

ANALÝZA METEOROLOGICKÝCH BALÓNOV A SONDÁŽNYCH RAKIET AKO NÁSTROJOV NA VÝSKUM ATMOSFÉRY

ANALYSIS OF METEOROLOGICAL BALLOONS AND SOUNDING ROCKETS AS DEVICES FOR ATMOSPHERIC RESEARCH

Samuel Malárik

Katedra leteckej dopravy
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Robert Dianovský

Katedra leteckej dopravy
Žilinská univerzita v Žiline
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
dianovsky1@stud.uniza.sk

Abstract

This paper addresses the utilisation of meteorological balloons and sounding rockets for data collection for meteorological purposes. The first chapter introduces stratospheric balloons, meteorological balloons and sounding rockets. Their properties, components from which they are constructed, and their current applications are described. The second chapter compares the devices from three perspectives. The operational perspective focuses on flight profiles, control systems, possibilities for reusability, and risks associated with operation. The economic perspective concentrates on the costs associated with launches and possibilities for reduction. The legislative perspective examines the existing legislation pertaining to these devices. The third chapter presents a conceptual design for a sounding rocket, based on which approximate costs for its launch are determined. In conclusion are discussed the advantages and disadvantages of weather balloons and sounding rockets and the potential area of application for sounding rockets in meteorological measurements is identified.

Keywords

meteorological balloons, sounding rockets, atmospheric research

1. Úvod

Výskum horných vrstiev atmosféry je kľúčový pre lepšie pochopenie klimatických zmien, vývoja počasia a zabezpečenie bezpečnosti leteckej dopravy. Tradičné metódy, ako sú pozorovania zo zeme a satelitné snímky, neposkytujú údaje o celom priereze atmosféry, čo vedie k informačným medzerám. Na ich vyplnenie sa využívajú meteorologické a stratosférické balóny, ktoré sa zameriavajú na nižšie a stredné vrstvy atmosféry (troposféru a stratosféru), ako aj sondážne rakety, ktoré skúmajú vyššie vrstvy (stratosféru, mezosféru a termosféru). Tieto zariadenia umožňujú priame merania, čím dopĺňajú chýbajúce informácie.

2. Súčasný stav riešenej problematiky

Kapitola poskytuje prehľad súčasného poznania v oblasti vlastností zemskej atmosféry, možnosti jej prieskumu pomocou stratosférických balónov a sondážnych rakiet, ako aj technológií využívaných pri týchto letoch.

2.1. Atmosféra

Zemská atmosféra sa skladá z niekoľkých vrstiev: troposféra (do 12 km), stratosféra (12–50 km), mezosféra (50–80 km), termosféra (80–700 km) a exosféra (nad 700 km). Stratosféra je obzvlášť významná pre klimatológiu a letectvo, pretože poskytuje stabilné podmienky s nižšou turbulenciou a menej hustým vzduchom, čo prispieva k zníženiu spotreby paliva. V tejto vrstve sa nachádza aj ozónová vrstva, ktorá chráni

Zem pred ultrafialovým (UV) žiarením. Avšak znečistenie stratosféry môže mať negatívny dopad na klímu a ozónovú vrstvu. Preto je dôležité pochopiť jej dynamiku, aby sme mohli presnejšie predpovedať počasie (Aero Corner, 2020).

2.2. Meteorologické balóny a stratosférické balóny

Stratosférické balóny, známe aj ako high-altitude balloons (HAB), sú zariadenia určené na pozorovanie a zber dát vo vysokých nadmorských výškach. Meteorologické balóny a HAB sú navrhnuté na stratosférické lety a zvyčajne dosahujú výšky nad 18 km, pričom niektoré môžu na krátky čas preniknúť aj do dolnej mezosféry, ktorá sa nachádza vo výškach od 50 do 80 km (Ehrenfried, 2021).

Meteorologické balóny, známe aj ako sondážne balóny, sú používané meteorologickými ústavmi po celom svete. Sú vybavené rádiosondami, ktoré merajú atmosférické podmienky, ako sú tlak, teplota, vlhkosť, rýchlosť vetra a úroveň ozónu. Tieto balóny je možné sledovať pomocou radaru alebo GPS, vďaka čomu je možné získať informácie o rýchlosti a smere vetra. Zvyčajne sú vyrobené z latexu alebo syntetickej gumy a sú plnené vodíkom alebo héliom. Pri vypustení majú priemer 1–2 m, pri stúpaní sa zväčšujú v dôsledku poklesu tlaku. Prasknú, keď dosiahnu priemer 6–8 m, zvyčajne vo výške okolo 35 km. Po prasknutí sonda padá späť na Zem, často s padákom, ktorý znižuje rýchlosť pádu a riziko poškodenia. Vytrvalosť týchto balónov býva 1-2 hodiny (Ehrenfried, 2021).

Stratosférické balóny sú podstatne väčšie ako bežné meteorologické balóny, pričom niektoré môžu dosahovať veľkosť futbalového štadióna. Tieto balóny sa využívajú vo vedeckom výskume, testovaní technológií, pozorovaní vesmíru. Existujú dva hlavné typy:

Zero-pressure balóny (ZPB), ktoré dostali svoj názov, pretože vnútorný tlak balóna je rovný atmosférickému tlaku v okolí, v ktorom sa nachádzajú. Po dosiahnutí cieľovej výšky je tlak v balóne rovný okolitému prostrediu, pretože prebytočný plyn je vypustený, pretlak plynu v balóne je teda nulový. Sú vyrobené z jednovrstvového polyetylénu, môžu byť zosilnené, pre zvýšenie životnosti balóna. ZPB majú dostup 30 až 45 km a môžu vyniesť náklad o hmotnosti 2 až 3,6 ton. Vytrvalosť ZPB býva 5-6 dní (HEMERA: The European Community for Advanced Research in the Stratosphere, 2023).

