



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Bc. Martin Luner

**Analýza podmínek vzniku námrazy na vrtulích
multikoptéry**

Diplomová práce

2020

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



K621**Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Martin Luner

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Analýza podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptér**

Název tématu (anglicky): **Analysis of the Conditions of Icing on the Multicopter Propellers**

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je provést analýzu podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptér a navrhnout opatření pro minimalizování pravděpodobnosti vzniku námrazy na vrtulích multikoptér
- popište podmínky vzniku námrazy a jejich druhy obecně i se zaměřením se na multikoptéry
- proveďte rešerši odborných a vědeckých zdrojů zabývajících se tvorbou námrazy na vrtulích obecně i na vrtulích multikoptér
- vykonejte návrh experimentu, provedení a vyhodnocení experimentu
- navrhnete opatření pro minimalizování pravděpodobnosti vzniku námrazy na vrtulích multikoptér



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: P.F. Lester: Aviation Weather
L.Keller: Učební texty pro piloty
P. Dvořák: Letecká meteorologie

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Ladislav Keller**

Datum zadání diplomové práce: **17. července 2019**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **18. května 2020**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Martin Luner
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 17. července 2019

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Ladislavu Kellerovi za věcné rady, odborný přístup a trpělivost s mými dotazy během psaní diplomové práce. Rád bych rovněž poděkoval všem odborníkům, s kterými jsem měl tu čest komunikovat a vyslechnout si jejich názory a postřehy. Dále nemohu zapomenout na podporu z okruhu mých přátel, kteří mi poskytli věcné rady a kritický pohled. Poslední příjemnou povinností je poděkovat mé přítelkyni a celé rodině, kteří mi během psaní diplomové práce i během celého studia poskytovali značnou morální i materiální podporu.

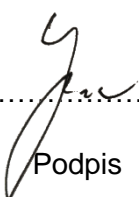
Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám žádný závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 10. srpna 2020


.....
Podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

ANALÝZA PODMÍNEK VZNIKU NÁMRAZY NA VRTULÍCH MULTIKOPTÉRY

Diplomová práce

srpen 2020

Klíčová slova: UA, UAV, Bezpilotní letoun, Multikoptéra, Podmínky vzniku námrazy, Námraza multikoptér, Nehody multikoptér způsobené námrazou, Adiabatické ochlazování vrtule.

Keywords: Unmanned aircraft, Unmanned Aerial Vehicle, Multicopter, Condition of icing, Icing of multicopter, Accident of multicopter caused by icing, adiabatic cooling of the propeller.

ABSTRAKT

Diplomová práce „Analýza podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry“ pojednává o námrazových podmínkách a jejich vlivu na bezpilotní letadla, se zaměřením na multikoptéry. Cílem práce je analyzovat podmínky, při kterých dochází k námraze vrtulí multikoptér a následné vyhodnocení jejich nehod s námrazou spojené. V závěru práce probíhá experimentální měření vlivu adiabatického ochlazování na teplotu vrtule a ověření, za jakých podmínek k námraze dochází. Součástí práce je doporučení pro minimalizaci vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry.

ABSTRACT

The diploma thesis "Analysis of the Condition of Icing on the Multicopter Propellers" deals with icing conditions and their impact on unmanned aircraft, especially multicopters. The main object of this thesis is to analyse the conditions under which icing of multicopters propellers occurs and the subsequent evaluation of their accidents associated with icing. At the end of the thesis, there is an experimental measurement of the adiabatic cooling effect affecting on the propeller temperature and verification of the conditions under which icing occurs. Part of the work is dealing with recommendation for minimizing the effect of icing on the multicopter propellers.

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	1
ÚVOD	2
1. ADIABATICKÝ DĚJ, METEOROLOGICKÉ PRVKY A JEVY	4
1.1 ADIABATICKÝ DĚJ.....	4
1.2 METEOROLOGICKÉ PRVKY.....	4
1.2.1 <i>Teplota</i>	4
1.2.2 <i>Vlhkost</i>	10
1.2.3 <i>Tlak</i>	12
1.3 METEOROLOGICKÉ JEVY.....	12
1.3.1 <i>Mlha</i>	14
1.3.2 <i>Námraza</i>	16
2. BEZPILOTNÍ LETADLO	28
2.1 MULTIKOPTÉRA.....	28
2.2 ZÁKLADNÍ ČÁSTI MULTIKOPTÉRY.....	29
3. TECHNICKÉ OPATŘENÍ PRO ZAMEZENÍ VZNIKU NÁMRAZY	34
3.1 TEPELNÁ OCHRANA.....	34
3.2 MECHANICKÁ OCHRANA.....	36
3.3 CHEMICKÁ OCHRANA.....	37
4. ANALÝZA NEHOD ZPŮSOBENÝCH VZNIKEM NÁMRAZY	40
5. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA OCHLAZOVÁNÍ LISTŮ VRTULE	51
5.1 NÁVRH EXPERIMENTU.....	51
5.2 PROTOKOL PRO ZÁZNAM MĚŘENÍ.....	56
5.3 DÍLČÍ KOMPONENTY SLOUŽÍCÍ K MĚŘENÍ.....	59
ZÁVĚR	64
POUŽITÁ LITERATURA	66
SEZNAM OBRÁZKŮ	68
SEZNAM TABULEK	69
SEZNAM GRAFŮ	70
SEZNAM PŘÍLOH	71

Seznam použitých zkratek

AC	Vyvýšená kupa	Alto cumulus
AS	Vyvýšená sloha	Alto stratus
AGL	Výška nad zemí	Above ground level
CB	Dešťová kupa	Cumulonimbus
CU	Kupa	Cumulus
DC	Stejnoseměrný proud	Direct Current
ESC	Elektronický regulátor otáček	Electronic Speed Controllers
FullHD	Vysoké rozlišení	High-definition
GNSS	Globální satelitní navigační systém	Global Navigation Satellite System
Km	Kilometr	Kilometer
LiPO-3S	Lithium-polymerová baterie (3.články)	Lithium-Polymer 3S
mAh	Miliampérhodina	Milliampere hour
mm	Milimetr	Millimeter
mmHg	Milimetr rtuťového sloupce	Millimetre of mercury
nm	Nanometr	Nanometre
NS	Dešťová sloha	Nimbostratus
PCO	Ochrana proti nadměrnému vybití	Power Cut-Off system
RP	Vzdálený pilot	Remote pilot
RPS	Vzdálený pilotní systém	Remote pilot system
SC	Slohová kupa	Stratocumulus
ST	Sloha	Stratus
UA	Bezpilotní letadlo	Unmanned Aircraft
UAV	Bezpilotní letadlo (USA)	Unmanned Aerial Vehicle
UZPLN	Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod	Air accidents investigation institute
V	Volt	Volt
WLAN	Bezdrátová síť	Wireless Local Area Network
ε	Emisivita	Emissivity

Úvod

Bezpilotní letadla jsou svou povahou velmi užitečná zařízení, která postupně pronikají do světa letectví a narůstá tím i jejich aplikovatelnost v jiných odvětvích. Pojem bezpilotních letadel může být pro širokou veřejnost poměrně neznámý do chvíle, kdy zmíníme hovorový výraz dron. Jedná se o zařízení, které je charakteristické svým bzučivým akustickým projevem a je velmi pravděpodobné, že každý z nás se s ním již aspoň jednou setkal. Používaný slangový výraz dron je ovšem velmi zavádějící, jelikož vychází z anglického slova, jehož skutečný význam jsou slova bzučivý nebo trubec. Terminologicky správné pojmenování je v tomto případě označení multikoptéra, ačkoli není mezi běžnými uživateli příliš vžitě.

Provoz multikoptér se za poslední dekádu velmi rozšířil a dostal se tak do podvědomí i mezi běžné uživatele. Ti často nemají povědomí o základní problematice multikoptér a některých jejich limitacích, které objasňují vhodné podmínky pro jejich provoz. Zásadní vliv na provozní podmínky má počasí, které může negativně ovlivnit letové vlastnosti během letu. Nejzásadnějším prvkem je v tomto ohledu námraza, jejíž následkem mohou vzniknout nehody. Ve srovnání s komerční leteckou dopravou, nemají tyto nehody vážnější dopad, avšak s expanzí bezpilotních letadel do širšího spektra napříč mnoha odvětvími se tento stav může změnit. Právě nedostatečná probádanost vlivu počasí na provoz multikoptéry mě vedla k výběru a objasnění tohoto tématu.

Na základě nehod spojených s námrazou bylo zjištěno, že negativní vliv námrazy na provoz multikoptér se stává závažnou překážkou, které nejsou schopná tato zařízení efektivně čelit. Jakmile námraza na vrtulích multikoptéry vznikne, hrozí její pád a následné zničení. To může limitovat jejich budoucí nasazení, ve větším průmyslovém měřítku, jelikož nemohou operovat téměř za jakéhokoli počasí, jako je tomu u běžných letadel.

Tato diplomová práce si klade za cíl provést analýzu námrazy multikoptér a experimentálně ověřit vliv adiabatického ochlazování na teplotu pohonných vrtulí. Současně je nutné identifikovat příčiny vzniku nehod multikoptér spojené s námrazou. Obsah teoretické části práce pojednává o základních meteorologických prvcích, základním popisu multikoptéry a analýze nehod způsobené námrazou. Dílčí cíl je zaměřen na sestavení měřicí soustavy k experimentálnímu ověření vlivu adiabatického ochlazování na vznik námrazy. Díky tomu bude možné navrhnout vhodná opatření, které v budoucnu mohou vzniku námrazy u multikoptér předcházet.

Výsledkem diplomové práce je podrobná analýza podmínek vzniku námrazy na vrtulích multikoptér, její spojitosti s provozem a vyhodnocení naměřených údajů v rámci experimentu, který může prokázat vliv adiabatického ochlazování na vznik námrazy na povrchu listů vrtule. Součástí diplomové práce je podrobná metodika měření a sestavení měřící soustavy.

1. Adiabatický děj, meteorologické prvky a jevy

1.1 Adiabatický děj

Během adiabatického děje nedochází k tepelné interakci s okolím. Tento děj probíhá za předpokladu, že je systém zcela izolován od okolí nebo děj proběhne tak rychle, že k žádné tepelné výměně nedojde. Teplo je zkrátka v systému zcela izolováno a nemůžeme ho do něj dodat ani odebrat. Dosažení změny vnitřního stavu energie lze docílit skrze dodanou nebo odebranou práci. V praxi si můžeme představit například izolovaný válec u kterého při zvýšeném objemu klesá tlak i teplota. Pokud systém odvede práci, důsledkem bude snížení vnitřní energie v tomto systému. Vnitřní energie je tedy přímo úměrná na dodané nebo odebrané práci, která je popsána prvním termodynamickým zákonem. ^[1]

Vztah mezi dodaným teplem a prací je odvozen z prvního termodynamického zákona, jehož vzorec je uveden níže: (dU – změna vnitřní energie, dQ – odevzdané nebo přijaté teplo, dW – vykonaná práce)

$$dU = dQ - dW \quad [1]$$

Pokud se jedná o adiabatický děj, dodané teplo je nulové, tedy $dQ = 0$. Pro adiabatický děj platí následující vztah: (dU – změna vnitřní energie, dW – vykonaná práce) ^[1]

$$dU = -dW \quad [1]$$

Adiabatický děj je značně vzdálen od reality, jelikož není možné zajistit takové podmínky, abychom tepelnou interakci s okolím zcela zamezili. ^[1]

1.2 Meteorologické prvky

Meteorologické prvky charakterizují fyzikální stav atmosféry a atmosférické jevy, což souhrnně charakterizuje počasí. Fyzikální stav atmosféry je vyjádřen prostřednictvím měřitelných veličin jako je teplota, sluneční záření, vlhkost, atmosférický tlak. ^[2]

1.2.1 Teplota

Teplota vzduchu

Teplota vzduchu je významným prvkem ovlivňující počasí v atmosféře. Teplota je termodynamická veličina, která vyjadřuje energetický stav molekul. Tento stav je závislý na dodané nebo odebrané vnější energii. Jakmile je do systému vnější energie dodána, zvýší se

energie vnitřní a současně s ní vzroste celková teplota. Vlivem dodané vnější energie se začnou molekuly pohybovat vyšší rychlostí, což způsobí nárůst vnitřní energie a teploty daného tělesa. [3]

Teplotní stupnice

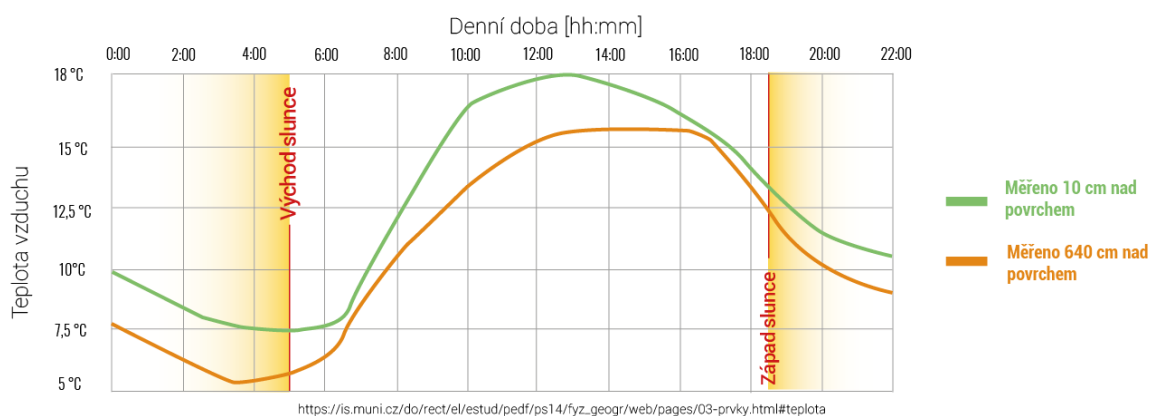
Pro srozumitelný popis teploty vzduchu se používají tři rozličné stupnice, které jsou popsány v *tabulce č. 1*. Teplota v soustavě SI je vyjádřena v jednotkách Kelvin, která je významnější ve fyzikálních oborech. V odborné meteorologické praxi se nejhojněji využívá stupnice Celsiova, která udává hodnoty mezi bodem varu s hodnotou 100° a bodem tuhnutí s hodnotou 0°. Fahrenheitova stupnice používá jiné referenční hodnoty a je standardem ve Spojeném království, USA nebo v Kanadě. V naší zeměpisných šířkách není tato stupnice podstatná. [4]

Druh stupnice	Bod tuhnutí	Bod varu
CELSIUS	0°	100°
FAHRENHEIT	32°	212°
KELVIN	273,16°	373,16°

Tabulka 1 Druhy teplotních stupnic [5]

Průběh denních teplot

Průběh teplot má standardně klesající trend směrem od povrchu. Sluneční záření zahřívá během dne více zemský povrch nežli samotný vzduch, ten je spíše izolantem. Během dne pak zahřátý povrch konstantně přenáší tepelnou energii do okolí a zahřívá přilehlé vrstvy vzduchu. Zajišťuje tak určitou stabilitu průběhu denních teplot, které jsou zobrazeny na *obrázku č.1*. V naší zemi dosahuje teplota vzduchu nejvyšších hodnot kolem 13. hodiny (zelená linie) a nejnižší hodnoty dosahuje před východem slunce. Vodní plochy dosahují svých extrémů se zpožděním několika hodin, je to dáno velkou tepelnou kapacitou vody. Teplota vzduchu je přímo závislá na geografické poloze a času. [4] [6]



Obrázek 1 Ukázka průběhu průměrných denních teplot pro ČR [vlastní]

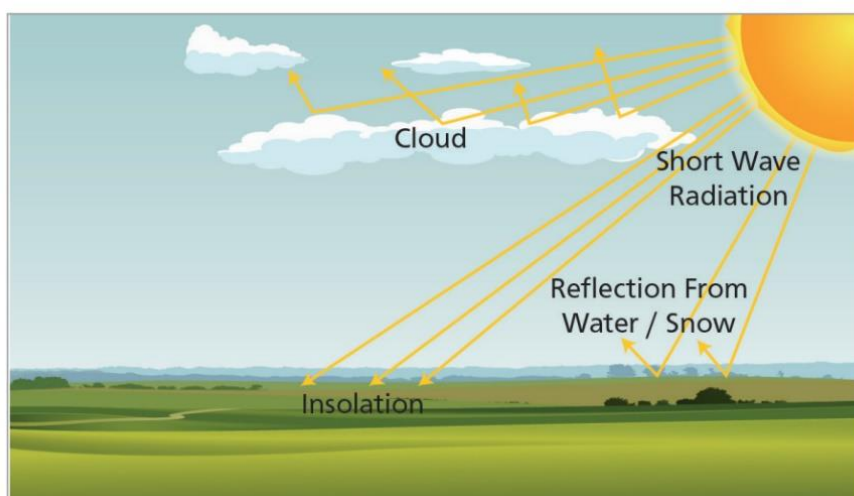
Změna teploty vzduchu s výškou

Změna teploty s výškou se nazývá vertikální teplotní gradient a vyjadřuje hodnotu teploty, která klesá společně s výškou, až na pomezí tropopauzy. Pokud je vzduch suchý, rychleji se ochladí. Dosahuje poklesu teploty o 1 °C na 100 m výšky, jedná se o suchoadiabatický gradient. U vlhkoadiabatického gradientu klesá teplota s výškou pouze o 0,6 °C vlivem uvolněného latentního tepla. Průměrné ochlazování atmosféry s narůstající výškou je 0,65 °C na 100 m. Tato hodnota není konstantní, závisí na denní a roční době současně s relativní vlhkostí vzduchu. [7]

Teplota na horní hranici troposféry v rovníkových oblastech klesá až k hodnotě -70 °C. Je to to z toho důvodu, že troposféra je v těchto oblastech mohutnější a její výška dosahuje 17 Km. V oblastech pólů jsou teploty na vrchní hranici troposféry přibližně -45 °C. [4]

Zahřívání atmosféry

Tepelná energie má značný vliv na veškeré termodynamické procesy odehrávající se v zemské atmosféře. Hlavním zdrojem této energie je Slunce, jehož prostřednictvím dochází k zahřívání atmosféry a zemského povrchu. Sluneční záření dopadá k zemi jako svazek takřka rovnoběžných paprsků, které si vyznačují velmi širokým spektrem radiace. Vstupem do atmosféry se část svazku rozptýlí, část pohltí a část prochází až k zemskému povrchu, průnik paprsků atmosférou můžeme vidět na *obrázku č. 2*. Významným efektem je rozptyl světla, má značný vliv na zahřívání zemského povrchu a barvu viditelného světla oblohy, soumraku a úsvitu. Sluneční záření, které dopadá na zemský povrch je krátkovlnného charakteru, zatímco vyzařování zemského povrchu je dlouhovlnného. Převážná část radiačního spektra dopadajícího záření tvoří viditelné (48 %) a infračervené (45 %) záření. [4]



Obrázek 2 Sluneční radiace [5]

Nejvíce sluneční energie, která se podílí na zahřívání zemské povrchu, k nám dopadá na vlnové délce přibližně 505 nm, což vnímáme jako žlutozelenou barvu. Na základě Wienova posunovacího zákona se zemský povrch podílí na ohřívání atmosféry převážně v infračerveném spektru. Jeho vyzařovací maximum je nejvyšší na hodnotě vlnové délky 9829 nm. [6] [4]

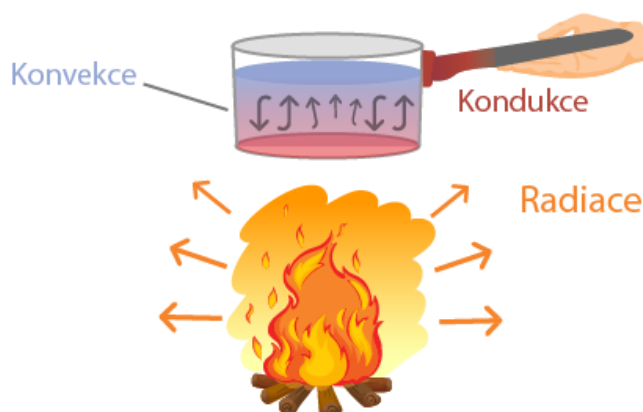
Přenos tepelné energie v atmosféře

Přenos tepelné energie v atmosféře probíhá několika procesy.

