované podľa zmien tlaku v podmienkach MSA. Modelové podmienky MSA sú reálne málokedy, údaje výškomera si teda vyžadujú opravy (korekcie). Prístrojové opravy vyplývajúce s konštrukčných vlastností samotného výškomera sa uvádzajú v tabuľke opráv alebo z grafu. V prípade, že tlak alebo teplota pod lietadlom je iná ako v MSA, výškomer vykazuje tlakové alebo teplotné chyby. Najpodstatnejšie sú teplotné chyby výškomerov, pretože znamenajú najväčšie riziko najmä v zimnom období a v oblastiach značne chladnejších ako podľa MSA.

V podmienkach letectva má zmysel uvažovať troch druhoch odchýlok od ukazovateľa výšky barometrického merania výšky:

- Teplotné chyby;
- Tlakové chyby;
- Chyby spôsobené orografickým zrýchlením prúdenia.

### 2.3.5 Teplotné odchýlky

Teplotné odchýlky sú najvýraznejšie z vyššie uvedených druhov chýb merania výšky a táto problematika je rozobraná najrozsiahlejšie zo všetkých. Teplotné chyby znamenajú potenciálne riziko pre bezpečnosť letania najmä v zimnom období pri nízkych záporných hodnotách teploty vzduchu. Predpokladajme že sa tlak nemení. Ak je vzduch pod lietadlom chladnejší ako podľa MSA, lietadlo je nižšie ako je hodnota nameraná výškomerom. Ak je vzduch pod lietadlom teplejší ako podľa MSA, lietadlo je vyššie ako je hodnota nameraná výškomerom.



Obrázok 7

Efekt teplotnej chyby na skutočnú výšku lietadla

Kde:

- 1 – Teplota vzduchu;
- 2 – Kladná chyba výšky;
- 3 – Indikovaná výška;
- 4 – Záporná chyba výšky;
- 5 – Skutočná výška;
- 6 – Tlak 1013,25 hPa.

Vyplyva to z faktu, že tlak vzduchu v chladnejšom vzduchu klesá rýchlejšia ako podľa MSA a naopak tlak vzduchu s výškou klesá pomalšie v teplejšom vzduchu ako je v MSA. Ak je barický stupeň podľa MSA v malých výškach

približne 8 metrov v teplejšom vzduchu to bude viac ako 8 metrov a v chladnejšom menej. Tento fakt dobre popisuje už spomínaná Laplaceova barometrická formula:

$$z_2 - z_1 = \frac{R}{g} \times \bar{T} \times \ln \frac{p_1}{p_2}$$

kde rozdiel hladín  $z_2 - z_1$  (výška) je priamo úmerný priemernej teplote vrstvy pod výškomerom. Zo zväčšujúcou sa priemernou teplotou pri tých istých prislúchajúcich tlakoch  $p_1$  a  $p_2$  rozdiel medzi hladinami  $z_2$  a  $z_1$  rastie. Z uvedených skutočností vyplýva, že riziko letu v menšej výške ako posádka lietadla v skutočnosti zamýšľa je reálne v zimnom období.

Chybu merania výškomera možno určiť nasledujúcim postupom:

1. určenie teplotnej odchýlky od MSA pre danú hladinu;
2. výpočet chyby merania výškomera;
3. korekcia údaju výškomera.

### Určenie teplotnej odchýlky od MSA $\Delta T$ (ISA deviation)

Na výpočet skutočnej výšky je nevyhnutné pri teplotných opravách určiť odchýlku teploty od MSA v istej špecifickej výške. Na to je potrebné určenie modelovej teploty podľa MSA v danej výške a následne možno určiť teplotnú odchýlku rozdielom medzi skutočnou vonkajšou teplotou prostredia a modelovou teplotou MSA. Teplota v nulovej výške podľa MSA je stanovená 15 °C, a súčasne vertikálny teplotný gradient je 0,65 °C na 100 m, čo činí približne 2 °C na 1000 FT. Teplotu v danej výške podľa MSA vypočítame.

$$T_{MSA} = 15 - 0,65 \times h \text{ [výška v 100 m]},$$

keďže v letectve je výška udávaná vo feetoch praktickejší bude vzťah:

$$T_{MSA} = 15 - 2 \times h \text{ [výška v 1000 ft]}$$

Príklad: Vypočítajte teplotu vo výške 10 000 FT.

$$T_{MSA} = 15 - 2 \times 10 = 15 - 20 = -5^\circ\text{C}$$

Odpoveď: Teplota vo výške 10 000 FT podľa MSA je  $-5^\circ\text{C}$ .