Super-pressure balóny (SPB) udržiavajú pozitívny vnútorný tlak v porovnaní s prostredím, v ktorom sa vznášajú, pretože prebytočný plyn nie je vypustený. Vďaka tomu majú vyššiu stabilitu pri lete a dlhšiu vytrvalosť. Vytrvalosť SPB môže dosahovať až 100 dní. Konštrukcia SPB je ale zložitejšia, skladá sa z polyetylénových panelov, ktoré sú tepelne spojené a vystužené kevlarovými vláknami. Ich dostup a nosnosť je horšia, cca 34 km a maximálna nosnosť 1 tona (National Aeronautics and Space Administration, 2022).

2.3. Sondážne rakety

Sondážne rakety sú sub-orbitálne nosiče, ich trajektória je parabolická a umožňuje vyniesť rôzne vedecké prístroje do výšky od 50 do 350 km, pričom najvýkonnejšie modely dosahujú až 1400 km. Využívajú sa najmä na experimenty v mikrogravitácii a testovanie zariadení určených pre vesmírne misie. Let trvá väčšinou 5 až 20 minút (National Aeronautics and Space Administration, 2022).

Tento typ rakiet je obľúbený najmä pre výskum vo výškach 50 až 160 km, kam sa HAB nedostanú kvôli nízkej hustote vzduchu, ktorá spôsobuje rozťahovanie a prasknutie balóna. Satelity v tejto výške nemôžu letieť, pretože by kládli príliš veľký odpor a nevedeli udržať orbitu okolo Zeme (Sounding Rockets are unique Experimental Platforms, 2018).

2.3.1. Konštrukcia a systémy

Aby bolo možné realizovať lety v širokom rozmedzí výšok a s rôznou hmotnosťou nákladu, sú sondážne rakety vyrábané v rôznych veľkostiach. Napriek tomu sa každá z týchto rakiet skladá z niekoľkých rovnakých komponentov a systémov:

1. **Trup rakety** – zabezpečuje tvar a prenos síl, umiestňujú sa v ňom ďalšie systémy
2. **Raketový motor** – zabezpečuje ťah
3. **Palivový systém** – uskladňuje a zabezpečuje prívod paliva do motora
4. **Špička** – minimalizuje aerodynamický odpor
5. **Systém riadenia** – krídelká zabezpečujúce stabilitu
6. **Náklad**

7. **Oddeľovacie sekcie** – použité u viacstupňových rakiet

8. **Systém návratu** – umožňuje bezpečný návrat rakety

Z týchto komponentov sú najdôležitejšie motory a palivový systém, pretože priamo určujú výkon, maximálny dostup a nosnosť užitočného nákladu sondážnej rakety (Sounding Rockets are unique Experimental Platforms, 2018).

2.3.2. Typy palív

Motory na tuhé palivo sú jednoduché, lacné, môžu byť dlhodobo skladované, majú vysokú hustotu a umožňujú kompaktný dizajn rakiet. Ich nevýhodou je nemožnosť regulovať alebo prerušiť ťah po zapálení. Využívajú sa najmä v jedноступňových a prvých stupňoch viacstupňových rakiet (Pappalardo, 2018).

Motory na tekuté palivo využívajú kombináciu skvapalneného kyslíčovača a paliva. Vyžadujú samostatné nádrže, čerpadlá a často aj chladiaci systém. Motory sú preto technicky náročnejšie, drahšie a ťažšie, no umožňujú reguláciu ťahu a núdzové vypnutie, poskytujú vyšší špecifický impulz a tým aj lepšiu efektívnosť v porovnaní s motormi na tuhé palivo. Využívajú sa najmä v neskorších stupňoch viacstupňových rakiet a rakiet, kde riaditeľnosť zohráva veľkú rolu (Pappalardo, 2018).

Spojením týchto systémov dostaneme rakety s hybridným pohonom. Kombinujú vlastnosti vyššie uvedených pohonov. Sú efektívnejšie, bezpečnejšie ako rakety na tuhé palivá a jednoduchšie ako rakety na tekuté palivá.

3. Porovnanie balónov a rakiet

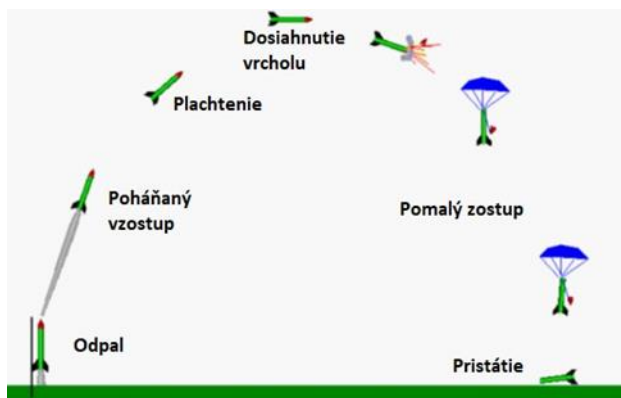
Predchádzajúce kapitoly analyzujú využitie meteorologických balónov, stratosférických balónov a sondážnych rakiet. Tieto systémy majú široké uplatnenie, no pre leteckú dopravu sú kľúčové najmä v meteorológii, keďže presné predpovede počasia sú nevyhnutné pre bezpečnú a plynulú prevádzku letov. Merania sa sústreďujú hlavne na troposféru a stratosféru, kde prebiehajú najvýznamnejšie zmeny ovplyvňujúce počasie.

