



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

NÁMRAZA AKO NEBEZPEČNÝ JAV V LETECTVE

ICING AS DANGEROUS PHENOMENON IN AVIATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN DRŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. KAREL KRŠKA, CSc

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Drška

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Profesionální pilot (3708R030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem c.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Námraza jako nebezpečný jev v letectví

v anglickém jazyce:

Icing as Dangerous Phenomenon in Aviation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pevné usazené srážky v meteorologii a v letecké praxi. Fyzikální a jiné podmínky vzniku námrazy na letadlech a námrazku na letištních plochách. Klasifikace námrazy podle rozložení námrazové hmoty na povrchu letadla. Metody měření námrazy.

Cíle bakalářské práce:

Popište nebezpečí vyplývající z utváření námrazy na různých typech letounu a způsoby ochrany před námrazovými jevy za letu a parkování letadel. Zvláštní pozornost věnujte námraze u vrtulníku.

Seznam odborné literatury:

- Dvořák, P.: Letecká meteorologie. 2. vyd. Cheb 2012.
Kulčák, L. a kol.: Učebnice pilota vrtulníku. Část II. Brno 2009.
Meteorologie (050 00). Učební texty. Brno 2006.
Nedelka, M.: Přehľad leteckej meteorológie. Bratislava 1984.
Řezáčová, D. a kol.: Fyzika oblaků a srážek. Praha 2007.
Materiály z konferencí cs. letecké meteorologie.

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Karel Krška, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Břně, dne 22.11.2012

L.S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Ředitel fakulty

ANOTÁCIA

Cieľom bakalárskej práce je popísať vznik námrazy a jej nebezpečenstvo v letectve. Práca obsahuje viacero častí, ktoré popisujú podmienky vzniku námrazy, jednotlivé druhy námrazy a metódy jej merania. Taktiež sa tu popisujú prostriedky na ochranu proti námraze.

ANOTATION

The aim of the bachelor's thesis is describe the creation of icing and its dangerous in aviation. The work contains several sections that describe the conditions of icing, different types of icing and its measuring. Also methods are described here means to protect against icing.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

námraza, vznik námrazy, druhy námrazy, intenzita námrazy, predchádzanie námrazy, odstraňovanie vzniknutej námrazy

KEY WORDS

icing, creation icing, types icing, icing intensity, antiicing, deicing

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

DRŠKA, M. *Námraza ako nebezpečný jav v letectve*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 42 s. Vedoucí bakalářské práce RNDr. Karel Krška, CSc..

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že túto bakalársku prácu na som vypracoval sám s použitím uvedenej literatúry a s odbornou pomocou.

Dňa 24. mája 2013

.....
Martin Drška

POĎAKOVANIE

Predovšetkým by som sa chcel touto cestou poďakovať pánovi RNDr. Karlovi Krškovi, CSc. za veľmi ústretový prístup, trpezlivosť, odborný dohľad, cenné rady a pripomienky. Za čas nad rámec jeho povinností, ktorý so mnou nad touto prácou strávil a za vedomosti, ktoré mi svojim profesionálnym prístupom predal.

Ďalej by som veľmi rád poďakoval svojej rodine a hlavne svojej mamine, ktorí ma podporovali v štúdiu a sú mi veľkou oporou.

Obsah

1. Úvod	9
2. Všeobecné podmienky vzniku námrazy	10
2.1. Meteorologické podmienky.....	10
2.2. Aerodynamické podmienky	10
3. Oblasti výskytu vzniku a tvorby námrazy	11
3.1 Vrstevnatá oblačnosť; teplý front.....	11
3.2. Kopovitá oblačnosť; studený front.....	12
3.3. Námraza veľkých výšok.....	12
4. Vznik námrazy a jej vplyv na jednotlivé druhy letúnov	14
4.1. Vplyv námrazy na lietadlá všeobecného letectva.....	15
4.2. Námraza na prúdových lietadlách	16
4.3. Vznik námrazy na lietadlách stojacich na zemi	17
5. Druhy námrazy	20
5.1. Delenie podľa mechanizmu tvorby	20
5.2. Delenie podľa tvaru	22
5.3. Intenzita tvorby námrazy.....	24
5.4. Vplyv vysokých rýchlostí letu a ohriatia povrchu lietadla na vznik námrazy	26
6. Meranie a pozorovanie námrazy	27
6.1. Na námrazomerných stanicich energetiky.....	27
6.2. Na lietadlách.....	30
7. Námraza na letiskových plochách	32
8. Ochrana proti námraze – protinámrazové vybavenie	34
8.1. Ochrana proti námraze za letu.....	34
8.2. Odstránenie a prevencia námrazy pred vzletom.....	35
9. Vplyv námrazy na vrtuľníky	38
10. Záver	40
11. Zoznam použitej literatúry	41
12. Zoznam použitých skratiek	42

1. Úvod

Letectvo je odvetvie, ktoré v súčasnej dobe zažíva veľkolepý rozkvet. Jeho popularita veľmi rýchlo rastie a cestovať v dnešnej dobe lietadlom nie je žiaden problém. Letecké spoločnosti prepravujú veľké množstvo pasažierov a rôzneho tovaru takmer do celého sveta. Čísla, ktoré hovoria o počte prepravených zákazníkoch, sú vysoké a do budúcnosti sa počíta s ich ďalším zvyšovaním. Lietanie sa stáva čoraz viac dostupnejším spôsobom dopravy pre ľudí, čo so sebou prináša zhustenie leteckej prevádzky na oblohe. Hustá prevádzka sa môže stať komplikovaná vtedy, keď sa prejaví nepriaznivé počasie. Niektoré meteorologické javy stále ovplyvňujú veľmi významne leteckú dopravu, hlavne z hľadiska bezpečnosti. Je preto nutné byť oboznámený s oblasťami výskytu týchto javov, aby bolo možné sa im buď vyhnúť alebo aspoň znížiť ich vplyv na rôzne fázy letu na minimum. Preto sa pre zachovanie maximálnej bezpečnosti všetkých letov snažíme zdokonaľiť systémy predpovede počasia.

Námraza, ako letecky veľmi významný jav, je jedným z najdôležitejších objektov, o ktoré sa letecká meteorológia zaujíma. Námraza, ako nebezpečný jav v letectve vstúpila prvýkrát do širšieho povedomia svetovej verejnosti v roku 1928, kedy v Severnom ľadovom oceáne havarovala v dôsledku preťaženia námrazou vzducholod' Italia, vedená generálom Umberto Nobile. Odvtedy sa námraza stala komplikáciou v letoch početných aj moderných lietadiel.

Informácie o námrazových javoch, väčšinou pomenúvané pod pojmom námraza, sú obsiahnuté v mnohých správach pre letecké účely. Námraza sa študuje z hľadiska jej vzniku, vplyvu na letové charakteristiky, taktiež aj z pohľadu jej predpovede.

Táto práca pojednáva o nebezpečných javoch spojených s námrazou a o princípoch jej výskytu a tvorby. O zisťovaní najpravdepodobnejších oblastí jej výskytu, intenzite tvorby a vplyvoch nepriaznivých účinkov na lietadlá.



Obr. 1 – Talianska vzducholod' Italia

2. Všeobecné podmienky vzniku námrazy

Námraza, ako jeden z najnebezpečnejších poveternostných javov, zostáva pre súčasnú leteckú prevádzku, i cez moderné prostriedky boja proti nej, stále vážnym problémom. Jej následkom sa veľmi rýchlo zhoršujú aerodynamické vlastnosti lietadiel.

Podmienky vzniku námrazy sú rozmanité. Letové vlastnosti sa následkom námrazy menia predovšetkým s intenzitou námrazy, celkovým množstvom námrazy, jej geometrickým tvarom a štruktúrou.

Samotné fyzikálne vlastnosti a tvar námrazových javov závisia na vodnom obsahu oblaku, teplote vzduchu a teplote povrchu lietadla, na rýchlosti letu a na podmienkach obtekania jednotlivých častí lietadla.

Aby sa vytvorila námraza v značnom množstve, musia byť splnené predovšetkým dve základné podmienky:

- teplota povrchu lietadla musí byť nižšia než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- musia byť prítomné prechladené vodné kvapky (tj. vodné častice, ktoré zostávajú v kvapalnom stave aj pri teplotách pod bodom mrazu).

Na rozdiel od veľkých vodných objemov nemrznú vodné kvapky ihneď pri dosiahnutí bodu mrazu, ale pri teplote pohybujúcej sa od $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pri náraze na povrchu lietadla sa prechladené vodné kvapky chovajú rôzne, podľa svojej veľkosti:

- malé kvapky mrznú okamžite,
- veľké kvapky sa najprv rozlievajú a až potom zamrzajú.

Podmienky vzniku námrazy môžeme rozdeliť do dvoch skupín:

2.1. Meteorologické podmienky

- prechladené vodné kvapky
- rozdelenie veľkosti častíc - koloidálna instabilita
- teplota a vlhkosť vzduchovej hmoty

2.2. Aerodynamické podmienky

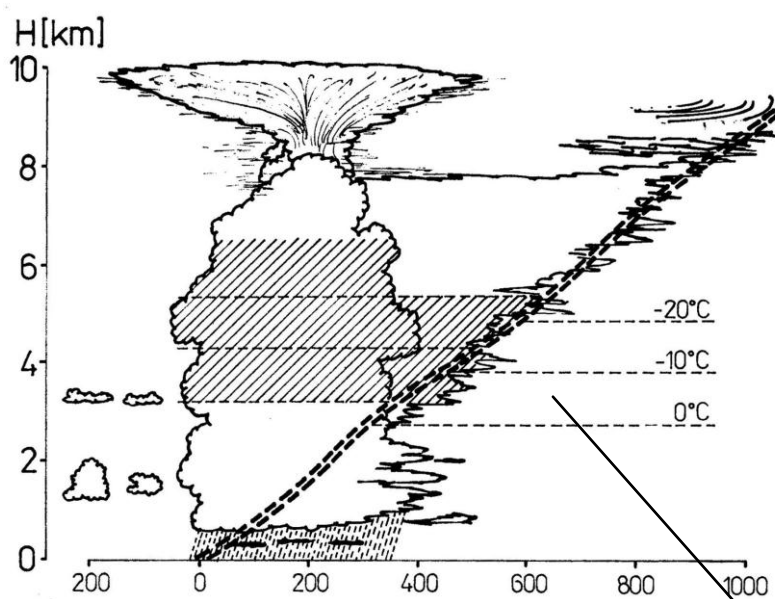
- teplota povrchu lietadla
- rýchlosť lietadla
- veľkosť a zakrivenie čelných a nábežných plôch letúna (aerodynamická jemnosť) [2].