- Radiace
- Kondukcce
- Konvekce
- Kondenzace

Tepelná energie je na zemský povrch přenášena radiací ze Slunce. Některá energie se odrazí zpět do vesmíru, některá se odrazí během cesty v atmosféře a zbytek je absorbován zemským povrchem. Zemský povrch předává teplo kondukcí. Na základě fyzikálních procesů v atmosféře dochází k výměně tepla konvekcí a později kondenzací. [4]

Slunce je naším hlavním energetickým zdrojem a jeho zásluhou dochází k tepelným přenosům. Tyto výměny probíhají změnou stavu vnitřní energie plynů, způsobené stlačením anebo zahřátím. Stav vnitřní energie ovlivníme na základě dodané energie z tepleného zdroje, například jako je Slunce. Dodaná energie zvýší hybnost atomů, což se na venek projevuje vyšší teplotou. Mezi částicemi s vyšší hybností dochází ke srážkám a předávají tuto energii částicím sousedním. To se projevuje jako přenos tepelné energie prostředím, které může probíhat několika způsoby. Jednotlivé způsoby přenosu tepla jsou znázorněny na obrázku číslo 3. [7] [4]



Obrázek 3 Konvekce, kondukcce a radiace [vlastní]

Radiace

Popisuje přenos energie prostřednictvím elektromagnetických vln, v případě tepelné výměny se jedná o infračervené spektrum, které je šířeno do okolí prostřednictvím výkonného zářiče. Výkon vyzařujícího tělesa je závislý na jeho teplotě a velikosti povrchu. Výkonným zářičem, jehož prostřednictvím je dodávána tepelná energie zemskému povrchu, je Slunce. ^[1]

Záření prostupuje skrze atmosféru k zemskému povrchu, který zahřívá. Některé paprsky jsou odraženy od svrchní hranice mraků nebo od vodních ploch. Voda a vodní plochy jsou obecně výbornými akumulátory energie, díky své měrné tepelné kapacitě, která je čtyřikrát vyšší než u vzduchu. Vodní plochy záření absorbují a pak jej postupně šíří do okolí. Zemský povrch rovněž akumuluje sluneční záření, byť má nižší tepelnou kapacitu a vyzařuje tak méně tepla. ^[4]

Vyzařování zemského povrchu je během dne značně proměnlivé a ovlivňuje ho především stav okolní atmosféry a jejího vodního obsahu. Radiace povrchu je přes den překryta přímým nebo rozptýleným slunečním zářením. Jakmile dojde během noci k útlumu slunečního záření, projevuje se efekt radiace výrazným poklesem vzduchu. Vliv zemské radiace má velmi malý vliv na tepelné děje probíhající v atmosféře. ^[4]

Kondukcce

Kondukcí se rozumí vzájemné vedení anebo šíření tepla v hmotném prostředí. Ke kondukcí nejčastěji dochází u pevných látek, setkat se sní můžeme v kapalném a zvláště pro meteorologii významném plynném prostředí. Kondukcce zajišťuje přenos tepelné energie napříč prostředím rozdílných teplot. ^[4]

Kinetická energie atomů roste v závislosti na teplotě. Pokud je energie dodána vnějším zdrojem jako je Slunce (tepelná energie), vnitřní energie se zvýší a dochází k intenzivnějším kmitům atomů, které se srážejí se sousedními a získanou energii vedou dále do prostředí s nižší energií. Kondukcce popisuje vzájemnou interakcí atomů, které přenášejí tepelnou energii k chladnějším částem v prostředí. ^[1]

V praxi se můžeme s kondukcí setkat během prudkých změn teplot. Nejideálnějšími podmínkami pro demonstraci je střídání dne a noci. Vzduch je velmi špatným vodičem a na tepelné změny reaguje mnohem pomaleji než zemský povrch. Ten v průběhu dne nakumuluje podstatné množství tepelné energie, vlivem dopadajícího slunečního záření. Vzduch ležící blízko zemského povrchu je tak zahříván zemským povrchem. Naopak během noci je zemský povrch chladnější než okolní vzduch, a proto je vzduch ochlazován od povrchu a teplota s narůstající výškou stoupá. Kondukcce je složka podílející se na tvorbě inverze, o které je pojednáno dále. ^[5]

Konvekce

U konvekce probíhá přenos tepla prouděním látek, jedná se o cirkulaci teplého a studeného vzduchu ve vertikálním směru. Proudění umožní výměnu tepla v jednotlivých částech atmosféry. Proudění může nastat pouze v případě látek v kapalném a plynném skupenství. [5]

Teplý vzduch je lehčí a rozpíná se. Jestliže je jeho teplota vyšší než okolní, stoupá směrem vzhůru. Vzduch vystoupá do vyšších pater atmosféry, kde nahradí vzduch chladný, který je těžký a klesá dolů. Teplý vzduch se v atmosféře spojuje do masivnější termických výstupných proudů, které nazýváme termika. Termika je hojně využívána ptáky anebo piloty kluzáků. Prostřednictvím výstupných proudů teplého vzduchu dochází k cirkulaci studeného a teplého vzduchu, což je základním prvek k tvorbě meteorologických jevů. [1]

Za podmínek dostatečné vlhkosti vzduchu můžou být teplo přeneseno až na hranici tropopauzy. Během skupenské přeměny (kondenzace, mrznutí), se uvolní značné množství energie, které nazýváme latentní teplo. To způsobí, že daným objem vzduchu má stále vyšší teplotu, než jeho okolí a může stále stoupat, dokud se jejich teplota nevyrovná. [4]

Kondenzace

Kondenzace je fázová přeměna vodních par do kapalného stavu. Teplý vzduch je přirozenou konvekcí tlačěn vzhůru a adiabaticky se ochlazuje. Kondenzace nastává s poklesem teploty na úroveň absolutního stavu nasycení. Objem vody není možné při takovéto teplotě v plynné fázi udržet a proto kondenzuje. Pára se přemění v mikroskopické vodní kapky, které vytvoří oblak. Pokud dojde ke kondenzaci uvolní se latentní teplo, které zahřívá okolní atmosféru. [3]

Latentní teplo

Latentní teplo je druh energie, který je třeba dodat nebo se uvolní během fázové přeměny, aniž by došlo ke změně teploty samotné látky. Nejčastěji se jedná o vypařování anebo kondenzaci v atmosféře. Za určitých podmínek sublimuje pevná látka v podobě ledu přímo do atmosféry anebo vodní pára mrzne na povrchu teploty bod bodem mrazu. Na obrázku můžeme vidět, že nejvíce energeticky náročná je přeměna vody na páru. Přímá sublimace ledu do plynné fáze je osmkrát náročnější než přeměna pevné fáze na kapalnou, což můžete vyčíst z obrázku č. 4. [4]



Obrázek 4 Odevzdané a přijaté teplo, během fázové přeměny [vlastní]

1.2.2 Vlhkost

Vzduchová hmota je v atmosféře zastoupena třemi základními složkami mezi, které patří vodní páry, vodní srážky (kapalné i pevné) a suchý vzduch. Vodní páry patří mezi nejvýznamnější prvky v atmosféře, které ovlivňují tepelné přenosy probíhající prostřednictvím fázových přechodů, konvekce nebo velkoprostorové cirkulace. Smíšením vodních par se suchým vzduchem dostaneme vzduch vlhký, jehož poměr je označen jako vlhkost vzduchu.^[6]

Termín vlhkost vzduchu popisuje množství vodních par obsažených v atmosféře, které jsou úzce spojeny s teplotou. Vzduch je při dané teplotě schopný pojmout určité množství vodních par, se vzrůstající teplotou toto množství kvadraticky roste. V okamžiku, kdy není vzduch schopen pojmout větší množství vodních par, stává se plně nasyceným. Pokud je vzduch vodními parami přesycen dochází k jejich kondenzaci. Při teplotách 0 °C a nižších může docházet ke vzniku námrazy.^[6]

Obsah přítomné vlhkosti ve vzduchu je jeden ze základních faktorů při tvorbě počasí. Pokud by v atmosféře nebyla přítomna žádná vlhkost v podobě vodních par, neodehrávaly by se v ní žádné atmosférické jevy, jako je vznik srážek, mlhy, oblačnosti nebo námrazy.^[4]

Vlhkost se v atmosféře tvoří převážně z výparů rozsáhlých vodních ploch, vegetace nebo přímo ze zemského povrchu. Vlhkost rovněž vzniká odpařováním vodních srážek, oblačnosti nebo sublimací sněhové pokrývky. Vzdušné proudy dokážou šířit vodní obsah na velké vzdálenosti jak ve vertikálním, tak i v horizontálním směru.^[6]

Změna skupenství vody

Voda se v atmosféře vyskytuje v několika skupenstvích jejichž formu ovlivňuje především teplota. Prostřednictvím vody dochází v atmosféře k velmi důležitým energetickým přenosům, které jsou znány jako fázové přechody mezi skupenstvími. K přechodům dochází formou tání, tuhnutí, kondenzací, vypařováním, sublimací a desublimací. Změna jednotlivých stavů neboli skupenství uvolňuje nebo spotřebovává energii, kterou nazýváme latentní teplo.^{[4] [6]}

Význam vlhkosti v meteorologii

V letecké meteorologii patří mezi nejdůležitější ukazatele obsahu vodních par v suchém vzduchu relativní vlhkost. Vzrůstající relativní vlhkost indikuje pravděpodobnost vzniku mlhy nebo nízko položené oblačnosti, což může mít vliv na bezpečnost letového provozu. Každé letiště má jasně definovanou kritickou relativní vlhkosti, na jejíž základě vydají odpovídající opatření. Kritická relativní vlhkost se obecně pohybuje od 90 % do 98 %, při překročení horní hodnoty nastává omezení letového provozu, které může znemožnit vzlety a přistání. Množství vodních par s narůstající výškou rychle ubývá, pokud se nejedná o inverzní oblačnost, u které

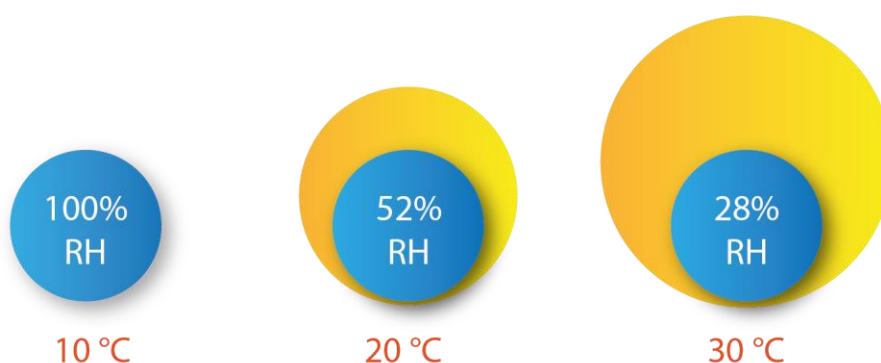
může být tento trend opačný. Přítomnost vodních par v atmosféře a vysoká relativní vlhkost může značně zkomplikovat letový provoz. Zejména jevy jako déšť, sníh, mrholení, mlha nebo kouřmo mohou způsobit těžko předvídatelné problémy. ^{[7][6]}

Absolutní vlhkost

Absolutní vlhkost udává potenciální hodnotu nasycení vzduchu vodními parami v gramech na 1 m³ při dané teplotě. S narůstající teplotou roste potenciální hodnota absolutního nasycení vzduchu vodními parami, které může pojmout. Jakmile je této hranice dosaženo, mluvíme o dosažení absolutní vlhkosti vzduchu, tento termín může být také označován výrazem mokrý vzduch. ^{[7][6]}

Relativní vlhkost

Je poměrná část obsahu vodních par v jednotce vzduchové hmoty, které je závislá na okolní teplotě. Relativní vlhkost udává, množství vodních par obsažených ve vzduchu vzhledem k maximální možné hodnotě nasycení, jak je patrné z *obrázku č.5*. Jestliže relativní vlhkost dosáhne své maximální hodnoty, mluvíme o takzvané absolutní vlhkosti. Relativní vlhkost je vyjádřena v %. ^[6]



Obrázek 5 Relativní vlhkost při různých teplotách ^[vlastní]

Rosný bod

Je význačným prvkem vlhkosti vzduchu, který vyjadřuje teplotu, při které se vzduch stane plně nasycený a jeho relativní vlhkost dosáhne svého maxima. Teplota rosného bodu je buď shodná nebo nižší než teplota okolního vzduchu. Relativní vlhkost vzduchu roste v závislosti na zmenšujícím se rozdílu těchto dvou teplot. Jestliže se teplota vzduchu sníží pod hodnotu teploty rosného bodu, obsah vodních par se již do vzduchové částice nevejde a dochází ke kondenzaci do kapalného skupenství. Jestliže je teplota vzduchu shodná s teplotou rosného bodu můžeme zaznamenat tvorbu rosy nebo mlhy s nimi spojené zhoršení dohlednosti. ^{[7][6]}

Měření vlhkosti

V praxi se nejčastěji měří teplota rosného bodu a relativní vlhkost. K měření těchto hodnot se používá zařízení zvané vlhkoměr (hygrometr). V odborné meteorologii probíhá měření vlhkosti na základě roztažnosti lidského vlasu nebo živočišné membrány, která na vlhkost vzduchu reaguje. Dále je k profesionálnímu měření určen Augustův psychrometr. ^{[7][6]}

Pro širokou veřejnost jsou tyto přístroje značně nevhodné, a jsou zastoupeny automatickými čidly. Ty měří relativní vlhkost na základě hygroskopické kapacity polymerové vrstvy čipu. Součástí měřicí sondy bývá standardně senzor okolní teploty, kterou dokáže měřit. ^{[7][6]}

1.2.3 Tlak

Tato krátká podkapitole stručně popisuje další významný meteorologický prvek, kterým je atmosférický tlak vzduchu. Ten není příliš podstatný pro tuto diplomovou práci, a proto o něm bude pojednáno pouze v několika řádcích. ^[6]

Tlak vyjadřuje sílu působící na jednotku plochy. Atmosférický tlak je síla, která je vyvozena tíhou vzduchového sloupce, která působí na zemský povrch. Atmosférický tlak klesá se vzrůstající výškou a je velmi ovlivněn teplotou vzduchu, která způsobuje rozdílný tlak u jednotlivých vrstev vzduchu. Tato rozdílnost je spojena především se změnou počasí. ^[6]

V meteorologii se pro měření tlaku používá jednotka hektopascal, které předcházelo měření v milibarech. V letectví se můžeme setkat s hodnotou tlaku v milimetrech rtuťového sloupce (mmHg). Tlak se měří rtuťovými tlakoměry nebo aneroidy, které pracují na základě roztažnosti kovových částí. ^[6]

1.3 Meteorologické jevy

Meteorologické jevy označují veškeré děje probíhající na zemském povrchu nebo v atmosféře, které jsou pozorovány na meteorologických stanicích. Patří k nim především meteory, které se objevují ve formě dešťových srážek, bouřek, mlhy, sněhové pokrývky a dalšími jevy jako je například vítr. U meteorologických jevů můžeme zaznamenávat časové údaje, intenzitu a vzdálenost od místa konání. ^[2]

Meteor

Název meteor popisuje určitý druh jevu nebo úkazu objevující se v atmosféře. Může se jednat o úkazy elektrické nebo optické povahy anebo úkazy charakteru vodních srážek. ^[2]

Izoterma

Izoterma spojuje místa se shodnou teplotou. V letecké meteorologii je pro nás podstatnější termín nulová izoterma, která vyjadřuje spojitou hladinu nulových teplot. V této hladině se již začínají tvořit námrazové podmínky. Výška nulové izotermy je závislá na ročním období, v zimních měsících je v důsledku nízkých teplot položena níže, než je tomu v letních měsících. Z toho důvodu jsou pro zimu typické srážky v podobě sněžení. Srážky padají z nízké oblačnosti s teplotami vzduchu kolem bodu mrazu. Padající srážka se nestačí dostatečně ohřát a dopadne na povrch ve formě sněhové vločky. [9]

Inverze teploty

Inverze znamená obrácený průběh změny teploty s narůstající výškou, než je v reálné atmosféře obvyklé. V takzvané inverzní vrstvě roste společně s výškou i teplot. Podle výšky inverzní vrstvy rozlišujeme, zdali se jedná o inverzi přízemní nebo ve volné atmosféře. Inverze brzdí horizontální i vertikální promíchávání vzduchu. V průmyslových oblastech může vést ke zvýšené koncentraci skleníkových plynů. [2] [4]

Přízemní inverze často vzniká radiačním ochlazením během noci. Jedná se o intenzivní vyzařování tepla ze zemského povrchu, které zahřívá přilehlou vrstvou vzduchu, která se tak stává teplejší než vrstvy nad daným podkladem a dochází tak k opačnému průběhu růstu teploty s výškou. Vznik inverze ve volné atmosféře může být podmíněn mnoha příčinami. Příčiny jejich vzniku jsou následující: [4] [7]

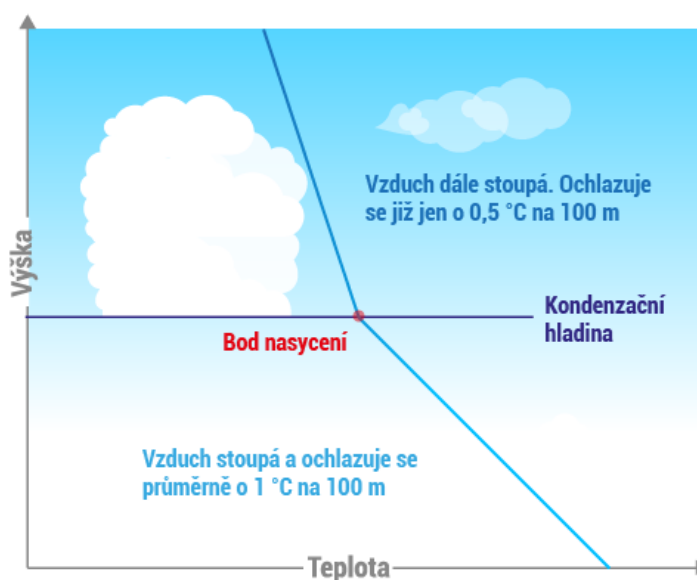
- Ochlazování vzduchu od horní hrance oblačnosti (Radiační). [7]
- Nasunutím teplejší vrstvy na vrstvu chladnějšího vzduchu (Subsidenční). [7]
- Sklesání vlhkého vzduchu pod teplejší vrstvou vzduch (Pasátové). [7]
- Z vlivu turbulentního proudění (Turbulentní). [7]

Kondenzace vodních par v atmosféře a vznik oblačnosti

Kondenzací vodních par se rozumí změna stavu vody z plynného do kapalného skupenství. Zemský povrch se během dne prohřívá a dochází k odpařování vody z jeho povrchu. Zahřáté vodní páry proto začnou stoupat vzhůru, rozpínají se a tím se ochlazují. V důsledku klesající okolní teploty s výškou roste hodnota jejich nasycení. V okamžiku, kdy dosáhne teplota stoupajícího vzduchového elementu hodnoty rosného bodu, dochází ke kondenzaci. Vodní pára se přemění na drobné kapičky nebo desublimuje přímo do pevného stavu v podobě ledových krystalků, avšak k desublimaci dochází pouze při teplotách pod bodem mrazu. Transformaci vodních par do kapalného skupenství můžeme pozorovat na tzv. Kondenzační hladině. [4] [7]

Kondenzační hladina

Kondenzační hladina je výška, ve které nastává přesycení vzduchu vodními parami následkem ochlazení během jejich výstupu a dochází tak ke kondenzaci. Jakmile teplota vzduchu dosáhne hodnoty rosného bodu, veškeré vodní páry zkondenzují do kapalného skupenství. V této hladině vzniká viditelná základna oblačnosti, která vertikálně roste vzhůru a tvoří tak oblaka, což můžeme vidět na obrázku číslo 6. ^{[4][7]}



Obrázek 6 Kondenzační hladina a vznik oblačnosti ^[vlastní]

Vznik oblačnosti

Oblačnost vzniká především ochlazení vzduchu na hodnotu teploty rosného bodu během vzestupného vertikálního pohybu nad kondenzační hladinu. Oblak je tvořený množstvím drobných kapiček vody nebo ledových krystalů. Ve spodní části oblaku se nejčastěji vyskytují vodní kapky, ve svrchních částech vertikálně přechází v ledové krystaly. Skupenství oblačnosti je především závislé na teplotě vzduchu. ^{[7][4]}

1.3.1 Mlha

Mlha vzniká nahromaděním drobných vodních kapiček v přízemní vrstvě vzduchu, která je zcela nasycená vodními parami formou vodních kapiček, ledových krystalků nebo jejich směsí. Mlha může také vzniknout smíšením teplého a studeného vzduchu ve stavu blízkém absolutního nasycení. Vysoká koncentrace vodních kapek přítomných ve vzduchu snižuje viditelnost na úroveň do vzdálenost několika stovek metrů. ^{[7][6]}

Radiační mlhy

Tento druh mlhy vzniká při bezoblačném podnebí, nejčastěji během noci. Dochází k poklesu teploty zemského povrchu, který postupně ochlazuje přilehlé vrstvy vzduchu. S poklesem teploty, roste jeho relativní vlhkost a v bodě nasycení dochází ke kondenzaci. Při kondenzaci vznikají drobné kapičky, případně ledové krystalky, které jsou ve vzduchu viditelné. ^{[7][6]}

Radiační mlhy se často tvoří v níže položených místech, která jsou bohatá na vlhkost zemského povrchu. Radiační mlhy se nejčastěji tvoří v druhé polovině noci, s poklesem teplot k nejnižším denním hodnotám. Jejich trvání je poměrně krátké a s východem slunce se mlha rozpustí. ^{[7][6]}

Advekční mlhy

Advekční mlhy vznikají ochlazením vlhkého a teplého oceánské vzduchu nasouvající se na studený zemský povrch. Teplota zemského povrchu má nižší hodnotu než teplota rosného bodu přitékajícího oceánskému vzduchu, což způsobí prudké ochlazení. Relativní vlhkost ochlazeného vzduchu dosáhne svého absolutního maxima a stane se tak plně nasyceným. Vodní páry zkondenzují a na povrchu se vytvoří mlha značného vertikálního rozsahu často doprovázena mrholením. Advekční mlhy se tvoří v libovolné denní době anebo v noci a jsou zesilovány radiační mlhou. ^{[7][6]}