Meteorologické balóny s rádiosondami sú hlavným nástrojom na sledovanie počasia, zatiaľ čo sondážne rakety sa dnes využívajú skôr na výskum vyšších vrstiev atmosféry (mezosféra, termosféra), čo vedie k „vedomostnej medzere“ v stratosférických dátach. Je dôležité preto vyhodnotiť, či by rakety mohli nahradiť alebo sa použiť spolu s balónmi, aby sa zlepšila kvalita meteorologických údajov.

3.1. Prevádzkové porovnanie

3.1.1. Meteorologické balóny

Letový profil meteorologických balónov sa skladá z 3 fáz: stúpania, prasknutia a zostupu.



Obrázok 1. Fázy letu balónov. Zdroj: (Tang, a iní, 2022).

Pred letom sa balón nafúkne požadovaným množstvom plynu, ktoré sa určuje pomocou výpočtových programov alebo online kalkulačiek. Po prípravách je možné balón vypustiť; stúpa rýchlosťou 3–5 m/s, pričom meteorologickému balónu trvá dosiahnuť 30 km asi 1,5–2 hodiny. Meteorologické balóny stúpajú konštantne až do prasknutia. Výška a doba pobytu závisia od typu balóna – meteorologické balóny dosahujú 18–30 km. Po dosiahnutí cieľovej výšky balón praskne a začne klesať. Klesanie je v prípade meteorologických balónov neriadene; ak je použitý padák, klesanie prebieha rýchlosťou 5–10 m/s (Ehrenfried, 2021) (Tang, a iní, 2022).

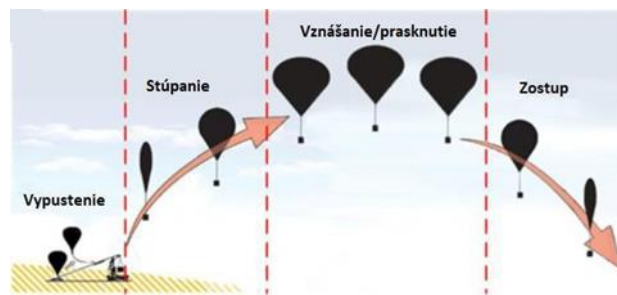
Meteorologické balóny nemajú tradičné ovládacie plochy, preto majú obmedzenú riaditeľnosť. Sú riadené pasívne pomocou prírodných síl a jednoduchých mechanizmov. Pred letom sa analyzujú výškové profily vetra a určí sa rýchlosť stúpania množstvom vztlakového plynu, vďaka čomu sa určuje približná trajektória letu (Brown, a iní, 2024). Používajú sa jednorazovo – po dosiahnutí cieľovej výšky prasknú, sonda padá na zem spomalená zvyškami balóna alebo padákom. Kvôli možnosti poškodenia a nepredvídateľnému dopadu je ich opakovateľné použitie veľmi obmedzené (Piccard, 2023).

Prevádzka balónov prináša viaceré riziká – nesprávne naplnenie plynom môže viesť k úniku alebo predčasnemu prasknutiu. Počasie, ako nízka teplota a silný vietor, môže poškodiť plášť či náklad. Počas letu balóny čelia vetru, dažďu, UV žiareniu a teplotným zmenám, ktoré znižujú ich životnosť. Zároveň je nutné dbať na bezpečnosť leteckej prevádzky a mať všetky potrebné prevádzkové povolenia (Piccard, 2023).

3.1.2. Sondážne rakety

Sondážne rakety letia po parabolickej trajektórii, pričom väčšinou štartujú pod uhlom 80°–90°, niekedy menej strmo pre merania v hustejších vrstvách. Trajektória závisí od ťahu motora, času vyhorenia a pomeru hmotnosti. Pre vyššie výšky sa používajú viaceré stupne (Huh, a iní, 2022).

Let prebieha v fázach: štart a poháňaný vzostup, plachtenie, dosiahnutie vrcholu a zostup.



Obrázok 2. Fázy letu sondážnej rakety. Zdroj: (Huh, a iní, 2022).

Poháňaný vzostup nastáva po štarte, keď motor generuje ťah a raketa zrýchľuje z nulovej rýchlosti. Spaľovanie paliva vedie k vysokému zrýchleniu (10–13 G), pričom raketa môže dosiahnuť rýchlosť až 4,5 km/s (Mach 4–8). Táto fáza trvá 5 až 60 sekúnd, pričom rýchlejšie spaľovanie paliva zvyšuje maximálnu dosiahnutú rýchlosť (Huh, a iní, 2022).

Plachtenie začína po vyhorení motora. Raketa už neprodukuje ťah, stáva sa balistickým telesom ovplyvňovaným gravitáciou a atmosférickým odporom. Dosiahne maximálnu výšku (napr. 60 km pre jednostupňové a nad 100 km pre dvojestupňové rakety) (Encyclopaedia Britannica, 2024).

Zostup je riadený padákmi, ktoré spomaľujú raketu na asi 8 m/s pre bezpečné pristátie. Počas zostupu môžu byť dáta zozbierané v meracej fáze odosielané na Zem (Encyclopaedia Britannica, 2024).

Celkovo celý let vrátane návratu trvá zvyčajne do 20 minút. Dostup a rýchlosť rakety najviac ovplyvňuje: výber motora, konštrukcia rakety a riadenie hmotnosti počas letu výrazne ovplyvňujú výšku aj dĺžku letu (National Aeronautics and Space Administration, 2022).