ISA deviation  $\Delta T$  následne vypočítame ako rozdiel nameranej teploty okolia a modelovej teploty  $T_{MSA}$ :

$$\Delta T = T - T_{MSA}$$

Príklad: Vypočítajte odchýlku teploty od MSA ak je vo výške 10 000 FT teplota  $-15^\circ\text{C}$ .

$$\Delta T = -15 - (15 - 2 \times 10) = -15 + 5 = -10^\circ\text{C}$$

Odpoveď: Odchýlka teploty vo výške 10 000 FT od MSA je  $-10^\circ\text{C}$ .

Ak je  $\Delta T$  kladná, t.j. teplota okolia je vyššia ako modelová teplota MSA, lietadlo sa nachádza vyššie ako je hodnota udávaná výškomerom, oprava bude teda kladná, a naopak v prípade zápornej odchýlky sa bude jednať o zápornú opravu, čiže lietadlo je v skutočnosti nižšie ako hodnota udávaná výškomerom.

## Výpočet chyby merania výškomera

Po výpočte ISA deviation možno pristúpiť k výpočtu prístrojovej opravy výškomera pri určitej teplote okolia. Približná oprava teplotnej chyby výškomera sa dá určiť pomocou vzťahu:

$$\Delta H_{temp} = \frac{\Delta T}{300} H_{pr}$$

Kde:

- $\Delta H_{temp}$  je teplotná oprava výškomera;
- $\Delta T$  je odchýlka teploty od štandardnej atmosféry (ISA deviation);
- $H_{pr}$  je údaj výškomera.

Príklad: Vypočítajte chybu merania výškomera ak je vo výške 10 000 FT teplota – 15 °C. Z predchádzajúcich výpočtov bolo zistené, že ISA deviation, teda  $\Delta T$  je – 10 °C.

$$\Delta H_{temp} = \frac{-10}{300} \times 10000 \approx -333 \text{ FT}$$

Odpoveď: Oprava údaju výšky výškomera je -333 FT.

## Korekcia údaju výškomera

Po výpočte veľkosti odchýlky od údaju výškomera možno túto hodnotu aplikovať na zistenie skutočnej výšky lietadla. Platí, že ak je odchýlka záporná, odpočíta sa od údaju výškomera a naopak. Znamienko hodnoty opravy údaju výškomera určuje jej zmysel, čo je len dôsledkom predchádzajúcich záverov. Platí, že v chladnejšom vzduchu budú odchýlky záporné, výškomery teda nadhodnocujú údaj o výške a zistenú odchýlku je nutné odrátať od údaju indikovaného prístrojom.

$$H_{real} = H_{pr} - \Delta H_{temp}$$

Príklad: Určite reálnu výšku lietadla ak výškomer na palube lietadla ukazuje 10 000 FT a vonkajšia teplota je – 15 °C. Z predchádzajúceho postupu vyplynulo, že pri teplote – 15 °C vo výške 10 000 FT je odchýlka od teploty podľa MSA -10 °C a tej následne prislúcha prístrojová oprava -333 FT, čiže:

$$H_{real} = 10\,000 - 333 = 9667 \text{ FT}$$

Odpoveď: Reálna výška lietadla pri teplote -15 °C a indikovanej výške 10 000 FT je 9667 FT.

Z uvedeného príkladu vyplýva, že v zimnom období pri väčších rozdieloch oproti priebehu teploty podľa MSA je nutné údaje výškomera korigovať v dôsledku chybnej indikácie, ktorá je navyše nadhodnotená a hrozí tak nedostatok rezervy výšky nad terénymi nerovnosťami. Ešte väčší problém môže znamenať nesprávna indikácia výšky v chladných oblastiach pri klesaní na pristátie kedy barometrická metóda vykazuje značné negatívne rozdiely, najmä pri dosiahnutí výšky rozhodnutia. Pre tieto prípady sú letiská vybavované tabuľkami opráv výšky rozhodnutia vzhľadom na teplotu vzduchu.