Mlhy z vypařování

Mlhy z vypařování vznikají přítomností rozsáhlých vodních ploch, které jsou teplejší než okolní vzduch. Nad vodním povrchem dochází k odpařování vody a studený vzduch tak dosáhne dostatečného nasycení a kondenzuje. V průmyslových oblastech může být vznik mlhy vyvolán vysokou koncentrací kondenzačních jader, jako jsou nečistoty, prach a produkty spalování z výroby. ^{[7][6]}

Frontální mlhy

Tento typ mlhy vzniká ve spojitosti se zvýšenou vlhkostí vzduchu a je úzce spjat s frontálním systémem. Ve spojitosti s teplou frontou mluvíme o předfrontální mlze, která vlivem vypařování teplých dešťových srážek zvyšuje vlhkost vzduchu a tvoří se před frontou. Zafrontální mlha postupuje společně se studenou frontou a vzniká na rozhraní studeného a teplého vzduchu, který uzavírá studenou frontu. Ke vzniku dochází na stejném principu, jako i mlhy předfrontální. ^{[7][6]}

Kouřmo

je přízemní vrstva tvořená množstvím mikroskopických vodních kapiček. Kouřmo nedosahuje takové relativní vlhkosti jako mlha, ale i přes to je její relativní vlhkost poměrně vysoká. Kouřmo může definovat jako formu lehčí mlhy, složenou z drobných kapiček, vznášející se vzduchu. Dohlednost je skrze vodní obsah kouřmo snížena na vzdálenost v rozmezí 1 až 10 km. ^[10]

Mrholení

Mrholení je definováno jako druh tekuté srážky s průměrem mezi 0,025 až 0,250 mm. Vyznačuje se velmi drobnými vodními kapičkami, které jsou obsaženy ve vzduchu. Mrholení vzniká ve vrstevnaté oblačnosti bez výstupných proudů a nedochází vněm k nárůstu velikosti vodních kapek. Proti pádu vodních kapek působí odpor vzduchu, který drží kapky v konstantní výšce, ve které nedochází k jejich vypadávání. Během těchto vertikálních pohybů, se některé kapky vzájemnými srážkami shlukují do větších a těžších forem, až je odpor vzduchu neudrží a padají k zemi. ^{[6][11]}

1.3.2 Námraza

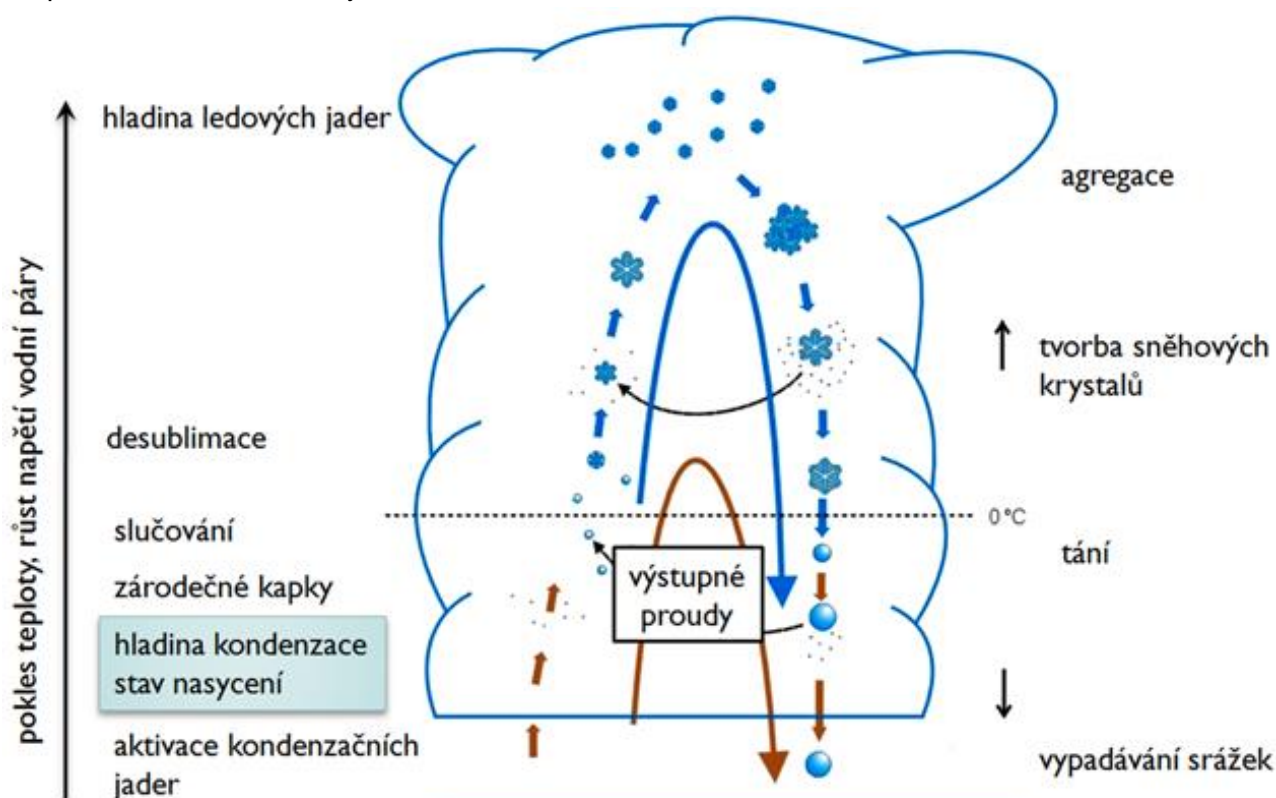
Námraza patří mezi jeden z nejnebezpečnějších meteorologických jevů v letecké dopravě, který může způsobit vážné letecké nehody se smrtícími následky. Námrazou se rozumí jakékoli usazování ledu nebo vznik ledové vrstvy na povrchu letadla, který je podchlazen do záporných teplot a přišel do kontaktu s přechlazenými kapkami vody, které na něm zamrzly. ^[12]

Následkem usazování ledu dochází ke zvýšení hmotnosti, zvýšení spotřeby paliva a změně aerodynamických vlastností letadla. Nejčastěji má námraza přímý vliv na snížení vztlaku, rychlosti a zvýšení odporu celého draku. Námraza dále ovlivňuje funkčnost pohyblivých nosných ploch, které se stávají méně účinné a mohou způsobit problémy s ovládáním. Nejdříve námraza vzniká na místech, která jsou vyznačována tenkým profilem, což jsou právě náběžné hrany křídel, listů vrtule anebo antény. U těchto částí dochází ke vzniku námrazy nejintenzivněji. Při silné intenzitě námrazy se mění těžiště letounu, které zhoršuje stabilitu a přispívá k stížené říditelnosti. ^{[12][13]}

S námrazou se nejčastěji můžeme setkat v podmínkách konvekční a slohové oblačnosti při teplotách 0 až -12 °C, kde je četnost přechlazených vodních kapek největší a dosahují větších velikostí, které mohou být mnohem závažnější pro bezpečnosti letu. Námraza vzniká na listech vrtule nebo na částech předního skla slouží jako prvotní indikace k nebezpečí vzniku námrazy na dalších částech a mělo by být, co nejdříve zakročeno, aby nedošlo horším následkům. ^[4]

Vznik ledových jader v oblačnosti

Vzduch obsahující vodní páry stoupá vzhůru, postupně ztrácí svoji energii a teplotu. Dochází k jeho rozpínání a ochlazování. Vodní páry se v úrovni kondenzační hladiny přeměňují do kapalného stavu ve formě mikroskopických kapiček. V nasycené atmosféře dochází k jejich dalšímu slučování, jehož výsledkem jsou větší vodní kapky. V okamžiku, kdy okolní teplota dosáhne úrovně teploty pod bodem mrazu, může docházet ke změně skupenství vodního obsahu, mluvíme tak o hladině nulové izotermy. Přeměna přechlazených vodních kapek do pevného skupenství probíhá na základě dostatečného množství krystalizačních jader v okolí, na které mohou vodní kapky namrznout a utváří tak ledové krystalky. Pospaný proces můžeme vidět na obrázku číslo 7. Nejčastější formu krystalizačních jader představují různé nečistoty, prachové částice nebo vodní kapky, či ostatní ledové krystalky, které vlivem vertikálních proudů v oblaku cirkulují. [7][10]



Obrázek 7 Změna skupenství vody v oblačnosti [7]

Do určité výšky je oblak smíšený, voda se objevuje v kapalné i pevné formě a postupně přechází pouze do pevného skupenství. Tato hranice je definována jako hladina ledových jader, jejíž teplota je -12°C , od této výšky je oblak tvořen převážně ledovými krystaly. [7]

Podmínky vzniku námrazy

Vznik námrazy podléhá několika faktorům, které se navzájem kombinují. Aby se námraza na povrchu tělesa vytvořila, musí být splněny následující základní podmínky. ^[6]

- Teplota vzduchu je 0 °C nebo nižší. ^[6]
- Přítomnost přechlazených vodní kapek. ^[6]

Vznik námrazy

Vznik námrazy je především ovlivněn druhem oblačnosti, teplotou a množstvím přechlazených vodních kapek. Nejčastěji dochází k vzniku námrazy v konvekční a slohovitě oblačnosti s teplotami od 0 °C do -12 °C s nejčetnějším výskytem velkých přechlazených vodních kapek. Při teplotách nižších než -12 °C se ve vzduchu vyskytují drobné krystalky, které nepředstavují pro letadlo zvýšené nebezpečí. Přechlazené vodní kapky jsou v těchto podmínkách velmi vzácné, v ojedinělých případech může námraza vzniknout při teplotě až - 40 °C. ^{[12] [14]}

Ve chvíli, kdy se letadlo dostane do prostředí bohaté na přechlazené vodní kapky a teplota jeho povrchu nabývá záporných hodnot, dochází ke střetům vodních kapek s jeho povrchem, na němž se přichytí a zamrznou. Malé kapky zmrznou okamžitě, velké kapky se rozlijí do tenké vrstvy, a poté taktéž zmrznou. Četnost střetů přechlazených kapek s povrchem letadla roste, se stoupající rychlostí a s jejich velikostí. Kapky se postupně koncentrují na náběžných hranách a dochází k jejich vrstvení. Při velmi nízkých teplotách se led usazuje pouze v blízkosti náběžných hran. ^[14]

Celkové množství a rychlost tvorby závisí nejvíce na teplotě a vzdušné vlhkosti. Velký vliv na rychlost vzniku námrazy má tvar objektu, který je vystaven námrazovým podmínkám. Námraza se častěji tvoří u pomaleji letících těles, jelikož není jejich povrch aerodynamicky zahříván následkem vysokých rychlostí. ^[12]

Vznik námrazy nemusí být podmíněn okolní zápornou teplotou vzduchu. Jestliže je povrch letadla vystaven teplotě pod bodem mrazu a letadlo přelétá do prostředí s teplotou kladnou, teplota povrchu zůstává svojí setrvačností stále v záporných hodnotách. Pokud se v okolí vyskytují přechlazené vodní kapky, podmínky nutné ke vzniku námrazy jsou splněny. ^[12]

Přechlazené vodní kapky

Jedná se o stav vody, která se nachází v kapalném skupenství při teplotách pod bodem mrazu. Přechlazené vodní kapky nemrznou ve volném ovzduší okamžitě, ale při teplotách mnohem nižších pohybující se od -10 °C. Pokud nejsou v okolí drobné částice (krystalizační jádra) voda

zůstává v ojedinělých případech přechlazená v kapalném skupenství až do teploty $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je tomu díky uvolněnému latentnímu teplu, jedná se o mikroskopické kapky, které se od nižších teplot vzduchu již nevyskytují. ^{[12] [4]}

Přechlazené vodní kapky zmrznou, pokud se dostanou do kontaktu s krystalizačním jádrem. S klesající teplotou se snižuje pravděpodobnost výskytu přechlazených vodních kapek, až do úrovně teploty $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při této teplotě se jedná o mikroskopické přechlazené vodní kapky, od nižších teplot vzduchu se již nevyskytují, jelikož zamrzají samy od sebe. Přechlazené vodní kapky jsou nejčastěji v konvekční oblačnosti s teplotami od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$. ^{[4] [5] [12]}

Vodní obsah oblaku závisí především na výšce jeho základny. S nižší výškou základny roste intenzita námrazy. Výskyt přechlazených vodních kapek se můžeme u různých druhů oblačnosti lišit. Především zde velmi záleží na teplotě, která zásadně ovlivňuje skupenství vody. Převažující skupenství vyskytující se v oblačnosti je blíže specifikováno na obrázku č.8. ^[12]

- Velké podchlazené vodní kapky se vyskytují při teplotách od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ v oblačnosti typu CU, CB a NS ^[5]
- Malé podchlazené kapičky vody se vyskytují
 - při teplotách od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ v oblačnosti typu ST, SC, AS a AC ^[5]
 - při teplotách od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve vrchních hranicích oblačnosti typu CU, CB a NS ^[5]

$-50\text{ }^{\circ}\text{C}$	Pouze ledové krystaly
$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	Ledové krystaly, ojediněle malé vodní kapky
$-30\text{ }^{\circ}\text{C}$	Převládající výskyt ledových krystalů
$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Přechlazené vodní kapky a ledové krystaly
$-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	Přechlazené vodní kapky a ledové krystaly
$0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Přechlazené vodní kapky

Obrázek 8 Skupenství vody při záporných teplotách ^[vlastní]

Intenzita námrazy

Intenzita námrazy je tloušťka vrstvy ledu na povrchu vytvořená za jednotku času. Závisí především na koncentraci přechlazených vodních kapek přítomných ve vzduchu, na jejich velikosti a rychlosti letu. S klesající výškou základny oblačnosti, stoupá vodní obsah oblaku

a jeho teplota. Intenzita bude na základě množství vodního obsahu růst. Pokud je oblak složen pouze z ledových krystalků, můžeme skrze něj proletět, aniž by došlo ke střetu s přechlazenou vodní kapkou. Většinou tomu tak je ve vrchních patrech oblačnosti. ^{[6] [5] [12]}

S přibývajícím množstvím námrazy se zmenšuje poloměr zakřivení náběžných hran. Změna poloměru zakřivení způsobí, že se na profil zachytává větší množství vodních kapek a intenzita množství námrazy tak prudce roste. Zakřivení menších poloměrů příliš neovlivňuje laminární proudění, což způsobí usazování většího množství kapek různých velikostí na povrchu, zatímco u větších poloměrů se jedná pouze o malé množství drobných kapek, které se dokáží na povrch přichytit. ^{[12] [6] [5]}

Námraza se bude intenzivněji tvořit na tenkých profilech, které jsou schopné zachytit větší množství kapek než profil tlustý, je tomu vlivem již zmíněného laminárního proudění, které usazování ledu do určité míry zabraňuje. ^[12]

Intenzita	Intenzita	Kumulace ledu
Slabá námraza	do 0,6 mm/min	Viditelná vrstva ledu, není nebezpečná a lze ji odstranit dostupnými odmrazovacími prostředky
Mírná	0,6 -1,0 mm/min	Míra intenzity vzniku námrazy není v krátkodobém časovém horizontu příliš nebezpečná. Při delším letu (více než 1 hodinu) může představovat značné riziko nahromadění množství ledu, pokud nebudou použity odmrazovací prostředky,
Silná	1,0-2,0 mm/min	Nárůst množství námrazy za časovou jednotku je značně vysoký a ke vzniku dochází ve velmi krátkém časovém sledu. Použití odmrazovacích prostředků je v tomto případě nutné.
Velmi silná	nad 2,0 mm/min	Nárůst ledu představuje takovou rychlost, u které je nemožné zabránit vzniku dostupnými odmrazovacími prostředky a musí dojít k okamžité změně trasy letu.

Tabulka 2 Tabulka intenzity námrazy ^{[6] [5]}

Druhy námrazy

na základě několika faktorů, jako je velikost přechlazených kapek, rychlosti letu a teplota vzduchu, dělíme námrazu do tří základních kategorií. ^[15]

Jinovatka

Jinovatka je druh lehké námrazy, která je výsledkem sublimace vodních par na povrchu a vzniká radiačním ochlazením. Nejčastěji vzniká na povrchu stojících letadel, avšak může se vytvořit i u letících letadel při přechodu mezi vrstvou vzduchu se zápornou teplotou a vrstvou teplejšího vzduchu. Jinovatka tvoří tenký film ledových krystalků a vzniká při vysokých vlhkostech vzduchu. ^{[12] [4]}

- **Vznik jinovatky na zemi** je podmíněn radiačním ochlazením vzduchu. Nejčastějším projevem je tenká vrstva na povrchu stojících letadel, což je zobrazeno na *obrázku č. 9*.
- **Vznik jinovatky za letu** je obvyklý při přechodu z vrstev vzduchu se zápornou teplotou do vrstev s teplotou kladnou. Těleso zůstává stále podchlazené a dochází k sublimaci vodních par na jeho povrchu, což vede ke vzniku ledových krystalků.



Obrázek 9 Jinovatka na stojícím letadle ^[36]

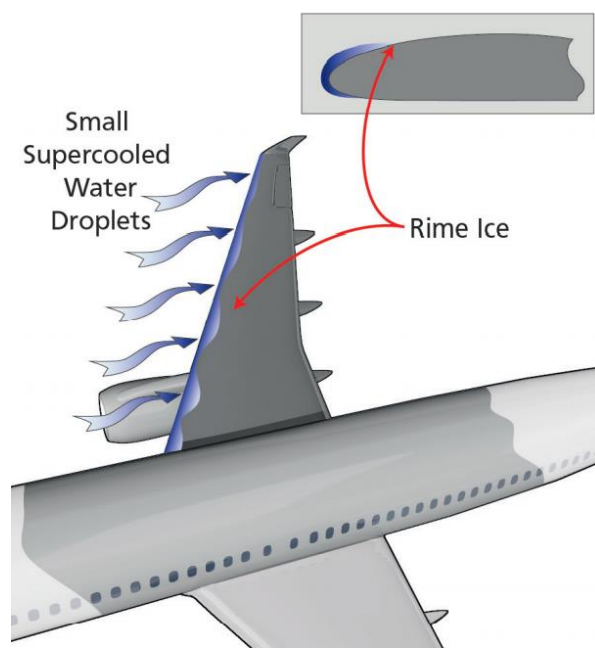
Jinovatka nezpůsobuje významné nebezpečí, ale může být vhodným základem k usazování jiných druhů námrazy. ^[4]

Zrnitá námraza (Rime Ice)

Jedná se druh námrazy složený z drobných přechlazených kapek, které při kontaktu s povrchem letadla okamžitě zamrznou. Na povrchu letadla pak tvoří drsný, mléčně zbarvený neprůhledný film. ^[4]

Zrnitá námraza se tvoří při nízkých teplotách v rozmezí 0 °C až -40 °C, nejčastěji však při teplotách od -10 °C do -20 °C, ve kterých jsou přechlazené kapky menší a méně početné. Struktura ledu je tvořena drobnými kapkami téměř kulovitého tvaru, které mezi sebe uzavírají vzduchové bubliny, které při kontaktu s povrchem společně okamžitě zmrznou. Zrnitá námraza má podobu mléčného, drsného a neprůhledného ledu a usazuje se pouze v oblasti náběžných hran, nešíří se do větších vzdáleností směrem po profilu, což je znázorněno na obrázku číslo 10. ^[4]

Nejčastější výskyt zrnité námrazy je v oblačném systému teplých front během zimy a ve vyšších patrech oblačnosti, kde je kumulace drobných přechlazených kapek největší. Zrnitá námraza je méně nebezpečná než ledovka. ^[5]



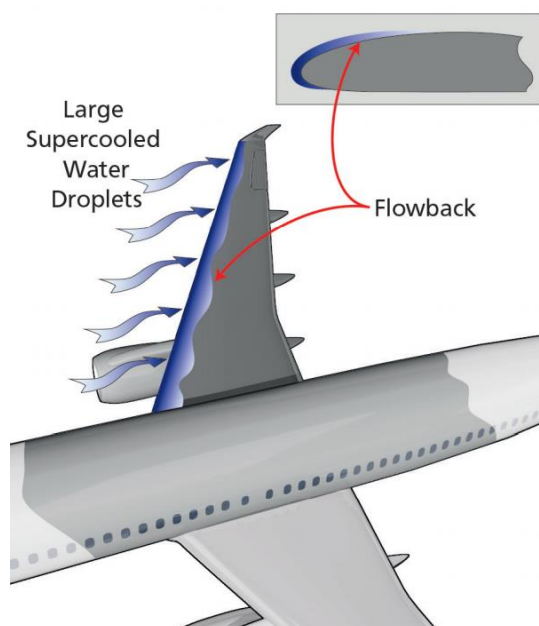
Obrázek 10 Vznik zrnité námrazy na profilu ^[5]

Ledovka (Clear/Glaze Ice)

Ledovka je čistá a průhledná forma námrazy tvořená velkými přechlazenými kapkami, které tvoří vrstvu souvislého hladkého ledového filmu. Ledovka vzniká nárazem vodních kapek na povrch letadla, což je zobrazeno na obrázku číslo 11. V důsledku uvolnění latentního tepla během skupenské přeměny se proces mrznutí oddálí a vodní kapka se rozlije po povrchu a až poté zmrzne. ^{[5] [6]}

Ledovka vzniká v prostředí tvořené nižšími vrstvami oblačnosti, které obsahují více přechlazených kapek s větším průměrem. Teplota, při které ledovka nejčastěji vzniká je slabě pod bodem mrazu a méně často při teplotách nejvýše do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pravděpodobnost vzniku námrazy je větší především v podmínkách mrholením, mrznoucího deště nebo v konvekční oblačnosti (Cu, Cb). ^{[12] [6]}

Ledovka se formuje velmi rychle prostřednictvím kumulace ledových vrstev, které výrazně ovlivňují obtékání profilu, zvyšují odpor a hmotnost letadla. Tento druh námrazy patří k nejnebezpečnějším druhům a musí být proti němu zakročeno vhodným proti námrazovým opatřením. ^{[12] [6] [5]}



Obrázek 11 Vznik ledovky na profilu ^[5]

Tvar námrazy

Tvar ledu může mít na náběžné hraně různou podobu, která závisí hlavně na teplotě, vzdušné vlhkosti a na typu oblačnosti. V závislosti na rychlosti letu může být tvar ovlivněn aerodynamickým ohřevem, který je vyznaný až u rychlostí nad 500 km/h. Do té doby intenzita námrazy, se stoupající rychlostí, narůstá. ^[12]

Profilová námraza

Tento tvar námrazy vzniká při velmi nízkých teplotách kolem $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ prudkým nárazem drobných přechlazených kapek v oblasti náběžných hran a povrchu okamžitě přilnou. Led se rovnoměrně usazuje po celé délce náběžné hrany a zachovává tvar původního profilu, jak je vidět na *obrázku č. 12*. Při profilové námraze nedochází k vážnému ohrožení bezpečnosti letu a nedochází k redukci aerodynamických vlastností letadla. ^{[4] [6]}



Obrázek 12 Beztvará námraza ^[4]

Žlábková námraza

Tento tvar námrazy vzniká při vyšších teplotách od $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a současně při vysokých rychlostech letu. Následkem aerodynamického ohřevu nabývá náběžná hrana kladné teploty, zatímco teplota jejího okolí zůstává na teplotě záporných hodnot. Kapky tak nemohou zmrznou

hned při nárazu a jsou pak unášeny proudem vzduchu do chladnějších částí podél profilu, kde zamrzají, a tvoří tak charakteristický tvar žlábků, který můžete vidět na *obrázku č. 13*. Žlábkový tvar je velice nebezpečná forma námrazy ovlivňující odpor a aerodynamické vlastnosti profilu.