3. Oblasti výskytu vzniku a tvorby námrazy

3.1 Vrstevnatá oblačnosť; teplý front

Jednou z hlavných príčin vzniku námrazy je značný obsah prechladených vodných kvapiek v oblačnosti. Túto podmienku najviac spĺňajú slohovité oblaky druhu Ns, As a popřípade St, zriedka slohokopovité Ac, Sc. Pokiaľ sa táto oblačnosť vyskytuje pri teplotách od 0 °C do -10 °C, je tvorená prechladenými vodnými kvapkami a pravdepodobnosť vzniku námrazy je veľká. V oblačnosti, ktorej vertikálny rozsah nedosahuje hladiny s teplotou -10 °C až -12 °C, sa vyskytuje námraza mierna až silná. Pri teplotách pod -12 °C sa už tvoria kryštálky ľadu, ktoré sú zrážkami, takže obsah vody v oblaku sa znižuje a nebezpečenstvo námrazy klesá. Námraza sa najčastejšie tvorí v oblasti koloidnej instability, kde narastajú kryštálky ľadu na úkor kvapiek a veľké kvapky na úkor malých kvapiek.

Námraza vo vrstevnatej oblačnosti teplého frontu sa vyskytuje ďaleko častejšie, než v oblačnosti nefrontálnej. Je to podmienené jednak väčším rozsahom tejto oblačnosti, ako aj prítomnosťou dvoch vzduchových hmôt, oddelených od seba frontálnou plochou. Mierna a silná ľadovka sa obvykle tvorí pred frontom, kde dážď alebo mrholenie prepadajú studeným vzduchom pod frontálnu plochu. Tieto podmienky sa vyskytujú vtedy, keď je teplota vykľzavajúceho vzduchu nad frontálnou plochou vyššia než 0 °C a teplota studeného vzduchu pod frontálnou plochou nižšia než 0 °C. Silná ľadovka sa vyskytuje taktiež v oblačnosti medzi nulovou izotermou teplého a studeného vzduchu [2,4].



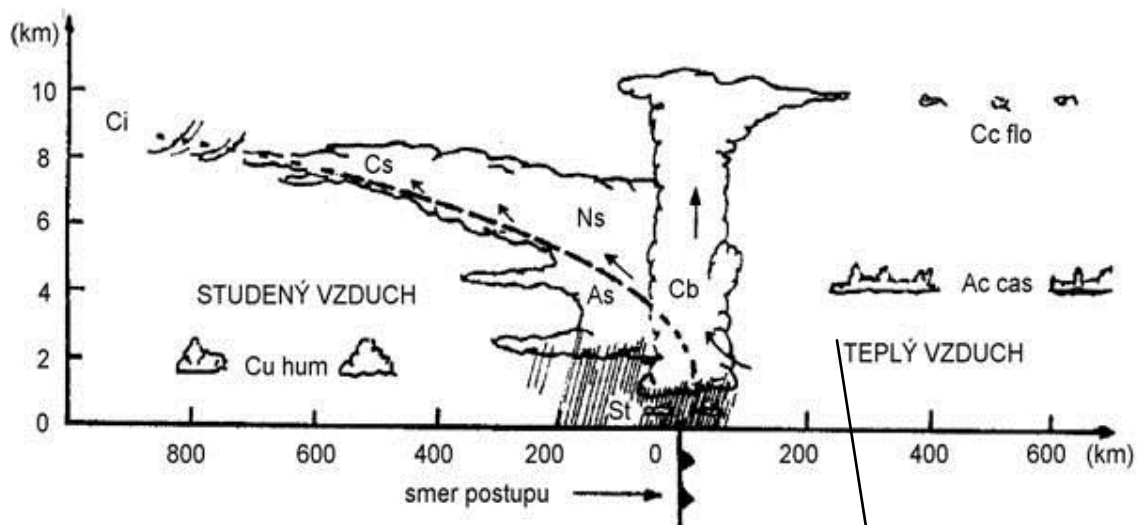
Obr. 2 – Teplý front

Zóny tvorby námrazy na teplom fronte

Vo vrstevnatej oblačnosti sa najčastejšie vyskytuje zrnitá námraza alebo námraza kombinovaná (zrnitý ľad + ľadovka). Najväčšie nebezpečenstvo spočíva vo veľkom horizontálnom rozsahu vrstevnatej oblačnosti, pretože je v nej lietadlo vystavené účinkom námrazy po dlhé časové obdobie [2].

3.2. Kopovitá oblačnosť; studený front

Podobne ako u vrstevnatej oblačnosti je i v kopovitej oblačnosti v spodnej časti veľkosť kvapiek a vodnatosť oblaku malá, s výstupom rastie a maximá dosahuje v hornej časti oblaku. Oproti vrstevnatej oblačnosti je však oblasť výskytu námrazy kopovitej oblačnosti v horizontálnom smere menšia, vo vertikálnom smere však oveľa väčšia. Intenzita námrazy sa mení od veľmi slabej v plochých kopách na slabú až miernu, vo vežovitých kopách Cu con a silnú v Cb. Druh námrazy v oblačnosti Cu, Cb je zrnitý ľad alebo ľadovka, často sú oba druhy súčasne (kombinovaná námraza). U vrstevnatej oblačnosti sme uvádzali, že tam, kde vypadávajú zrážky, nebezpečenstvo námrazy klesá. U kopovitej oblačnosti to neplatí, pretože silné výstupné prúdy neustále dodávajú do vyšších hladín vlhkosť, ktorá nahrádza úbytok vody, spôsobený vypadávaním zrážok [2,4].



Obr. 3 – Studený front

Zóny tvorby námrazy na studenom fronte

Podobný rozdiel, aký je medzi vrstevnatou a kopovitou oblačnosťou nefrontálneho typu, je i medzi oblačnosťou teplého a studeného frontu. Zatiaľ čo na teplom fronte je oblasť s výskytom námrazy rozsiahla, na studenom fronte je obmedzená a jej horizontálny rozsah malý. V instabilnej oblačnosti studeného frontu však prevláda ľadovka nad zrnitou námrazou. Mierna až silná ľadovka sa obvykle vyskytuje na čele studeného frontu priamo v oblasti frontu, slabá námraza sa obmedzuje na rozsiahlu vrstvu prechladených slohokôp (Sc), ktoré sa často vyskytujú za frontom [2].

3.3. Námraza veľkých výšok

V zásade možno konštatovať, že s výškou pravdepodobnosť výskytu námrazy prudko klesá a že v hornej troposfére a spodnej stratosfére sa takmer nevyskytuje. Aj tak sa však lietadlo môže i v týchto výškach stretnúť s námrazou. Tá sa môže dokonca tvoriť veľmi rýchlo, zvlášť na exponovaných častiach motorov. Niekedy je námraza týchto výšok spojená s hornou hranicou Cb, s nákovami tvorenými Cs a niekedy dokonca i s oblasťami cirrovitej oblačnosti, zvlášť pri jej hustote, či vertikálnej mohutnosti (na teplom fronte apod.). Väčšinou má

námraza podobu inovati a je iba slabej intenzity. K jej tvorbe môže dôjsť i v bezoblačnom priestore [2,6].

4. Vznik námrazy a jej vplyv na jednotlivé druhy letúnov

Námraza znamená pre väčšinu lietadiel veľký problém. Vzniká výhradne v oblačnosti pri teplote vzduchu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nižšej. Je teda možné sa jej vyhnúť jedine tým, že lietadlo nepoletí v oblaku, v ktorom sú podmienky námrazy, alebo v takom oblaku poletí a použije technické prostriedky na rozmrazovanie námrazy.

Námraza vzniká tuhnutím prechladených oblačných vodných kvapôčok predovšetkým tam, kde sú malé polomery zakrivenia povrchu, na nábežných hranách krídel, chvostových plochách alebo vrtuliach, či na anténach a rôznych vyčnievajúcich častiach lietadla. Tým na lietadle pribúda hmota, mení sa poloha ťažiska a tvar profilu nosných plôch. Z toho vyplývajú zmeny aerodynamických vlastností lietadla, ktoré sa nakoniec stáva neriaditeľné, či neschopné udržať sa vo vzduchu. Odlamujúce sa kusy ľadu z krytu motorov môžu tiež napríklad vletieť do turbíny a poškodiť ju. Taktiež ľad odlietavajúci z točiacej sa vrtule môže poškodiť trup lietadla. Niektoré tvary námrazy spôsobujú na nábežných hranách silné vibrácie lietadla. Námraza rovnako ovplyvňuje snímače na povrchu lietadla, napríklad zamrznutie Pitotovej trubice alebo iné snímače dynamického i statického tlaku, čím sa znemožní meranie indikovanej vzdušnej rýchlosti, vertikálnej rýchlosti a výšky. To vedie k ovplyvneniu funkcií autopilota, ktorý potom dáva lietadlu pokyny, ktoré môžu viesť až ku katastrofe.

Námraza sa za letu spravidla vytvára vtedy, keď sa vo vzduchu vyskytujú prechladené vodné kvapky a teplota vzduchu je pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nie je možné, aby sa na letiacom lietadle vytvorila námraza sublimáciou z vodnej pary. Oblačné kvapôčky v atmosfére zostávajú v kvapalnom stave do teplôt medzi -10 až $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, pričom najčastejšie a najväčšie množstvo ich je medzi 0 až $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. To je taktiež interval teploty vzduchu, v ktorom sa najčastejšie námraza vyskytuje.

