

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

ANASTASIA BORISOVA

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Námraza a její vliv na vznik leteckých nehod:
Analýza minulých katastrof a rozvoj preventivních
opatření

Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Anastasia Borisova**
Osobní číslo: **D20448**
Studijní program: **B0716P040001 Technika, technologie a řízení letecké dopravy**
Téma práce: **Námraza a její vliv na vznik leteckých nehod: Analýza minulých katastrof a rozvoj preventivních opatření**
Zadávací katedra: **Katedra letecké dopravy**

Zásady pro vypracování

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem námrazy na bezpečnost leteckého provozu. Práce kombinuje analýzu minulých leteckých nehod způsobených námrazou s posouzením existujících preventivních opatření. Výsledky naznačují, že námraza je významným faktorem přispívajícím k leteckým nehodám, a navrhuje zlepšení technických a procedurálních opatření ke snížení tohoto rizika.

Rozsah pracovní zprávy: **minimálně 35 stran**
Rozsah grafických prací: **dle pokynů vedoucího práce**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Vašíček, J.: Námraza – Pracovní pomůcka č.
02/2007 Dvořák, P.: Letecká meteorologie
Řezáčová, D. a kol.: Fyzika oblaků a srážek
Kopáček, J. – Bednář, J. – Žák, M.: Jak vzniká počasí

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. David Hůlek,
Ph.D.**

Katedra letecké dopravy

Konzultant bakalářské práce: **RNDr. Jacek Kerum**
Ústav fyziky atmosféry Akademie věd v.v.i.

Datum zadání bakalářské práce: **13. října 2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2024**

L.S.

doc. Ing. Libor Švadlenka,
Ph.D.
děkan

Ing. Petr Mrázek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 1.února
2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Námraza a její vliv na vznik leteckých nehod: Analýza minulých katastrof a rozvoj preventivních opatření jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 13.5.2024

Anastasia Borisova

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem námrazy na bezpečnost leteckého provozu. Práce kombinuje analýzu minulých leteckých nehod způsobených námrazou s posouzením existujících preventivních opatření. Výsledky naznačují, že námraza je významným faktorem přispívajícím k leteckým nehodám, a navrhuje zlepšení technických a procedurálních opatření ke snížení tohoto rizika.

KLÍČOVÁ SLOVA

Námraza, protinámrazový, odmrazování, letecká nehoda

TITLE

Icing and its Impact on Aviation Accidents: Analysis of Past Disasters and Development of Preventive Measures

ANNOTATION

This bachelor's thesis examines the impact of icing on aviation safety. The work combines an analysis of past aviation accidents caused by icing with an assessment of existing preventive measures. The results suggest that icing is a significant contributing factor to aviation accidents and propose improvements in technical and procedural measures to mitigate this risk.

KEYWORDS

Icing, anti-icing, de-icing, aviation accident

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu Ing. Davidu Hůlkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při tvorbě bakalářské práce. Rovněž bych chtěla vyjádřit vděk RNDr. Jacku Kerumovi za spolupráci, cenné konzultace a podporu po celou dobu psaní práce.

OBSAH

Úvod	10
1. Teoretický rámec	11
1.1. Definice a charakteristika námrazy	11
1.2. Vznik námrazy	14
1.2.1. Meteorologické podmínky	14
1.2.2. Aerodynamické podmínky	17
1.2.3. Konstrukční podmínky	20
2. Analýza leteckých nehod	24
2.1. Let AF 447	24
2.2. Soukromý let letadla F-JCEC	29
2.3. Let SBI - 5219/5220	31
3. SYSTÉMY A METODY OCHRANY PROTI NÁMRAZE	38
3.1 Protinámrazové systémy na letadlech	38
3.2 Metody odmrazování na zemi	42
3.3 Ochrana proti námraze na zemi	43
4. Návrhy na vývoj	45
ZÁVĚR	48
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
SEZNAM OBRÁZKŮ	52
SEZNAM TABULEK	53

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	54
---	-----------

Úvod

Letecká bezpečnost je jedním z klíčových aspektů v oblasti civilního letectví a hraje důležitou roli při zajišťování spolehlivosti, efektivity a stability letecké dopravy.

Současné vzdušné prostředí je trvale sledováno výzkumníky v souvislosti s rostoucím objemem leteckého provozu a zvyšujícími se požadavky na bezpečnost letů. Při zajišťování bezpečnosti leteckých operací je jedním z priorit meteorologie a kontrola nad nebezpečnými meteorologickými jevy. Mezi tyto jevy patří námraza, jejíž vznik má vliv na aerodynamické vlastnosti a celkový letový výkon letadel. Nesprávný a nedbalý přístup k tomuto jevu může vést k vážným a tragickým následkům, jak lze pozorovat v historii letectví.

Cílem bakalářské práce je vyhodnocení stávajících systémů ochrany proti námrazy a návrh jejich zdokonalení. To bude dosaženo na základě prozkoumání vlivu námrazy na leteckou bezpečnost a identifikování hlavních aspektů rizika. První část práce bude zaměřena na analýzu struktury námrazy, její druhy a principy vzniku v závislosti na meteorologických, aerodynamických a konstrukčních podmínkách.