Sondážne rakety využívajú na udržanie kontroly počas letu pasívne aj aktívne systémy riadenia a stabilizácie. Pasívne systémy stabilizácie využívajú tvar a dizajn rakety na udržanie stability bez aktívnych riadiacich mechanizmov (Cadamuro, a iní, 2024). Aktívne systémy riadenia umožňujú dynamicky korigovať a udržiavať trajektóriu rakety v reálnom čase. Medzi hlavné aktívne mechanizmy patrí systém vektorovania ťahu motora, nastaviteľné kačacie plochy a reakčné kolesá – gyroskopy (Posta, a iní, 2024).

Sondážne rakety taktiež ponúkajú možnosť opakovateľného využitia vďaka modulovej konštrukcii, ktorá umožňuje jednotlivé poškodené časti rakety nahradiť novými. Na to, aby boli možné ich opakované použitie, je treba bezpečne pristáť. Najčastejšie sa na tieto účely používajú padáky, ale testujú sa aj nové technológie (systém WiRES), ktoré môžu umožniť pristátie na presne určené miesto.

Pri prevádzkovaní sondážnych rakiet je kladený veľký dôraz na bezpečnosť a spoľahlivosť, pretože prípadné poruchy môžu viesť k zničeniu rakety, vysokým finančným stratám, škodám na majetku a zdraví. Kľúčová je dôkladná kontrola konštrukcie rakety, hlavne stavu motorov a paliva, pretože akékoľvek poškodenie môže viesť k odklonu z trajektórie alebo k zničeniu rakety počas štartu či letu. Odklon rakety z plánovanej dráhy môže spôsobiť riziko kolízie s inou leteckou prevádzkou alebo nebezpečný dopad do obývaných oblastí, ohrozujúc životy a

majetok (National Aeronautics and Space Administration, 2023) (NASA Goddard Space Flight Center, 2015).

3.2. Ekonomické porovnanie

Pri vypúšťaní meteorologických balónov a sondážnych rakiet je potrebné zohľadniť náklady na získanie potrebných komponentov, ktoré sa líšia v závislosti od typu zariadenia. Meteorologické balóny majú nižšie náklady, pretože ich komponenty sú bežne dostupné. Avšak špeciálne meracie zariadenia na meranie atmosféry môžu zvýšiť náklady. Naopak, sondážne rakety sú navrhované na konkrétne misie, čo znamená vyššie náklady na výrobu a komponenty. Analýza sa zameriava na porovnanie obstarávacích nákladov a možnosti zníženia nákladov na vypustenie oboch typov zariadení.

3.2.1. Náklady na vypustenie meteorologických balónov

Pri určovaní nákladov na meteorologické balóny sa zohľadňujú tieto hlavné komponenty: Balón (nosná časť), Sonda (meracie zariadenie), Plyn (najčastejšie vodík, zodpovedný za vztlak). Môžu byť dodatočne vybavené zariadeniami ako GPS na sledovacie zariadenia alebo padákmi. Tieto zariadenia nie sú povinnou súčasťou pri každom vypustení.

Pri určovaní výšky nákladov na vypustenie meteorologických balónov využijeme údaje od organizácií, ktoré ich najčastejšie používajú na Slovensku: SHMÚ a VTSÚ. Pri určovaní nákladov sa stanovia ceny balónov, sond, plynu, padáky a GPS tieto organizácie nepoužívajú.

SHMÚ používa na vynášanie sond latexové balóny od spoločnosti TOTEX, presnejšie TA800. Na merania používajú sondy RS41 SGP od spoločnosti VAISALA. Na naplnenie balónu užívajú 1,5 m³ vodíku 3.0. Spoločnosť Spinel a.s. je zodpovedná za dodávanie setov balónov a sond. Spoločnosť Messer Tatragas s.r.o. je zodpovedná za dodávanie stlačeného vodíku vo fľašiach o objeme 8,9 m³. Pretože ide o organizáciu spadajúcu pod štátnu správu, ceny týchto komponentov sú dohľadateľné na základe zmlúv z verejných obstarávaní. Ceny komponentov sú uvedené v tabuľke 1. Finálna cena letu schopného balóna je 346,74 € (Slovenský hydrometeorologický ústav, 2024) (Ministerstvo životného prostredia SR, 2024).

Tabuľka 1. Náklady na vypustenie balóna pre SHMÚ (Slovenský hydrometeorologický ústav, 2024) (Ministerstvo životného prostredia SR, 2024).

Komponenty	Cena
1x Balón TOTEX TA800	91,80 €
1x Rádio sonda VAISALA RS41 SGP	239,16 €
Vodík 3.0 - 1,5 m ³	15,78 €
Spolu	346,74 €

VTSÚ Záhorie používa na vynášanie sond latexové balóny od spoločnosti TOTEX, presnejšie TA200. Na merania používajú sondy DFM-17 od spoločnosti GRAW. Na naplnenie balónu užívajú 1 m³ vodíku 3.0. Podobne ako SHMÚ, sú balóny obstarávané v setoch, avšak od iného dodávateľa- spoločnosti Empire com., s.r.o. Spoločnosť Messer Tatragas s.r.o. je zodpovedná za dodávanie stlačeného vodíku vo fľašiach o objeme 8,9 m³. Ceny týchto komponentov sú určené na základe cenníkov spoločností Empire com., s.r.o. a Messer Tatragas s.r.o.

(EMPIREcom., 2024). Ceny komponentov sú uvedené v tabuľke . Finálna cena letu schopného balóna je 245,25 €.

Tabuľka 2. Náklady na vypustenie balóna pre VTSÚ. Zdroj: (EMPIREcom., 2024).