Iný spôsob tvorenia námrazy je v oblakoch, v ktorých sa vyskytujú ľadové častice a zároveň je teplota nábehových častí lietadla aerodynamickým ohrevom zvýšená nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dopadajúce ľadové častice na lietadle sa z časti roztopia a kľžu až do miest s teplotou povrchu lietadla pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tam potom primrznú a vytvárajú tzv. bez tvarú námrazu.

Príkladom je lietadlo letiace horizontálnym letom, ktorému postupne zamrzá snímač celkového tlaku. Údaj o statickom tlaku zostáva konštantný, ale dynamický tlak zdanlivo klesá, takže autopilot situáciu vyhodnotí ako pokles rýchlosti a pridá plyn, prípadne potlačí riadenie a prevedie letún do klesania, aby lietadlo získalo opäť svoju rýchlosť. Pretože snímač ďalej zamrzá, pokračuje zdanlivý pokles rýchlosti letu a autopilot ešte viac pridáva plyn a ešte viac potláča riadenie do strmšieho klesania, až lietadlo narazí do zeme [3].



Obr. 4 – Havária lietadla po štarte, spôsobená námrazou na krídlach

4.1. Vplyv námrazy na lietadlá všeobecného letectva

Tvorením námrazy na povrchu lietadla sa zväčšuje jeho hmotnosť. V týchto prípadoch je najhoršia ľadovka. Ak vzniká zrnitá námraza (najmä žliabková), zväčšuje sa odpor lietadla až o 35%. Narušením laminárnej vrstvy vzduchu na profile krídla sa znižuje vztlak, čím sa zväčšuje pádová rýchlosť. Na tvorenie a usadzovanie námrazy sú prevažne veľmi citlivé najmä laminárne profily moderných vetroňov.

Námraza postihuje ako prvé tenké časti lietadla, čo niekedy môže viesť k odtrhnutiu antény. Ďalej skresľuje hodnoty alebo úplne vyradí prístroje, ktoré sú napojené na Pitotovu a Venturiho trubicu. Taktiež obmedzuje pohyblivosť riadiacich plôch. Nesmieme zabudnúť ani na to, že silnejšia námraza postihne tiež sklá kabíny, čo znemožní výhľad.

Pri motorových letúnoch námraza spôsobuje poruchy splynovača a vytvára sa taktiež na listoch vrtule, čo obmedzuje jej činnosť a preto účinnosť vrtule klesá až o 15%. Nerovnomerné tvorenie a usadzovanie námrazy, ktorá sa začína najskôr vytvárať na vrtulovej hlave a až potom prechádza smerom ku koncu listov. Toto spôsobuje nevyváženosť a vibrácie. Námraza sa väčšinou na koncoch listov vrtule už nevytvára. Dôvodom je veľký kinetický ohrev na špičkách listov vrtule. Veľké vibrácie sa vyskytujú aj vtedy, keď sa námraza začína praskať a odpadávať. Úlomky ľadu môžu spôsobiť poškodenie rôznych častí lietadla.



Obr. 5 - Námraza na špičke vrtule

Športový pilot musí vedieť, že silná námraza typu ľadovky sa tvorí v zimnom období pri záporných teplotách aj v prízemnej vrstve, ak do nej padajú tekuté zrážky. Môže to byť dážď alebo mrholenie, ktoré vypadáva z oblačného systému teplého frontu alebo z inverzného St – Sc.

Proti vzniku a tvorbe námrazy na lietadlách sa môžeme chrániť rôznymi technickými prostriedkami, ktorými je dané lietadlo vybavené. Sú to mechanické alebo termické zariadenia, poprípade je povrch lietadla pred letom ošetrený chemicky. Pri podmienkach, ktoré naznačujú nebezpečenstvo vzniku námrazy, je prvoradé zapnúť odmrazovacie zariadenie skôr, ako sa začne tvoriť námraza. Dôležitá ochrana je hlavne taktika letu. V situácií, kedy je riziko výskytu námrazy, sa musí pilot dôkladne oboznámiť s meteorologickými podmienkami na svojej trati letu. Kopovité oblaky nemajú veľký horizontálny rozsah, takže lietadlo sa z nich najrýchlejšie dostane v horizontálnom lete. Ak sa však stretne s výskytom námrazy vo vrstevnatej oblačnosti, treba zmeniť letovú hladinu. Niekedy je výhodnejšie hladinu zvýšiť, inokedy zasa znížiť. V takýchto prípadoch je dôležitá znalosť momentálnych podmienok teplotného zvrstvenia a výšky hraníc oblačných vrstiev [5].

4.2. Námraza na prúdových lietadlách

Nebezpečenstvo námrazy na prúdových lietadlách má viaceré špecifické vlastnosti spojené so samotnou myšlienkou konštrukcie motora a tiež s veľkými rýchlosťami týchto lietadiel.

Nábežné hrany krídiel, ako aj koreňové časti nosných plôch prúdových lietadiel sa prakticky námrazou vôbec nepokrývajú. Avšak, námraza sa môže intenzívne vytvárať na nosných častiach plôch, čo má za následok vyvolávanie vibrácií v pozdĺžnej rovine lietadla.

Prúdové lietadlá sú vystavené vzniku námrazy pri lete oblakmi z vodných kvapiek, ako aj v oblakoch obsahujúcich ľadové kryštáliky. Obzvlášť nebezpečná je námraza vytvárajúca sa na plôškach vstupného hrdla motora, nakoľko úlomky námrazy sú následne nasávané turbínovým motorom. Tieto úlomky môžu vniknúť až do kompresora a poškodiť ho. Najčastejšie sa námraza vytvára na vstupnom kanáli, na ochranných mriežkach a na smerovom zariadení.

Medzi následkami vzniku námrazy na pohonných jednotkách treba v prvom rade spomenúť pokles ťahu motora, vyvolaný znížením nasávania vzduchu. Je známe, že z tejto príčiny môže ťah motora klesnúť až o 20 či 30 %. To spôsobuje zvýšenie teploty plynov za turbínou [4].

Ak prelietavame oblasťou s intenzívnou námrazou pri rýchlostiach letu 500 km/h dlhšie než 13 minút, zvýšenie teploty plynov za turbínou presiahne prípustné hodnoty. Z tohto dôvodu je doba letu v oblakoch s námrazou časovo ohraničená. Ak sa však rýchlosť letu zvýši na 600 km/h, ľad sa na ochrannej mriežke začne rozrušovať a teplota plynov za turbínou klesáť. Pozorujeme teda, že pri vyšších rýchlostiach môže byť doba letu v oblakoch s intenzívnou námrazou oveľa dlhšia. Pri lete rýchlosťou 600 km/h a výške 5000 m je doba letu prakticky neobmedzená. V týchto prípadoch sa ľad tvorí iba na nevyhrievaných vzpruhách medzi závitmi špirál, pričom sa periodicky odlamuje.

So znižovaním výšky letu sa rýchlosť letu v oblastiach s intenzívnou námrazou musí zvyšovať. Môžeme teda konštatovať, že oblasti s intenzívnou námrazou je nutné prekonávať väčšími rýchlosťami. Hlavným znakom tvorenia silnejšej námrazy na ochrannej mriežke je zvýšenie teploty plynov za turbínou. V takomto prípade sa musí zvýšiť rýchlosť letu na úkor zmenšenia výšky letu alebo zvýšením otáčok motora [6].



Obr. 6 – Trosky lietadla po havárii, ktorej príčinou bola námraza

Námraza na motore prúdového lietadla je najnebezpečnejšia tým, že pilot nespozoruje začiatok jej vzniku. Preto sa pri uskutočňovaní letov v hladinách pod $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ odporúča preventívne zapínanie protinámrazových zariadení [4].

Existuje špekulatívny názor na tragickú nehodu lietadla Airbus 330 spoločnosti Air France, ktoré sa na linke AF447 z Ria de Janeiro do Paríža dňa 1. 6. 2009 krátko po 02:15 UTC zrútilo do Atlantiku v oblasti intertropickej zóny konvergencie. Údajne bolo zistené, že letún vyletel do oblaku Cb, kde v jeho letovej hladine bolo nezvyčajne vysoké zastúpenie prechladených vodných kvapiek. Zrejme preto došlo k vytvoreniu námrazy na snímačoch dynamického a statického tlaku, z ktorých sa meria rýchlosť letu. Snímače mali technickú chybu, kvôli ktorej palubný počítač chybné vyhodnotil parametre letu. Počítač chybné zistil klesajúcu rýchlosť a dal príkaz autopilotovi, aby letún previedol do klesavého letu. Pilot tomu nemohol zabrániť vzhľadom na to, že počítač chcel opäť chybné chrániť letún pred letom mimo letovú obálku a nedovolil pilotom, aby prevedením lietadla do horizontálneho letu stratili rýchlosť. Lietadlo, ovládané iba počítačom, sa snažilo udržať potrebnú rýchlosť strmým zostupným letom a nakoniec sa rozlámalo vo vzduchu. Tento názor je však iba predstavou dopravných pilotov a vychádza z diskusií v odborných kruhoch. Nie je to citácia záverečnej správy z vyšetrovania nehody [3].



Obr. 7 – Vyťahovanie trosiek Airbusu 330 spoločnosti Air France z oceánu

4.3. Vznik námrazy na lietadlách stojacich na zemi

Na povrchu lietadla, ktoré stojí na zemi, môže pri záporných teplotách vznikáť ľadová pokrývka rôzneho typu. Za jasných nocí, pri záporných teplotách môžeme pozorovať inovat', ktorá vzniká následkom priameho prechodu vodnej pary v ľad (sublimácia).

Inovatka sa tvorí prevažne na vystupujúcich častiach letúna za hmlistého počasia a slabého vetra. Ku vzniku inovati dochádza obvykle na náveternej strane letúna.

Do druhej skupiny námrazy usadzujúcej sa na letúnoch na zemi patria druhy ľadu vznikajúceho pri mrznutí prechladených dažďových kvapiek. Ak je mráz slabý, od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, kvapky sa rozlievajú a zamrzávajú v tvare priezračného ľadu. Pri nižších teplotách mrznú kvapky rýchlejšie a tým tvoria nepriehľadnú matnú vrstvu ľadu. Tento druh námrazy veľmi dobre prilieha k povrchu lietadla a môže dosiahnuť značných rozmerov.