Druhá část práce se bude věnovat výzkumu případů leteckých nehod spojených s námrazou. Budou ukázány jejich příčiny a následky.

Třetí část bakalářské práce zahrnuje již existující technologie prevence a odstranění námrazy. Provedu průzkum bezpečnostních systémů, které by měly být implementovány k prevenci leteckých incidentů spojených s námrazou.

Dalším krokem bude vytvoření doporučení pro zlepšení bezpečnosti. Tak v poslední části budou popsány návrhy na zlepšení existujících systémů.

1. Teoretický rámec

1.1. Definice a charakteristika námrazy

Jádrem všech meteorologických jevů jsou základní meteorologické prvky, ke kterým patří teplota a vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, směr a rychlost větru, oblačnost a srážky. Součty a různé kombinace těchto jednotek ve výsledcích představují aktuální nebo předpokládaný stav atmosféry.

Z hlediska letectví je potřeba prvořadně zaměřit pozornost na nebezpečné meteorologické jevy. Při nedostatku znalostí a zkušeností mohou tyto podmínky vést jak k materiálním a finančním újmám, tak i k poškození zdraví, a dokonce k úmrtí. Uvnitř dané skupiny jevů se nachází například nárazový vítr, sněhová a písečná bouře, turbulence. Samozřejmě v tomto seznamu zahrnuta je i námraza.

Za námrazu se považují všechny meteorologické jevy, při kterých dochází k namrzání molekul H_2O na předmětech. Led se začíná šířit na všech obtékaných součástkách letadel a stejně se může objevit v pohonných jednotkách a jedinečných elementech stroje. [1]

Rozdělení námrazy

Podle procesu vzniku v přírodě rozlišují tři druhy námrazy, které se liší svými vlastnostmi, způsobem vzniku a určitou úrovní nebezpečí, kterou jsou schopny způsobit.

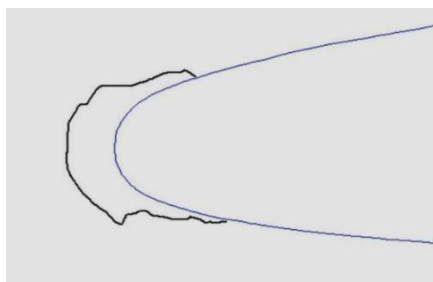
Podle posledního popisu nejjednodušší a tím i nejbezpečnější je jinovatka, nazývaná také krystalickou námrazou. Důvodem takového označení je její tvar v podobě malých ledových krystalků. Vzniká na strojích nebo jiných předmětech nepohybujících se během určitého času. Jinovatka zanikne okamžikem ohřevu povrchu na teplotu nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. [1]

Druhým typem námrazy je zrnitý led. Tento neprůhledný led s mléčnou nebo bílou barvou se objeví, když se malé podchlazené kapky srazí s nějakým pohybujícím se předmětem a začnou se lepit na něj a mezi sebou, vytvářejíce volné prostory ve vzduchu. [1]

Třetí druh námrazy je známý jako ledovka, a ten je nejškodlivější ze všech. Namrzání probíhá kvůli velkým podchlazeným vodním kapkám přímo na povrchu letadla. Na rozdíl od zrnitého

ledu se nezamrzají okamžitě, ale mají čas rozlévat se kolem profilu a vytvářet jednolitou vrstvu, která v závislosti na svých rozměrech je schopná úplně změnit aerodynamické vlastnosti letounu. [1]

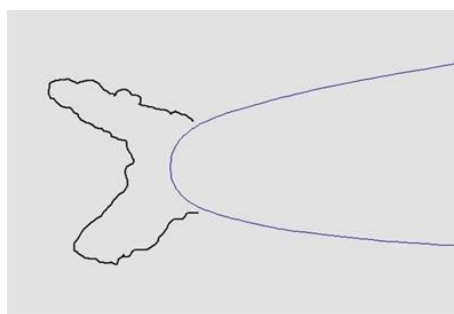
Kromě parametru vzniku rozdělují námrazy i v souvislosti s vytvořeným profilovým tvarem. V tomto porovnání na začátku bude hovořeno o profilové, jinak nazývané klínové námraze (obrázek 1). Jak lze pochopit z názvu, její specifikum spočívá v pokrytí profilu kormidel a náběžných hran křídel bez výrazných změn, ale s pravidelným narůstáním. [7] Její tvar je zobrazen na obrázku 1.



Obrázek 1 - Tvar profilové námrazy

Zdroj: [7]

Následující typ je žlábkový a, stejně jako profilový, tvarem odpovídá svému pojmenování. Příčina pro objevení takové formy se skrývá v pomalém zamrzání vodních kapek; tímto způsobem mají šanci uniknout z centrální polohy směrem k okrajům (obrázek 2). Většinou k tomu dochází kvůli kinetickému ohřevu, například při letu rychlostí vyššími než 500 km/h.



