

Úloha IV.P ... pták Fykosák na dovolené

10 bodů; (chybí statistiky)

Jak by fungovalo letectví na jiných planetách (s atmosférou)? Zajímejte se hlavně o proudová letadla. Které parametry by působily pozitivněji a které negativněji než na Zemi?

Karel byl v muzeu letectví v Košicích.

Úvod

Úloha je značně otevřená a je možné ji uchopit různými způsoby. Pokusíme se pokrýt ty nejdůležitější parametry a popsat jejich vliv na létání. Letmo se zmíníme i o vybraných pravidlech létání ve spojitosti s měněnými fyzikálními parametry. Speciálně se budeme, dle zadání, věnovat proudovým letadlům. Ty mají motory, které vpředu natahují okolní vzduch. Ten se uvnitř stlačuje kompresory a následně se využívá pro spalování paliva (letecký petrolej či letecký benzín). Spaliny pak pokračují motorem dále k turbíně, kterou roztáčí, tudíž rotuje i osa motoru, na které jsou lopatky kompresoru. Současně s tím je letadlo poháněno díky principu akce a reakce.

„Prolétli“ jsme pouze základní princip motorů, který může být v jednotlivých aplikacích vylepšen dalšími technickými prvky. Výhodou proudových motorů je, že umožňují rychlejší let než vrtulové. Nevýhodou naopak, že základní typ tohoto motoru potřebuje pro vzlet dosáhnout netriviální minimální rychlosti, aby motor fungoval.

Pro jednoduchost budeme v následujícím textu často plyn v atmosféře planety nazývat vzduchem, i když může mít zcela odlišné složení. Nadpisy jsou zvoleny tak, aby se následující část textu věnovala více právě zmíněné fyzikální veličině, nicméně tyto parametry jsou často provázané a působí na letadlo a vlastnosti letu v kombinacích. Tím, že jsme zvolili proudové motory, automaticky jsme zvolili i letadla s přetlakovými kabinami. Létají totiž tak vysoko, že by lidem nebylo moc dobře.¹

Hustota atmosféry u povrchu planety

Na planetě bez atmosféry bychom nemohli letadla vůbec využívat. Ze vzduchu je využíván kyslík na spalování paliva. Neméně důležité je látkové prostředí, které vytváří vztlak. Nedá se ovšem přímočaře říct, že čím větší hustota vzduchu, tím lépe ze všech hledisek. Jednoznačně ale platí, že čím hustější je atmosféra, tím nižší rychlost nám stačí pro vzletnutí.

Podívejme se nejprve, k čemu jsou letadlu motory. Tah motoru se využívá jak na vyrovnání tíhové síly, tak na vyrovnání odporu při letu (případně i zrychlování). Tíhová síla se vyrovnává tím, že křídla letadla svírají vůči letové hladině určitý úhel (úhel náběhu). Dalo by se říct, že to je pro nás užitečná část odporové síly, tedy vztlak. Část spotřebovaná na odpor působící proti pohybu pro nás ovšem již tolik užitečná není a byli bychom raději, kdyby byl tento odpor minimální, případně by nám umožnil co nejvyšší rychlost letadla. Ilustrativně se podívejme, jak závisí odporová síla na rychlosti tělesa. Při turbulentním proudění můžeme obvykle použít Newtonův odporový vztah

$$F_{\text{odp}} = \frac{1}{2}CS\rho v^2,$$

kde C je bezrozměrný koeficient určený tvarem tělesa, S průřez tělesa kolmý na směr pohybu, ρ hustota vzduchu a v je rychlost tělesa. Tento vzorec neplatí přesně pro libovolné rychlosti. U letadel pozorujeme, že odpor při letu prudce roste s tím, jak se rychlost letadla blíží rychlosti

¹Co si budeme povídat – většina lidí by po tak rychlém nastoupání do 11 km nad zemí zemřela na hypoxii. Jedině možná trénovaní horolezci či potápěči by měli trochu šanci. Také je potřeba v letadle udržovat rozumně vysokou teplotu, protože turisté v žabkách by při teplotách kolem -55°C měli tendenci umrznout.

zvuku ve vzduchu (rychlosti Mach 1). Když ji nadzvukové letadlo překročí², pak se zpravidla odpor prostředí sníží a opět začne růst až pro výrazně vyšší rychlosti.³ Pro jednoduchost se nadále budeme tvářit, že Newtonův vztah funguje bez omezení. V praxi inženýři používají komplexní simulace a následně modely ve větrných tunelech, aby si ověřili správnost svých výpočtů.