Do tretej skupiny zaraďujeme prípady, kedy zamrzajú dopadajúce vodné kvapky a mokrý sneh.



Obr. 8 - Stojace lietadlo pokryté hrubou vrstvou ľadu

Na rozdiel od námrazy vznikajúcej za letu, kde namrzajú prevažne nábehové hrany, sú na zemi ohrozené najviac horné časti nosných plôch, trupu atď. Usadzovanie ľadu je nesymetrické a ľad sa usadzuje predovšetkým na náveterných častiach lietadla.

Pri vzniku námrazy na letúnoch stojacich na zemi sa zhoršujú ich aerodynamické vlastnosti. Už pri usadení tenkej vrstvy ľadu sa silne zhoršuje súčiniteľ vzlaku a tým sa zhoršuje alebo dokonca znemožňuje vzlet letúna. Okrem zmeny aerodynamických vlastností sa zreteľne mení aj hmotnosť samotného lietadla. Napríklad vrstva ľadu o hrúbke 5 mm pokrývajúca nosné plochy stredného dopravného letúna váži 400 – 450 kg.

Preto musí byť letún pred letom od ľadu očistený. V zime sa musí venovať veľká pozornosť predným sklám kabíny. So zapoteným či zamrznutým sklom nemožno vlietnuť, pretože v začiatku výstupu letúna môže námraza zosilnieť a tým prakticky znemožniť vizuálnu orientáciu pilota v prvých fázach letu.



Obr. 9 a 10 - Sklá kabíny znečistené námrazou a snehom

Vznik námrazy na prúdovom letúne, predovšetkým na kabíne, nastáva i pri skupinovom vzlete v období zimy. Námraza vzniká tým spôsobom, že plyny vystupujúce veľkou rýchlosťou z motora víria sneh. Ten sa potom topí a znovu namŕza na lietadlách, ktoré sa pohybujú za ním [6].

5. Druhy námrazy

Podmienky vzniku námrazových javov sú veľmi rozsiahle. Letové vlastnosti lietadiel sa následkom námrazy menia hlavne v závislosti od intenzity námrazy, od celkového množstva, geometrického tvaru a štruktúry námrazy.

Samotné fyzikálne vlastnosti a tvar námrazových javov závisia od vodného obsahu oblaku, teploty vzduchu a teploty povrchu lietadla, od rýchlosti letu a od podmienok obtekania jednotlivých častí lietadla.

Klasifikácia námrazy vychádza tak z tvaru , ako aj zo štruktúry námrazkových javov [4].

5.1. Delenie podľa mechanizmu tvorby

Inovat' - kryštalická námraza

Sú to ľadové kryštáliky, ktoré sa obvykle tvoria na povrchu parkujúcich lietadiel pri radiačných ochladieniach. Niekedy sa tvorí tiež počas letu pri stúpaní alebo klesaní lietadla z vrstiev vzduchu so zápornou teplotou do vrstvy teplejšieho a vlhšieho vzduchu. Pri styku teplejšieho vzduchu s chladnejším povrchom lietadla môže dôjsť ku kondenzácii vodnej pary na letúne a tvoreniu inovati. Tento druh námrazy je pomerne neškodný. Tvorí sa taktiež v riasnatej oblačnosti druhu Ci, Cc, Cs [2].

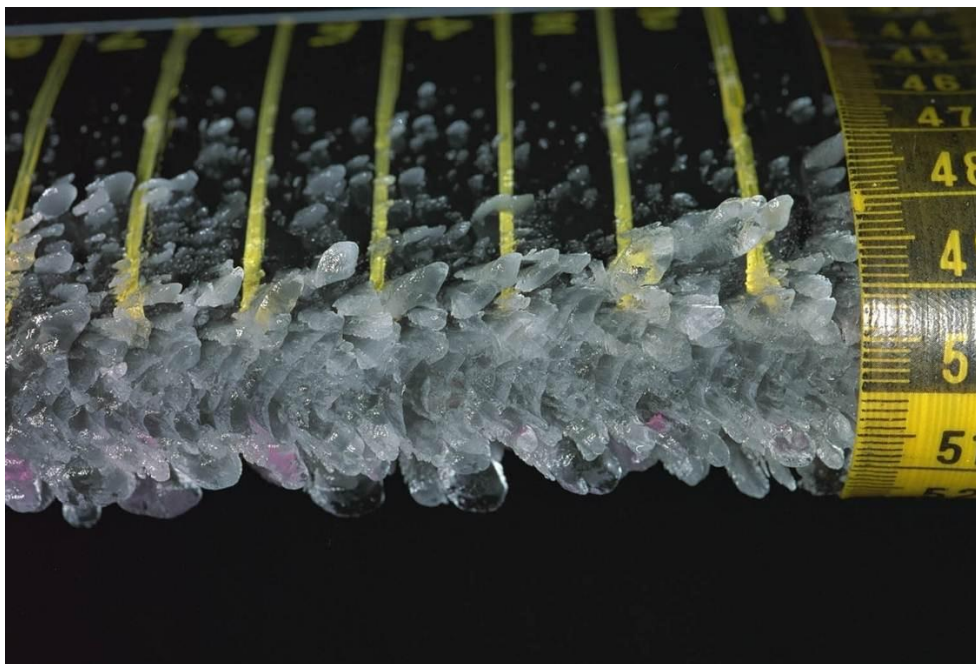


Obr. 11 - Inovat' na lietadle

Zrnitá námraza - zrnitý ľad

Je to drsný, mliečne sfarbený, nepriehľadný ľad, ktorý sa tvorí okamžitým mrznutím malých prechladených kvapiek pri ich náraze na lietadlo. Nepriehľadnosť je spôsobená tým, že kvapky pri zmrznutí zachovávajú takmer guľovitý tvar a medzi sebou uzatvárajú vzduchové bubliny. Tento druh námrazy sa tvorí na nábežných hranách lietadiel pri teplote od 0 °C do - 40 °C, najčastejšie však v rozmedzí -10 °C až -20 °C. Najčastejšie sa vyskytuje vo

vrstevnatej oblačnosti, ale i v Cu pri teplote pod $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Najčastejšia a najintenzívnejšia býva v oblačnom systéme teplého frontu v zimnej časti roka, a to v hornej časti oblačnosti, kde je hustota kvapiek najväčšia [2].



Obr. 12 - Zrnitá námraza

Ľadovka

Ľadovka je hladký priesvitný alebo priehľadný ľad, tvoriaci sa zamrznutím veľkých prechladených vodných kvapiek na povrchu lietadla. Veľké kvapky sa pri náraze na letún najskôr rozlejú a až potom mrznú. Tvorí tak vrstvu priehľadného kompaktného ľadu. Ľadovka sa najčastejšie tvorí pri teplote slabšie pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, menej pri teplotách do $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stretávame sa s ňou v oblačnosti Cu con a Cb, môže sa však tvoriť i pri lete oblasťou prechladeného dažďa alebo mrholenia.



Obr. 13 - Ľadovka na trupe lietadla

Zvláštnym druhom námrazy je námraza v karburátore piestového motora, ktorá sa vytvára v podstate nezávisle na výskyte vody v rôznych fázach vo vzduchu, v ktorom sa let uskutočňuje a nie je podmienená výskytom prechladených vodných kvapiek oblaku alebo dažďa. Tvorí sa v dôsledku expanzie a vyparovania paliva pri lete i mimo oblakov a pásma dažďov pri vysokej vlhkosti vzduchu, ktorý môže mať aj kladnú teplotu. Karburátor môže zamŕzať i v prípade, že na povrchu lietadla sa námraza nebude vytvárať. Obzvlášť nebezpečné je, ak sa námraza usadzuje na častiach regulujúcich prítok paliva. Znížené množstvo pohonnej zmesi prichádzajúcej do motora vyvoláva pokles jeho výkonu, a tým i zníženie rýchlosti letu. Týmto nepriaznivým javom môžeme zabrániť ohrevom karburátora teplým olejom alebo teplým vzduchom z motora [8].

5.2. Delenie podľa tvaru

Z hľadiska tvaru, v akom sa námraza tvorí hlavne na nábežných hranách krídiel, sú dôležité nasledujúce typy námrazy:

Profilová námraza

Vzniká pri nízkej teplote, obyčajne pod $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pri malom vodnom obsahu oblakov. Vytvára sa najčastejšie v miestach dotyku vodných kvapiek s povrchom lietadla, najmä na nábežnej hrane krídla. Niekedy sa hovorí, že profilová námraza dotvára krídlo v smere zvýšenia jeho aerodynamickej jemnosti. V skutočnosti profilová námraza vážne neohrozuje aerodynamické vlastnosti lietadla. Býva polo priehľadná až nepriehľadná [2].



Obr. 14 – Tvar profilovej námrazy

Žliabková námraza

Viaže sa na podmienky, v ktorých vodné kvapky pri dotyku s nábežnou hranou nestačia okamžite namrznúť, pretože táto časť krídla je kineticky najvyššou mierou ohrievaná. Prúd vzduchu odnáša kvapky od nábežnej hrany k chladnejším a silnejším častiam krídla, kde namŕzajú a námraza tak dostáva žliabkovitú formu. Žliabková námraza vzniká pri teplotách vyšších než $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a pri zvýšenom obsahu vody v oblaku. Býva priehľadná až polo priehľadná.



Obr. 15 - Silná žliabková námraza

Žliabkovitý tvar námrazy vzniká pri veľkých rýchlostiach v momente, kedy je následkom kinetického ohrevu teplota v kritickom bode krídla kladná, ale smerom od nábežnej hrany prechádza do záporných hodnôt. Námraza v tvare žliabku môže vzniknúť aj na nábežnej hrane, ale len v tom prípade, že je vodný obsah oblaku mimoriadne veľký. Žliabková námraza významne mení aerodynamické vlastnosti a vyvoláva tak rast čelného odporu prostredia, čím je najnebezpečnejšou formou námrazy. Tento tvar námrazy sa vytvára najčastejšie v zmiešanej oblačnosti pri teplote $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Žliabková námraza podstatne deformuje profil krídla a zhoršuje jeho aerodynamické vlastnosti (aerodynamický odpor sa zväčšuje až o 35%, znižuje sa vztlak a zväčšuje pádová rýchlosť lietadla) [2].