**Tabuľka 1** Korekcie výškomera pre výšky rozhodnutia pri záporných odchýlkach teploty vzduchu

Odchýlka od teploty v ISA	Výška nad letiskom v stopách								
	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
0									
-15	12	18	24	30	36	42	48	54	60
-25	20	30	40	50	60	70	80	90	100
-35	28	42	56	70	84	98	112	126	140

-45	36	54	72	90	108	126	144	162	180
-55	44	66	88	110	132	154	176	198	220
-65	52	78	104	130	156	182	208	234	260

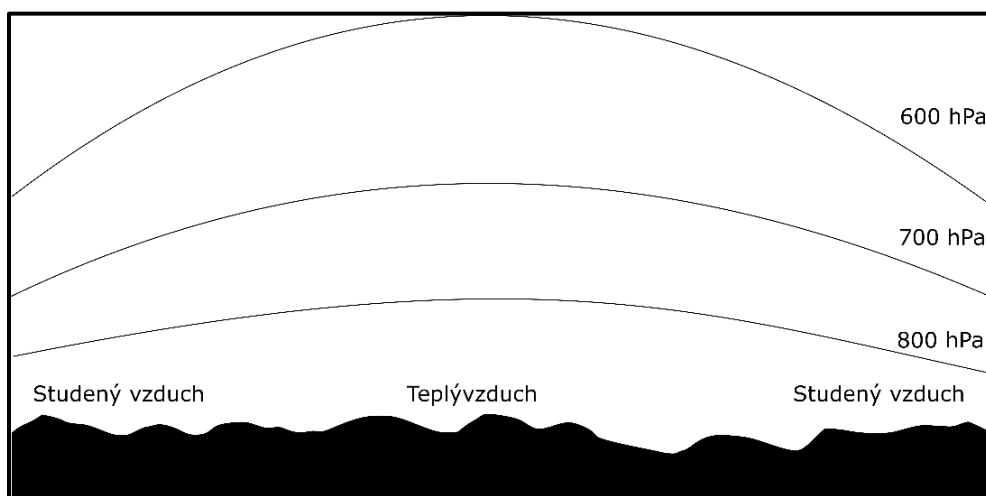
Tabuľka je platná pre letisko s nulovou nadmorskou výškou. Z tabuľky vyplýva, že odchýlky od skutočnej výšky pri záporných teplotách vzduchu najväčšie riziko v arktických oblastiach, kde pri dosiahnutí výšky rozhodnutia môžu dosahovať až 25 % rozdiel indikovanej výšky.

### 2.3.6 Tlakové odchýlky

Tento typ odchýlok údajov výškomera od skutočnej výšky vzniká pri preletoch cez oblasti z rôznym tlakom vzduchu. Nerovnomerné rozdelenie tlaku vzduchu v priestore je typickou vlastnosťou atmosféry. Pri preletoch z oblastí s vyšším tlakom do oblastí s nižším tlakom vzduchu (alebo naopak) vznikajú odchýlky od skutočnej výšky v dôsledku meniaceho sa tlaku vzduchu, pričom výškomer tieto zmeny vyhodnocuje ako zmenu výšky. Posádka, v reakcii na tieto nesprávne indikácie, sa snaží udržiavať tú istú výšku, nevedomujúc si, že v skutočnosti lietadlo klesá alebo stúpa. Ak predpokladáme, že teplota sa nemení, môžeme tieto odchýlky popísať nasledovne:

- Pri lete do oblasti **tlakovej nižšie je skutočná výška lietadla nižšia** ako udáva výškomer chyba merania je záporná;
- Pri lete do oblasti **tlakovej výššie je skutočná výška lietadla vyššia** ako udáva výškomer, chyba merania je kladná.

Dôvodom týchto odchýlok je kolísania výšky tlakových hladín medzi oblasťami s teplejším a chladnejším vzduchom. V teplejšom vzduchu tlak s výškou klesá pomalšie ako v studenom. Inými slovami povedané, barický stupeň v teplejšom vzduchu je väčší ako v chladnejšom vzduchu.