[4] [6]



Obrázek 13 Žlábková námraza [4]

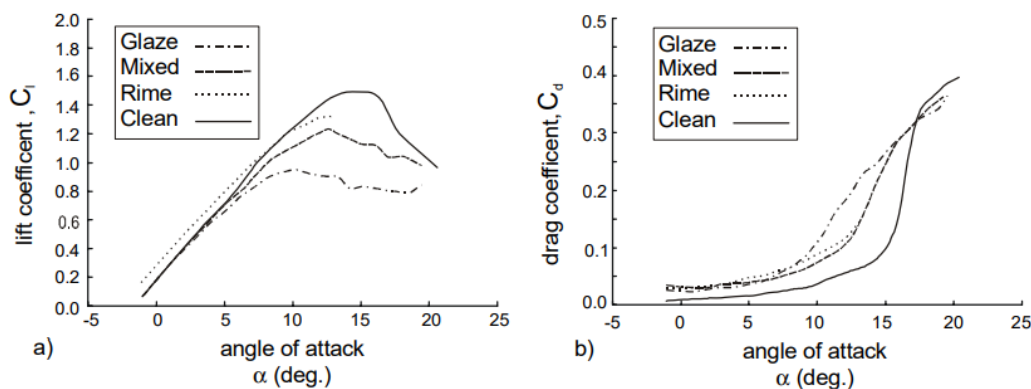
Beztvará námraza

Tento tvar námrazy je běžný za poměrně vysokých teplot lehce pod bodem mrazu ($-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) a teplotách povrchu pod bodem mrazu. Vzniká při vyšších rychlostech, kde se již projevuje aerodynamický ohřev. Beztvará námraza se tvoří při letu ve smíšené oblačnosti, která obsahuje vysokou koncentraci vodních kapek a ledových krystalků. Ty jsou následně unášeny podél profilu, ochlazují povrch letadla a usazují se na ostatních vrstvách. Jakmile je povrch dostatečně podchlazen, vrstvy zmrznou, Nejčastější vznik toho druhu námrazy je během stoupání smíšenou oblačností. [6]

Účinek vlivu námrazy

Obtékání profilu

Námraza se nejčastěji zachytává na náběžných hranách, kde naruší aerodynamický profil. Výsledkem účinku námrazy je snížení vztlačku, zvýšení odporu, zvýšení hmotnosti, zvýšení pádové rychlosti a zvýšení spotřeby paliva. Poměrně tenký nános ledu s hrubým povrchem snižuje vztlak o 30 % a odpor o 40 %. Závažnost vlivu námrazy na profil obtékání závisí na druhu vzniklé námrazy a je graficky zobrazen na *obrázku číslo 14*. [5]



Obrázek 14 Vliv námrazy na profil podle jednotlivých druhů [22]

Navýšení hmotnosti

V důsledku vzniku námrazy na jednotlivých profilech úměrně k množství ledu narůstá hmotnost celého letadla. To může vést ke ztrátě stability, vlivem posunutého těžiště, jelikož se led po celém draku usazuje nerovnoměrně. Úlomky ledu mohou způsobit poškození povrchu letadla. [5]

Nefunkčnost přístrojů

Usazený led může způsobit nefunkčnost mnoha letových přístrojů jako je třeba výškoměr nebo variometr. Nejohroženější jsou v tomto směru komponenty, které významně vyčnívají z povrchu draku. Nejčastěji tak zamrzají antény, vystupující čidla nebo například pitotova trubice. To může vést k měření chybných dat a k následné nefunkčnosti palubních přístrojů [5]

Motory

Pístový

Námraza pístového motoru může způsobit zastavení jeho chodu. Nejčastěji vzniká námraza v karburátoru, na vstupních částech přívodu vzduchu do motoru nebo zamrznutím vody v palivu. Námraza karburátoru patří mezi nejnebezpečnější jevy spojené s námrazou, jelikož se může objevit i při kladných teplotách. Námraza karburátoru je způsobena: [5]

- Náhlým poklesem teploty v důsledku absorbování latentního tepla během odpařování paliva.
- Poklesem teploty v důsledku adiabatického rozpínání vzduchu při průchodu potrubím.

[5]

Proudový

Proudové motory jsou na námrazu velmi náchylné a pokud dojde jejímu vzniku na vstupní části dmychadla, dojde ke snížení výkonu a účinnosti celé pohonné jednotky. Drobné úlomky ze vstupní části mohou vniknout do jádra motoru, což způsobuje pumpáž a může dojít k jeho poškození. [5]

Proudový motor je na námrazu nejnáchylnější především při vysokých otáčkách a nízké dopředné rychlosti. Adiabatické ochlazování může způsobit pokles teploty až o 5 °C. V důsledku těchto skutečností je nutné, během průletu oblastí s vysokým výskytem vodních srážek a venkovní teplotou nižší než + 10 °C, mít zapnuté protinámrazové opatření. [5]

Námraza vrtulových letadel

V průběhu letu nedosahují vrtulová letadla příliš vysokých rychlostí, a proto jsou na námrazu mnohem náchylnější než letadla proudová. Při rychlostech do 500 km/h nedochází k aerodynamickému zahřívání jejich povrchu a intenzita námrazy tak roste společně

s rychlostí. Nejvíce jsou námrazou ohroženy části, které mají tenký profil a jejich rychlost se blíží k této hranici. ^[15]

Mezi nejohroženější části patří právě vrtule, jejíž profil je velmi tenký. Led se usazuje mnohem rychleji právě na listech vrtule, než je tomu na křídlech, jelikož je její profil mnohem tenčí. Námraza vrtule patří mezi počáteční indikaci před vznikem námrazy na ostatních částech letounu. ^[15]

Ze začátku se námraza tvoří ve středu vrtulového náboje a následně zamrzají i vrtulové listy. Led vzniká především na náběžných hranách listů, podobně jako je tomu u křidel. Vlivem vysokých rychlostí dochází k aerodynamickému ohřevu, jehož následkem nedochází k namrznání konců vrtulových listů. Na konci listů vzniká rovněž odstředivá síla, která ovlivňuje ledovou vrstvu odstředivou silou a může tak dojít k odlupování nebo odtrhnutí ledu. Úlomky ledu mohou poškodit povrch letadla nebo vniknout přímo do motoru. Jamile roste uhlová rychlost otáčení, roste odstředivá síla, která může námrazu na konci listů odstranit. ^[15]

Námraza vrtule zhoršuje aerodynamické vlastnosti, snižuje její účinnost a celkový tah. Přechlazené vodní kapky se na ní usazují mnohem více než na křídlech a zvyšují hmotnost jednotlivých listů. Usazený led je rozprostřen na každém listu různorodě a působí na něj rozdílným zatížením. To vyvolává asymetrické obtékání vzduchu na dílčích profilech listů a tím vznikají silné vibrace. Vibrace způsobí podstatné namáhání listů a dále se přenáší i na lože motoru, což může zapříčinit poruchu pohonné jednotky. ^[15]

Námraza vrtulí multikoptér

Námraza vrtule nepředstavuje u letadel takové zásadní riziko, jako je tomu u multikoptér. Vrtule multikoptér tvoří zároveň nosnou plochu, která je u letadel zastoupena pevnými křídly. V současné době je námraza multikoptér zkoumána pouze okrajově, jelikož jejich provoz není v námrazových podmínkách tak častý a není ani nezbytný. V nepříznivých podmínkách lze let odložit. ^[16]

Námraza nejčastěji vzniká v prostředí velmi nasyceného vzduchu, kde jsou přítomny viditelné vodní kapky (mlha, kouřmo), které se vyskytují již v přízemních vrstvách. Vysoká rychlost vrtule způsobuje rozdílný tlak na přítokové a odtokové hraně. Ve vstupní části před přítokovou hranou dochází k poklesu tlaku, který se projeví snížením teploty vzduchu. Teplota okolního vzduchu může být i o několik stupňů vyšší než teplota vzduchu procházející vrtuli. Jelikož je urychlení vzduchu vrtulí značné, nedochází k výměně tepla s okolím, mluvíme tak o adiabatickém ochlazení, které snižuje teplotu povrchu vrtulových listů. Jestliže je splněna podmínka dostatečné vodní vlhkosti a teplota povrchu listů vrtule klesne pod teplotu 0 °C, vznikne námraza, kterou můžete vidět na *obrázku č. 15*. ^[16]

Tenká vrstva námrazy může způsobit zásadní změnu aerodynamického obtékání profilu. Vrtule nedosahují požadované efektivity a snižuje se tak její produkovaný tah. Snížený tah se projeví vyššími požadavky na výkon a dochází k zvýšenému odběru proudu z akumulátorů. Během velmi dlouhých letů se tak může stát, že v akumulátorech nezbyde dostatečné množství energie k návratu multikoptéry do místa vzletu. ^[16]



Obrázek 15 Vzniklá námraza na listu multikoptéry ^[36]

2. Bezpilotní letadlo

Bezpilotní letadlo je druh letadla, které je provozováno bez přítomnosti pilota na palubě a je ovládáno z dálkové řídicí stanice RPS (**R**emote **P**ilot **S**tation). Bezpilotní letadlo se v angličtině označuje jako UA (**U**nmaned **A**ircraft) nebo zkratkou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) používanou v USA. Osoba, která je pověřena řízením UA, se odborně nazývá dálkově řídicí pilot RP (**R**emote **P**ilot). Všechny tyto jednotlivé složky tvoří bezpilotní systém UAS (**U**nmaned **A**ircraft **S**ystem), který se skládá z bezpilotního letadla, řídicí stanice a veškerých dalších prvků, které jsou nezbytné k vykonání letu. ^{[17][18]}

Bezpilotní letadla hrála velkou roli ve vojenském odvětví, kde se využívala ke sledování, průzkumu a ke strategicko-analytické činnosti. K historicky prvnímu nasazení došlo během druhé světové války, prostřednictvím dálkově řízené střely V1 s plochou dráhou letu, která byla určena k destrukční činnosti. Výhodou použití UA byla eliminace rizika ztráty lidských životů. Původní modely byly poháněny spalovacími nebo proudovými motory, což v měřítku komerčního použití nebylo příliš vhodné. Na základě nasazení výkonnějších baterií, bezkartáčových elektromotorů nebo pokročilé elektroniky došlo k prudkému rozvoji bezpilotních letadel pro širší veřejnost v posledním desetiletí, jelikož dříve tyto komponenty nebyly na takové technické úrovni. ^{[18][19]}

Bezpilotní letadla se dělí do několika kategorií, u nichž mají nejpočetnější zastoupení multikoptéry. Multikoptéra je nejdostupnější a nejčastěji používané bezpilotní letadlo mezi širokou veřejností. Vynikají velmi dobrou ovladatelností, přesností polohy zásluhou GNSS a uživatelskou přívětivostí. Často jsou širokou veřejností chybně nazývány drony. Z anglického překladu slova „DRONE“ je pojmenování poněkud zavádějící. Význam tohoto slova znamená hukot, bzukot nebo bzučení. ^[17]

2.1 Multikoptéra

Multikoptéra je dálkově ovládané bezpilotní letadlo (UA), jehož vztlak je vyvozován na nosných vrtulových listech se svislou osou rotace. Pohyb multikoptéry je řízen dálkově pověřenou osobou (RP) skrze RPS, která ovládá pohyb zařízení změnou otáček jednotlivých vrtulí. Pohyb je zajištěn v horizontální i vertikální rovině s možností kolmého startu nebo přistání. ^[17]

Název zařízení vychází z počtu pohonných jednotek, jedná se tedy o vícemotorové zařízení. V praxi se nejčastěji používají kvadrokoptéry, které disponují čtyřmi vrtulemi a shodným počtem pohonných jednotek. Počet jednotek není omezen a záleží pouze na provozovateli,

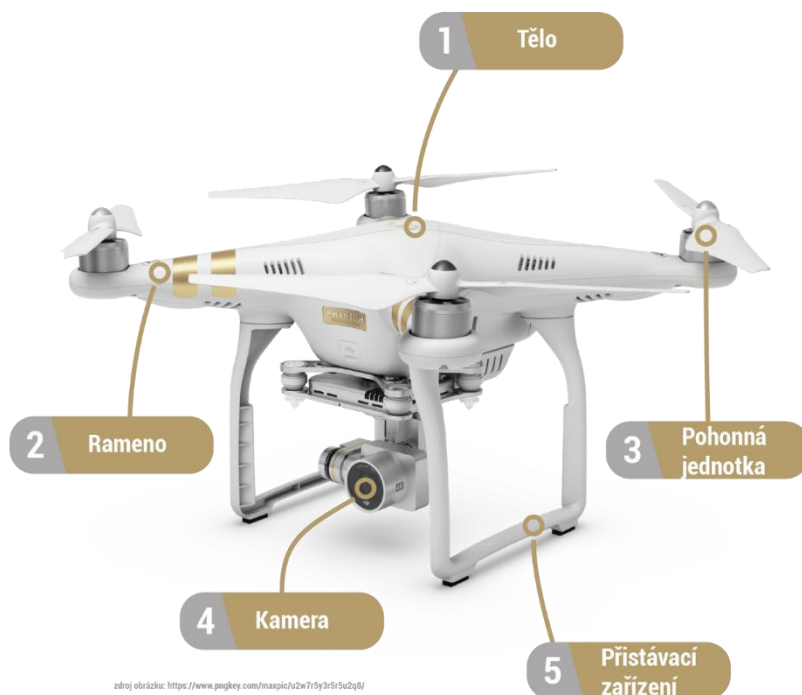
jakou konfiguraci si zvolí na základě svých požadavků. Počet pohonných jednotek roste s vyšší předpokládaného provozního nákladu, jako je zátěž v podobě kamery s těžkým objektivem. [17]

Odvětví, ve kterém dnes najdou multikoptéry využití, je velmi rozsáhlé. Jedná se o různorodou činnost, zabývající se monitorováním životního prostředí (trasování ledových ker, detekce požárů lesů, meteorologie), záchranou a vyhledáváním, geografii, dopravní analýzou anebo vědeckým výzkumem. V blízké budoucnosti se očekává vysoký nárůst využití multikoptér v různých průmyslovém odvětví, výrazně především v logistice. Velké společnosti jako je Amazon, Google nebo DHL plánují využití bezpilotních letadel ve velkém měřítku pro různou činnost, například pro doručování zásilek. [18]

Pro širokou škálu nasazení multikoptér v běžném provozu je zapotřebí dalšího vývoje, zlepšení spolehlivosti, bezpečnosti a zvýšení technické vyspělosti. K širšímu komerčnímu využití musí být především minimalizovány pořizovací a provozní náklady. Nezbytně nutná je, kromě pokročení technických a komerčních výzev, legislativní integrace UA a začlenění bezpilotních letounů do mezinárodního vzdušného prostoru. [18]

2.2 Základní části multikoptéry

Multikoptéry jsou důležitou součástí bezpilotního systému včetně řídicí stanice a ostatního příslušenství. Je rozdělena na několik částí, které se liší dle požadavků nebo druhu využití a jsou zobrazeny na *obrázku č. 16*. Hlavní část, tělo (1) obsahuje veškerou elektroniku, senzory



zdroj obrázku: <https://www.pengkey.com/mazpic/2w7r5y3r5f5u2q8/>

Obrázek 16. Popis těla multikoptéry [vlastní]

a pohonnou baterii. Z hlavní části vystupují ramena (2), která jsou oporou pohonným jednotkám (3) a jsou v nich uloženy regulátory. Počet ramen se liší v závislosti na počtu použitých pohonných jednotek. K bezpečnému vzletu a přistání jsou multikoptéry vybaveny přistávacím zařízením (5), které zajišťuje podpurnou činnost v době prostoje a umožňuje zavěšení užitečného nákladu jako je kamera nebo fotoaparát.^[17]

Tělo multikoptéry (1)

Jedná se o hlavní část draku, která zajišťuje výslednou pevnost a vzhled zařízení. Tělo je důležitá integrální část, která spojuje veškeré komponenty. V jeho útrobách nalezneme veškerou řídicí elektroniku a senzory, které vyhodnocují letová data. Na základě těchto dat a dat přijatých z RPS je umožněno ovládní pohybu zařízení ve vzduchu. Vysílač od RP přenáší kódovaný radiový signál skrze přijímač do řídicí jednotky, která signál zpracuje a předá povely regulátorům, které řídí množství otáček pohonných jednotek. Množství otáček na konkrétních pohonných jednotkách ovlivňuje výsledný pohyb multikoptéry.^[17]

Jednotlivé části mohou být vyrobeny z různých materiálů, které mají zásadní vliv na výslednou pevnost a hmotnost multikoptéry. U amatérských konstrukcí se jedná o dřevěné překližky anebo plastové části. Materiál použitý k výrobě konstrukce těla je nejčastěji plast, který může být vyztužen uhlíkovým vláknem, kompozitními materiály nebo použitými částmi z hořčíkových slitin. V konstrukci multikoptéry mohou být použity tyto materiály.^[17]

- Dřevo – použití dřevěných částí bývá levným řešením a pokud dojde ke zničení lze ji rychle a snadno nahradit. Její výroba a opracování je značně náročné a prakticky se nepoužívá.^[20]
- Plast – Je nejčastěji zastoupený materiál použitý u všech komerčních multikoptér. Vyniká příznivou cenou a vysokou odolností.^[20]
- Uhlíkový kompozit – Je velice lehký a zároveň velmi tvrdý materiál, což je vykoupeno vyššími pořizovacími náklady. Uhlíkové vlákno brání prostupu vysokofrekvenčního signálu, proto je třeba zvážit jeho použití v blízkosti elektronických komponentů.^[20]
- G10 – Materiál G10 je tvořen skelnými vlákny a jeho vlastnosti jsou podobné vláknům uhlíkovým. Cena tohoto materiálu je však nižší.^[20]
- Hořčíková slitina – jedná se o levný a snadno dostupný materiál, který vyniká nízkou hmotností, avšak nedosahuje takové hmotnosti jako kompozitní materiály. Slitina může být použita k vytvoření celého těla anebo ke zpevnění některých exponovaných částí.^[20]

Rameno (2)

Rameno poskytuje oporu pohonným jednotkám a napojuje je k hlavní části, tělu. Většina běžně používaných multikoptér je nejčastěji tvořena čtyřmi, šesti nebo osmi rameny a však můžeme narazit na konstrukce tvořené pouze třemi rameny. Počet ramen je shodný s počtem pohonných jednotek, které jsou umístěny na jejich koncích rovnoměrně po obvodu kruhu. ^[17]

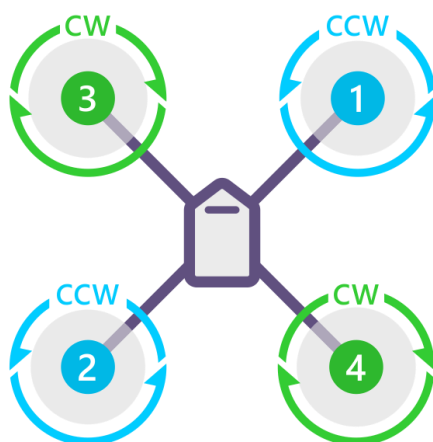
Obecně lze říci, že s počtem ramen a současným navýšením pohonných jednotek roste její složitost, pořizovací cena a hmotnost. Výhodou je, že v případě selhání pohonné jednotky lze lépe kompenzovat ztracený výkon a nemusí dojít k zřícení. Větší počet ramen je používá, jestliže není výkon jednotlivých pohonných jednotek dostatečný, používá se větší počet ramen s pohonnými jednotkami, k zajištění požadovaného výkonu, který roste s výší užitečného zatížení.