Obr. 16 – Tvar žliabkovej námrazy

Beztvará námraza

Vytvára sa počas letu v oblakoch zložených z kvapiek vody alebo kryštálikov ľadu pri teplote vzduchu málo pod bodom mrazu a teplote nábežných častí lietadla pod nulou. Prúd vzduchu unáša kvapky vody za nábežnú hranu, kde v miestach s menším kinetickým ohrevom vzniká námraza. Kryštály ľadu postupne ochladzujú nábežnú hranu krídla a na zárodkoch námrazy, na miestach, ktoré mali prechodne kladnú teplotu, námraza narastá. Najčastejšie vzniká pri stúpaní lietadla zmiešanými oblakmi.



Obr. 17 – Tvar beztvarej námrazy

Amorfna námraza bola pozorovaná pri rýchlostiach od 800 km/h do 850 km/h a tiež od 600 km/h do 700 km/h. Môže sa vyskytovať na rôznych miestach lietadla pri pomerne vysokých teplotách, často i pri $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2] .



Obr. 18 - Beztvará námraza

5.3. Intenzita tvorby námrazy

Intenzita námrazy závisí v značnej miere od vodného obsahu oblakov, bežne ale nevhodne označovanom taktiež ako vodnosť oblakov. Je to úhrnná hmotnosť častíc vody (v kvapalnej alebo pevnej forme) v jednotke objemu. Všeobecne môžeme povedať, že čím je vyšší vodný obsah oblaku, tým intenzívnejšia je námraza. Intenzita námrazy je množstvo usadeniny (ľad alebo kryštáliky ľadu), ktorá sa vytvorí za jednotku času.

Námraza sa najviac tvorí na častiach letúna, ktoré majú malé polomery zakrivenia (nábehové hrany krídel, chvostové plochy, antény atď.). Na silnejších častiach lietadla (trup, kabína, silné krídla) sa tvorí oveľa menej. Rovnako rýchlosť letu je dôležitým faktorom pre tvorenie námrazy. Pri rýchlostiach do 500 km/h intenzita námrazy pri rovnakom vodnom obsahu oblakov s rastúcou rýchlosťou rastie. Pri rýchlostiach nad 500 km/h intenzita opäť klesá. Je to spôsobené tým, že sa pri vyšších rýchlostiach vplyvom adiabatického stlačenia a trenia okolitého vzduchu ohrieva povrch letúna. V takýchto prípadoch sa námraza tvorí na odtokových častiach lietadla, avšak v oveľa menšej miere.



Obr. 19 - Silná námraza na krídle letúna

Môžeme teda usudzovať, že námraza sa tvorí intenzívnejšie v prostredí s veľkými vodnými kvapkami, na tenších profiloch a pri rýchlostiach letu do 500 km/h. Podľa hrúbky vrstvy ľadu, ktorá sa vytvorí za jednotku času, bola zostavená nasledujúca stupnica intenzity námrazy:

- do 0,6 mm/min – slabá,
- 0,6-1,0 mm/min – mierna,
- 1,0-2,0 mm/min – silná,
- nad 2,0 mm/min – veľmi silná.

Slabá intenzita neznamená veľké nebezpečenstvo pre letún, možno ju odstrániť použitím bežných odmrazovacích prostriedkov. Väčšie nebezpečenstvo znamená námraza mierna. Pri dlhšom lete v prostredí s touto námrazou by sa mohlo nahromadiť veľké množstvo ľadu na povrchu lietadla. Preto je nutné použiť odmrazovacie prostriedky a zmeniť letovú hladinu. Silnú námrazu je potreba odstraňovať okamžite. Predstavuje takú rýchlosť narastania ľadu, že odmrazovacie zariadenie mu nestačí čeliť a je nutné okamžite meniť letovú hladinu [2]. Na silnú námrazu je vydávaná výstraha SIGMET, či už predpokladanú alebo pozorovanú. Meteorológovia pri určovaní námrazy vychádzajú z radarových snímok oblačnosti, ktoré zodpovedajú vodnému obsahu oblakov, z vertikálneho profilu teploty, ktorý majú k dispozícii z aerologických meraní a z predpovedných máp jednotlivých výškových hladín. Veľmi často kooperujú aj posádky dopravných lietadiel, ktoré miernu a silnú námrazu ihneď ohlasujú riadiacemu letovej prevádzky a ten túto informáciu odovzdá meteorológovi. Meteorológ následne ihneď vydá správu SIGMET na pozorovanú námrazu [3].

5.4. Vplyv vysokých rýchlostí letu a ohriatia povrchu lietadla na vznik námrazy

Veľký význam v procese vzniku námrazy na dnešných moderných lietadlách má kinetický ohrev povrchu lietadla. Spravidla podstatne ovplyvňuje termodynamiku tohto javu. S ohľadom na fyzikálne vlastnosti vzduchu a povrchu lietadla v atmosferických podmienkach sa kinetický ohrev začína výraznejšie prejavovať až pri rýchlostiach okolo 100 m/s, čiže približne 360 km/h [4]. Je známe, že čím rýchlejší je let, tým rýchlejšie sa tvorí námraza. Je dôležité povedať, že vznik námrazy na lietadlách sa neriadi len počtom prechladených vodných kvapiek, ktoré dopadnú na povrch lietadla, ale aj teplotnými pomermi vo vrstve priliehajúceho vzduchu k obtekanému povrchu. Pri zväčšovaní rýchlosti letu dochádza k rýchlemu zvyšovaniu teploty letúna následkom adiabatického otepľovania vzduchu. Toto je obzvlášť zreteľne pozorované na nábežnej hrane nosnej plochy. Za nábežnou hranou sa uplatňuje hlavne vplyv trenia vzduchu o obtekaný povrch [6]. Veľkosť kinetického ohrevu závisí od množstva tepla, vznikajúceho trením o povrch daného lietadla [4].

Povrch lietadla sa pri pohybe vo vzduchu zahrieva z dvoch hlavných dôvodov:

- rýchlosť vzduchu sa znižuje z hodnoty rýchlosti nerozrušeného prúdu vo väčšej vzdialenosti od lietadla na nulovú rýchlosť, ktorá sa dosiahne v určitej vzdialenosti od prednej hrany telies v bode rozbiehania prúdu;
- medzná vrstva, ktorá sa tvorí v tesnej blízkosti povrchu telesa, kde jednotlivé častice strácajú rýchlosť vplyvom trenia, vytvára úzku oblasť prúdenia, v ktorej je priebeh prúdenia úplne iný než vo väčšej vzdialenosti od profilu [6]. Tvar medznej vrstvy závisí na obtekanom profile a uhle nábehu. Medzná vrstva sa neustále zväčšuje od nábežnej hrany obtekaného profilu a zahrieva sa vnútorným trením.

Ohriatie povrchu letúna pri rôznych rýchlostiach letu v suchom vzduchu ukazuje nasledujúca tabuľka:

v [km/h]	100	200	300	400	500	600	700	800	900
t [°C]	0,4	1,6	3,5	6,2	9,6	13,9	19,0	24,6	31,2

Teoretické výpočty pre letúny lietajúce nadzvukovou rýchlosťou dokazujú, že námraza na lietadlách lietajúcich vysokou rýchlosťou nie je možná. Je veľmi málo pravdepodobné, že by teplota povrchu letúna poklesla pod 0 °C, a tak vznikla námraza. Taktiež nie je možné, aby množstvo vody vyparujúce sa z povrchu letúna letiaceho nadzvukovou rýchlosťou bolo väčšie, než množstvo vody dopadajúce na povrch letúna.

Môžeme urobiť nasledujúci záver: zvýšenie rýchlosti nad 700 km/h znemožní tvorbu námrazy pri teplote okolitého vzduchu do - 10 °C a rýchlosť nad 900 - 1000 km/h znemožní vznik námrazy pri teplote vzduchu do - 20 °C.

Doteraz získané informácie dokazujú, že námraza na lietadlách lietajúcich vyššími rýchlosťami vzniká iba v nízkej a strednej oblačnosti pri vzlete alebo pristátí, kedy sa letúny pohybujú v rýchlostiach 300 - 400 km/h [6].

6. Meranie a pozorovanie námrazy

Námrazové javy na lietadlách sa vo všeobecnosti kvantitatívne nezisťujú. Merania sa uskutočňujú predovšetkým na horských a vysokohorských meteorologických staniciach. Na ich meranie sa používajú tzv. námrazomerné tyče, vystavované prúdeniu vzduchu oproti hlavným svetovým stranám, poprípade aj iným smerom. Námrazomerné tyče bývajú prevažne drevené a pre špeciálne účely kovové. Kovové tyče sa napríklad používajú pre vyšetrenie podmienok vzniku námrazy na elektrovodnej sieti. Informácie o námraze obsahujú hlavne čas začiatku a ukončenia javu, druh námrazy a jej intenzitu. Pre posúdenie daného množstva námrazy sa zisťuje jej vodná hodnota za určitý časový interval.

Pre objektívne posúdenie intenzity námrazových javov bol vyvinutý registračný prístroj zvaný geligraf, pracujúci na váhovom princípe. Geligraf má meraciu tyč umiestnenú vo vertikálnej polohe a tak umožňuje zachytávať produkty námrazotvorných procesov z ľubovoľného smeru. Geligraf je určený pre vysokohorské meteorologické stanice [4].

6.1. Na námrazomerných staniciach energetiky

Sústavné sledovanie námrazy v bývalom ČSR začalo prvýkrát na Českomoravskej vrchovine, v dôsledku častých havárií vonkajšieho elektrického vedenia. Od roku 1963 budoval sieť námrazomerných staníc na mnohých miestach ČSR Výskumný ústav energetiky v Brne spolu z Hydrometeorologickým ústavom. Niektoré z týchto staníc boli umiestnené aj na letiskách. Námraza sa merala vo výške 5 m nad zemou na železných tyčiach umiestnených v horizontálnej a vertikálnej polohe. V roku 1980 bola vybudovaná na najexponovanejšom mieste Českomoravskej vrchoviny, v Studniciach pri Novom Meste na Morave, experimentálna stanica na meranie horizontálneho zaťaženia vodičov a stožiarov vedenia vysokého napätia námrazou a vetrom. Ide o pokusné vedenie so stredným meracím stožiarom, vybavené registračným zariadením pre kontinuálne meranie námrazku s vetrom pre vyšetrenie vertikálneho gradientu námrazy nad zemou.