Obrázek 2 - Tvar žlábkové námrazy

Zdroj: [7]

Její nebezpečnost spočívá v schopnosti striktně změnit aerodynamické vlastnosti letadla a významně zvýšit odpor. Kromě toho je nekompaktní, odlupuje se nepravidelně a tím podstatně zhoršuje aerodynamické vlastnosti letadla. Odlétající kusy ledu mohou poškodit povrch letadla ve směru proudění. [6]

Nejhorší druh námrazy, který je možné potkat v rámci daného srovnání, je hrbolkovitý nebo hříbovitý. Jeho tvar je zobrazen na obrázku 3. V daném případě vznik je podmíněn silným proudem vzduchu, který odnáší vodní kapky na povrch letadla, kde dochází k jejich namrzání. [6]



Obrázek 3 - Tvar hrbolkovité námrazy

Zdroj: [6]

Podobně jako ostatní nebezpečné meteorologické jevy, námraza má různé intenzity, které jsou interpretovány jako množství usazenin za určený čas. Celkově námraza má čtyři stupně síly. První stupeň je charakterizován pokrytím menším než $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, a nazývá se slabou. Další úroveň je mírná a její intenzita se pohybuje od $0,6$ až do $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Třetí výše je silná s vydatností $1,1-2,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Poslední intenzita je velmi silná a překračuje $2,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. [6]

Tato data spolu s označením námrazy na mapách jsou uvedena v tabulce 1.

Tabulka 1 - Hodnocení intenzity námrazy

Název	Anglické názvy	Značka na mapách	Rychlost usazování ledu
Slabá	Light		Menší jak $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Mírná	Moderate		$0,6$ až $1,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Silná	Severe, vyjimečně strong		$1,1$ až $2,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Velmi silná			Více jak $2,0 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

1.2. Vznik námrazy

1.2.1. Meteorologické podmínky

Z hlediska meteorologie existují několik základních pravidel pro objevení námrazy, tak ve většině případů námraza vzniká v rozsahu teplot od 0 do -12 °C, ale kapky o větších průměrech jsou schopné udržovat svůj kapalný stav až do -42 °C. Důležitou podmínkou pro její vznik je vlhkost vzduchu, takže riziko objevení námrazy je mnohem vyšší při letu v oblastech se srážkami, mlhou, vedle bouřek nebo i oblaků. [1]

Deficit rosného bodu

V praxi mají údaje o vlhkosti vzduchu a například o obsahu vodních oblaků spíše teoretický význam. I když existují statistické průměrné hodnoty, je třeba věnovat pozornost charakteristikám vlhkosti, které dokáží přesně změřit nebo vypočítat a tím předpovědět výskyt námrazy v konkrétních meteorologických podmínkách. Právě pro tento účel je nutné pracovat s deficitem teploty rosného bodu. Dále budou rozebrány klíčové definice [3]:

- Absolutní vlhkost (α): Hmotnost vodní páry v jednotce objemu vlhkého vzduchu. Udává se v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

- Relativní vlhkost (RV): Charakteristika vlhkosti vzduchu měřená na meteorologických stanicích, která vyjadřuje stupeň nasycení vzduchu vodní párou. Je definována jako poměr skutečné hustoty vodní páry α a hustoty vodní páry A ve vzduchu nasyceném vodní párou při dané teplotě (1). Vyjadřuje se obvykle v %, tzn.:

$$RV = \alpha/A * 100 [\%]. \quad (1)$$

- Rosný bod: Teplota, na kterou by musel být vzduch ochlazen (za konstantního tlaku), aby byla relativní vlhkost 100 %.

- Teplota rosného bodu (t_d): Hodnota teploty, při níž se vlhký vzduch o dané hodnotě směšovacího poměru vodní páry stane nasyceným vzhledem k vodě následkem izobarického ochlazování.

- Deficit teploty rosného bodu (d): Rozdíl teploty vzduchu (t) a teploty rosného bodu (2).

$$d = t - t_d \text{ [}^\circ\text{C]}. \quad (2)$$

Po zajištění d je možné posoudit, jak výrazná je pravděpodobnost vzniku námrazy. Největší riziko nastává při nízkém d. Hodnoty od 0 °C do +6 °C obvykle signalizují potenciální riziko, a to se obyčejně nastává tehdy, když je RV přibližně v rozmezí 80-100 %.

Kromě uvedeného výše základu očekávají námrazu i za komplikovanějších podmínek. Například v situaci, kdy klesá hodnota d s výškou v blízkosti zadržujících vrstev inverze a izotermie. V takovém případě lze předpokládat výskyt mírné námrazy pod vrstvou. Pokud bude hodnota d nadále klesat, námraza se může prodloužit i v samotné vrstvě. Dalším důvodem pro výskyt námrazy může být rychlý pokles teploty s výškou při aktivním snižování hodnoty deficitu rosného bodu. [6]

Oblaky

Při hodnocení nebezpečí vzniku námrazy v oblačnosti je důležité obrátit pozornost k vodnatosti oblaků – δ , která představuje hmotnost zkondenzované vody v jednotkovém objemu vzduchu.