Jako nejideálnější a nejrozšířenější řešení se z tohoto pohledu jeví konstrukce typu kvadroptéra (4 ramena). Chytrým konstrukčním řešením je umístění regulátoru do nevyužitého prostoru uvnitř ramen. ^{[17] [20]}

Pohonná jednotka (3)

Pohonná jednotka je jedna z nejdůležitějších částí multikoptéry, která zajišťuje pohyb ve všech směrech. Pohonnou jednotku tvoří vrtule, elektromotor a regulátor, nejčastější variantou pohonu je elektřina. Tyto části budou podrobně popsány v dalších podkapitolách.

Počet pohonných jednotek je závislý na použitém konstrukčním řešení, tedy na počtu ramen. Ty musí tvořit vyrovnaný kroutící moment, proto je jejich smysl otáčení stabilně rozložen, jak můžete vidět na obrázku č.17. Energie je dodávána z pohonné baterie, která v závislosti na své kapacitě ovlivňuje dobu provozu. ^{[17] [20]}

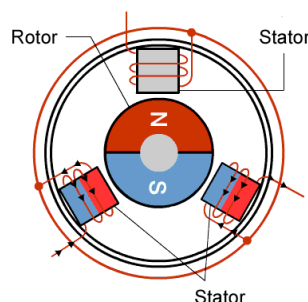


Obrázek 17 Smysl otáčení vrtulí UA ^[35]

Elektromotor

Elektromotor je zařízení, které mění elektrickou energii na energii mechanickou. To se projevuje otáčkami připevněných vrtulí. Elektromotor je složen z magnetů a cívek, které řídí tok magnetického pole prostřednictvím množství přitékajícího proudu. Vzájemnými silami mezi magnety a cívkami dochází k posunu magnetických částí, které začnou rotovat, zvenčí se tento pohyb jeví jako otáčení. Vzájemné uspořádání magnetů a cívek závisí na druhu použitého elektromotoru. Mezi základní typy patří komutátorový (brushed) a bezkomutátorový (brushless). Mezi nejčastěji používané patří právě bezkomutátorový stejnosměrný motor (brushless motor DC), který je také označován jako bezkartáčový. Stejný proud je veden fixními cívkami, prostřednictvím elektromagnetického pole dochází k rotaci magnetů kolem středu. Průběh otáček motoru je díky protékajícímu stejnosměrnému proudu krokový. Výhodou použití, tohoto typu motoru, je vyšší životnost a účinnost za cenu vyšších nákladů.

[17] [20] [21]



Obrázek 18. Princip funkce elektromotoru [21]

Regulátor

Regulátor se stará o řízení výstupního proudu, který je přiváděn na elektromotor. Elektronická regulace otáček (ESC), zajišťuje přepínání proudu mezi cívkami motoru, které uvedou do pohybu magnety. ESC je náhradou mechanického regulátoru, který je připojen ke zdroji a skrze pohonnou jednotku zajišťuje otáčení vrtule. Regulátor má zásadní vliv na počet otáček motoru, které jsou řízeny přes řídicí jednotku skrze RPS anebo jiný ovládací prvek. [17] [20]

Vrtule

Vrtule je posledním důležitým prvkem, který je součástí pohonného ústrojí multikoptéry. Vrtule převádí mechanickou sílu elektromotoru na sílu aerodynamickou, kterou je urychlován vzduch. Vrtule slouží jako hlavní pohonné ústrojí, které umožní pohyb multikoptéry ve vertikální a horizontálním směru. Charakteristika letu je pak ovlivněna velikostí listu. Menší listy dosahují většího zrychlení a zpomalení, než je tomu u listů s větším průměrem. Malé vrtulové listy

najdou využití spíše u sportovního létání, kde je brán zřetel na rychlejší reakce, naopak větší lopatky mají výhodu zachování větší stability během letu. ^{[17] [20]}

Nejčastěji jsou na multikoptérech používány plastové dvoulisté vrtule. Vrtule mohou být vyrobeny i z jiného druhu materiálu, mezi které patří dřevo nebo kompozit. ^{[17] [20]}

Pohonná baterie

Výše popsané komponenty tvoří dohromady primární celek hlavního pohonného ústrojí. Bez dodání energie do pohonné jednotky by nebyla multikoptéra schopna provozu. O dodávku elektrické energie se starají akumulátory, které mohou být integrovány v těle multikoptéry nebo připojeny externě. Nejčastějším typem používané baterie jsou Lithium polymerové (Li-Pol) články, jejichž počet závisí na velikosti multikoptéry a počtu pohonných jednotek. Zpravidla se používá dva až šest článků v jedné baterii. Lithium polymerová baterie vyniká vysokou koncentrací elektrického náboje, nízkou hmotností a netrpí paměťovým efektem. Bohužel jsou citlivé na mezní extrémy jako je přebíjení nebo úplné vybití, což může velmi zkrátit životnost akumulátoru. ^{[17] [20]}

Přistávací zařízení (4)

Jedná se o část konstrukce, která stabilizuje multikoptéru během fáze vzletu nebo přistání ze země. Přistávací zařízení může být integrováno přímo do rámu formou ližin, které mohou být pevné nebo polohovatelné. Typy řešení přistávacího zařízení se liší podle konstrukce multikoptéry. Můžeme se také setkat s automatizovaným polohovacím zařízením, které přesunou po vzletu nohy do horizontální polohy a před přistáním do vertikální. ^[17]

Kamera (5)

Součástí konstrukce mnoha komerčních multikoptér je integrovaná kamera, která poskytuje přenos obrazu v reálném čase, využitím bezdrátové technologie WLAN, záznamu videosekvencí nebo pořizování fotografií. Lepším standardem je záznam videa v kvalitě FullHD nebo 4K. Během letu dochází k drobným vibracím, které na ovládání nemají zásadní vliv, avšak na kvalitu pořízených videí mají vliv vysoký. K utlumení těchto vibrací slouží zařízení zvané Gimbal, které zajišťuje zavěšení kamery na Kardanovém závěsu, který nežádoucí vibrace utlumí. ^[19]

3. Technické opatření pro zamezení vzniku námrazy

Opatření proti vzniku námrazy poskytuje ochranu významných ploch proti nahromadění ledu, který vzniká během letu nebo stání na zemi. Protinámrazové systémy se dělí na proaktivní a reaktivní a jsou označeny anglickými termíny **anti-icing** a **de-icing**.^[22]

Protinámrazové systémy neboli proaktivní systémy vzniku námrazy poskytují aktivní ochranu významných ploch před jejím vznikem. Jejich účelem je prevence a měly by být spuštěny bezprostředně po vstupu do námrazových podmínek.^[22]

Systémy odstraňující námrazu neboli reaktivní systémy jsou určeny k odstranění následků námrazy. Jedná se o druh protinámrazového opatření, který námrazu odstraní následně potom, jakmile vznikne. Reaktivní protinámrazové systémy bývají spouštěny, až v okamžiku sponzorování námrazy.^[22]

Pro běžně používaná komerční letadla existuje široká škála opatření, která jsou využívána k zamezení nebo minimalizaci vzniku námrazy. Často je na letadlech využívána právě kombinace několika druhů opatření, které mají proaktivní i reaktivní účinky.^[22]

Tyto druhy se dělí do tří základních kategorií v závislosti na principu funkce daného systému.

- Tepelné
- Mechanické
- Chemické

3.1 Tepelná ochrana

Tato kategorie odstraňuje vznikající námrazu prostřednictvím zahřívání povrchu na vysoké teploty. Zahřívání probíhá formou dodaného horkého vzduchu z motorů nebo elektrickým vyhřívání příslušných ploch.^[22]

Horký vzduch

Tento druh ochrany využívá horkého vzduchu přivedeného z pohonné jednotky na místa exponovaná námrazou, nejčastěji jsou to náběžné hrany křídel. Dopadající kapky jsou zahřívány a dochází tak k oddalování vzniku námrazy a kumulaci ledové vrstvy. To vše závisí na intenzitě námrazy. Stlačený zahřátý vzduch je dodáván z motorů a je veden potrubím do oblastí vyžadující protinámrazovou ochranu. Zahřívání ploch probíhá pomocí děrovaného

potrubí nazvaného „Piccolo tube“. Teplý vzduch se z něho šíří tryskami a při kontaktu s chladným povrchem své teplo kondukcí předává chladnému povrchu. Chladnější vzduch je pak z křídla odváděn skrze dvojitou komoru výstupními ventily. [22]

System odmrázování využívající horkého vzduchu je velmi efektivní a spolehlivý, má ovšem vysoké požadavky na odběr stlačeného zahřátého vzduchu. To způsobuje snížení efektivity výkonosti pohonné jednotky a dochází k nárůstu jeho spotřeby. Ve výsledku je snížen celkový dostupný tah a je snížena rezerva výkonu v případě akutní potřeby. Použití horkého vzduchu limituje užití kompozitních materiálů v částech konstrukce, která přijde s horkým vzduchem do kontaktu. Tento druh ochrany proti námraze může sloužit jak k zamezení, tak k odstranění námrazy. [22]

Využitelnost pro multikoptéry

Vzhledem ke složitosti tohoto protinámrazového systému a převažující absenci spalovacího motoru u většiny druhů multikoptér je možnost nasazení toho druhu protinámrazového opatření nevhodný.

Elektro-termická

Elektro-termický protinámrazový systém využívá elektrický prvek k zamezení vzniku námrazy, nebo k jejímu odstranění. Konstrukce tohoto opatření může být provedena prostřednictvím integrace kondukčních vláken do potahu, použitím elektro-vodivých fólií, nebo skrze povrchovou aplikaci kovu. [22]

Z důvodu vysoké energetické náročnosti provozu ($2,5 - 3 \text{ Watty/cm}^2$) je použití této ochrany limitováno pouze na menší plochy nebo komponenty. Nejčastěji se tak jedná o části, u kterých by jiné řešení bylo nevhodné. Nejčastější využití se nachází u termoelektrického vyhřívání čelních skel, náběžných hran křídel nebo vrtulí, rotorů multikoptér nebo pitotových trubic. Z důvodu vysoké energetické náročnosti systému během zahřívání rozsáhlejších ploch, jsou na vybrané povrchy aplikovány úzké pásy, které danou plochu permanentně zahřívají. Ostatní, méně významné části jsou zahřívány v cyklické periodě. Toto řešení snižuje energetickou zátěž celého systému. [22]

System může být použit pro účely proaktivního opatření vůči námraze nebo k její odstranění jakmile se vytvoří. Standartně se systém uvádí do provozu, pokud mohou nastat námrazové podmínky a teplota okolního vzduchu klesne pod hodnotu $4 \text{ }^\circ\text{C}$ a nižší. [22]

Využitelnost pro multikoptéry

Využití elektrotermické ochrany pro minimalizaci vzniku námrazy multikoptéry by mohlo být vhodným řešením. Ačkoli by byla jeho aplikace na vrtule multikoptér nepříliš komplikovaným úkolem, objevují se zde poměrně závažné provozní komplikace.

Limitací jsou bohužel příliš vysoké náklady a vysoká energetická náročnost tohoto systému. Prvním omezením je především výdrž baterií. Ačkoli, v jejich vývoji nastal významný technologický posun, stále je jejich kapacita poměrně nedostačená. Jak již bylo uvedeno výše, použití elektrotermické ochrany je velice energeticky náročné, což má závažný dopad na výdrž baterie, což by přineslo významně sníženou dobu letu. Druhým limitem je spotřebitelské chování. Jelikož je vrtule multikoptéry považována jako druh spotřebního zboží a při menším poškození je doporučeno nahradit vrtuli za nový kus, integrace elektrotermické ochrany do této komponenty je pro uživatele z ekonomického pohledu velice neatraktivní. Ačkoli se z prvního pohledu může elektrotermická ochrana jevit jako vhodné řešení, bohužel zatím disponuje zásadními komplikacemi.

3.2 Mechanická ochrana

Pneumatická ochrana

Pneumatická ochrana se řadí mezi reaktivní prvky, odstraňuje tedy námrazu následně po jejím vzniku. Odstranění ledové vrstvy probíhá nafouknutím a vyfouknutím gumových trubíc umístěných na náběžné hraně křídel. Systém vyžaduje přívod stlačeného vzduchu z pohonné jednotky, o tlaku 1,2 Bar–1,37 Bar (18–20 PSI), k nafouknutí gumových trubíc. Následně dojde k vytvoření trhliny v námraze, která pak rozpraská a následkem aerodynamických sil jsou úlomky popraskaného ledu unášeny z povrchu křídel pryč. Vytvořením podtlaku se trubice vrátí zpět do původní polohy. Pokud dojde k předčasnému nafouknutí námraza se může vytvořit v nafouknutém stavu a účinnost protinámrazového opatření je pak minimální. ^[22]

Použití tohoto systému probíhá na velmi jednoduchém principu, a vyžaduje nízký výkon. Bohužel je systém poměrně náchylný k vnějšímu poškození a jeho odolnost klesá při nízkých teplotách (-15 °C), při kterých dochází k poklesu pružnosti gumy, což může způsobit její popraskání. Následným nafouknutí poškozená trubice praskne. Při teplotách -40 °C dochází k permanentnímu poškození. Vzhledem k těmto vlastnostem nejsou pneumatické trubice vhodné k použití na proudových nebo větších letadlech, současně s vysokou náročností na údržbu. Tento druh ochrany je nejčastěji používán u turbovrtulových a vrtulových letadel, která neoperují v tak náročných podmínkách a nevýhody tohoto řešení jsou pro ně minimální.

Pneumatická ochrana je nejčastěji používána na náběžných hranách a jejich řešení je zkombinované s ostatními systémy. ^[22]

Využitelnost pro multikoptéry

Ačkoli pneumatický systém vyžaduje nízkou energii na provoz, není příliš vhodným řešením k provozu na multikoptérách a to z důvodu složitých konstrukčních nároků, u kterých se v rámci relativně nízké hodnoty multikoptér nevyplatí implementovat.

3.3 Chemická ochrana

Protinámrazová kapalina

Chemická ochrana se aplikuje na zemi nebo za letu. Povrch exponovaných částí je pokryt protinámrazovou kapalinou na bázi ethylen glykolu nebo alkoholu, které snižují bod tání vody a zamezuje tak vzniku námrazy. ^[22]

Aplikace kapaliny na zemi

V okamžiku výskytu námrazy na významných částech letadla stojícího na zemi, dochází k jejímu odstranění protinámrazovou kapalinou. Námraza na významných částech jako jsou náběžné hrany může negativně ovlivnit aerodynamiku během vzletu a může vést k nehodám. K ošetření povrchu letadla se používá směs horké vody a ethylen glykolu, tato směs je dostupná a ekonomicky přijatelná. Její odstranění a následná ochrana jsou bohužel dočasné a klesají s časem po její aplikaci. ^[22]

Nemrzoucí kapaliny jsou rozděleny do několika typů, lišící se především účinky a viskozitou. Kapalina typu I se používá především k odstranění námrazy, avšak poskytuje vůči ní zanedbatelnou ochranu. Pro zajištění ochrany letadel proti vzniku námrazy jsou používány kapaliny typu II a VII, které se liší dobou účinnosti. Tyto kapaliny obsahují látku na bázi polymerů, které zvyšují viskozitu roztoku. Kapalina s vyšší viskozitou může během vzletu snižovat účinek vztlačových sil, a proto je žádoucí se této kapalinou s narůstající rychlostí během vzletu zbavit. Hodnota rychlosti, při které dochází vlivem aerodynamických sil k odfouknutí veškeré kapaliny, je u typu II a IV kolem 100 uzlů. Tato rychlost může být omezující pro méně výkonná letadla, která se díky své nižší hmotnosti rotují mnohem dříve. Z tohoto důvodu byl zaveden nový typ kapaliny, která má podobné vlastnosti jako typ II, avšak nedosahuje takové viskozity. Tento typ je označen číslem III a zajišťuje odstranění kapaliny vlivem aerodynamikou obtékání i při nižších rychlostech. ^[22]

Aplikace kapaliny za letu

Odstraňování námrazy za letu chemickou kapalinou probíhá ostřikováním náběžných hran a jiných významných částí kapalinou na bázi glykolu, která snižuje bod tání vody a zabraňuje tím vzniku námrazy. Běžný systém se skládá s několika komponent, jejichž součástí je nádrž k uskladnění proti námrazové kapaliny, sací a tlakové filtry a skupina rozdělovacích jednotek řídicí průtok hlavního čerpadla do koncových částí. Kapalina je přiváděna na povrch skrze porézní panely umístěné na náběžné hraně, které jsou vyrobené z nerezové oceli nebo z laserem děrovaného titanového plechu. [22]

Systém by měl být za letu aktivován nejpozději v okamžiku vstupu do námrazových podmínek. Pokud k námraze již dojde, k jejímu odstranění je třeba použít mnohem většího množství rozmrazovací kapaliny, které je na palubě omezené množství. Použití tohoto systému velkých letadel je limitováno především u velkých letadel. Vzhledem k ploše, kterou by bylo nutné proti námraze chránit, je hmotnost převážené kapaliny velmi významná. [22]

Tento typ protinámrazového opatření je konstrukčně jednoduchý a používá prověřený princip. Jeho výdrž však záleží na množství dostupné kapaliny. Systém lze použít jako proaktivní a rovněž jako reaktivní, za cenu vyšší spotřeby nemrzoucí směsi. [22]

Využitelnost pro multikoptéry

Ošetření vrtulí chemickým přípravkem multikoptér se jeví jako vhodná prevence vůči vzniku námrazy. Tato ochrana vyniká jednoduchou uživatelskou manipulací a mohla by být poměrně dostupnou variantou. Bohužel musím konstatovat, že v měřítku multikoptér není podobný funkční přípravek na trhu dostupný. Webový článek zmiňuje použití kapaliny proti vlhkosti na drobnou elektroniku Nanoprotech Electric, avšak bez předvídaného účinku. Vznik námrazy byl oddálen pouze v řádu minut a jejímu vzniku se i přesto nedalo předejít.

Po vývoji ochranných prostředků proti vzniku námrazy na multikoptérách není příliš poptávka, proto nejsou zatím žádné podložené opatření k její minimalizaci. Věřím, že jakmile se tento problém stane více závažných, stane se protinámrazová kapalina jako jeden z prvních funkčních opatření, proti jejímu vzniku. [23]

	Proudový letoun	Vrtulový letoun	Multikoptéra
Horký vzduch	Použitelné	Nepoužitelné	Nepoužitelné
Elektrické vyhřívání	Použitelné	Použitelné	Použitelné
Pneumatikcá ochrana	Nepoužitelné	Nepoužitelné	Nepoužitelné
Chemická kapalina	Použitelné	Použitelné	Použitelné

Tabulka 3 Využitelnost protinámrazového opatření u jednotlivých druhů pohonu

Opatření pro minimalizaci vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry.

Z výše uvedených protinámrazových opatření je zřejmé, že pokud nebude nutné používat multikoptéry za téměř každého počasí, nevznikne poptávka po vývoji vhodných opatření k zamezení vzniku námrazy. Nejpřívětivějším řešením minimalizace jejího vzniku je použití chemické kapaliny nebo elektrického vyhřívání náběžných hran vrtulových listů. Vyjmenovaná opatření zůstávají pouze v teoretické rovině a bude třeba podnítit jejich vývoj v oblasti protinámrazových opatření pro multikoptéry. Aktuálně, jediným vhodným opatřením proti vzniku námrazy je v těchto podmínkách zkrátka nelétat.

4. Analýza nehod způsobených vznikem námrazy

K leteckým nehodám dochází v mnohem menším měřítku, než tomu bylo dříve. Je to především díky pokročilejší technice a vyšší bezpečnosti, na kterou je brán značný zřetel. V minulosti nebylo letectví nijak regulováno, a proto docházelo k častým nehodám s tragickými následky, vinnou technických závad, lidského faktoru a v neposlední řadě selháním systémových opatření. V dnešní době jsou tyto nedostatky značně eliminovány a letectví se stává velmi bezpečným odvětvím dopravy, ačkoli se v roce 2019 pravděpodobnost smrtelné nehody mírně zvýšila, stále dosahuje pravděpodobnosti jedné nehody na 5,6 milionu provedených letů. ^[24] ^[25]

Na rozdíl od letecké přepravy cestujících, nepředstavují bezpilotní letadla zásadní riziko ohrožení lidského života a jejich nehody jsou proto vcelku opomíjené. Rozvoj a rozšíření bezpilotních letadel v mnoha odvětvích může v budoucnu vytvořit požadavek na zvýšení bezpečnosti u letadel tohoto typu. V České republice se leteckými nehodami bezpilotních letadel zabývá předpis L-13, který je univerzálním pro všechny typy letadel. ^[25]

Odborné zjišťování příčin letecké nehody.