Meracia stanica je umiestnená na náhornej plošine vo výške 800 m n. m. Stanicu tvorí stredný stožiar a dve rozpätia s kotviacimi stožiarimi na koncoch oboch rozpätí a obslužná stanica s meracím zariadením. Trasa rozpätia je umiestnená v smere kolmom na prevládajúci smer námrazotvorného prúdenia.

V každom rozpätí je zavesený zväzkový vodič $3 \times 450 \text{ mm}^2$, rovnaký ako sa najčastejšie používa v našich vedeniach. Na strednom stožiarovi sú umiestnené meracie lávky, umožňujúce merať námrazu a vietor v dostatočnej vzdialenosti od hlavnej konštrukcie stožiaru. Na konci látok, v jednotlivých poschodiach vo výške 10 m, 20 m, 30 m, 40 m a na vrchole stožiaru sú horizontálne uložené námrazomerné tyče o priemere 30 mm vo dvoch na seba kolmých smeroch, vyhrievané anemometre dvoch rôznych typov na meranie rýchlosti vetra a registračné námrazomery s vertikálnymi tyčami o priemere 30 mm s diaľkovým meraním [9].



Obr. 20 - Stredný stožiar meracieho vedenia na stanici v Studniciach (podľa [9]).

Námraza sa vytvára na jednotlivých lanách a zväzkoch vodičov. V závesoch kotviaceho lana je inštalovaný tenzometer pre snímanie pôsobiacich síl, takže je možné merať vertikálnu zložku udávajúcu zaťaženie námrazou, aj horizontálnu zložku prídavného zaťaženia vetra na omrznutý vodič. U zväzkového vodiča sa meria ťah na záves a jeho vychýlenie vetrom. Vo vzdialenosti asi 50 m od stožiara je umiestnená klasická námrazkomerná stanica s dvoma horizontálnymi, vzájomne kolmými tyčami, námrazomer s vertikálnou tyčou a vyhrievaný anemometer, všetko vo výške 5m nad zemou.

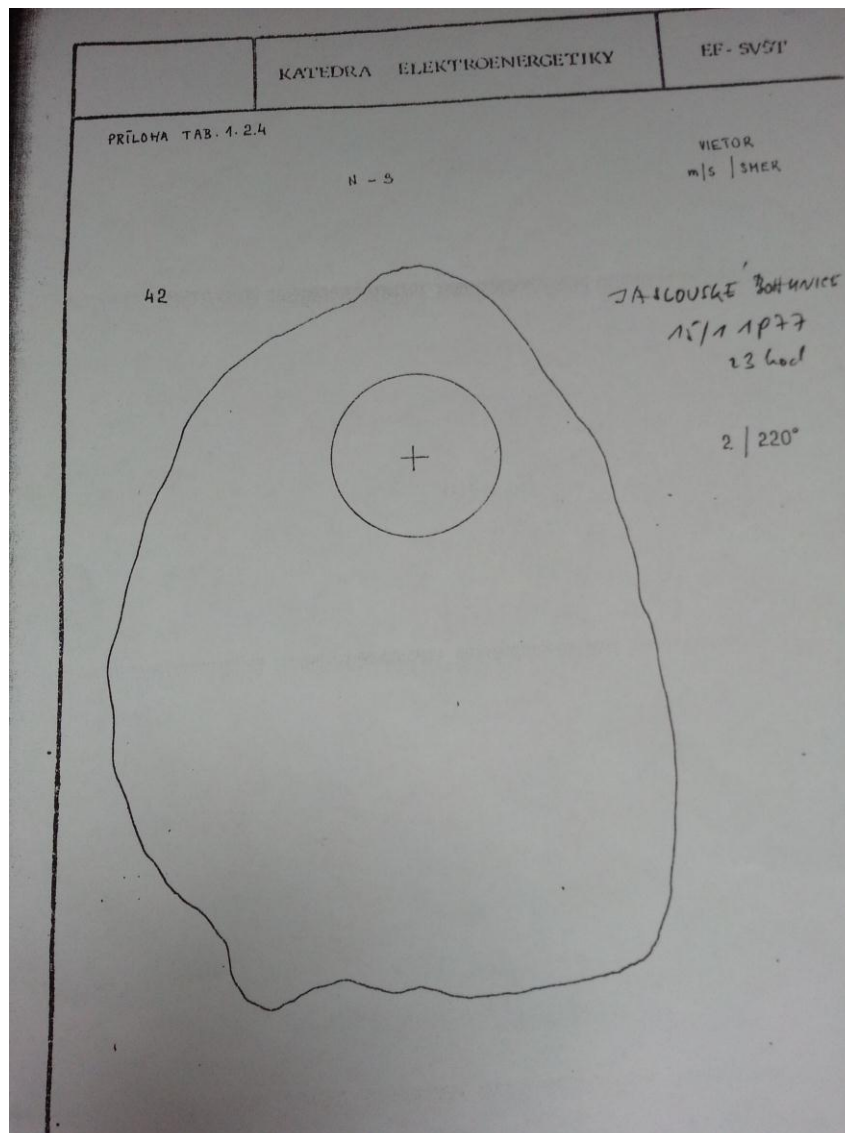
Množstvo vzniknutej námrazy sa meria ako hmotnosť na jeden diaľkový meter. Všetky diaľkovo merané hodnoty, tj. námrazky na vertikálnych tyčiach, rýchlosti vetra, sily pôsobiace na kotviace lano a teploty v troch výškach na stožiare, možno priebežne pozorovať na displejoch meracieho pultu a sú registrované v počítači.

V celej dobe doterajšieho sledovania, bola v decembri 1995 na tomto meracom stanovišti zaznamenaná najvyššia hodnota 21,6 kg/m námrazy [9].



Obr. 21 - Zväzkový vodič pokrytý hrubou vrstvou námrazy

V nižších polohách sa najväčšia námraza vytvára v okolí jadrových elektrární, v dôsledku veľkého obsahu vodnej pary vychádzajúcej z chladiacich veží.



Obr. 22 – Rez námrazou na vodiči vysokého napätia o priemere 3 cm neďaleko jadrovej elektrárne Jaslovské Bohunice, ktorá leží v blízkosti letiska Piešťany (podľa výročnej správy EGÚ Brno).

6.2. Na lietadlách

Tvorbu námrazy je možno pozorovať vizuálne, napríklad na čelných sklách kabíny, na stieračoch, na krídlach. Najčastejšie sa do zorného pola pilotov umiestňuje sonda pre vizuálnu indikáciu tvorby námrazy. V noci musí byť sonda osvetlená. Jej umiestnenie sa volí tak, aby bola prvým miestom tvorby námrazy. V moderných lietadlách sa inštalujú detektory námrazy, ktoré automaticky upozorňujú posádku varovným signálom [8].



Obr. 23 - Námrazomerná sonda na krídle lietadla

7. Námraza na letiskových plochách

Plocha letiska podlieha poveternostným vplyvom rovnako ako napr. cesta. Predpoveď počasia je kvôli stavu dráhy, pojazdných dráh, vyčkávacích miest dôležitá pre ich údržbu. Prevádzková plocha kontaminovaná vodou, snehom alebo námrazou predstavuje určité riziko šmyku pre pohybujúce sa lietadlá, ale významne predlžuje vzlet alebo pristátie. Posádky lietadiel zaujímajú predovšetkým tzv. brzdné účinky pohybových plôch a najmä dráhy, ktoré majú vplyv na vzlet i na pristátie.

Plocha letiska môže byť kontaminovaná padajúcimi i usadenými zrážkami kvapalného alebo pevného skupenstva. Rizikové sú hlavne zrážky pevného skupenstva, tzn. rôzne formy ľadu, a to obzvlášť takého, ktorý pokrýva letisko v nepravidelných plochách [3]. Na plochách letiska sa v podstate vyskytujú tri druhy ľadového povlaku: ľadovica, poľadovica a zmrazky.

Ľadovicou rozumieme hladkú kompaktnú usadeninu, ktorá býva zvyčajne priehľadná a vniká zamŕzaním podchladených vodných kvapiek vo forme dažďa alebo mrholenia na predmetoch, ktorých teplota je pod bodom mrazu. Ľadovica občas vzniká aj na predmetoch, ktorých teplota pred zrážkami bola nad bodom mrazu. Z hľadiska vzniku možno ľadovicu zaradiť medzi námrazové javy. Zvyčajne sa vytvára pri teplotách od 0 do -3 °C.

V prípade, že ľadovica vzniká pri mrholení, vznikajú medzi jednotlivými kvapôčkami vody vzduchové medzery a ľadovica vytvára nepriehľadnú vrstvu ľadu. Ľadovica vytvára pomerne hrubé vrstvy a tým vo veľkej miere obmedzuje a znemožňuje vzlety a pristátia lietadiel.

Poľadovica vzniká pri daždi alebo mrholení, ktorého teplota vodných kvapiek je nad bodom mrazu, čiže nejde o mrznutie podchladených zrážok. Teplota povrchu, na ktorom sa poľadovica tvorí, je záporná a jednotlivé kvapky vody mrznú až potom, keď sa rozlejú po povrchu. Tento proces vzniku pripomína do istej časti vznik priehľadnej námrazy. Poľadovica býva síce menších hrúbok ako ľadovica, ale povlak poľadovice je oveľa kompaktnjší.

Zmrazkami zvyčajne nazývame zamrznutú vodu po topiacom sa snehu. K tomu dochádza vtedy, ak sa vyskytuje snehová pokrývka a pritom teplota vzduchu počas dňa vystúpi nad 0 °C a potom zase poklesne pod bod mrazu. Sneh sa čiastočne roztopí a vytvorí kaluže, ktoré potom zamrznú. Na dráhach vznikajú zmrazky aj vplyvom prevádzky utlačením a zľadovatením snehu [4].