Tak skupina oblaků vysokého patra – Cirrus (Ci), Cirrocumulus (Cc) a Cirrostratus (Cs) - má nejnižší hodnotu vodnatosti ze všech ($\delta \leq 0,1 \text{ m}^3\text{g}^{-3}$). Tato skutečnost samostatně omezuje možnost vzniku námrazy, ale nejvíce ji vážou ledové krystalky, ze kterých se tyto oblaky skládají. V nejhorším případě v blízkosti Ci, Cc a Cs se může objevit pouze slabá intenzita námrazy. [1]

Ve Stratusu (St) a Stratocumulusu (Sc) pozorují častý výskyt námrazy se slabou až mírnou intenzitou, která se tvoří převážně v horní části oblačnosti, a to kvůli velké koncentraci vody v ovzduší. I když vodnatost těchto oblaků obvykle nepřesahuje $0,3 \text{ m}^3\text{g}^{-3}$, pravděpodobnost setkání s námrazou v obou typech oblaků převyšuje 70 %. Důvodem k tomu je skutečně složení vrstevnaté oblačnosti, konkrétně vodní kapky nebo smíšená struktura s výraznou převahou vodních kapek. [6]

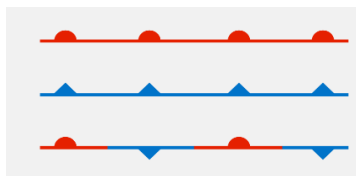
Dostatečně podobnou situaci lze očekávat i se skupinou oblaků středního patra – Altostratus (As) a Altocumulus (Ac). Při zcela malých hodnotách vodnatosti: $\delta \leq 0,3 \text{ m}^3/\text{g}^3$, jejich kapalná struktura vede k výskytu námrazy v více než 60 % případů, ale intenzita už nebude tak výrazná a dosáhne maximálně mírné úrovně v oblasti pod vrstevnatými oblaky za přítomnosti srážek. [6]

O něco horší podmínky se tvoří v oblačnosti velkého vertikálního a horizontálního rozsahu – Nimbostratus (Ns). Nebezpečí námrazy v Ns je vyvoláno nejen její vodnatostí pohybující se od 0,3 do $1 \text{ m}^3/\text{g}^3$, ale i smíšeným složením. Ve struktuře takového oblaku pozorují jak kapalnou vodu s velkým rozdílem teplot, tak i ledové částice. Typické pro Ns jsou i srážky. V důsledku toho se objevuje vážně nebezpečný oblak pro letectví, protože kombinuje mírnou až silnou námrazu, turbulence, a nakonec i bouře. [6]

Mohutný a hustý oblak velmi značného vertikálního rozsahu Cumulonimbus (Cb) a jedno z jeho rozvojových stadií Cumulus congestus (Cu cong) má vodnatost v rozmezí od 0,3 do $4 \text{ m}^3/\text{g}^3$. To znamená, že tyto druhy oblačnosti v porovnání s ostatními mají největší riziko vzniku velmi intenzivní a proměnlivé námrazy v celém nebo velkém množství oblaku. [1]

Fronty

Tvoření jednotlivých druhů oblaků je spojeno s vznikem a pohybem front. Atmosférická fronta označuje rozhraní v synoptickém měřítku mezi různými vzduchovými hmotami v troposféře. V dané zóně dochází i ke změně hlavních meteorologických prvků: tlaku, hustoty a teploty. Vrstva se rozprostírá rozlehlým prostorem horizontálně a může dosahovat několika desítek kilometrů, přičemž její vertikální délka se pohybuje od stovek metrů až do několika kilometrů. Podle parametrů vzniku a dalších vlastností lze fronty rozdělit do tří skupin: Teplá fronta, Studená fronta a Okluzní fronta. [3] Jejich meteorologická označení jsou znázorněna na obrázku 4.



Obrázek 4 – Symboly front na meteorologických mapách

Zdroj: [8]

Teplá fronta je předěl mezi teplým a studeným vzduchem, po jehož přechodu se oteplí, a tím dochází ke kondenzaci. Za přítomnosti teplé fronty lze očekávat trvalé srážky pásmem do 400 km. Zde se vyskytují jak poměrně bezpečné oblaky z hlediska námrazy: Ci, Cs a As, tak i Ns a bouřkový oblak Cb. V souladu s tím může intenzita námrazy měnit od mírné do silné. [8]

Studená fronta, vznikající v týlu cyklony, má dva druhy. První je anafronta. Do jejích vlastností patří pomalý a vlnitý pohyb, malá šířka ve srovnání s teplou frontou. Největší nebezpečí tohoto druhu fronty se skrývá v Cb a téměř neexistují možnosti pro včasné identifikace této oblačnosti.

Druhý typ studené fronty se nazývá katafronta. Na rozdíl od anafronty, katafronta má rychlý pohyb, doprovázený přeháňkami a bouřkami, zejména na čele fronty. [8]

Posledním druhem fronty je okluzní, která fakticky spojuje studenou a teplou frontu. V závislosti na převažující frontě ve spojení okluzní fronta přejímá její charakteristiky. [3]

1.2.2. Aerodynamické podmínky

Stejně jako meteorologie, i aerodynamika je významným faktorem pro výskyt námrazy. Lze říct, že věda, která studuje proudění vzduchu, podléhá kontrole a vlivu člověka mnohem více než počasí. To znamená, že správná práce s hodnotami a podmínkami v daném oboru může zmenšit, a dokonce i odvrátit riziko spojené s probíraným nebezpečným jevem.