Uvědomme si, že sílu můžeme rozložit do dvou směrů a vzorec platí jak pro směr pohybu letadla (osa x), tak pro směr proti tíhovému zrychlení (osa y), tedy

$$F_{\text{odp},x} = \frac{1}{2}C_x S_x \rho v_x^2, \quad F_{\text{odp},y} = \frac{1}{2}C_y S_y \rho v_y^2.$$

Vidíme, že jediná proměnná, která je pro obě osy přímočaře shodná, je hustota okolní atmosféry. Mohlo by se zdát, že letadlu letícímu v konstantní letové hladině odpovídá nulová vertikální rychlost. Musíme si ale uvědomit, že jde o relativní rychlost vzduchu vůči letadlu. Můžeme i vyjádřit, jak velká by měla být, aby vyrovnala tíhovou sílu $F_g = mg$, kde m je hmotnost letadla, takže

$$mg = \frac{1}{2}C_y S_y \rho v_y^2 \Rightarrow v_y = \sqrt{\frac{2mg}{C_y S_y \rho}}.$$

Jinak řečeno, kdybychom touto rychlostí foukali zesponu na letadlo, pak by se udrželo v konstantní výšce. Letadlo by však muselo být správně naklopené a neotáčet se. Nebo by musel náš fukar fungovat adaptivně podle toho, jak se vůči němu natáčí.

Měli bychom zmínit i aerostatickou vztlakovou sílu $F_{Vz} = \rho Vg$, kde V je objem letadla. U letadel na Zemi je docela dobře zanedbatelná kvůli nízké hustotě vzduchu. Pokud bychom byli na planetě s vysokou hustotou atmosféry, pak by nám mohla pomoci letadlo snadněji udržet ve vzduchu. Tím by se ovšem opět zvýšila odporová síla pro dopředný pohyb a letadlo by pravděpodobně dosahovalo výrazně nižších rychlostí.

Složení atmosféry

Aby mohlo v motoru probíhat spalování, potřebujeme atmosféru ze směsi plynů, která podporuje hoření palivové směsi. Pro stávající motory je ideální způsob natahování vzduchu z okolní atmosféry a následně spálení kyslíku. Mohli bychom motory upravit, aby spalovaly jiné látky či by si letadlo vezlo s sebou všechny složky nutné pro hoření paliva. Druhá možnost ovšem neodpovídá zájmu o proudová letadla, ale šlo by o raketový motor. U proudových motorů je důležitý proud vzduchu procházející skrz celý motor. Jsme tedy limitováni tím, že nějakou část palivové směsi chceme získávat z atmosféry.⁴ I pokud se omezíme na běžné hoření, tak můžeme získávat buď kyslík, nebo naopak palivo (např. plynné uhlovodíky). Důvodem, proč bychom nemohli sbírat jak palivo, tak kyslík, je, že by taková atmosféra měla nejspíše tendenci sama vzplanout, což pro létání není vhodné prostředí. Pokud by nevzplála sama, pak bychom ji pravděpodobně našim letadlem zapálili. Obdobně bychom asi nechtěli atmosféru s blížícím se podílem k 100 % kyslíku. Přestože kyslík není sám o sobě hořlavý, atmosféra s vysokým podílem kyslíku by podporovala hoření ještě výrazněji než naše. To by způsobovalo snadné vzplanutí téměř čehokoliv

²Což nedokáže každé letadlo, jak diskutujeme dále.