Najmenej nebezpečná je rosa alebo navlhnutie, ktoré sa na zhoršenie brzdných účinkov v podstate neprejavujú a väčšinou vznikajú na trávnatých, ale nie na betónových, či asfaltových plochách letiska. Trávnatý porast poskytuje viac vlhkosti než betónová plocha. Rosa alebo inovať nie sú ani natoľko výdatné, aby vytvorili silnejšiu vrstvu. Slabý nános týchto produktov sa roztopí pod silným tlakom kolies podvozku ťažkých lietadiel [3].

Pre boj proti ľadovému povlaku na dráhach a pohybových plochách sa používajú rôzne novodobé dopravné prostriedky. Letiská väčšinou využívajú odhŕňače, snežné frézy a autá s chemickými prípravkami, ktoré sa nanášajú na pohybové plochy a tým sa zamedzuje opätovnému zamŕzaniu [4].



Obr. 24 - Údržba pohybových plôch letiska

Pre pilotov je veľmi dôležitý údaj o brzdných účinkoch, ktorý sa pri situáciách s kontaminovanou dráhou pripája k správe METAR ako dodatok. Tento dodatok sa nazýva SNOWTAM. Brzdné účinky sa merajú špeciálnym zariadením, tzv. skidometrom, pripojeným k autu idúcemu po dráhe. Tieto merania zaisťujú prevádzkovatelia letísk [3].

Informácie o stave dráhy as normalness uvádzajú aj v správe METAR.



Obr. 25 - Meracie vozidlo zo zabudovaným skidometrom

Ukázkový príklad dodatku SNOWTAM:

SWLZ0026 LZTR 12010543

SNOWTAM 0026

A)LZTR B) 12010520 C) 01 F) 4/4/4 G) 3/3/3 H) 44/33/37 N) 4 R) 4

T) RWY COVERED WITH 3 MM OF DRY SNOW, RWY CONTAMINATION 100 PCT

8. Ochrana proti námraze – protinámrazové vybavenie

Zamedziť tvoreniu námrazy môžu tak technické opatrenia, ktoré delíme na mechanické, termické a chemické, ako aj znalosti pilota a rozvaha, s akou ich v konkrétnych podmienkach využije. Pilot je poučený, že je nutné sa vyhýbať letu v namrzajúcom daždi, kde hrozí silná ľadovka. Vie, že ak sa ocitne počas leta v zóne námrazy, je treba zónu podletieť a naopak v zime nadletieť [5].

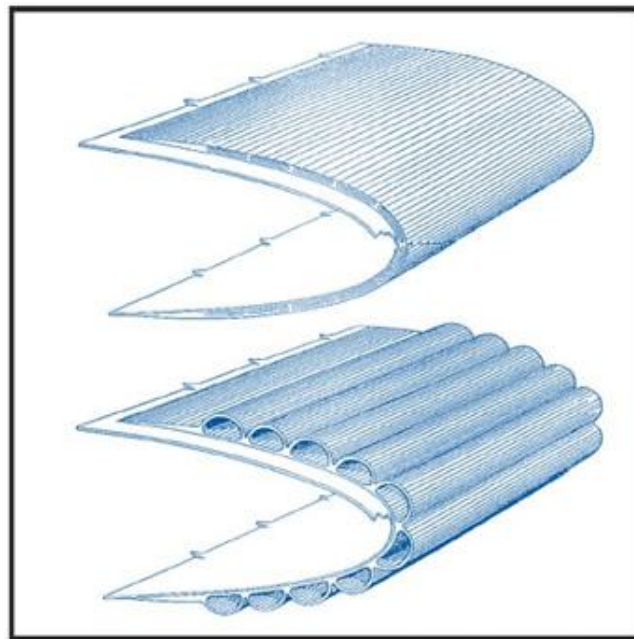
Rôzne okolnosti neumožňujú vždy sa včas vyhnúť zónam, v ktorých sa vyskytuje tvorenie námrazy, preto je veľmi často potrebná aktívna ochrana lietadiel pred týmto javom. Pred nepriaznivými účinkami námrazy sa ochraňujú vonkajšie časti, a taktiež aj pohonné jednotky lietadla.

8.1. Ochrana proti námraze za letu

Mechanické prostriedky (de-icing) boja proti námraze sa veľmi často používajú pri piestových motoroch [4]. Uvádza sa do činnosti až po vytvorení určitej vrstvy námrazy na lietadle [7]. Protinámrazové opatrenie tohto typu spočíva v inštalovaní gumových protektorov na nábežné hrany krídla, prípadne aj chvostových plôch. Vo chvíli vzniku námrazy sa protektory striedavo napúšťajú vzduchom odoberaným z kompresora motora, čím menia svoj objem a tým sa ľadové usadeniny lámu a prúd vzduchu ich odnáša preč [4]. Odberom vzduchu z kompresora sa znižuje výkon motorov. Preto sa nedajú využívať pri vzlete letúna, kedy je potrebný maximálny výkon, respektíve ťah [7].

Protinámrazové opatrenia tohto druhu bývajú inštalované prevažne na lietadlá s menšími rýchlosťami, kde pri pomalom narastaní námrazy postačujú.

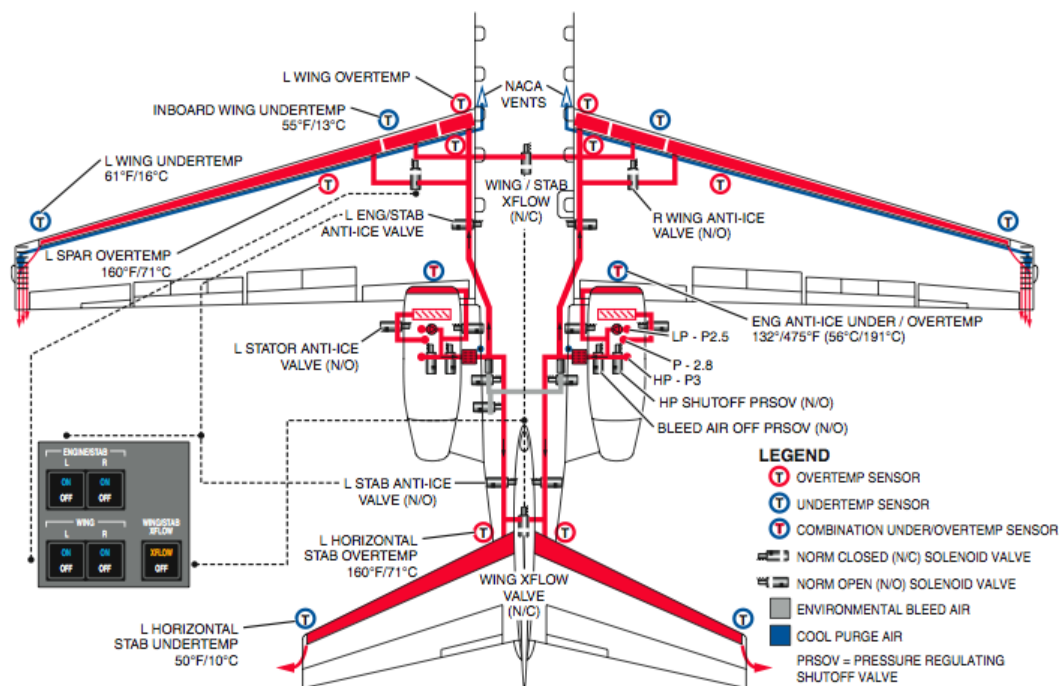
Najväčším nedostatkom mechanických protinámrazových zariadení je, že následkom nafukovania protektorov sa narušajú aerodynamické vlastnosti krídla a chvostových plôch [4].



Goodrich pneumatic boots

Obr. 26 - Konštrukcia gumových protektorov

Termické prostriedky (anti-icing) využívajú väčšinou lietadlá s turbínovými motormi [4]. Používajú sa pri lete do očakávaných podmienok vzniku námrazy. Spočívajú v ohrievaní častí lietadla, na ktorých sa tvorí námraza [7]. Zabezpečujú sa tepelnými systémami, ktoré sa delia na vzduchové a elektrotepelné. Pri aplikácii týchto systémov sa využíva ohriaty vzduch od kompresora a teplo výstupných plynov, ako aj mechanická energia od hriadeľa kompresora, ktorá sa mení na elektrickú energiu.



Obr. 27 - Zobrazenie rozvodu elektrotepelného systému

Elektrotepelný protinámrazový systém je účinnejší než vzduchový [4]. Využíva sa na ohrev čelných skiel kabíny, snímačov celkového a statického tlaku a vrtúl [7]. U vzduchového tepelného systému sa potrebné teplo získava privedením teplého vzduchu z kompresora motora. Avšak, množstvo získaného tepla je závislé od počtu otáčok motora a od hustoty vzduchu. Oproti tomu elektrotepelný systém nezávisí od pracovného režimu motora, od výšky a rýchlosti letu, ako aj od teploty. Okrem toho má aj vysoký koeficient účinnosti, avšak je zložitejší a náročnejší na technickú údržbu [4].

Vyhrievanie snímačov celkového a statického tlaku a vyhrievanie čelných skiel kabíny sa zapína pred zahájením pojazdu a vypína sa až po pristátí. Vyhrievanie vrtúl, nábežných hrán a vstupov do motora sa zapína pred vletením do očakávaných podmienok námrazy, oblakov alebo do zóny so zvýšenou vlhkosťou vzduchu [7].

Pre ochranu motorov pred námrazou sa väčšinou využíva vzduchový tepelný systém s nepretržitým pôsobením. Elektrotepelný systém sa používa zriedkavejšie [4].

8.2. Odstránenie a prevencia námrazy pred vzletom

Pred každým letom, v podmienkach vzniku námrazy, musí byť prevedená prehliadka povrchu letúna za účelom zistenia prípadne vzniknutej námrazy. Povrch letúna pripraveného k odletu nesmie byť znečistený ľadom, snehom alebo inováťou. Kritické plochy letúna musia byť zbavené akejkoľvek kontaminácie.