Teplota

Úplně základní podmínkou pro vznik námrazy na letadle je teplota povrchu. Námraza se může vytvořit pouze tehdy, pokud je plocha chladnější než 0 °C. Jak bylo naznačeno dříve, slabou námrazu lze překonat i pomocí ohřevu nad nulovou teplotu. [6]

Rychlost letu

Rychlost je nesmírně důležitou veličinou pro letectví, a nesmí být podceňována ani při hovoření o námraze. Je třeba si uvědomit, že přechodovým bodem rychlosti pro vznik námrazy je 500 km/hod (270 kt). To znamená, že ve většině případů se námraza nevytváří při letech s vyššími rychlostmi. Určení hodnoty rychlosti je také užitečné pro kontrolu a úpravu výšky, aby

se předešlo vzniku nebezpečného jevu. Čím je rychlost letu větší, tím jsou nižší teploty, při kterých může námraza začít působit. [6]

Jednoznačně, rychlost má význam i pro určení intenzity námrazy při letu v oblaku, kterou lze vypočítat pomocí následujícího vzorce (3):

$$I = 10^{-2} \cdot \delta \cdot v \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}, \quad (3)$$

Kde I – intenzita námrazy, v – rychlost letu, δ – vodní obsah oblaku

Proberu tento princip na základě různých fází letu letadla Piper PA-28 Cherokee při letu v oblačnosti Stratus (obrázek 5).



Obrázek 5 – Průběh letu v oblačnosti Stratus

Zdroj: [autor]

Jak bylo naznačeno dříve, oblast oblačnosti St je spojena s vlhkostí v rozmezí od $0 \text{ m}^3 \cdot \text{g}^{-3}$ do $0.3 \text{ m}^3 \cdot \text{g}^{-3}$. Pro příklad vezmu největší možnou hodnotu. Podle letových charakteristik Piper PA-28 dá se stanovit všechny potřebné rychlosti. Tak rychlost vzletu bude rovnat 120 km/h (65 kt) (4). V takovém případě:

$$I = 10^{-2} \cdot 0.3 \cdot 120 = 0.36 \text{ [mm} \cdot \text{min}^{-1}\text{]}, \quad (4)$$

což naznačuje slabou námrazu. Cestovní rychlost daného letounu se přibližně rovná 210 km/h (213 kt), a očekává se mírná námraza s intenzitou dosahující $0.63 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Rychlost při

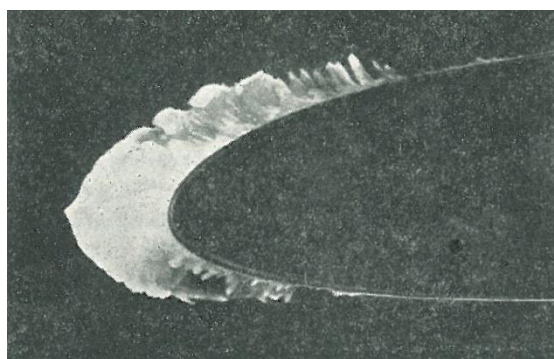
přistání je trochu vyšší než při vzletu a při hodnotě 150 km/h (81 kt) intenzita zůstane slabá ($I = 0.45 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

Velikost a zakřivení

Z hlediska konstrukce je třeba zvážit velikost a zakřivení ploch letadla. Zejména rozebírají křídla, ocasní plochy a listy vrtule.

Největší nebezpečí výskytu námrazy bude spočívat především na koncích uvedených ploch, s časem a zhoršujícími podmínkami nebo nedostatkem úvahy se led bude pochybovat směrem ke kořenové části. Další komplikace souvisejí se štíhlostí profilu. Například u superkritických křídel je možnost výskytu námrazy mnohem větší než u křídel obyčejného typu. [5]

Během povídání o aerodynamických příčinách výskytu námrazy je potřeba naznačit i výsledky, které ona může způsobit. Tak z pohledu křídel nebezpečí spočívá ve zvýšení součinitele odporu až do 35 %, zmenšení vztlaku, celkové změně těžiště a zhoršení ovladatelnosti. Na obrázku 6 je zobrazena usazená námraza na modelu křídla. Mezi problémy spojené s ocasní plochou jsou změna stability letadla a nesprávné údaje o úhlu náběhu, které budou ovlivněny zaledněním svislého stabilizátoru. Společnou hrozbou pro křídla a ocasní plochy slouží změna aerodynamického profilu letadla jako celku a zvětšení a nerovnoměrné rozložení hmotnosti konstrukce. [5]



Obrázek 6 - Usazená námraza na modelu křídla letadla

Zdroj: [5]

Ze strany vrtule jsou příčinou nebezpečí kousky ledu, které se při rychlém pohybu listů začínají odlamovat, a objevuje se riziko poškození například pístového motoru. Navíc námraza vede ke snížení účinnosti, která může dosahovat hodnoty až 19 %. [5]

1.2.3. Konstrukční podmínky

V některých případech mohou být základem pro vznik námrazy i konstrukční prvky a jejich vlastnosti. Obyčejně se led zde neobjevuje příliš často, ale každopádně nese nebezpečný charakter a může poškodit ovládání stroje.