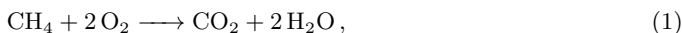
³https://en.wikipedia.org/wiki/Drag-divergence_Mach_number

⁴Přípustné by mohlo být létat s oběma přísadami pro hoření, současně do motoru vpouštět tyto složky, a ještě plyn z atmosféry, který by se také po spálení paliva ohřival, čímž by působil další tah. To by bylo možné i v inertní atmosféře. Nicméně je otázkou, jestli by se to konstrukčně vyplácelo a nebylo by lepší používat pouze plyny unikající po spalování. S nejvyšší pravděpodobností by přidávaný plyn zhoršoval účinnost spalování a bylo by těžší zajistit dokonalé spalování paliva.

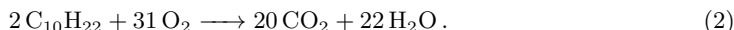
hořlavého umístěného do takového plynu. Současně by to vedlo k rychlé korozi konstrukčních materiálů letadla.

Skládování kyslíku je sice rizikové, ale mohli bychom to vyřešit tlakovými lahvemi na palubě. Atmosféra by pak musela obsahovat vhodný hořlavý plyn. Mohlo by se jednat například o směs podobnou zemnímu plynu, který se převážně skládá z methanu. Relevantní otázkou může být, jestli by bylo reálné takovým palivem něco pohánět a s jakou účinností. Opačně, tedy zemní plyn jako stlačené palivo z nádrže a kyslík z atmosféry, se používá běžně jako alternativní palivo pro auta. Samotná reakce je tedy vhodná pro pohon motorů obecně. Proudové motory letadel by se sice musely upravit, ale není to nemožné. Pokud se podíváme na výhřevnost zemního plynu, pak je dokonce o něco málo vyšší,⁵ a to $49 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ oproti $43 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ u kerosenu.⁶ Řádově jsou tyto hodnoty ale blízké. Navíc záleží na složení konkrétního zemního plynu a leteckého paliva, které se liší podle místa těžby. Možná by bylo vhodnější porovnávat spalná tepla, protože ta zahrnují, na rozdíl od výhřevnosti, i energii, kterou přijme voda uvolňující se při spalování. Poměr tepel by byl ale obdobný.

Jaké množství kyslíku bychom měli s sebou mít v letadle oproti konvenčnímu palivu pro letadlo na Zemi, kdybychom chtěli získat srovnatelnou energii? Pro to potřebujeme znát rovnici spalování. Vyjdeme z dokonalého spalování, protože se budeme snažit motor upravit tak, aby i v nové atmosféře byl co neúčinnější. Dokonalé spalování je pro nás tak výhodnější než nedokonalé probíhající za nedostatku kyslíku. Pro methan (hlavní složku zemního plynu) vypadá rovnice takto



a spalování dekanu (letecký petrolej se skládá z uhlíkových řetězců dlouhých od 9 do 16 uhlíků) je



Spotřeba paliva na Zemi je např. pro letadlo Boeing 747 něco pod 2,4 l na 100 km a jednoho pasažéra.⁷ To je mimochodem méně než spotřeba většiny aut, pokud v autě jede jeden až dva cestující. Z rovnice (2), molární hmotnosti dekanu⁸ $M_{\text{m,dek}} = 142,3 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ a kyslíku $M_{\text{m,O}_2} = 32,00 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ dostáváme poměr

$$k_{\text{dek}} = \frac{31}{2} \frac{M_{\text{m,O}_2}}{M_{\text{m,dek}}} \doteq 3,49,$$

který nám říká, že na jeden kilogram dekanu potřebujeme spálit tři a půl kilogramu kyslíku. U dekanu je pro nás jednoznačně výhodou, že samotné palivo je lehčí než kyslík, když musíme nést palivo s sebou. Čím těžší letadlo musíme udržet ve vzduchu, tím více spotřebujeme paliva. Podívejme se na tento poměr pro methan⁹ s $M_{\text{m,met}} = 16,04 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Ten je

$$k_{\text{met}} = \frac{2}{1} \frac{M_{\text{m,O}_2}}{M_{\text{m,met}}} \doteq 3,99,$$

což je pro nás velice nevýhodný poměr. Abychom mohli používat methan či další uhlovodíky z atmosféry jako palivo a nést si s sebou kyslík jako oksyličovadlo, pak bychom pro možnost

⁵Přepočteno na hmotnost z <http://www.cng4you.cz/cng-info/co-je-zemni-plyn.html>.

⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Aviation_fuel

⁷Při obsazenosti 500 cestujících dle <https://www.flyradar.cz/letadla/spotreba-paliva-dopravniho-letadla/>.

⁸[https://cs.wikipedia.org/wiki/Dekan_\(uhlovodik\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Dekan_(uhlovodik))

⁹<https://cs.wikipedia.org/wiki/Methan>

spálení srovnatelného hmotnosti paliva museli nést zhruba čtyřnásobnou hmotnost kyslíku. Výhřevnost, resp. spalné teplo, sice byly o něco málo vyšší, ale museli bychom nést i tlakové nádoby na kyslík, které by byly těžší než standardní nádrže na letecký benzín. Spotřeba letadla by tak opět vzrostla. Neříkáme, že by bylo nemožné létat s tímto obráceným režimem, ale jistě by to bylo náročnější a záleželo by na dalších parametrech atmosféry.¹⁰

Atmosféra by musela být složená buď z málo korozivních plynů,¹¹ nebo bychom museli letadlo upravit tak, aby v dané atmosféře rychle nekorodovalo. Zrovna v motorech, v nichž je vysoká teplota, by to mohla být konstrukční výzva. Museli bychom pokrývat všechny exponované povrchy dostatečně silnou protikorozní vrstvou, která by je izolovala od atmosféry. Na Zemi používáme za tímto účelem různé laky a mazání. Ostatně sám kyslík je korozivní plyn. Nebo bychom museli nějaké součástky zcela nahradit jinými, například z keramiky, která je ovšem křehčí.

Tíhové zrychlení

Uvažujeme planety, kde je odstředivá složka síly prakticky zanedbatelná vůči gravitační. U přirozené vzniklé planety odstředivá síla nesmí převýšit gravitační, protože by odletoval materiál z jejího povrchu a planeta by byla jako celek nestabilní. Velká odstředivá síla by byla známkou rychlé rotace planety, která by způsobovala silné větry na jejím povrchu. Znamenalo by to nepraktičnosti i v tom, že by mohlo být někde výrazně snazší odstartovat než jinde a záleželo by na tom, kterým směrem letadlo vzlétá.

Tíhové zrychlení primárně určuje potřebný vztlak pro letadlo. Čím vyšší je tíhová síla, tím větší část tahu motoru musíme investovat do vztlaku. Motor musí být schopný mít tah vyšší než

$$F_{\min} = F_g - F_{vz} = (m - \rho V) g,$$

aby se letadlo udrželo ve vzduchu. Jak vidíme, při vysoké hustotě atmosféry je vliv tíhové síly slabší, protože na letadlo působí současně vztlaková síla, která také závisí na tíhovém zrychlení.

Srovnajme víc planet, které by měly stejné chemické složení atmosféry, stejný poloměr a u povrchu stejnou hustotu vzduchu. Planeta s vyšší střední hustotou, a tedy vyšším povrchovým tíhovým zrychlením, bude mít větší gradient tlaku. Jinak řečeno, tlak vzduchu bude rychleji klesat s výškou. To se nám může hodit, pokud naše motory mají vyšší účinnost v řidším vzduchu, ale je krátkozraké považovat to pouze za výhodu. Současně se nám může stát, že nebudeme moci přestoupat nejvyšší hory na planetě, protože letadlo nebude mít potřebný dostup.¹² Tím se vracíme k prvnímu podnadpisu, kde jsme u hustoty vzduchu zmínili odporovou sílu, jejíž diskuzi jsme ještě nevyčerpali. Pro každou výšku totiž existuje minimální a maximální rychlost, kterou musí letadlo letět, aby nespadlo. Minimální rychlost letadla je dána nutností generovat dostatečný vztlak. Protože s výškou klesá hustota vzduchu (a odporová síla, případně vztlaková síla), ale neklesá hmotnost letadla, tak se minimální nutná rychlost zvyšuje. Maximální rychlost je dána zpravidla tím, že letadla nejsou konstruována na to, aby překonala Mach 1. Když se jí letadlo blíží, tak odpor prudce roste. Na některých částech trupu či křídel pak dochází k překročení rychlosti zvuku dříve než na jiných a běžné subsonické letadlo se stává