Pokud dojde k jakékoli události, která inklinuje ke změně stavu oproti původnímu bezchybnému, jedná se o leteckou nehodu nebo incident. Tato skutečnost je podrobně popsána v předpise L-13, který se leteckými nehodami zabývá a vztahuje se na provoz bezpilotních letadel se schválenou konstrukcí nebo provozním povolením. Pokud se jedná o rekreačně sportovní použití, nevzniká ohlašovací povinnost a událost není oficiálně zaznamenána. ^[26]

Incident

Za incident se považuje událost, která svou povahou neovlivňuje bezpečnost letového provozu. Jedná se o drobnou výchytku od standartního průběhu, která je zapříčiněna chybou lidského činitele nebo techniky, ale jejím důsledkem není nutnost předčasného ukončení letu nebo nutnost vykonání nouzových postupů. Mezi incidenty se zařazují i nepředvídatelné příčiny přírodní povahy jako je srážka s ptáky nebo elektrický výboj. ^[26]

Vážný incident

Vážný incident je událost spojená s vysokou pravděpodobností vedoucí k letecké nehodě během provozu, kdy je letadlo připraveno k pohybu pro účely letu a dobou kdy již není v provozu a pohonná soustava již nekoná svoji činnost. ^[26]

Letecká nehoda

Letecká nehoda je vztažena k době, kdy je letadlo připraveno k pohybu pro účely letu a dobou kdy již není v provozu a pohonná soustava nekoná svoji činnost. Letecká nehoda je popsána třemi stěžejními body, jež alespoň jeden z nich musí být splněn. ^[26]

- Osoba byla smrtelně nebo těžce zraněna v době provozu.
- Bezpilotní letadlo bylo zničeno nebo poškozeno tak, že jeho poškození není slučitelné s dalším provozem a potřebuje větší opravu.
- Bepilotní letadlo je nezávěsné nebo je na nedostupné místě. ^[26]

Popis incidentu č. 1

Informační přehled

Povaha letu byla rekreačního charakteru, operátor létá v podmínkách námrazy velmi ojediněle. Tomuto incidentu předcházely zkušenosti s provedením několika letů za mnohem nižších teplot v horách, během sněhové bouře, které nebyly nijak problematické ^[27]

Průběh letu

Let byl uskutečněn kvadrokoptérou DJI Mavic pro ve vzdálenosti přibližně 400 m od operátora, pochvilí došlo k varovným zprávám a zřícení kvadrokoptéry k zemi. ^[27]

Meteorologické podmínky

Meteorologické podmínky v okolí nebyly příliš příznivé. V místě letu byla mlha a teplota vzduchu se pohybovala kolem 0°C. ^[27]

Provedení letu

Provedení letu bylo v přímé dohlednosti operátora, který krátce po startu obdržel výstražnou zprávu. Zpráva obsahovala informace o problému s napětím pohonné jednotky a doporučení kontroly vrtulí. Následně se objevila varovná zpráva „over-voltage battery discharge“ (přepětí, baterie se vybíjí). ^[27]

Operátor provedl potřebný zásah do řízení a zadal povel pro návrat zpět do místa vzletu. Kvadrokoptéra ovšem na povely nereagovala let začal být nestabilní. Následně došlo k prudkému poklesu výšky a neřízenému pádu k zemi. Kvadrokoptéra dokázala v poslední chvíli reagovat a operátorovi se podařilo navést stroj na přilehlou mýtinu pokrytou měkkým sněhem, kde se po dopadu převrátila. ^[27]

Závěr

Po dopadu a ohledání byly zjištěny nánosy ledu na odtokové hraně vrtulí a spodní části zařízení. Po odstranění námrazy byl proveden krátký let, u kterého se problémy již znovu neobjevily. ^[27]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
do 2 minut	Nespecifikováno	Mlha	Nespecifikováno	0 °C	Spodní část a vrtule.

Tabulka 4 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[27]

Popis incidentu č. 2

Informační přehled

Let byl proveden s kvadrokoptérou DJI Mavic pro. Operátor měl předchozí zkušenost s letem v podmínkách velmi nízkých teplot, kolem -20 °C, ve kterých se neobjevily žádné vážné problémy. ^[28]

Meteorologické podmínky

Během letu byla nízká mlha a teplota vzduchu kolem -2°C. Po dobu letu docházelo k opakujícímu se průletu nízkou oblačností. ^[28]

Průběh a provedení letu

Let trval přibližně 15 minut během kterých nezaznamenal operátor nějaké závažnější problémy. Kvadrokoptéra se pohybovala v podmínkách nízké oblačnosti včetně průletů skrze ni. Po přistání byla na vrtulích objevena námraza. ^[28]

Závěr

K námraze došlo po celém povrchu vrtulových listů. K případu byla přiložena fotodokumentace, kterou můžeme vidět na obrázku č.19. ^[28]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
15 minut	Nespecifikováno	Mlha	Nízká oblačnost	-2 °C	Celá horní strana vrtulí

Tabulka 5 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[28]



Obrázek 19 Námraza listů vrtule ^[28]

Popis letecké nehody č. 3

Informační přehled

K letu byla využita hexakoptéra blíže nespécifikovaného typu s pevnými karbonovými dvoulistými vrtulemi. Řídící jednotka byla vyrobena firmou DJI typ A2, maximální vzletová hmotnost hexakoptéry byla 6,95 Kg. Let byl uskutečněn na modelářském letišti Sobínka, přibližně 5 km od mezinárodního letiště Praha. ^[29]

Průběh letu

Let byl proveden dne 9.12.2014 okolo 15 hodiny, 30 m AGL a byl rozdělen do několika krátkých etap. Během posledním letu se letadlo zřítilo a došlo na něm k celkové destrukci draku multikoptéry v důsledku nárazu do země. Z palubního záznamníku bylo zjištěno, že nehodě předcházelo zvyšování otáček vrtulí a nadměrný odběr proudu z baterie, a to až nad limitní hodnoty. ^[29]

Meteorologické podmínky

Meteorologické podmínky byly zpočátku příznivé a v okolí svítilo slunce, pouze ve stínu byla patrná námraza v trávě (jíni). Při samotném letu došlo pravděpodobně k zhoršení meteorologických podmínek a po dobu letu bylo zataženo a kouřmo. Teplota vzduchu se pohybovala kolem $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. ^[29]

Provedení letu

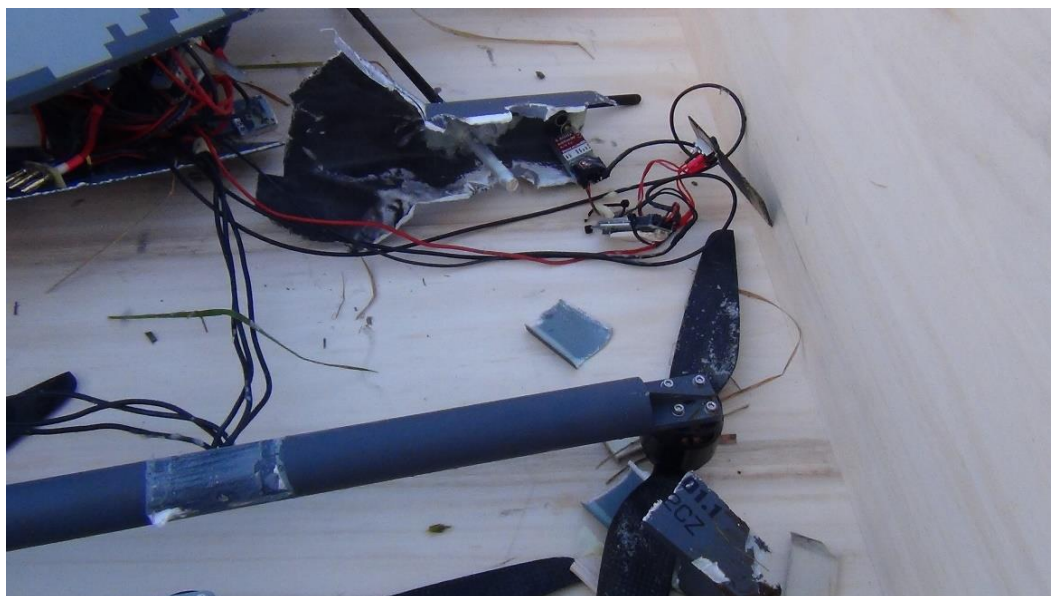
První let byl bezproblémový a trval přibližně 5 minut. Během následujícího letu, přibližně 1 minutu od vzletu, se hexakoptéra naklonila a přešla do téměř kolmému pádu. Po nárazu byl stroj zničený. ^[29]

Závěr

Na vrtulích vznikla námraza, která způsobila neřízený strmý pád hexakoptéry. Tato událost je posuzována jako letecká nehoda a byla vyšetřována UZPLN. K tomuto případu jsou přiloženy fotografie, s rozsahem vzniklé námrazy a úrovní destrukce. Fotografie jsou vyobrazeny na obrázcích č.20 a č.21. ^[29]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
cca 6 minut	Nespecifikováno	Kouřmo	Zataženo	-0,5 °C	Náběžné a odtokové části vrtule

Tabulka 6 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[29]



Obrázek 20 Hexakoptéra těsně po nehodě ^[28]



Obrázek 21 Námraza na vrtulích hexakoptéry ^[29]

Popis incidentu č. 4

Informační přehled

Let probíhal pod dohledem zkušeného operátora, který měl s létáním celoroční praxi. Inkriminovaný let byl uskutečněn dne 21.11.1997 s modelem polomaketou letounu DC3. Tuto událost popsal Jaroslav Kroufek v článku s názvem „Námraza“ v časopise RC Modely 1/98. [30]

Meteorologické podmínky

Meteorologické podmínky se vyznačovaly vysokou hustotou vzduchu s viditelným obsahem vodních kapek. Dohlednost nepřesahovala více jak 500 metrů a teplota se pohybovala kolem 1 °C. [30]

Průběh a provedení letu

První let proběhl bez větších problémů. V průběhu druhého letu začalo drobně mrholit. Asi po třech minutách operátor zpozoroval problémy s ovládáním modelu, u kterého se viditelně zhoršila říditelnost v zatáčkách a model přešel do klesání. Poté došlo ke ztrátě říditelnosti a model se v zatáčce dostal do vývrtky a zřítíl se do trávy. [30]

Závěr

Po ohledání zříceného modelu pokrývala přibližně 1 mm silná námraza křídla, ocasní plochy i před trupu. [30]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
3 minuty	Více jak 500 m	Mlha	Nespecifikováno	1 °C	Křídla a trup

Tabulka 7 Specifikace meteorologických údajů v době nehody [30]

Popis incidentu č. 5

Informační přehled

Obdobný případ stejného operátora, jako u incidentu č.4 nastal dne 31.12. 2016 s modelem Commando, který nedosahuje příliš vysokých rychlostí. Let trval přibližně 1 hodinu. [31]

Meteorologické podmínky

Meteorologické podmínky byly podobné jako u předešlé události. Byla mlha s velmi nízkou dohledností do 50 metrů a teplota se pohybovala kolem 3 °C. [31]

Průběh a provedení letu

Let byl proveden v krátké vzdálenosti od operátora s nízkou letovou rychlostí. Po přistání byla na modelu viditelná námraza. ^[31]

Závěr

Po dokončení letu byla zaznamenána námraza na vrtuli, s nejtlustší vrstvou podél náběžné hrany. Vlivem nízké rychlosti letu modelu se na ostatních částech námraza nevytvořila. Tento incident byl bez vážnějších následků. ^[31]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
Přibližně 1 h	do 50 m	Mlha	Nízká oblačnost	3 °C	Náběžná hrana vrtule

Tabulka 8 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[31]

Popis incidentu č. 6

Informační přehled

Jednalo se o rekreační let během zimy v malé výšce nad zemí. Operátor je poměrně zkušený a blíže se zabývá problematikou multikoptér. K letu byl použit model DJI F315 Phantom 2 Vision+. ^[32]

Průběh letu

Kvadroptéra se ve vzduchu pohybovala přibližně 3 minuty, pak došlo k prudké ztrátě její výšky a došlo ke zřícení do pole. Rychlost klesání byla dle údajů z telemetrie přibližně 6 m/s, namísto obvyklých 2 m/s. ^[32]

Meteorologické podmínky

V okolí letu byly tradičně nepříliš příznivé podmínky pro provedení letu, jako je viditelná mlha. Teplota se pohybovaly kolem 0 °C. ^[32]

Provedení letu

Krátce po 3 minutách letu začala kvadroptéra ztrácet výšku, na ovládací povely operátora vůbec nereagovala, na poslední chvíli se podařilo zvrátit náraz do kamenité cesty a směr letu byl odkloněn do ornice na poli. ^[32]

Závěr

Příčinou prudké ztráty výšky byl vznik námrazy na vrtulích, na zařízení nedošlo k žádné závažné škodě. Po ohledání byla na vrtulích kvadroptéry viditelná námraza o velikosti 1 mm, která způsobila nekontrolovatelné klesání. ^[32]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
3 minuty	Nespecifikováno	Mlha	Nespecifikováno	0°C	Námraza vrtulí

Tabulka 9 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[32]

Test námrazy, incident č. 7

Informační přehled

Uživatel po předešlé události vykonal obdobný let, který sloužil k provedení testu vzniku námrazy. K letu byla použita kvadrokoptéra typu DJI Phantom FC40. Let byl doplněn o videozáznam prostřednictvím kameri GoPRO. ^[23]

Meteorologické podmínky

Podmínky během letu byly identické, jako ve většině předešlých případů. Byla značná mlha a teplota pod bodem mrazu, -2 °C. Během stoupání se kvadrokoptéra dostala do kontaktu s nízkou oblačností. ^[23]

Provedení letu

Doba letu byla kolem 2 minut, během kterých došlo k narušení stability kvadrokoptéry, která začala prudce klesat k zemi a nereagovala na povely z ovladače. Je patrné, že klesání předcházelo zvýšení výkonu otáček vrtulí a poté došlo k poklesu napětí na baterii. Kvadrokoptéra se neřízeně zřítila k zemi a po nárazu sama znovu vzlétla do vzduchu bez ohledu na příkazy pilota. Nakonec mírným klesáním sestoupila zpět k zemi. ^[23]

Doba letu	Dohlednost	Stav počasí	Oblačnost	Teplota vzduchu	Námraza
2 minuty	cca 100 m	Mlha	Nízká oblačnost	-2 °C	Náběžná hrana vrtule

Tabulka 10 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[23]

Závěr

V tomto případě byla na vrtulích rovněž identifikována námraza, která je zdokumentovaná na obrázku číslo 22. ^[22]



Obrázek 22 Námraza na listu vrtule ^[22]

Analýza příčin vzniku nehod multikoptér

Nehody bezpilotních letadel je velmi těžké identifikovat, jelikož se liší ohlašovací povinnost pro soukromé a profesionální užití. Dle Ústavu civilního letectví došlo, v souvislosti s námrazou, pouze k jedné nehodě multikoptéry. Ta je popsána v podkapitole letecká nehoda č.3. Z ostatních zdrojů lze dohledat množství případů, které se neočekávaným vznikem námrazy zabývají. Dostupnost informací o vzniku námrazy jsou následující.

- Incidentsy a nehody, které byly ohlášeny musí být monitorovány ÚZPLN. Oficiální cestou byla v ČR nahlášena pouze jedna nehoda (k roku 2020). Děje se tomu pravděpodobně nízkou závažností nehod, které operátoři nechtějí nahlašovat.
- Neoficiální cestou lze dohledat incidentsy a nehody způsobené námrazou rozebírané na diskuzních fórech nebo v různých publikacích. Z velké části se jednalo o případy pilotů, kteří neměli o námraze hlubší znalosti a nedokázali ji předejít. U tohoto druhu událostí nevzniká ohlašovací povinnost.

Počáteční podmínky

Z uvedených nehod vyplývá, že podmínky vzniku námrazy na vrtulích multikoptér mají velmi identický průběh. Teplota se ve většině analyzovaných případů pohybovala kolem 0 °C, někdy dosahovala i kladných hodnot. Okolní vzduch, ve kterém byly lety provedeny, byl bohatý na vodní obsah. Společně s nízkou teplotou se tak vytvoří podmínky vhodné ke vzniku námrazy.

Námraza nejčastěji vzniká v prostředí s nízkou dohledností spojenou s meteorologickými jevy jako je kouřmo, mrholení nebo nízká oblačnost. Podmínky předcházející vzniku námrazy můžeme shrnout do několika bodů, které vypadají následovně:

- Vysoká vlhkost vzduchu.
- Nízká dohlednost (mlha, kouřmo, nízká oblačnost).
- Teplota vzduchu pohybující se kolem 0 °C.

Chování multikoptéry po vzniku námrazy

Ve většině případů se jednalo o zhoršení aerodynamických vlastností vrtulí, vlivem vzniklého nánosu ledového filmu na listech vrtule. V některých případech dosahovala tloušťka ledu až 1 mm. V závislosti na typu použité multikoptéry obdrželi RP varovné zprávy o nestandardních otáčkách vrtulí a informaci o nízkém napětí na baterii. To je způsobeno řídicí jednotkou, která se snaží dorovnat úbytek vztlačkové síly a přírůstek hmotnosti a reaguje na situaci zvýšením otáček vrtulí. Projevem je nadměrný odběr proudu z akumulátoru a pokles jeho napětí. S kumulujícím se množstvím ledu vrůstá potřebný tah, který již multikoptéra nedokáže kompenzovat zvýšením otáček. Zpočátku dojde ke snížení stability a kymácivému pohybu který přejde v prudké klesání směrem k zemi. Projevy chování multikoptéry při námraze jsou pospány v následujících bodech:

- Zvýšení otáček vrtulí a ztráta stability.
- Pokles napětí baterie způsobené vysokým odběrem elektromotorů.
- Neřízený prudký pád k zemi.

Identifikovaná příčina a následky

Důvod nekontrolovatelného klesání byl u všech nehod identický. Jednalo se o vzniklou námrazu na různých částech zařízení, nejčastěji to byly vrtule a další exponované části s malým poloměrem (Antény). V některých případech se námraza vytvořila velmi rychle, průměrně byl její vznik do několika minut po vzletu. Teplota u prvního letu byla vyšší o hodnotu prostředí, v kterém byla multikoptéra převážena. Během druhého letu poklesla teplota povrchu na úroveň okolní teploty vzduchu, která dosahoval nízkých hodnot, a splnily se tak námrazové podmínky. Díky chladnému povrchu námraza vznikne mnohem rychleji než u předcházejících letů.

V některých případech došlo k zničení celé konstrukce multikoptéry a ta již nebyla schopná dalšího provozu (případ č.3). V ostatních případech se jednalo pouze o poškození, bez vážnějších následků. Z uvedených případů vyplývá, že pokud se v poslední fázi letu podařilo pád částečně zmírnit, nejednalo se o dovednosti pilota, ale spíše o štěstí. V budoucnu by tyto události mohly skončit poškozením multikoptéry a v horších případech ohrožením zdraví. Proto je třeba brát zřetel na případnou možnost vzniku námrazy a radši v těchto podmínkách nelétat.

„Z výše uvedených fotografií vyplývá jedna velice důležitá skutečnost, že námraza na vrtulích multikoptér vzniká prakticky na celém jejím povrchu – horním i spodním. Z dostupné literatury a na základě konzultací s odborníky, námraza vzniká pouze na náběžných hranách vrtulí, nikoliv po celém povrchu.“ ^[31]

5. Experimentální analýza ochlazování listů vrtule

Hypotéza

Po provedení podrobné analýzy nehod bezpilotních letadel bylo zjištěno, že k námraze na vrtulích dochází za podmínek definovaných v teoretické části. V konečném důsledku, lze říct, že námraza u zkoumaných nehod vznikla při podmínkách:

- Teplota vzduchu je nižší než 3 °C.
- Ve vzduchu je přítomná vysoká vlhkost (mlha, mrholení, déšť, sníh, ledové krystalky).

Prováděním rešeršní analýzy dostupných nehod bylo dále zjištěno, že nejčastěji k nehodám dochází při teplotách blízkým 0 °C a v některých případech tato hodnota dosáhla kladných hodnot. Vlivem vysokých otáček dochází k adiabatickému ochlazování, jehož důsledkem je pokles teploty na povrchu listu vrtule. Jakmile jsou splněny základní podmínky, dochází v důsledku vysoké vlhkosti vzduchu ke kondenzaci vody na podchlazeném povrchu listů vrtule, která se v tomto případě objevuje i za kladné okolní teploty a vznikne na vrtulích námraza.

5.1 Návrh experimentu

V této podkapitole se budeme zabývat návrhem experimentu, jeho provedením a následným vyhodnocením naměřených dat. Experiment byl proveden na základě předem stanovených postupů měření. Měření má za úkol zjistit, zdali dochází k ochlazování povrchu vrtulových listů, jehož vlivem vznikne námraza při kladných teplotách okolního vzduchu.

Návrh zařízení

K získání experimentálních dat bylo třeba sestavit zařízení, které bude schopné simulovat let multikoptéry v odpovídajících podmínkách, při kterých může námraza vzniknout. Měřicí zařízení je sestaveno z několika komponent. Zásadním prvkem je kovový měřicí stojan, vyrobený z tažné ocele a ostatní komponenty, které podrobněji popsane v další podkapitole.

Podmínky měření

Okolní podmínky by měly simulovat situaci letu v podmínkách námrazy. Pro účely měření byla stanovena teplota okolního vzduchu 10 °C a nižší a vysoká relativní vlhkost.

Návrh metodiky

Experiment bude prováděn simulací letových podmínek námrazy, které působí na multikoptéru s ohledem na počasí a tyto podmínky budou zaznamenány a měřeny.