Komponenty	Cena
1x Balón TOTEX TA200	45,60 €
1x Rádio sonda VAISALA RS41 SGP	178,80 €
Vodík 3.0 - 1 m ³	20,65 €
Spolu	245,25 €

3.2.2. Náklady na vypustenie sondážnej rakety

Určiť presnú cenu za vypustenie sondážnej rakety je zložitý úkon, pretože na rozdiel od meteorologických balónov nie sú sondážne rakety komerčne dostupné. Aj keď existujú amatérske rakety pre hobby použitie, tie sú navrhnuté na nízke výšky, majú obmedzenú rýchlosť a možnosti úprav, ich cena je taktiež vyššia ako cena jednotlivých komponentov rakety.

Ak chceme využiť sondážne rakety na meteorologické účely, je výhodnejšie zakúpiť/vyrobiť potrebné komponenty rakety a postaviť raketu. Pri navrhovaní rakety zohráva dôležitú úlohu voľba materiálov, použitých pri výrobe, ktorá priamo ovplyvňuje cenu. Najčastejšie používané materiály sú kovy (hliník, oceľ), ktoré sú lacné a pevné, ale ťažké, čo znižuje dolet. Kompozity (sklolaminát, uhlíkové vlákna) sú ľahšie a umožňujú vyšší dolet, no sú drahšie a menej pevné (Brown, 2023).

Hlavným nákladovým faktorom sondážnej rakety je jej motor, ktorý tvorí 60–80 % celkových výdavkov. Zavedenie opakovateľného použitia rakety (napr. pomocou padákových návratových systémov) môže náklady čiastočne znížiť. Presná cena však závisí od technických parametrov a optimalizácie motora, ktoré sú detailnejšie rozpracované v časti 4 – Ideový návrh sondážnej rakety.

3.2.3. Obnoviteľnosť

Pri meteorologických balónoch je možnosť obnoviteľnosti a s ňou spojené zníženie nákladov limitované. SHMÚ a VTSÚ používajú na merania vždy nové sondy, čo zaisťuje maximálnu spoľahlivosť meraní. Opätovné použitie balónov nie je možné – počas letu degraduje materiál a prasknú, čím možnosť opakovateľného klesá na nulu.

Jediná reálna možnosť úspory je výroba vodíka pre plnenie balónov pomocou generátora. Avšak je treba myslieť na to, že počiatočná investícia je vysoká (cena generátora, pripojenie na zemný plyn). Taktiež sa nesmie zabudnúť na prevádzkové náklady, ktoré zahŕňajú výmenu katalyzátorov, pravidelný servis a zaškolenú obsluhu. Z dlhodobého hľadiska je nutné porovnať tieto faktory a až následne určiť, či sa toto riešenie ekonomicky oplatí.

Možnosti opakovateľného využitia sondážnych rakiet sú lepšie ako u meteorologických balónov, najmä vďaka modulárnej konštrukcii rakiet. Po bezpečnom pristátí je možné raketu znovu využiť, pričom poškodené časti sa dajú vymeniť. Systémy na zabezpečenie návratu, ako padáky, sú tiež opakovane použiteľné, ak nie sú poškodené. Pri použití tekutého paliva je možnosť opakovateľného využitia 100 %, pretože po kontrole

integritu systému je možné ho naplniť a opäť použiť. Naopak, u tuhého paliva je potrebné vymeniť vyhorený motor alebo doplniť palivové zrno. Pri tekutom palive je okrem motora nutné skontrolovať aj celý palivový systém.

3.3. Legislatívne porovnanie

Legislatíva týkajúca sa meteorologických balónov a sondážnych rakiet sa zameriava na bezpečnosť leteckej prevádzky, ochranu ľudí a životného prostredia. Zabezpečuje koordináciu s riadením letovej prevádzky, vydávanie hlásení NOTAM a minimalizáciu rizík pri zostupe zariadení. Rešpektuje suverenitu vzdušného priestoru štátov a medzinárodné letecké predpisy. Cieľom je umožniť bezpečné využívanie týchto zariadení na vedecké a komerčné účely.

3.3.1. Legislatíva spojená s neobsadenými voľnými balónmi

Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo (ICAO) sa zaoberá celosvetovou reguláciou letectva prostredníctvom Annexov 1-19, ktoré poskytujú štandardy pre leteckú prevádzku. Annex 2 a jeho dodatok 4 sa špecificky týkajú prevádzky neobsadených voľných balónov. Európska agentúra pre bezpečnosť letectva (EASA) vychádza z týchto štandardov pri vytváraní Štandardizovaných európskych pravidiel lietania (SERA), ktoré upravujú pravidlá prevádzky v Európe. SERA dodatok 2 sa zameriava na prevádzku voľných balónov, vrátane klasifikácie, prevádzkových obmedzení a sledovania polohy [48].

SERA klasifikuje neobsadené balóny do 3 kategórií: Ľahké – balóny s MTOW do 4 kg, Stredné – balóny s MTOW od 4 do 6 kg, Ťažké – balóny s MTOW od 6 kg (European Union Aviation Safety Agency, 2024).

Na Slovensku sa bežne používajú meteorologické balóny v kategórii ľahké, ktoré majú hmotnosť 600 g - 800 g (SHMÚ) a 220 g (VTSÚ), čím neprekračujú váhový limit 4 kg pre túto kategóriu. Toto je výhoda pretože ľahké a meteorologické balóny nemajú v súčasnosti špecifické obmedzenia spojené z prevádzkou (Letové prevádzkové služby Slovenskej Republiky, 2024).