¹⁰Pokud bychom měli nést jak kyslík, tak palivo, pak by byly nároky na skladování ještě vyšší. Zejména kdybychom si nejspíše snížili jeho účinnost přidáním místní atmosféry do směsi.

¹¹Atmosféra Venuše by pro naše letadlo rozhodně nebyla žádná „hitovka“. Kyselina sírová či kyselina fosforečná nejsou zrovna inertní plyny.

¹²Dostup je maximální výška, do které může letadlo vystoupat. Může jít o konstrukční hodnotu udávanou výrobcem. Reálný maximální dostup letadla pak závisí na jeho aktuální hmotnosti.

nestabilní.¹³ S rostoucí výškou nad povrchem v naší atmosféře, kde se létá, teplota zpravidla klesá. Tím pádem se snižuje i rychlost zvuku ve vzduchu a klesá i maximální bezpečná rychlost letadla. Minimální a maximální rychlost se k sobě blíží, až se pro nějakou výšku protnou.¹⁴ Ve výšce, kde to nastane, je jediná přípustná rychlost letadla a při pouhé malé odchylce od ní dojde prakticky jistě k ztrátě vzlaku a pádu.¹⁵ Ale nemusí to mít fatální následky. Sem tam se to může stát i u dopravních letadel. V zemské atmosféře je výhodou, že jakmile letadlo začne padat, tak se dostává do výšek, kde je širší rozpětí možných rychlostí, takže je možné jej stabilizovat. Piloti jsou trénováni na to, aby tento manévr zvládli a letadlo vyrovnali v nižší letové hladině.

Další nevýhodou rychlého klesání tlaku s výškou je, že by bylo možné používat pouze menší počet letových hladin pro zachování bezpečných rozestupů mezi letadly. To by byl logistický problém, který by vyvstanul v čase, kdy by letadla na planetě používalo mnoho jejích obyvatel. Na Zemi jsme na to už narazili, ale vesmírné kolonizátory by to pravděpodobně nemuselo několik prvních let tolik trápit.

Teplota

Důležitá je jak teplota u povrchu planety, tak teplota atmosférického profilu. Pokud by se jednalo o atmosféru podobnou Zemi, tak bychom čekali pokles teploty s výškou nad povrchem planety v rámci většiny relevantních výšek pro létání. Ale i na Zemi je od 11 km do 20 km teplota obvykle konstantní,¹⁶ přičemž civilní proudová letadla stoupají až nad 11 km. Samozřejmě že různé vrstvy atmosféry mohou s přichozím slunečním zářením reagovat různě, podobně jako to dělá ozonová vrstva či ionosféra.

Vyšší teplota znamená nižší hustotu vzduchu za stejného tlaku. To znamená nižší vzlak, resp. vyšší potřebný tah motoru pro start a let.¹⁷

Teplota T společně s velikostí a hustotou planety nám dává omezení na to, jaké plyny vůbec může planeta udržet ve své atmosféře. Platí, že úniková rychlost částice z povrchu¹⁸ je

$$v_{\text{esc}} = \sqrt{\frac{2GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}}.$$

Střední rychlost molekuly plynu je

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M_m}},$$

kde k je Boltzmannova konstanta, m hmotnost molekuly plynu, R molární plynová konstanta a M_m molární hmotnost molekuly. Vidíme, že čím hmotnější molekula, tím se při stejné teplotě pohybuje pomaleji a tím spíše nepřekoná únikovou rychlost. To je jeden z důvodů, proč na terestrických planetách není v atmosféře mnoho vodíku či helia.