Způsob měření:

Měření předcházelo dobití baterií do plné kapacity. Měřicí stojan byl usazen do pevné zeminy a byla zkontrolována jeho stabilita. Do protokolu měření byly zaznamenány aktuální meteorologické podmínky. S pomocí teploměru byla změřena venkovní teplota a z vlhkoměru byla zaznamenána relativní vlhkost vzduchu. Před započítáním samotného měření, bylo třeba provést kontrolu servotesteru, jestli je jeho poloha nastavena na nulovou hodnotu. V opačném případě by mohlo dojít k nekontrolovanému roztočení vrtule ihned po zapojení akumulátoru.

Měření začínalo vložením baterie do úchytných pásků, přichycených na měřicím stojanu. Regulátor byl žilkovým kabelem spojen se servotesterem a pomocí trojice dalších kabelů byl připojen k elektromotoru. V tomto kroku je důležité vědět, jakou používáme vrtuli a jaký směr otáčení budeme během měření požadovat. V posledním kroku zbývalo připojit baterii k regulátoru pomocí dvou kabelů. Kabely k sobě musí být připojeny vždy shodnou barvou. Jestliže je vše správně zapojeno, uslyšíme akustický signál v podobě tří krátkých tónů a rozsvítí se trojice modrých kontrolék.

V dalším kroku byla změřena teplota povrchu vrtule pyrometrem a zaznamenán čas spuštění. Jakmile byly tyto hodnoty poznamenány, mohlo dojít k roztočení vrtule. Vrtule se uvedla do provozu pootočením potenciometru na servotesteru a její otáčky byly nastaveny přibližně na 75% maximální hodnoty, aby nedošlo k velké zátěži akumulátorů. Pokus byl měřen v délce 5 až 10 minut, vzhledem ke kapacitě baterie a v závislosti na okolních podmínkách. Průběh pokus byl celou dobu monitorován, zdali nedochází k neočekávanému chování vrtule vlivem vzniklé námrazy.

Jakmile uplynula požadovaná doba měření, došlo k plynulému vypnutí vrtule nastavením polohy potenciometru na nulovou hodnotu. Ihned po zastavení byla pyrometrem změřena teplota jejího povrchu a taktéž čas zastavení. Po skončení měření je třeba odpojit akumulátor od soustavy, aby nedošlo k jeho úplnému vybití, jelikož dochází ke stálému odběru proudu regulátoru. Po skončení veškerých úkonů spojených s měřením byla do protokolu zapsána hodnota venkovní teploty a provedena kontrola všech údajů. Baterie byla připojena k nabíjecí stanici, aby mohla být použita k dalšímu měření. Čas nabíjení se pohyboval od 20 do 30 minut v závislosti na délce měření.

Úkol

Stanovte rozdíl teplot povrchu vrtule před měřením a po jejím zastavení.

Dílčí úkoly měření:

1. Zapojte regulátor, servotester, baterii a proveďte kontrolu zapojení akustickou a následně vizuální indikací.
2. Zaznamenejte okolní teplotu vzduchu, vlhkost, teplotu vrtule a čas.
3. Zahajte pokus po stanovenou dobu a na pokus dohlížejte.
4. Po uplynutí stanovené doby pokusu zastavte vrtuli a zaznamenejte teplotu vrtule a aktuální čas.
5. Co nejdříve odpojte baterii a zapište okolní teplotu vzduchu.

Cíl

Cílem měření bylo zjistit, jaký je rozdíl mezi teplotami povrchu vrtule před roztočením vrtule a po zastavení a zdali se na vrtuli během pokusu projevilo adiabatické ochlazování a vznikla na listech námraza.

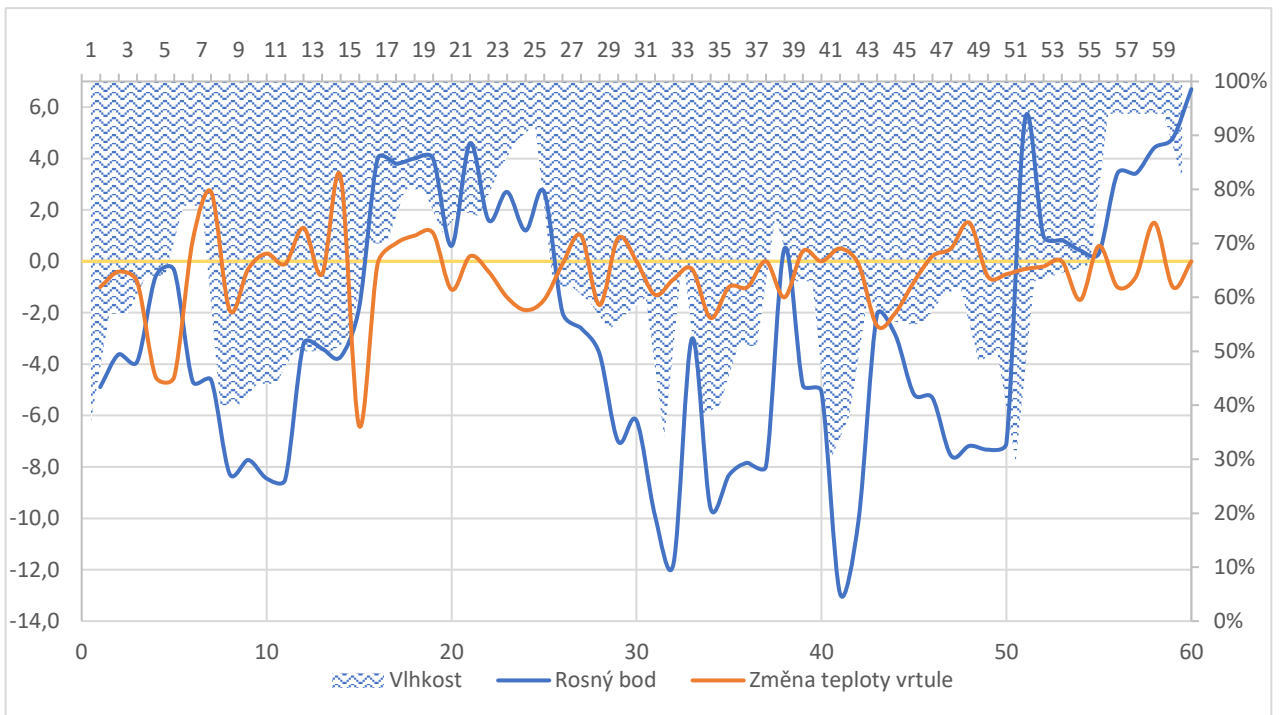
Definice měřených veličin:

Měření veličina	Jednotka SI	Měřicí přístroj
Teplota	[°C]	Teploměr
Teplota vrtule	[°C]	Pyrometr
Čas	[hh:mm]	Hodiny
Vlhkost	[%]	Vlhkoměr

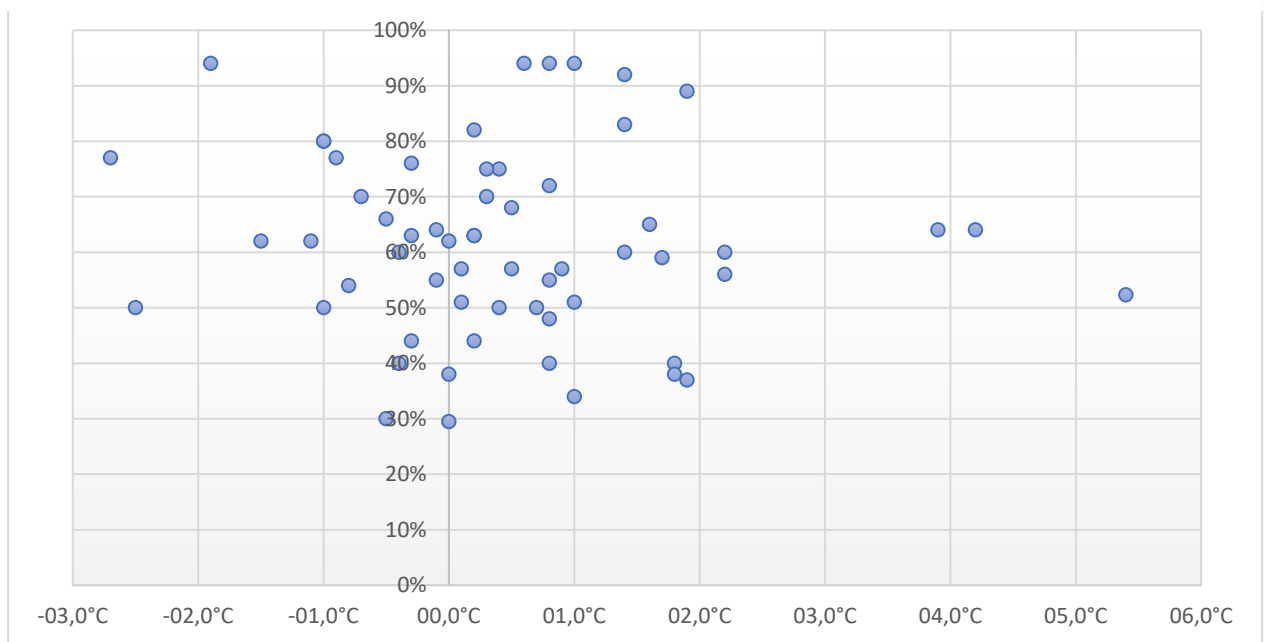
Tabulka 11 Tabulka měřených veličin

Naměřené hodnoty

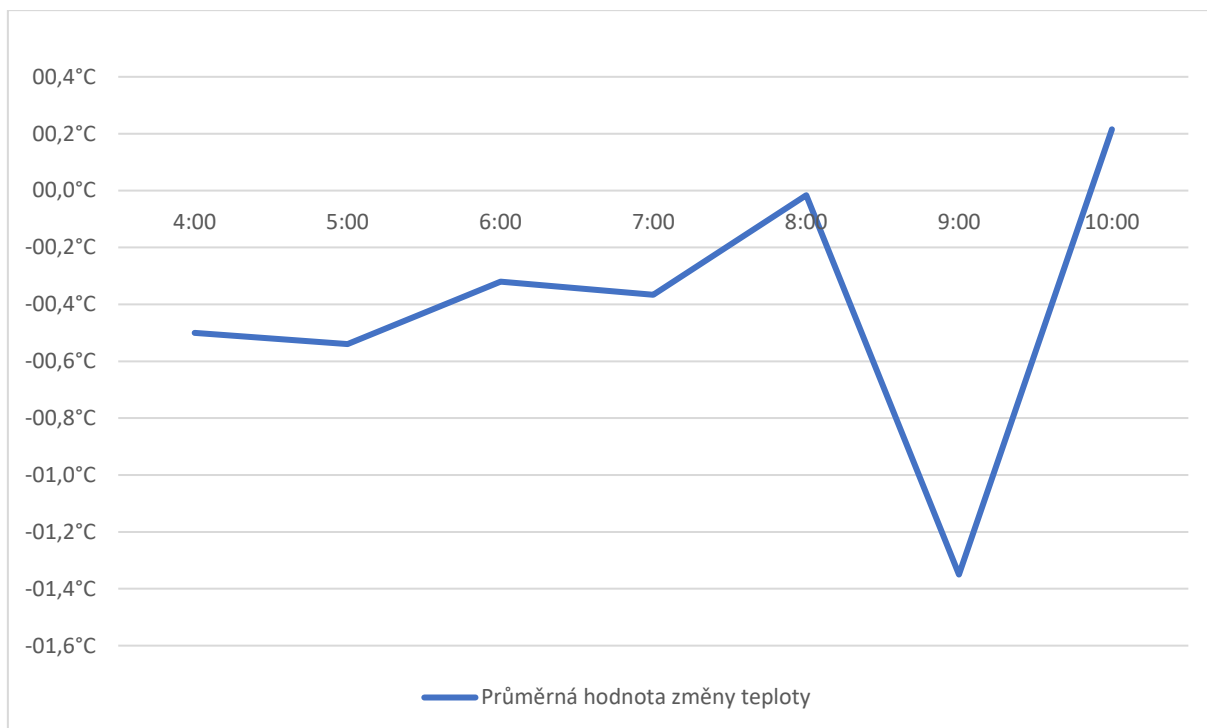
Celkem bylo provedeno 60 pokusů měření v různých meteorologických podmínkách.



Graf 1 Vývoj naměřených hodnot při různých meteorologických podmínkách



Graf 2 Rozptyl naměřených hodnot změny teploty při konkrétní vlhkosti



Graf 3 Průměrná změna teploty závislá na délce trvání měření

Data provedeného měření

Jsou uvedeny v příloze 1 a v příloze 2.

Vyhodnocení měření

Vyhodnocení experimentu probíhalo formou odečtu dat z měřicího přístroje a zaznamenáním do připraveného formuláře. Následně byly data digitalizovány do tabulek v programu Microsoft Excel. Měření probíhalo ve venkovním prostředí za různých meteorologických podmínek a v různých časech. Opakovaným měřením, které čítalo 60 pokusů, bylo zjištěno, že aritmetický průměr naměřených hodnot teploty povrchu listů vrtule se ochlazuje přibližně o $\bar{t} = 0,46 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Nepřesnost měření

Měření v daném prostředí nebylo dostatečně izolováno abychom zamezily projevu negativních meteorologických vlivů, které se z části mohou promítnout v naměřených hodnotách. Hodnoty ochlazení vrtule byly měřeny pyrometrem, který vykazoval nepřesnost, která je podrobněji popsána v příloze č. 4.

Výpočet chyby měření

Chyba vzniklá četností měření je vyjádřena směrodatnou odchylkou všech naměřených hodnot od zjištěného aritmetického průměru 0,46 °C. Odchylka je způsobena náhodnými chybami během měření a její hodnota s narůstajícím počtem provedených pokusů klesá.

$$u_a(t) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} = \sqrt{0,000282486 * 119,9} = 0,18 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Výsledná hodnota měření

Výsledek měření se započtením chyb během měření je celkový pokles teploty listů vrtule o hodnotu **0,46 °C ± 0,18 °C**.

Závěr měření

Průměr hodnoty ochlazení vrtule, vlivem adiabatického ochlazování, byl určen z 60 měření probíhajících ve venkovním prostředí v předem stanovených podmínkách. Teplota a vlhkost vzduchu byla dána aktuálními meteorologickými podmínkami a z části mohly ovlivnit měření další meteorologické vlivy jako je například sluneční záření, vítr nebo slabé přeháňky. Nejzásadnější vliv na provedená měření měl měřič povrchové teploty (pyrometr), který dosahoval vzhledem k výsledným hodnotám vysoké tolerance chyb měření, což nebylo před započtením série měření očekáváno. Z toho důvodu nemůže být výsledná hodnota ochlazení vrtule o $\bar{t} = 0,46 \text{ } ^\circ\text{C}$ průkazným výsledkem k potvrzení hypotézy.

5.2 Protokol pro záznam měření

VZOR

Pokus č.: 1 / 2 Datum pokusu: 15.3.2020 Vypracoval: Martin Luner

Podpis: _____

☐1 Počasí:

Poznámka: 1. Počáteční mrholení přešlo v déšť se sněhem. 2. Pokus byl po 10 minutách přerušeny, protože se projevil vysoké vibrace pohonné jednotky. 3. Po zastavení pohonné jednotky byla na listech vrtule námraza, tloušťka přibližně 2 mm.

85 Vlhkost vzduchu: [%] 90
2 Rosný bod: [°C] 2,2

☐2 Teplota vzduchu	4 °C	3 °C = -1 °C	4 °C	5 °C = +1 °C
	<small>Před spuštěním</small>	<small>Ukončení</small> <small>Rozdíl teplot</small>	<small>Před spuštěním</small>	<small>Ukončení</small> <small>Rozdíl teplot</small>
☐3 Teplota vrtule	3 °C	1 °C = -2 °C	4,5 °C	2 °C = -2,5 °C
	<small>Před spuštěním</small>	<small>Ukončení</small> <small>Rozdíl teplot</small>	<small>Před spuštěním</small>	<small>Ukončení</small> <small>Rozdíl teplot</small>
	Námraza: <input checked="" type="checkbox"/>	Druh: Ledovka	Námraza: <input type="checkbox"/>	Druh:
☐4 Čas	7:20	7:30 = 00:10	7:40	7:48 = 00:8
	<small>Začátek měření</small>	<small>Konec měření</small> <small>Doba celkem</small>	<small>Začátek měření</small>	<small>Konec měření</small> <small>Doba celkem</small>

Obrázek 23 Vzor protokolu měření [vlastní]

Hodnoty, které byly v průběhu diplomové práce naměřeny jsou zaznamenány do příslušného protokolu, který popisuje výstupy jednotlivých měření a můžete ho vidět na *obrázku č. 24*. V protokolu bylo nutné zaznamenat časové údaje, stav počasí, všechny naměřené teploty a vlhkost vzduchu. Součástí záznamu je stav počasí (slunce, déšť, noc). Během celého měření byly použity dvě baterie, a proto je možné do protokolu zaznamenat dva následné pokusy.

Postup vyplnění protokolu

Číslo pokusu

Pořadové číslo probíhajícího pokusu. Pokus je vyjádřen celočíselnou hodnotou.

Datum

Aktuální datum odpovídající dnu měření daného pokusu. Datum je zapsáno ve formátu [DD.MM.RRRR]

Vypracoval

Osoba, která je zodpovědná za naměřená data a zápis do formuláře.

Poznámka

Pole zaznamenává ostatní informace nebo poznatky, které nastaly během měření a nemohly být nikde zaznamenány

Pole číslo 1 - Počasí

Veškeré meteorologické jevy, související s prováděným pokusem.

Zaznamenání rázu počasí

Aktuální stav počasí v dané lokalitě odpovídající identickému stavu vyobrazeném na ilustrovanému obrázku.

Vlhkost

Aktuální naměřená relativní vlhkost vzduchu v dané lokalitě a v příslušné časové ose udávaná v procentech.

Teplota rosného bodu

Zaznamenání teploty rosného bodu v dané lokalitě. Lze určit výpočtem podle vzorce, pomocí tabulek nebo výpočtem online.

Pole číslo 2 – Teplota vzduchu

Naměřená hodnota teploty okolního vzduchu ve stupních Celsia.

Před spuštěním

Aktuální teplota vzduchu okolí ve stupních Celsia, která byla naměřena v době před roztočením vrtule.

Ukončení

Aktuální teplota vzduchu okolí ve stupních Celsia, která byla naměřena v době, kdy byl pokus ukončen a vrtule již nekonala žádný pohyb.

Rozdíl teplot

Výslednice rozdílu hodnot okolní teploty v době ukončení a před spuštěním.

Pole číslo 3 – Teplota vrtule

Naměřená hodnota teploty povrchu vrtule ve stupních Celsia.

Před spuštěním

Teplota povrchu vrtule ve stupních Celsia, která byla naměřena v okamžiku předcházející roztočení vrtule.

Ukončení

Teplota povrchu vrtule ve stupních Celsia, která byla naměřena v době, kdy byl pokus ukončen a vrtule již nekoná žádný pohyb.

Rozdíl teplot

Výslednice rozdílu hodnot okolní teploty v době ukončení a před spuštěním.

Pole číslo 4 – Časové údaje

Časové údaje vyjadřující celkovou dobu měření ve formátu [hh:mm].

Začátek měření

Fáze měření definovaná jako předcházející okamžik začátku pokusu před uvedením vrtule do pohybu.

Konec měření

Fáze měření, kdy byl pokus ukončen a vrtule již nekoná žádný pohyb.

Celková doba měření

Rozdíl mezi hodnotami *konce* a *začátku měření*.

5.3 Dílčí komponenty sloužící k měření

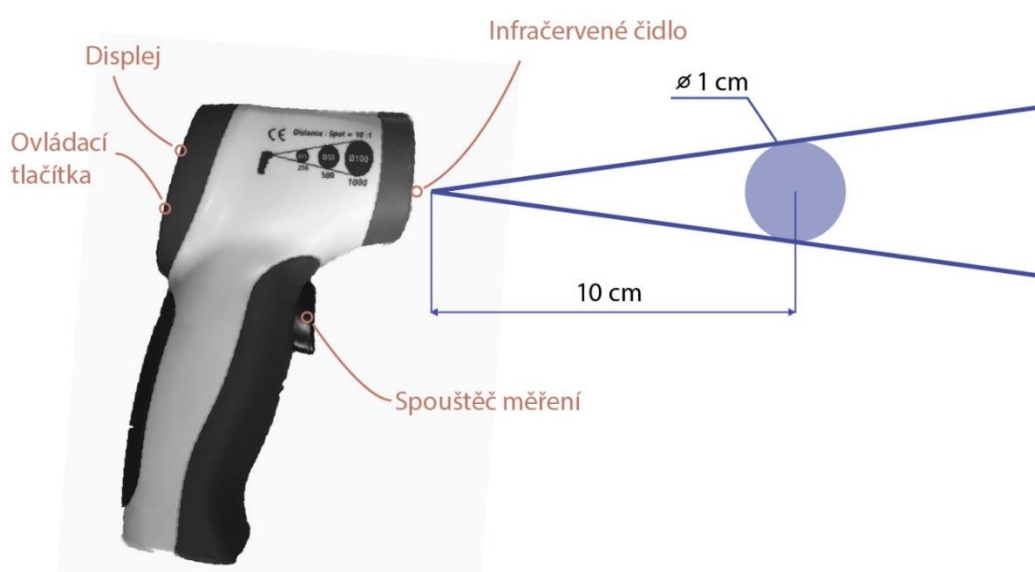
Infračervený teploměr

Infračervený teploměr slouží k bezdotykovému určení teploty různých povrchům na základě vyzážené infračervené energie měřeného objektu. Jedná se o typ IR 550-10S vyrobený firmou Voltcraft a zapůjčený ČVUT Fakultou dopravní v Praze. Odborně se tento přístroj nazývá pyrometr.