Pred samotným prevádzkovaním je však potrebné získať prevádzkové povolenie od Dopravného úradu SR. Pre meteorologické balóny SHMÚ a VTSÚ sú stanovené presné časy vypúšťania a dlhodobé povolenia publikované v hláseniach NOTAM. Iní prevádzkovatelia musia získať povolenia, pričom vypúšťanie sa nesmie uskutočniť v blízkosti letiska nie menej ako 20 km, s možnosťou výnimky. Žiadosť o povolenie musí byť podaná 15 dní pred letom a obsahovať detaily ako dátum, čas, miesto, výšku a kontaktné údaje (Letové prevádzkové služby Slovenskej Republiky, 2024).

3.3.2. Legislatíva spojená zo sondážnymi raketami

V súčasnosti neexistuje jednotná globálna ani celoeurópska legislatíva špecificky určená pre sondážne rakety – ich regulácia je ponechaná na jednotlivé štáty. Na Slovensku tiež neexistujú špecifické zákony a preto sa na ich prevádzku vzťahuje legislatíva pre neriadene letecké systémy (UAS). Tá upravuje klasifikáciu, stavbu, prevádzku, certifikáciu a bezpečnosť týchto zariadení podľa nariadenia EÚ 2019/947 a 2019/945 (European Commission, 2019) (European Commission, 2019).

Podľa nariadenia EÚ 2019/947 sa UAS delia na tri kategórie: otvorenú (do 25 kg, s VLOS, s bezpečným odstupom od ľudí, pohybu do 120 m od zeme, neprepravujú a nezhadzujú nebezpečný náklad), osobitú (prekračuje limity otvorenej kategórie) a osvedčenú (vysoké prevádzkové riziko). Sondážne rakety spadajú do osobitej kategórie, pretože lietajú nad 120 m, mimo VLOS a vypúšťajú náklad počas letu. Na prevádzkovanie musí prevádzkovateľ byť registrovaný u Dopravného úradu SR, získať letové povolenie, spracovať analýzu rizík SORA a pri lete do iného štátu požiadať o súhlas príslušný orgán (European Commission, 2019).

Samotná analýza SORA sa zameriava na: opis prevádzky, určenie rizika na zemi – GRC, opatrenie na zmiernenie rizík GRC, určenie rizika vzdušného priestoru – ARC, opatrenie na zmiernenie rizík ARC, určenie konečného rizika prevádzky – SAIL, určenie cieľov bezpečnosti prevádzky – OSO (European Union Aviation Safety Agency, 2024).

Spracovaná analýza rizík SORA sa spolu s žiadosťou o letové povolenie posielajú na Dopravný úrad SR, ktorý ich vyhodnotí a rozhodne o vydaní povolenia. Určí podmienky prevádzky, obmedzenia a technické parametre UAS. Po schválení vydá potvrdenie o prijatí, aby mohla prevádzka začať čo najskôr (European Commission, 2019).

4. Ideový návrh sondážnej rakety

Aby bolo možné porovnať, či je možné meteorologické balóny nahradiť sondážnymi raketami, je potrebné odhadnúť náklady na vypustenie rakety, a preto sa vypracoval ideový návrh. Cieľom je navrhnúť raketu schopnú dosiahnuť výšku 30 km, čo je bežná výška, kde sa získavajú meteorologické údaje. Raketa má byť schopná vyniesť náklad s hmotnosťou 1 kg, čo zodpovedá kombinácii meteorologickej sondy a padákov.

4.1. Výpočtová časť

Ako prvé sa určí zmena rýchlosti Δv (delta v), ktorá predstavuje celkovú zmenu rýchlosti potrebnej pre vykonanie letu. Na základe výpočtov pomocou vzorca

$$\Delta v = v_2 * g * h$$

táto hodnota vychádza na $\Delta v = 1017,2 \text{ m}^* \text{s}^{-1}$, pre zjednodušenie výpočtov zaokrúhli na $1100 \text{ m}^* \text{s}^{-1}$, vďaka čomu sa zistí rezerva pre zrýchlenie.

Pre určenie potrebného motoru je dôležité ďalej určiť ideálny hmotnostný pomer celkovej m_0 a konečnej hmotnosti rakety m_f . Po vykonaní výpočtov pomocou vzorca

$$m_0/m_f = e^{(\Delta v / I_{sp} * g)}$$

je hmotnostný pomer je určený na $m_0/m_f = 1,75$. Na výpočet je potrebné určiť hmotnosť nákladu, ktorý chceme vyniesť, v tomto prípade 1kg. Je známe, že m_0 musí obsahovať hmotnosť konštrukcie rakety (S) + nákladu (P) + palivom (F) a m_f je hmotnosť konštrukcie rakety

(S) + nákladu (P). V skutočnosti rakety ako je Terrier, Malamute alebo iné jednostupňové rakety, majú hmotnostný pomer podľa

konfigurácie 1,5 – 2, čiže pomer hmotnosti konštrukcie (S) a paliva (F) je 0,5 – 1. Pretože ide o ideový návrh, je stanovený pomer hmotnosti konštrukcie a paliva $S/F = 1$. Vzorec $m_0/m_f = 1,75$ sa upraví do nasledovnej formy:

$$S+P+F / S+P = 1,75 ,$$

vďaka čomu sa vypočíta pomer potrebného paliva na vynesenie 1 kg nákladu. Finálny pomer vychádza na 3kg. Spolu s 3 kg konštrukcie a 1 kg nákladu má finálna verzia sondážnej rakety hmotnosť pri vzlete 7 kg.