¹³Limity mají i nadzvuková letadla, ale zde se věnujeme hlavně „mainstreamu“.

¹⁴Výstižný anglický název pro tento jev je coffin corner, viz [https://en.wikipedia.org/wiki/Coffin_corner_\(aerodynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Coffin_corner_(aerodynamics)).

¹⁵Pokud by parametry atmosféry všude závisely pouze na výšce, tak bychom se ani nemohli s letadlem dostat na či dokonce nad tuto výšku. Nicméně atmosféra není všude stejná, takže tato výška se místo od místa liší.

¹⁶Pro výpočty v letectví se používají parametry Standardní atmosféry, viz např. https://cs.wikipedia.org/wiki/Standardní_atmosféra.

¹⁷Například proto dříve některá letadla mohla z oblastí s vysokou teplotou startovat naplněná jenom na polovinu kapacity cestujících a nákladu.

¹⁸Mohli bychom ji vypočítat z toho, jakou kinetickou energii musí částice mít, aby unikla až do nekonečna.

Všechny částice v plynu však nemají pouze jedinou rychlost. Jejich rychlosti se řídí Maxwellovým-Boltzmannovým rozdělením.¹⁹ Distribuční funkce je

$$f(v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{M_m}{RT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{M_m v^2}{2RT}}.$$

Ta nám říká, že pravděpodobnost, že rychlost částice spadá do intervalu $\langle v, v + dv \rangle$, je rovna $f(v) dv$. Alespoň 0,1 % částic z celkového počtu bude mít rychlost trojnásobnou či vyšší vzhledem ke střední rychlosti. Nestačí, aby pro daný plyn byla úniková rychlost vyšší než jeho střední rychlost. Je potřeba, aby byla aspoň tak pětikrát vyšší,²⁰ aby nedocházelo k úniku tohoto plynu z atmosféry.

Další faktor, který limituje možné částice v atmosféře, je sluneční vítr. Ten plyny kvůli srážkám odvádá pryč, zejména pokud není atmosféra chráněna magnetickým polem.²¹ Toto má největší vliv na částice, které mají podobnou hmotnost jako částice slunečního větru, tedy jádra vodíku a helia.

Pokud porovnáme víc podobných planet,²² které jsou v různé vzdálenosti od svého slunce, pak vyšší teplota na povrchu by měla znamenat vyšší teplotu celého vzduchového sloupce. Pokud bychom zajišťovali rozestupy letovými hladinami, tedy letadla by létala ve stejné tlakové výšce, tak by byly vzdálenosti mezi letovými hladinami vyšší než na chladnější planetě. Pokud bychom chtěli nastoupat do stejné tlakové hladiny, pak bychom museli stoupat déle. Na druhou stranu by se mohly na této planetě nastavit bezpečné rozestupy na menší rozdílů tlaků a byl by možný provoz ve více letových hladinách.

Počasí

Rozhodně nejde létat v nestabilní atmosféře, kde by probíhaly neustálé bouřky nad celým povrchem planety. Minimálně ne se současnými letadly, pro které jsou tyto podmínky velmi nevhodné. Pokud je nad letištěm bouřka, tak letadlo obvykle divertuje²³ na jiné bezpečné letiště. Problematické jsou jak blesky, tak vítr, zejména jeho poryvy a rychlé změny.