Materiály

Při výběru materiálu pro letadlo konstruktéři dávají přednost lehkosti, odolnosti vůči korozi, pevnosti a ceně. Z těchto důvodů mají prioritu kompozity, titan a hliník. Poslední z nich se používá skoro všude, včetně křídel, ocasních plochách, potrubí, drátech a motorech. [18]

Spolu s tím má hliník nejmenší odolnost proti námraze. Nastává to z účasti konkrétní vlastností materiálu: vysoká tepelná vodivost (λ). Vysoká λ vede k rychlému ochlazení povrchu vrtule a jako následek se očekává skoro okamžitý vznik ledu. [18]

V porovnání s hliníkem mají titan a kompozity lepší odolnost vůči námraze právě kvůli opačným vlastnostem. Nevýhoda těchto materiálů spočívá v jejich ceně.

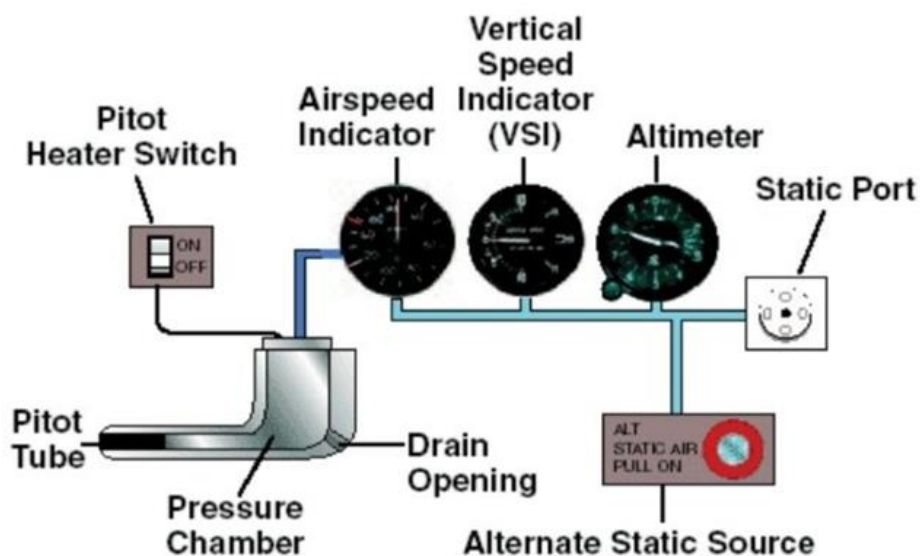
Dalším rizikovým materiálem je sklo, ale zde je nebezpečí zdůvodněno pouze kondenzací vody z okolí. Při nízkých teplotách voda zamrzá na materiálu a vytváří tak nebezpečný jev, který lze jednoduše odstranit ohřátím. [5]

Pitot-statická trubice

Pitot-statická trubice nebo Prandtlova trubice je měřicí zařízení, které umožňuje měření rychlosti průtoku pomocí výpočtu tlaku.

Oblast rizika zde souvisí s malým poloměrem vystouplého prvku na zařízení. Při výskytu námrazy na Pitot-statické trubici dochází k nesprávnému snímání tlaku a k nepravdivým

hodnotám u přístrojů, které jsou na něm závislé. Do této skupiny patří rychloměr, výškoměr a variometr. [11] Zjednodušený Pitot-statický systém je zobrazen na obrázku 7:



Obrázek 7 - Pitot-statický systém

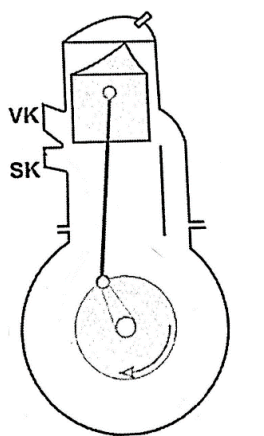
Zdroj: [11]

Není možné podceňovat tento fakt, protože uvedená zařízení jsou základem pro práci pilota a správné fungování autopilotního systému. Každá chyba v údajích může vést k fatálnímu výsledku, a proto není možné podceňovat tento fakt, protože uvedená zařízení jsou základem pro práci pilota a správné fungování autopilotního systému.

Motory

I když existuje riziko pro motory ze strany vrtulí, samotné pohonné jednotky mohou být místem vzniku námrazy. Celková úroveň nebezpečí závisí na typu motoru, ale existují i společné charakteristiky. Mezi ně patří tepelná výměna materiálu s okolním prostředím a zvláštnosti systémů nasávání vzduchu. Vzduchový vstup může být konstrukčně navržen tak, aby vytvářel podmínky pro kondenzaci vlhkosti a zamrznání při vysoké vlhkosti a nízkých teplotách. Další podmínky pro vznik námrazy se liší v závislosti na konkrétních typech motorů. U pístových pohonných jednotek – PPJ (obrázek 8) led se může objevit za přítomnosti zbytkových vlhkých stop, což znamená, že vodní kapky někdy zůstávají uvnitř motoru a při ochlazování může dojít