Senzor detekuje emitované (odražené) a propuštěné záření daného objektu. Teploměr tuto informaci vyhodnotí a zobrazí příslušnou teplotu na displeji přístroje. Na přesnost má vliv nastavení emisivity v závislosti na druhu měřeného materiálu. Emisivita je proměnná, která popisuje schopnost materiálu pohlcovat záření. Absolutně černé těleso pohlcuje veškeré záření a má hodnotu emisivity jedna ($\epsilon = 1$). U běžných předmětů klesá emisivita k nižším hodnotám. Emisivita plastové vrtule byla během měření nastavena na hodnotu $\epsilon = 0,94$, jedná se o bezrozměrnou veličinu. Přístroj vykazuje při teplotách v rozmezí 0 °C až 260 °C nepřesnost ± 2 °C.

Postup měření

Měření teploty povrchu musí probíhat v poměrné vzdálenosti od objektu dané vzdáleností měřeného objektu a ohniskové vzdálenosti. Ohnisková vzdálenost infračerveného čidla je nastavena výrobcem na hodnotu 10:1, což znázorňuje vzdálenost plochy od měřeného objektu 10 cm v poměru ke snímané oblasti o průměru 1 cm. Pro potřeby pokusu a zohlednění velikosti vrtule byla tato vzdálenost zcela dostačující.



Obrázek 24 Schéma funkce pyrometru [vlastní]

Teploměr/vlhkoměr

K měření teploty a vlhkosti byl během pokusu použit Xiaomi Thermostat Temperature Humidity Monitor, který dokáže změřit teplotu s přesností na 0,1 °C a vlhkost s přesností na 0,1 %. Teploměr disponuje technologií Bluetooth a může být připojen ke spárovanému chytrému zařízení, kde lze sledovat grafy naměřených údajů.



Obrázek 25 Teploměr/vlhkoměr [vlastní]

Měřicí stojan

Stojan je vyroben z tažné ocele hlazenky o průměru 14 mm. Hlavní tyč je vysoká 1,5 m a je svařena s kratší částí, která slouží ke zvýšení stability celého stojanu. Na vrcholu je přivařena kovová konzole, která tvoří základ pro uchycení překližek a elektromotoru.



Obrázek 26 Holá konstrukce stojanu [vlastní]

Dřevěné překližky

Na konzoly jsou přichycené dřevěné překližky o tloušťce 3 mm. Překližky kompenzují velikost rozměrů úchytného systému pohonné jednotky.

Nabíjecí stanice

Obsluha nabíjení baterií je vcelku snadnou záležitostí. Je důležité znát správné hodnoty které vyžaduje použitá baterie a tyto hodnoty navolit pomocí ovládacích prvků, tlačítek „+“ a „-“. Tlačítko Start slouží k potvrzení zadaný hodnot a tlačítko Batt. type slouží k selekci typu baterie nebo jako tlačítko pro návrat. Nabíjení probíhalo v režimu LiPO-3S při proudu 12V. Doba nabíjení se pohybovala od 20 do 30 minut.



Obrázek 27 Nabíjecí stanice [vlastní]

Baterie

Během pokusu byly použité dvě baterie od firmy Gravityhobby.com. Každá baterie má celkovou kapacitu 2500 mAh při maximálním napětí 11.1 V. Maximální kapacita byla během pokusu využívána přibližně kolem 70 % s ohledem na životnost baterie. Jedná se o tří článkovou baterii.



Obrázek 28 Baterie Gravity 2500 mAh [vlastní]

Pohonná jednotka

Jedná se o bezkomutátorový elektromotor značky CEMECH. Motor je přichycený přes dřevěné překližky na konzolu šrouby.



Obrázek 29 Pohonná jednotka umístěna na konzoly [vlastní]

Regulátor

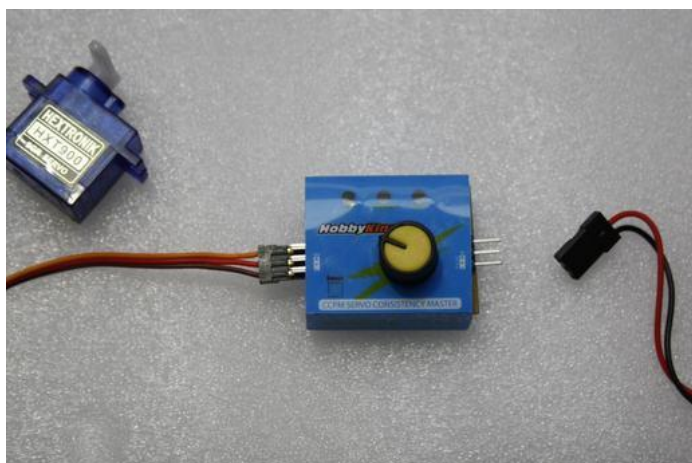
Regulátor zajišťuje dodávku stejnosměrného proudem z baterie do motoru. Výrobce regulátoru je firma Jeti, jedná se o typ Advance 40 plus, který nabízí tepelnou ochranu, ochranu proti přílišnému vybití (PCO), která zajišťuje vypnutí při sníženém odběru proudu a proudové omezení. [37]



Obrázek 30 Regulátor od firmy JETI [vlastní]

Servotester

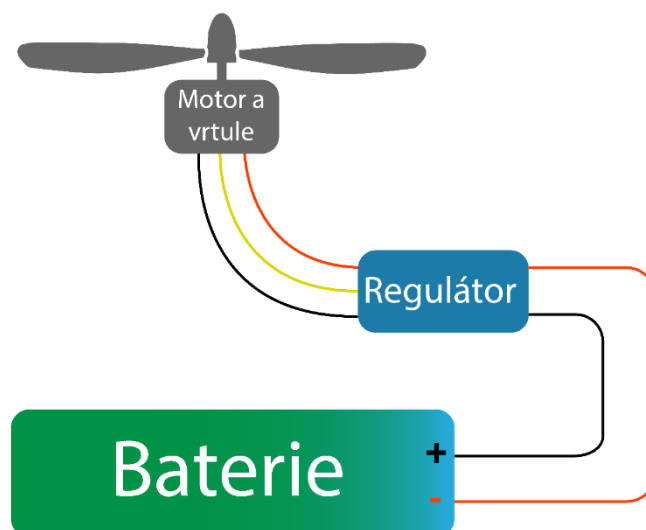
Servotester je součástka, která generuje řídicí signály na základě polohy potenciometru. Řídicí signály dále putují do regulátoru, který řídí počet otáček na základě řídicího signálu. [33]



Obrázek 31 Servotester [33]

Schéma zapojení

Zprovoznění celé soustavy vyžadovalo propojení jednotlivých komponenty navzájem k sobě. Z baterie vedou dva kabely opačné polaroty, černý (+) a červený (-), které jsou připojeny ke kabelům shodné barvy vedoucí z regulátoru. Pokud by došlo k záměně kabelů, dojde k poškození regulátoru. Na druhé straně regulátoru se nachází tři kabely, záměna krajních (napájecích) kabelů způsobí opačný smysl otáčení elektromotoru. Musíme tedy brát ohled na druh použité vrtule.



Obrázek 32 Schéma zapojení komponentů [vlastní]

Závěr

V rámci diplomové práce byly na základě teoretických znalostí, rešeršní analýzy nehod a experimentálního pokusu zkoumány podmínky vzniku námrazy na vrtulích multikoptér. Tato problematika může být často přehlížena, avšak v blízké budoucnosti se může stát závažným problémem při požadavku na nepřetržitý provoz multikoptér.

Tato diplomová práce si kladla jako hlavní cíl ověřit a analyzovat podmínky, během kterých dochází ke vzniku námrazy na vrtulích multikoptéry. Na základě několika incidentů bylo zjištěno, že námraza vzniká i při teplotách nad bodem mrazu, následkem adiabatického ochlazování listů vrtule. Tento úkaz bylo třeba ověřit v další části diplomové práce, jejíž součástí bylo sestavení měřicí soustavy, která bude moci hypotézu potvrdit nebo vyvrátit. Neméně důležitou částí byla teoretická část, jejíž cílem bylo seznámit čtenáře se základními meteorologickými termíny a současně ho uvést do problematiky námrazy. Část práce je věnována protinámrazovým opatřením, které by mohly námraze u multikoptér předejít.

S ohledem na povahu stanovených cílů byla provedena rešeršní analýza dostupných nehod a incidentů multikoptér, které byly způsobeny námrazou. Překvapujícím faktem bylo zjištění, že oficiálně nahlášená nehoda byla pouze jedna (ČR, 2020), navzdory počtu zveřejněných nehod na různých internetových fórech. U každé analyzované nehody je podrobně rozebrán její průběh včetně specifikace dostupných meteorologických údajů k dané nehodě. Z analýzy dat vyplývá, že k nehodám vedly nevyhovující meteorologické podmínky, které se vyznačovaly nízkou oblačností, vysokou vlhkostí a okolní teplotou kolem 0°C. Tyto podmínky se značně neliší od standardních podmínek vzniku námrazy u běžných vrtulových letadel. Zajímavým zjištěním bylo, že na rozdíl od vrtulí větších měřítek se námraza ve všech analyzovaných případech vytvořila po celé ploše listu vrtule. Z odborného hlediska k tomu může docházet vlivem velikosti tloušťky profilu, který je u vrtulí multikoptér velmi tenký. V souladu s teoretickými znalostmi zamrzají tenké profily nejdříve.

K ověření těchto zjištěných skutečností bylo dalším úkolem stanoveno navrhnout a sestavit měřicí zařízení, které bude moci ověřit vliv adiabatického ochlazování na vznik námrazy při kladných teplotách vzduchu. Návrh zařízení probíhal v programu AutoCAD a následné složení bylo zásluhou manuální činnosti. Měření probíhalo za předem definovaných meteorologických podmínkách při teplotě 0 °C až 10 °C a vysoké vlhkosti. Součástí měřicí soustavy byla sestavena metodika měření a byly nastaveny dílčí postupy k dosažení zdařilých pokusů měření. Výsledkem měření bylo provedení 60 pokusů, které trvaly průměrně kolem 7,5 minuty a byly prováděny v předem stanovených podmínkách. Výsledkem měření bylo ochlazení vrtule o 0,46 °C, což bylo konzultováno i s profesionálním meteorologem, který tuto hodnotu považoval za zcela reálnou, jelikož podobný jev je také prokázán u helikoptér. Vlivem

nevhodného nastavení parametrů měřicího zařízení se nepodařilo hypotézu řádně potvrdit, výsledky však indikují, že námraza vlivem adiabatického ochlazování může vznikat i při kladných teplotách. Výsledky bohužel nejsou průkazné z důvodu poměrně nízké naměřené hodnoty ochlazení vrtule. V rámci rozmezí přiznané chybovosti měřicího přístroje není možné hypotézu řádně potvrdit. V dalším výzkumu lze doporučit změnu parametrů výzkumu.

Výsledky této práce považuji jako stěžejní referenci k dalšímu výzkumu. Ačkoli nebyla hypotéza potvrzena ani vyvrácena, jsem si jist, že na základě naměřených výsledků se při dalších opakovaných měření hypotéza potvrdí. K následnému měření je třeba nastavit vhodnější podmínky, které eliminují drobné nedostatky, které mohou během měření nastat. Rovněž bych doporučil zvolit jiný typ měřicího přístroje, který vykazuje nižší toleranci chybovosti, což se ukázalo jako zásadní komplikace, vzhledem k nízké výsledné hodnotě měření. Pokud bude měření zopakováno a budou respektována tyto doporučení, je velmi pravděpodobné, že se hypotéza ochlazování vrtule multikoptéry za specifikovaných podmínek potvrdí.

Závěrem je důležité zmínit, že veškeré výsledky mohou mít informativní dosah pro veškeré uživatele multikoptér, což přinese lepší povědomí o vzniku nehod spojené s námrazou a sníží se tak pravděpodobnost dalších nehod.

Použitá literatura

- [1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2007. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 8021418680.
- [2] *Meteorologický slovník výkladový terminologický: s cizojazyčnými názvy hesel ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině*. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-85368-45-5.
- [3] VYSOUDIL, Miroslav. *Základy fyzické geografie 1: Meteorologie a Klimatologie*. Olomouc : Univerzita Palackého, 2013. ISBN 978-80-244-3893-1.
- [4] DVOŘÁK, Petr. *Letecká meteorologie 2017*. Cheb: Svět křidel, 2017. ISBN 9788075730145.
- [5] Oxford Aviation academy. *Meteorology*. Shoreham, England, 2008. ISBN 9781906202118
- [6] KRÁČMAR, Jan. *Meteorologie (050 00)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. *Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR-FCL 1*. ISBN 8072044478.
- [7] RUDA, RNDr Aleš, Ph.D. *Klimatologie a hydrogeografie pro učitele, Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity*. [online]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/pdf/ps14/fyz_geogr/web/index.html
- [8] *Meteo Aktuality, Počasí odborně a seriózně* [online]. Dostupné z: <https://pocasimeteoaktuality.wordpress.com/2019/02/12/izobary-izotermy-a-dalsi-pomyslni-cary/v>
- [9] Česká meteorologická společnost. *Meteorologický slovník* [online]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/>. České meteorologické společnosti. 10.
- [10] Český rozhlas Dvojka. *Proč mrholení není déšť*. [online]. Dostupné z: <https://dvojka.rozhlas.cz/proc-mrholeni-neni-dest-7528016>
- [11] ČERNAVA, S. a kol., 1972. *Letecká meteorologie*. Praha: SNTL.
- [12] The National Weather Service. *Icing* [online]. Dostupné z: https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/icing_stuff/icing/icing.htm.
- [13] EASA | European Union Aviation Safety Agency. *In Flight Icing* [online]. Dostupné z: https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/198961_EASA_EGAST_GA10.pdf. EASA. [Online]
- [14] *Předpis LET-51-24, Letecká meteorologie (VŠ učebnice)*. Praha, 1978.
- [15] DJI Mavic Drone Forum. *Mavic 2 Pro crash related to fog and iced props*[online]. Dostupné z: <https://mavicpilots.com/threads/mavic-2-pro-crash-related-to-fog-and-iced-props.70784/>
- [16] KELLER, Ing. Ladislav. *Učební texty pro piloty UAS*. Praha : Dronim, 2019.
- [17] SØRENSEN, Kim Lyng. *Autonomous Icing Protection Solution for Small Unmanned*. [Norwegian University of Science and Technology] Trondheim 2016.
- [18] HOHENLOHE, Stephan zu. *Drony: stručně a přehledně: výběr vhodného modelu, ovládání, foto a video, legislativa*. Přeložil Richard KRÍŽ. Frýdek-Místek: Alpress, 2016. ISBN 9788075432346

- [19] SVĚTRONŮ.NET. *Základy pro stavbu dronu* [online]. Dostupné z: <https://svetdronu.net/velky-pruvodce-zaklady-pro-stavbu-dronu/>
- [20] VOJÁČEK, Antonín. BLDC [obrázek]. 2016 [online] Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/ec-technologie-nebo-frekvencni-menic.html>.
- [21] GIUSEPPE, Mingione. MASSIMO, Barocco. Flight in icing conditions. [online] Dostupné z: https://www.ecologique-olidaire.gouv.fr/sites/default/files/lcing_flight_manual.pdf
- [22] VLAHOVIČ, Igor. *Test chování dronu při námraze vrtulí*. Droncentrum [online]. Dostupné z: <http://www.droncentrum.cz/test-chovani-drou-pri-namraze-vrtuli/>
- [23] REID, David. CNBC. *Deaths from commercial airplane crashes fell more than 50% in 2019*. [online]. Dostupné z: <https://www.cnbc.com/2020/01/02/deaths-from-commercial-airplane-crashes-fell-more-than-50percent-in-2019.html>
- [24] DĚKAN, Ing. Tomáš. *Bezpečnost v letecké dopravě*. [prezentace]. Praha.
- [25] L13-RLP. AIM | Air Navigation Services of the CR [online]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/dokumenty/L/L-13/index.htm>.
- [26] DJI Mavic Drone Forum. *Props iced up!* [online]. Dostupné z: <https://mavicpilots.com/threads/props-iced-up.85246/>.
- [27] DJI Forum. DJI Forum. *Ice on drone propeller* [Online] Dostupné z: <https://forum.dji.com/thread-75264-1-1.html>.
- [28] PLAČEK, Ing. Petr. *Námraza_DP* [elektronická pošta]. Message to: <Placek@caa.cz>. 29. dubna 2020. Osobní komunikace.
- [29] Kroufek, Jaroslav. RCmodely. *Námraza*. Leden 1998.
- [30] Keller, Ing. Ladislav. [Osobní komunikace]. Praha, 2020.
- [31] VLAHOVIČ, Igor. Droncentrum. *Havárie dronu vlivem námrazy vrtulí* [online]. Dostupné z: <http://www.droncentrum.cz/havarie-dronu-vlivem-namrazy-vrtuli/>.
- [32] RC-ZOOM/ HOBIX.CZ. *Servotester není jen k testování serv.* [online]. Dostupné z: <https://www.rc-zoom.cz/servotester-neni-jen-k-testovani-serv/>
- [33] ADER, Maria. AXELSSON, David. *Drones in arctic environments*. KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Stockholm, 2017.
- [34] DEICING.NET. *Active Frost* [obrázek] [online]. Dostupné z: <https://deicing.net/?p=187>
- [35] KINDPNG.COM. *Drone Motor Direction* [obrázek] [online]. Dostupné z: shorturl.at/iDNOY
- [36] PHANTOMPILOT. *Propeller Icing In Cold Foggy Weather* [obrázek] [online]. Dostupné z: shorturl.at/wGLUX
- [37] JETI MODEL S.R.O. Střídavé regulátory [online]. Dostupné z: <http://www.jetimodel.com/cs/katalog/Regulatory-otacek/Stridave-regulatory/>
- [38] VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ. *Nejistoty měření* [online] Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz/Podklady/AT/nejistoty1.pdf>

Seznam obrázků

Obrázek 1 Ukázka průběhu průměrných denních teplot pro ČR [vlastní]	5
Obrázek 2 Sluneční radiace [5]	6
Obrázek 3 Konvekce, kondukce a radiace [vlastní]	7
Obrázek 4 Odevzdané a přijaté teplo, během fázové přeměny [vlastní]	9
Obrázek 5 Relativní vlhkost při různých teplotách [vlastní]	11
Obrázek 6 Kondenzační hladina a vznik oblačnosti [vlastní]	14
Obrázek 7 Změna skupenství vody v oblačnosti [7]	17
Obrázek 8 Skupenství vody při záporných teplotách [vlastní]	19
Obrázek 9 Jinovatka na stojícím letadle [36]	21
Obrázek 10 Vznik zrnité námrazy na profilu [5]	22
Obrázek 11 Vznik ledovky na profilu [5]	23
Obrázek 12 Beztvará námraza [4]	23
Obrázek 13 Žlábková námraza [4]	24
Obrázek 14 Vliv námrazy na profil podle jednotlivých druhů [22]	24
Obrázek 15 Vzniklá námraza na listu multikoptéry [36]	27
Obrázek 16. Popis těla multikoptéry [vlastní]	29
Obrázek 17 Smysl otáčení vrtulí UA [35]	31
Obrázek 18. Princip funkce elektromotoru [21]	32
Obrázek 19 Námraza listů vrtule [28]	43
Obrázek 20 Hexakoptéra těsně po nehodě [28]	44
Obrázek 21 Námraza na vrtulích hexakoptéry [29]	44
Obrázek 22 Námraza na listu vrtule [22]	48
Obrázek 23 Vzor protokolu měření [vlastní]	56
Obrázek 24 Schéma funkce pyrometru [vlastní]	59
Obrázek 25 Teplomě/vlhkoměr [vlastní]	60
Obrázek 26 Holá konstrukce stojanu [vlastní]	60
Obrázek 27 Nabíjecí stanice [vlastní]	61
Obrázek 28 Baterie Gravity 2500 mAh [vlastní]	61
Obrázek 29 Pohonná jednotka umístěna na konzoly [vlastní]	62
Obrázek 30 Regulátor od firmy JETI [vlastní]	62
Obrázek 31 Servotester [33]	63
Obrázek 32 Schéma zapojení komponentů [vlastní]	63

Seznam tabulek

Tabulka 1 Druhy teplotních stupnic ^[5]	5
Tabulka 2 Tabulka intenzity námrazy ^{[6] [5]}	20
Tabulka 3 Využitelnost protinámrazového opatření u jednotlivých druhů pohonu.....	38
Tabulka 4 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[27]	42
Tabulka 5 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[28]	42
Tabulka 6 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[29]	44
Tabulka 7 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[30]	45
Tabulka 8 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[31]	46
Tabulka 9 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[32]	47
Tabulka 10 Specifikace meteorologických údajů v době nehody ^[23]	47
Tabulka 11 Tabulka měřených veličin	53

Seznam grafů

Graf 1 Vývoj naměřených hodnot při různých meteorologických podmínkách	54
Graf 2 Rozptyl naměřených hodnot změny teploty při konkrétní vlhkosti	54
Graf 3 Průměrná změna teploty závislá na délce trvání měření	55

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Tabulka hodnot měření 1-30

Příloha č. 2 – Tabulka hodnot měření 31-60

Příloha č. 3 – Technický výkres

Příloha č. 4 – Výpočet nejistot