Základné parametre, podľa ktorých sa vyberie motor sú: čas horenia paliva a celkový impulz, ktorý musí motor vytvoriť. Pre určenie času horenia sa použije nasledovný vzorec:

$$t_h = mp * Isp * g / F ,$$

Pri výpočte sa stanovil impulz na 200 s a ťah motora na 1 000 N. Z výpočtu vyplýva, že motor musí horieť $t_h = 5,8$ sekúnd. Ďalším krokom je výpočet pre celkový impulz rakety, ktorý sa zistí dosadením hodnôt času horenia t_h a ťahu F , do vzorca:

$$I = F * t_h$$

Z výpočtu sa určil potrebný ťah motora na 5 886 N. Vďaka týmto výpočtom je možné určiť parametre pre vyhľadávaný motor ktoré sú: ťah 1 000 N, celkový ťah 5 886 N, čas horenia 5,8 s, hmotnosť paliva 3 kg.

4.2. Cena ideovej rakety

Na základe výpočtov bol pre ideovú sondážnu raketu s 1 kg nákladu vybraný motor 5880M1160-P od výrobcu Cesaroni, ktorý poskytuje celkový impulz 5 886 N, priemerný ťah 1 361 N a čas horenia 5,1 sekundy. Hmotnosť paliva je 3,4 kg. Cena motora je 679,00 € (Soler Rodríguez, 2024).

Pri odhadovaní ceny konštrukcie sa počítalo s pomerom 70 % ceny pre motor a 30 % pre konštrukciu, čím cena konštrukcie vychádza na 291,00 €. K tomu sa pridáva cena rádiosondy PS-41 SPG a padákov pre zabezpečenie návratu. Ceny komponentov sú uvedené v tabuľke 3. Finálna cena pre ideovú sondážnu raketu je 1 312,40 €.

Tabuľka 3. Náklady na vypustenie ideovej sondážnej rakety (Soler Rodríguez, 2024).

Komponenty	Cena
Motor	679,00 €
Konštrukcia	291,00 €
Sonda	239,16 €
Padáky	21,18 € a 82,06 €
Spolu	1 312,40 €

5. Záver

Porovnaním vlastností, výhod a nevýhod stratosférických balónov, meteorologických balónov a sondážnych rakiet ukazuje, že všetky tieto zariadenia sú efektívne pri zbere

atmosférických dát. Meteorologické balóny, vďaka svojej nízkej cene, jednoduchej prevádzke a zavedeným predpisom, zostávajú preferovaným riešením pre zber údajov, najmä pre predpovedanie počasia. Ich hlavnou nevýhodou je však citlivosť plášťa na nepriaznivé podmienky v atmosfére.

Sondážne rakety sa používajú predovšetkým na výskum vo vyšších vrstvách atmosféry a v mikrogravitácii, kde balóny nedosiahnu. Z analýz a návrhu sondážnej rakety vyplýva, že ich vysoké náklady a obmedzená legislatíva vylučuje bežné využívanie na pravidelné meteorologické merania do 30 km. Avšak majú aj určité výhody hlavne v prípadoch, kedy je pravdepodobnosť úspešného merania balónmi malá, napr. z dôvodu nepriaznivého počasia.

V súčasnosti sa rakety na meteorologické merania nepoužívajú a preto nie je možné presne posúdiť ich efektívnosť v tejto oblasti. Do budúcnosti by bolo vhodné navrhnúť a otestovať prototyp sondážnej rakety určenej na meteorologické účely, ktorá by mohla efektívne dopĺňať meteorologické balóny najmä počas nepriaznivých podmienok.

Podakovanie

Tento výskum bol podporený v rámci projektu FUTUREFOR – Aplikácie programu Copernicus pre monitorovanie lesov novej generácie, výzva HORIZON-CL3-2023-DRS-01, Zmluvné číslo 101180278.

Referencie

- Encyclopaedia Britannica. 2024. sounding rocket. *britannica.com*. [Online] 25. Júl 2024. [Dátum: 30. Marec 2025.] <https://www.britannica.com/technology/sounding-rocket>.
- Aero Corner. 2020. Why Do Airplanes Fly in the Stratosphere? *aerocorner.com*. [Online] Aero Corner, 9. December 2020. [Dátum: 1. Marec 2025.] <https://aerocorner.com/blog/why-do-airplanes-fly-in-the-stratosphere/>.
- Brown, David, Linz, Marianna a Leidich, Jared. 2024. Seasonal and geographic viability of high altitude balloon navigation. *Scientific Reports*. 19. September 2024, Zv. XIV, 1.
- Brown, Eric. 2023. Boosting rocket reliability at the material level. *news.mit.edu*. [Online] MIT News | Massachusetts Institute of Technology, 28. November 2023. [Dátum: 1. Apríl 2025.] <https://quillbot.com/citation-generator/folders/6RG07yjAIBPli4FdVfPDHE/lists/7EodeYIkVntG5KABh4rrRC/sources/5z3n43R1cEXR8rmAJo0FH9/edit>.
- Cadamuro, Riccardo, a iní. 2024. A Static Stability Analysis Method for Passively Stabilized Sounding Rockets. *Aerospace*. Aircraft Modeling, Simulation and Control II, 20. Marec 2024, Zv. XI, 3.
- Ehrenfried, Manfred "Dutch" von. 2021. *Stratospheric balloons, Science and Commerce at the Edge of Space*. s.l. : Springer Praxis Books, 2021. ISBN 978-3-030-68129-6.