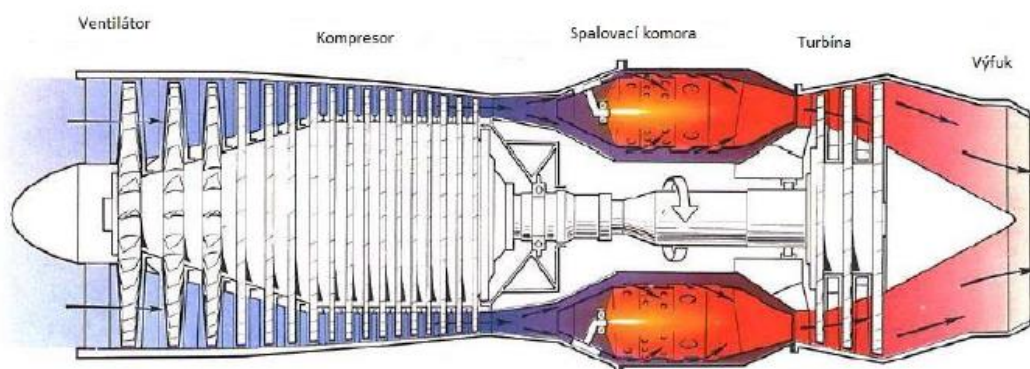
k nárůstu ledové vrstvy. Nejvíce ohroženými součástmi PPJ jsou sací ventily, karburátor nebo vstříkovací systém, námraza, ve kterém může způsobit porušení správného přísunu paliva do válců. Poté je riziko v chladících žebrech na válcích a v systému řízení oleje. [9]



Obrázek 8 - Nákres pístového motoru

Zdroj: [9]

Pro turbínové motory (obrázek 9) doplňující nebezpečí vzniká tepelnou výměnou ve chladících systémech, ale nastává to pouze při jejich neefektivitě nebo narušení. Větší problém souvisí s dodatečnými strukturami podporujícími konstrukci motoru, mezi nimiž vzniká prostor, který může být ovlivněn sníženou teplotou a vlhkostí. U turbínové pohonné jednotky může námraza zasáhnout sací ventil, kompresor, potrubí a spojení, včetně potrubí chladicího systému a statorů. [10]



Obrázek 9 - Popis částí turbínového motoru

Zdroj: [10]

Volné antény

Riziko výskytu námrazy v této oblasti závisí na rozměru, ale nebezpečný jev získává jiný význam. Led na anténách často způsobí nežádoucí vibrace letadla. K tomu dochází z důvodu, že námraza může ovlivňovat funkci anténních systémů tím, že mění jejich elektrické vlastnosti. To může způsobit změny v elektromagnetických polích kolem antén, což může ovlivnit dynamické chování letadla a také ztížit přenos a příjem signálů. [5]

2. Analýza leteckých nehod

Teď, na základě teorie, můžu přejít k analýze vlivu námrazy v praktické letecké činnosti. K tomu si proberu několik konkrétních leteckých nehod a rozeberu příčiny jejich vzniku z hlediska meteorologie a lidského faktoru.

2.1. Let AF 447

Základní informace

Letecká nehoda, o které budu povídat v této kapitole, je známá jako jedno z nejvýznamnějších událostí v historii civilního letectví. Tato katastrofa získala širokou pozornost po celém světě; v Paříži byl postaven památník obětem havárie a o ní bylo natočeno několik dokumentárních filmů.

Pro zahájení analýzy letecké nehody letu AF 447 je třeba se seznámit se základními údaji o letadle a členech posádky. Půjde o letadlo Airbus A330-203 s registrační značkou F-GZCP. Od dubna 2005 letadlo přešlo do provozu společnosti Air France, kde bylo letadlo celkově využíváno 18 870 letových hodin. Během této doby bylo provedeno 2644 letů.

V den před letem, kterým velel pilot, bylo oznámeno, že během předchozího letu se objevil problém s klíčem výběru VHF1 (Very High Frequency) na panelu řízení rádia RMP1 (Radio Management Panel). Přízemní inženýr vyměnil RMP1 a RMP3, aby umožnil odlet letadla v souladu s předpisy (odlet byl pokryt MEL). Poté tato položka MEL neměla žádné operační důsledky.

Nicméně existoval vážnější problém. Během roku bylo podáno 9 hlášení o ztrátě indikační rychlosti během letu. Toto bylo spojeno s poruchou systému ohřevu pitot-statické trubice, což vedlo k jejímu zanášení ledem a sněhem. Stojí za zmínku, že podobné problémy byly prakticky systematické ve společnosti Air Finance a vyskytovaly se na většině letadel. Bylo zjištěno, že došlo k chybě u výrobce a všechny trubky na všech letadlech měly být vyměněny. Nicméně výměna trubek zůstala pouze doporučením, protože nepředstavovala vážnou hrozbu. Bylo to řešeno vzhledem k tomu, že ztráty dat měly pouze krátkodobý charakter a všichni piloti absolvovali příslušný výcvik na simulátorech.