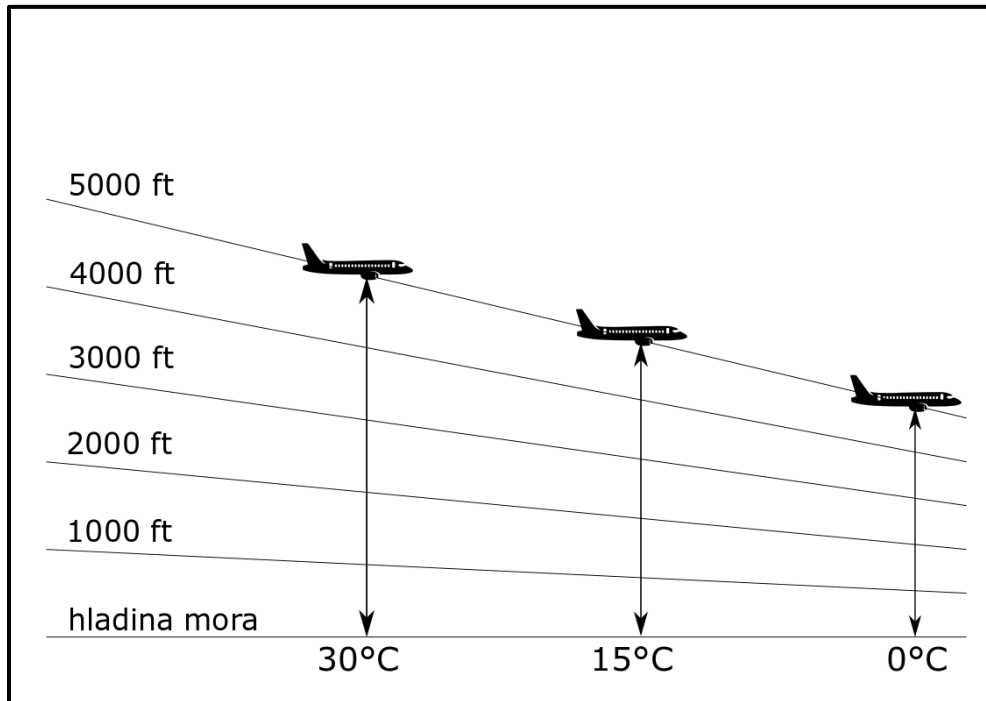


Obrázok 8 Vzostup tlakových hladín nad teplejšími oblasťami v dôsledku pomalšieho poklesu tlaku vzduchu

Ako už bolo spomenuté, výškomer je vo svojej podstate tlakomer a sleduje tlak vzduchu, nie výšku. Pri lete z tlakovej výššie do tlakovej nižšie bude sledovať napríklad tlak 600 hPa a posádka na to aby udržala rovnakú výšku podľa výškomera bude stúpať spolu s uvedeným tlakom. V prípade letu do tlakovej nižšie bude sledovať plochu tvoriacu rovnaký tlak, a bude klesať spolu so sklonom plochy. Potencionálnym rizikom je preto let z oblasti tlakovej výššie do oblasti tlakovej nižšie.

Ďalšie riziko predstavuje prípad výskytu dvoch lietadiel v rovnakom priestore, s výškomerom nastaveným na rôzne referenčné hodnoty tlaku. V takomto prípade môže dôjsť k situácii, že lietadlá sú v rovnakej výške, no posádky sú na základe údajov výškomerov presvedčené o bezpečnom výškovom rozstupe.

Na eliminovanie tlakových odchýlok sa v praxi využíva letová informačná služba, ktorá posádkam lietadiel poskytuje informácie o aktuálnom tlaku vzduchu a jeho zmenách. Posádka lietadla tak má možnosť nastaviť si na výškomery aktuálny tlak a týmto odchýlkam predchádzať.



Obrázok 9 Pokles lietadla pri lete z tlakovej výše do tlakovej níše.

### 2.3.7 Odchýlky merania výšky vplyvom topografického zrýchlenia

Vplyvom geografických podmienok môže dochádzať ku divergencii (rozchádzaniu) prúdenia alebo ku konvergencii. Divergentné prúdenie spôsobí zoslabenie prúdenia a konvergentné naopak jeho zosilnenie. Pri prúdení cez horskú prekážku zvyčajne dochádza ku zrýchleniu prúdenia a dynamickému poklesu tlaku vzduchu v tomto prúde. Tento efekt má za následok indikácie vyšších výšok ako je skutočná výška lietadla. Jedná sa o jav potenciálne nebezpečný a pri nedostatočnej výškovej rezerve môže dôjsť ku kolízii.

**Kontrolné otázky a úlohy overujúce pochopenie témy:**

- Vyslovte Newtonove pohybové zákony a popíšte ich aplikáciu v meteorológii.
- Vyslovte Archimedov zákon a opíšte jeho využitie pre letectvo.
- Čo sú to stavové veličiny? Pojednajte o ich vzájomnom vzťahu v atmosfére.
- Pri akých dejoch sa objem vzduchu ochladzuje?
- Aké je chemické zloženie atmosféry? Uveďte percentuálne zastúpenie jednotlivých plynov?
- Pojednajte o dôležitosti skleníkových plynov v atmosfére pre súčasné formy života na Zemi.
- Kde sa nachádza ozón a aký sú jeho efekty na život na Zemi?
- Uveďte základné vrstvy atmosféry podľa priebehu teploty rastúcou výškou.
- V ktorej vrstve sa odohrávajú prakticky všetky prejavy počasia a prečo?
- Popíšte efekty iónosféry.
- Uveďte charakteristiky homosféry a heterosféry.
- Definujte teplotu vzduchu.
- Akými procesmi prebieha ohrev atmosféry?
- Popíšte spôsob ohrevu a ochladzovania vzduchu radiáciou.
- Prečo sa menia ročné obdobia?