- EMPIREcom., s.r.o. 2024. *Cenová ponuka č. 241001/ML*. Nitra : EMPIREcom., s.r.o., 2024.
- European Commission. 2019. Nariadenie (EU) 2019/945 o bezpilotných leteckých systémoch a o prevádzkovateľoch bezpilotných leteckých systémov z tretích krajín. *eur-lex.europa.eu*. [Online] 21. Marec 2019. [Dátum: 10. Apríl 2025.] <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/945/oj/slk>. L 152.
- . 2019. Nariadenie (EÚ) 2019/947 o pravidlách a postupoch prevádzky bezpilotných lietadiel. *eur-lex.europa.eu*. [Online] 24. Máj 2019. [Dátum: 10. Apríl 2025.] https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj/slk. L 152.
- European Union Aviation Safety Agency. 2024. Easy Access Rules for Standardised European Rules of the Air. *easa.europa.eu*. [Online] 3. December 2024. [Dátum: 6. Apríl 2025.] https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-standardised-european?page=23#_Toc256000380.
- . 2024. Specific Operations Risk Assessment (SORA) | EASA. *easa.europa.eu*. [Online] 10. Júl 2024. [Dátum: 6. Apríl 2025.] <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/specific-category-civil-drones/specific-operations-risk-assessment-sora>.
- HEMERA: *The European Community for Advanced Research in the Stratosphere*. Albano, M., a iní. 2023. 102, s.l. : Aerotecnica Missili & Spazio, 2023, Zv. IV.
- Huh, J. a Kwon, S. 2022. A practical design approach for a single-stage sounding rocket to reach a target altitude. *cambridge.org*. [Online] The Aeronautical Journal, 3. Marec 2022. [Dátum: 30. Marec 2025.] <https://www.cambridge.org/core/journals/aeronautical-journal/article/practical-design-approach-for-a-singlestage-sounding-rocket-to-reach-a-target-altitude/F44C54276C25DF2E6F33C40A871FD828>.
- Letové prevádzkové služby Slovenskej Republiky. 2024. ENR 5.3 OSTATNÉ AKTIVITY NEBEZPEČNEJ POVAHY A INÉ. *aim.lps.sk*. [Online] 11. júl 2024. [Dátum: 6. Apríl 2025.] https://aim.lps.sk/eAIP/eAIP_SR/AIP_SR_EFF_15MAY2025/html/LZ-ENR-5.3-sk-SK.html.
- Ministerstvo životného prostredia SR. 2024. Zmluva 47-200-2023. *crz.gov.sk*. [Online] 1. Október 2024. [Dátum: 5. Apríl 2025.] <https://www.crz.gov.sk/zmluva/7648805/>.
- NASA Goddard Space Flight Center. 2015. *NASA Sounding Rockets User Handbook, Sounding Rockets Program Office, Sub-orbital and Special Orbital Projects Directorate*. Wallops Island : National Aeronautics and Space Administration, 2015. NASA-810-HB-SRP.
- National Aeronautics and Space Administration. 2023. Model Rocket Safety | Glenn Research Center | NASA. *grc.nasa.gov*. [Online] Glenn Research Center | NASA, 20. November 2023. [Dátum: 3. Apríl 2025.] <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/model-rocket-safety/>.
- . 2022. Sounding Rockets overview - NASA. *nasa.gov*. [Online] 2022. [Dátum: 13. Marec 2025.] <https://www.nasa.gov/soundingrockets/overview/>.
- . 2022. The super pressure balloon provides altitude stability and long duration ballooning at mid-Latitudes. *nasa.gov*. [Online] 19. September 2022. [Dátum: 2. Marec 2025.] https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/03/super-pressure-balloon-fact-sheet.pdf?utm_source=chatgpt.com.
- Pappalardo, Joe. 2018. The rocket fuel rivalry shaping the future of spaceflight, Popular Mechanics. *popularmechanics.com*. [Online] 10. Apríl 2018. [Dátum: 15. Marec 2025.] <https://www.popularmechanics.com/space/rockets/a19724715/liquid-solid-rocket-fuel-spacex-orbital-atk-blue-origin/>.
- Piccard, Donald L. 2023. Balloon flight - High Altitude, Stratospheric, Exploration | Britannica. *britannica.com*. [Online] Encyclopedia Britannica, 25. Október 2023. [Dátum: 29. Marec 2025.] <https://www.britannica.com/technology/balloon-flight/High-altitude-ballooning>.
- Posta, Alexandra, a iní. 2024. Improving an Active Stability System of a Sounding. *leedsrocketry.co.uk*. [Online] MECH5080M Team, 30. Apríl 2024. [Dátum: 1. Apríl 2025.] <https://leedsrocketry.co.uk/wp-content/uploads/2024/08/Improving-an-Active-Stability-System-of-a-Sounding-Rocket-via-Data-Monitoring-and-Interpretation-Methodologies.pdf>.
- Slovenský hydrometeorologický ústav. 2024. Zmluva 157-800-2024. *crz.gov.sk*. [Online] 1. Október 2024. [Dátum: 5. Apríl 2025.] <https://www.crz.gov.sk/zmluva/9835297/>.
- Soler Rodríguez, A. 2024. Preliminary Design of a High Power Rocket. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/412884/Final_report_Albert_Soler_Rodriguez.pdf?sequence=5. [Online] 2024.
- Sounding Rockets are unique Experimental Platforms*. Kirchhartz, Rainer, Hörschgen-Eggers, Marcus a Jung, Wolfgang. 2018. Berlín : German Aerospace Center (DLR), 2018. IAC-18.D2.6.8x46679.
- Tang, Jiwei, a iní. 2022. Research on Trajectory Prediction of a High-Altitude Zero-Pressure Balloon System to Assist Rapid Recovery. *Aerospace*. Mission Analysis and Design of Lighter-than-Air Flying Vehicles, 2022, Zv. IX, 10.