Kontrola povrchu musí zahŕňovať kontrolu nasledujúcich častí:

- povrchu krídla vrátane nábežnej hrany
- stabilizátora
- smerovky
- trupu
- snímačov a čidiel letových dát
- snímačov a čidiel pitot-statického systému
- snímačov uhla nábehu
- štrbín riadiacich plôch
- pohonných jednotiek
- všetkých vstupov a výstupov
- podvozku a podvozkových šácht

Odstránenie námrazy sa prevádza aplikovaním chemických látok na povrch lietadla v menšej miere taktiež ofukovaním povrchu letúna teplým vzduchom. Použité chemické latky by nemali spôsobovať koróziu, nesmú poškodzovať konštrukčný materiál lietadla, jeho náter a musia byť nehorľavé.

Pre odstraňovanie námrazy z povrchu lietadla sa používajú kvapaliny I. typu. Tie však neposkytujú dlhodobú ochranu proti námraze. Obsahujú 90 % glykolu, zvyšok tvorí voda, inhibítory korózie a zmáčadlá. Pre uľahčenie odstraňovania vzniknutej námrazy sa niekedy používa horúca voda, ktorá sa na povrch strieka pod vysokým tlakom.

Kvapaliny II. typu a kvapaliny IV. typu sa môžu používať na odstraňovanie námrazy, ale predovšetkým sa využívajú k ochrane lietadla pred opakovaným vznikom námrazy počas pojazdu, vyčkávania a v počiatočnej fáze vzletu. Rovnako ako kvapaliny I. typu obsahujú glykol, vodu, inhibítory a zmáčadlá. Navyše obsahujú látku na báze polymérov, ktorá má za úlohu zvýšiť viskozitu roztoku. Tým sa dosiahne udržanie roztoku na povrchu lietadla, čo zabráni jeho odtekaniu. Ideálne kvapaliny pre ochranu lietadla majú mať vysokú viskozitu do rýchlosti okolo 60 kt a potom prudko poklesnúť, aby najneskôr pri rýchlosti rotácie došlo k odtečeniu kvapaliny i zo zvyškami ľadu [7].



Obr. 28 - Proces odmrazovania a ochrany proti námraze

Rozdielny je spôsob aplikácie oboch typov. Najskôr sa lietadlo zbaví vzniknutej námrazy pomocou kvapaliny I. typu a do 3 minút od ošetrenia kvapalinou I. typu, by sa mal povrch ošetriť kvapalinou II. typu.

V prevádzkovej príručke musia byť uvedené postupy pre vykonávanie odmrazovania na zemi a doba účinnosti jednotlivých kvapalín. Doba účinnosti sa označuje ako HOT (Hold Over Time). Účinnosť nezriedenej kvapaliny sa pohybuje okolo niekoľkých desiatok minút, avšak účinnosť zriedenej kvapaliny spôsobuje pokles doby i na 5 minút. Danú účinnosť ďalej znižujú padajúce zrážky vo forme dažďa alebo snehových vločiek, hmla či silnejší vietor.

V prípade, že doba účinnosti kvapaliny uplynie pred vzletom alebo dôjde k opätovnému vzniku námrazy, musí byť vzlet odložený do prevedenia nového odmrazovania [7].



Obr. 29 - Ošetrovanie povrchu chvostovej časti kvapalinou II. typu

9. Vplyv námrazy na vrtuľníky

Piloti vrtuľníkov sa stretávajú s niekoľkými druhmi zrážok, ktoré sa usádzajú na týchto prostriedkoch pri parkovaní alebo počas letu a ohrozujú bezpečnosť lietania.

Aerodynamické vlastnosti a režim letu vrtuľníkov majú za následok, že sa na nich námraza vytvára častejšie ako na iných lietadlách s pevnými nosnými plochami. Námraza na vrtuľníkoch sa tvorí vo vertikálnom i horizontálnom lete, usadzuje sa na listoch nosnej i chvostovej vrtule. Pri horizontálnom lete sa môže vytvárať i na stabilizátore, meracom prvku rýchlomeru, na anténe, na skle prednej časti kabíny a na iných výstupkoch vrtuľníka [2,4].



Obr. 30 - Kabína vrtuľníka po prelete mrznúcou hmlou

O námraze na listoch nosnej vrtule možno konštatovať, že najintenzívnejšie sa tvorí pri koreni listov, zatiaľ čo konce listov bývajú následkom kinetického ohrevu zväčša bez námrazkových javov. Rozsah ľadového povlaku na listoch rotora pri konštantných otáčkach závisí, popri vodnom obsahu oblakov a veľkosti kvapiek vody, veľkou mierou od teploty okolitého prostredia. Čím je nižšia teplota oblaku, tým väčšiu časť listov rotora námraza postihuje. To dokazujú aj údaje v nasledujúcej tabuľke.

Teplota v oblaku v °C	Vzdialenosť okraja námrazy od osi rotácie v m
- 1 až - 2	4
- 5 až - 6	7
- 9 až - 10	9
- 13	10,5

Mechanizmus vzniku a tvorby námrazy na ostatných častiach vrtuľníka sa v princípe nelíšia od vzniku námrazy na lietadlách s piestovým motorom.

Pri znižovaní horizontálnej rýchlosti letu vrtuľníka sa intenzita námrazy, s výnimkou listov rotora, znižuje. Pri vertikálnom lete má praktický význam len vznik námrazy na

vrtuliach. Ostatné časti vrtuľníka sú vystavené nebezpečenstvu námrazy len pri lete v daždi so zápornými teplotami alebo v oblasti padania mokrého snehu [4].



Obr. 31 - Zamrznuté výstupy motora vrtuľníka

Vrtuľník má veľmi silné zaťaženie na liste rotora, takže už tenká vrstva ľadu môže vyvolať vážne poruchy vo funkcii rotora aj problémy s jeho ovládaním. Nepatrné zvýšenie hmotnosti rotorových listov môže mať za následok zväčšenie odstredivej reakcie na hlavicu rotora. Pretože rotor je veľmi presne vyvážený, hmotnostná nepresnosť jednotlivých listov vrtule môže túto rovnováhu narušiť a vyvolať nebezpečné vibrácie. Usadzovanie ľadu na hlavici rotora môže narušiť ovládanie listov. Úlomky ľadu odpadávajúce od vrtule poškodzujú iné časti vrtuľníka [2].

Praktické príznaky narastania námrazy na listoch rotora môžu byť napríklad nárazy na riadiacu páku, či chvenie celého vrtuľníka. Na moderných vrtuľníkoch sú inštalované signalizátory námrazy [4].

Námraza na vrtuľníku je nebezpečná aj na zemi. Vplyvom nevyváženosti listov dochádza ku kmitaniu podvozka, takže v krajnom prípade sa vrtuľník môže prevrátiť. Kusy ľadu odlietavajúce od listov sú nebezpečenstvom aj pre pozemný personál [2].

10. Záver

V dnešnej dobe je spoločnosť zameraná na čo najväčšie zisky, a to zanecháva veľký vplyv i na letectvo. Piloti sú veľmi často vedení k riskovaniu a prelietavaniu oblastí s výskytom silnej námrazy za úmyslom šetrenia. Preto je vhodné, aby bol pilot o nebezpečenstve námrazy oboznámený, pochopil javy a súvislosti s ňou spojené a aby sa pri kontakte s námrazou vyhol nadbytočnému riskovaniu.

Táto práca sa snaží vhodne zachytiť a opísať námrazu, aby sa na základe týchto vedomostí mohla stupňovať bezpečnosť a predchádzalo sa nebezpečným situáciám. Preto takto spracované informácie môžu pomôcť pilotom napr. pri prelietavaní teplým, či studením frontom. Taktiež ukazujú možnú ochranu a opatrenia voči vzniku a tvorbe námrazy. Ďalej informuje o jej možných následkoch a nehodách, ktoré námraza zapríčinila.

11. Zoznam použitej literatúry

- [1] SOBÍŠEK, B. a kol., 1993. *Meteorologický slovník výkladový a terminologický*. Praha: Academia + MŽP ČR. 594 s. ISBN 80-85368-45-5.
- [2] *Meteorologie (050 00)*, *Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR – FCL 1*, 2006. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-7204-447-8.
- [3] DVOŘÁK, P., 2010. *Letecká meteorologie*. 2.vyd. Cheb: Svět křídel. 481 s. ISBN 978-80-86808-85-7.
- [4] NEDELKA, M., 1982. *Letecká meteorológia II*. 2.vyd. Bratislava: Alfa, Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 326 s.
- [5] LEXMANN, E., 1986. *Meteorológia pre športového pilota*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, ISBN 63-053-86.
- [6] *Let za ztížených povětrnostních podmínek a ve velkých výškách*, 1963. Praha: Naše vojsko. ISBN 28-126-63.
- [7] *Provozní postupy (071 00)*, *Učební texty pro teoretickou přípravu dopravních pilotů dle předpisu JAR – FCL 1*, 2006. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 80-7204-444-3.
- [8] *Učebnice pilota vrtulníku PPL(H), část II.*, 2009. 1.vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. 450 s. ISBN 978-80-7204-638-6.
- [9] POPOLANSKÝ, F., 1996. *Měření námrazy ve Studnicích*. Meteorologické Zprávy, roč. 49, č. 6, s. 182-186. ISBN 0026-1173.
- [10] ŘEZÁČOVÁ, D.- NOVÁK, P.- KAŠPAR, M.- SETVÁK, P., 2007. *Fyzika oblaků a srážek*. 1. vyd. Praha: Academia. 576 s. ISBN 978-80-200-1505-1.

Pozn. Všetky uvedené obrázky okrem č. 20 a 22 boli prevzaté z internetu.

12. Zoznam použitých skratiek

Ns	Nimbostratus
As	Altostratus
St	Stratus
Ac	Altocumulus
Sc	Stratocumulus
Cu con	Cumulus congestus
Cu	Cumulus
Cb	Cumulonimbus
Cs	Cirrostratus
Ci	Cirrus
Cc	Cirrocumulus
SIGMET	Významné meteorologické informácie
METAR	Pravidelná letecká správa o počasí
SNOWTAM	Informácie o stave dráhy