Proberme trochu více vliv větru. Při startu i přistání letadla je potřeba, aby byl vítr buď co nejmenší, nebo aby váł směrem proti letadlu. Protivítr totiž zvětšuje vztlak letadla, což se hodí jak při startu, kdy se letadlo dostane do letuschopného režimu při nižší rychlosti vůči zemi, tak i při přistání. Rozumně silný protivítr tedy letadlu pomáhá. Nebezpečnou situaci může být ztráta vztlaku způsobená větrem do zad letadla. Proto se na letišti střídá směr dráhy v užívání podle aktuální rychlosti a směru větru. Při bočním větru musí letadlo tento vítr kompenzovat natočením, což jde pouze pro nízké rychlosti. Velké rychlosti nelze bezpečně vyrovnat. Pokud má letiště pouze jednu dráhu či pouze paralelní dráhy a je silný boční vítr, pak letadlo nesmí vzlétnout ani přistát. Například na pražském letišti v Ruzyni²⁴ se dráha změní, pokud je zadní

¹⁹https://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell-Boltzmann_distribution#Typical_speeds

²⁰Přesněji řečeno, čím vyšší bude tento poměr, tím lépe a atmosféra nám vydrží na planetě déle.

²¹Sice to není úplně k letadlům, ale z tohoto důvodu nevznikli velcí plynoví obři v blízkosti Slunce. To totiž začalo s termojadernými reakcemi ve svém jádru ještě před zformováním planet. Sluneční vítr tedy ještě snadněji odvál plyn předtím, než se ochladil natolik, aby se mohl udržet na nějaké planetě.

²²Podobný poměr, hmotnost, složení atmosféry a její hmotnost.

²³Změní cílové letiště.

²⁴Dle článku 2.21.2.4 v AIP Czech Republic na stranách AD 2-LKPR-24 až AD 2-LKPR-25, které naleznete v dokumentu https://aim.rlp.cz/ais_data/aip/data/valid/a2-pr-txt2.pdf.

složka větru vyšší než $9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ nebo boční větší než $28 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Obě hodnoty jsou včetně nárazů,²⁵ které jsou pro pilota ještě nepříjemnější než samotný stálý vítr.

Srážky či mraky a mlha ovlivňují účinnost proudových motorů. Jsou totiž natahovány do motorů, kde se odpařují. Tím také zabírají určité místo ve spalovací části motoru a mohou vést k nedokonalému spalování směsi. Zpravidla bychom tedy čekali, že dojde ke snížení účinnosti motoru. Hypoteticky by mohlo odpaření menšího množství kapaliny vést k zvýšení tlaku, a tak i zvýšení tahu motoru. Pravděpodobnější ale je pokles výkonu. Některé proudové motory umí vzduch vstupující do motoru filtrovat tak, že do spalovací komory pouští jenom plynné částice a kapalné či pevné projdou jinou cestou. Tím se minimalizuje jejich vliv na výkon motoru. Jednoznačně problematické je, pokud je natahovaného materiálu velké množství. V tom případě může nastat tzv. „flameout“, tedy vyhasnutí motoru, čímž přijdeme o veškerý vztlak. Na Zemi se to stane zřídka, protože se letadla oblačnostem vyhýbají a malé množství jim neuškodí.

Další detaily

Povrch planety musí být dostatečně rovný, aby se na něm dalo vzlétnout a přistát s proudovým letadlem. Sice je možné povrch upravit, ale pokud by byla celá planeta hornatá, pak by stavba letišť mohla být značně komplikovaným problémem. Zejména, když by parametry atmosféry prodlužovaly startovací a přistávací dráhy a bylo by nutné vytvořit konstrukci skrz/přes několik hor.

Závěr

Určitě jsme nezmínili všechny možné vlivy, které může mít jiná situace na cizí planetě na letectví. Spíše než optimistickou předpovědí, jak vytvořit lepší planetu, šlo o výčet toho, co se může pokazit. To je ale takový základ. Jistě byste nechtěli letět v letadle, které se v průběhu letu rozpustí. Letadla by se ovšem mohla přizpůsobit a upravit svůj tvar, materiály nebo i technologii motorů podle místních podmínek.

Karel Kolář
karel@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

²⁵Nahodilé změny rychlosti větru. Obvykle mají nějakou maximální hodnotu, o kterou se mění, o čemž jsou informována přilétající letadla. Varování je to pouze přibližné a náraz může nastat kdykoliv. Pokud to přijde přímo v okamžiku přistání, tak si toho všimnete.