Ted' musím ještě jednou zdůraznit, proč není vhodné podceňovat Pitot-statickou trubici. Pro tento účel stručně proberu její princip fungování. Před tím, než pilot dostane údaje o výšce a rychlosti letu, probíhá několik důležitých etap. Na začátku trubice snímá informace o statickém (S) a celkovém (C) tlaku vzduchu pomocí malých děr, které se nacházejí na její čelní a spodní hraně. Pak nastává čas výpočtu, po kterém se zjišťuje hodnota dynamického (D) tlaku (5):

$$D = C - S \quad (5)$$

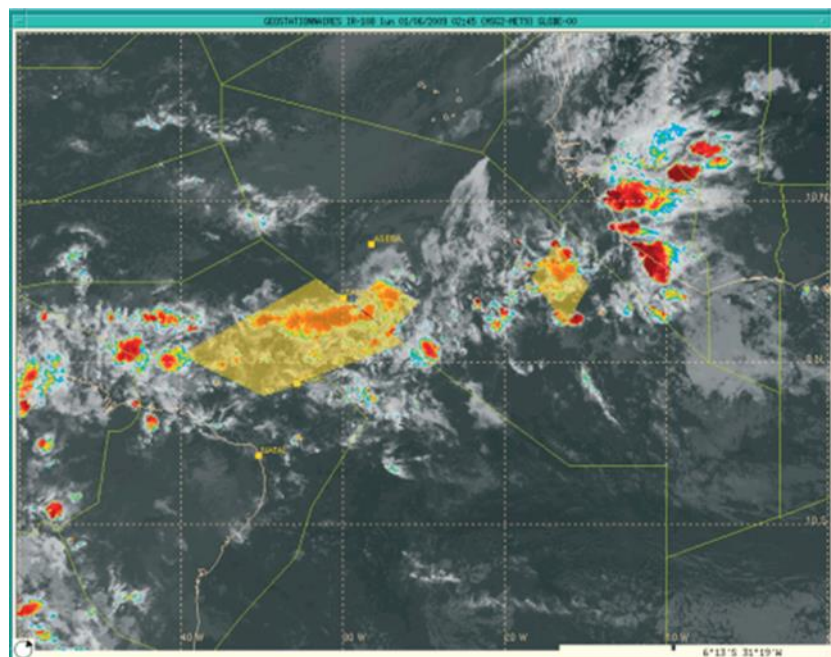
Posledním krokem je převod dynamického tlaku do potřebných jednotek. Selhání trubice vede k chybným údajům přístrojů na palubní desce a následky mohou být fatální.

Na palubě se nacházelo 228 lidí, z nichž 216 byli cestující. V souladu s pravidly mezikontinentálních letů posádka letu AF 447 se skládala z tří pilotů. Velícím pilotem byl Marc Dubois, a jeho celková doba v pilotní funkci byla 10 988 hodin, z toho 1 747 hodin ve funkci „Pilot-In-Command“. Jako druhý pilot působil Pierre-Cédric Bonin s 2 936 hodinami zkušeností. Posledním pilotem byl David Robert, plnicí náhradní roli. Jeho úkolem bylo nahradit jednoho z pilotů v případě potřeby odpočinkové přestávky. Jeho celková doba letu činila 6 547 hodin.

Meteorologické podmínky

Počasí během letu odpovídalo běžným meteorologickým podmínkám pro tuto oblast v červnu. Charakteristické mraky druhu Cumulonimbus byly přítomny s výraznou prostorovou nejednotností a s dobou života několik hodin. Avšak let byl plánován na letové hladině 350 (FL 350), což přináší omezení ve vnímání intenzity bouřkové aktivity. Infračervené snímky poskytovaly informace pouze o shluku mraků na konkrétním úseku o velikosti přibližně 400 kilometrů. Nebezpečí zde neohrožilo pouze v pravděpodobnosti vzniku bouřky, ale také v vysokém riziku setkání se silnou turbulencí. I když mapa CAT (Charts of Clear Air Turbulence) nepředpovídala žádnou turbulenci podél tratě.

Dále na obrázku 12 je přiložen graf TEMSI. Zde je pozorováno, že letová trať prochází dvěma oblačnými masami, což výrazně zvyšuje šanci na setkání s CB mezi hladinami XXX – FL450 (symbol XXX znamená, že je základna oblačnosti pod hladinou FL 100). Očekával se také ocásek o rychlosti přibližně 10 uzlů (18,5 km/h). Maximální teplota vzduchu na trati dosahovala -40 °C a nacházela se na úrovni FL 340.



Obrázek 10 - TEMSI graf překrývající se s infračerveným obrazem v 0 hodin 00 minut

Zdroj: [12]

Důležitým faktorem pro tento let byly také zprávy SIGMET, tato forma šíření meteorologických informací slouží k varování letadel před možnými a očekávanými meteorologickými hrozbami. První pro piloty zajímavá zpráva byla vydána 31. května v 16:33 a byla platná od 16:35 do 20:35. Informace byla zaměřena na oblast FIR DAKAR. Zde bylo oznámeno pozorování izolovaných bouří ve vrstvě s vrcholy na úrovni FL450, pohybujících se na západ rychlostí 10 uzlů.

Dvě následující zprávy byly vydány pro oblasti FIR RECIFE a FIR ATLANTICO na období od 18:00 do 22:00 (právě v tomto čase měl začít plánovaný let AF 447 na základě letového plánu). V těchto datech bylo předpovídáno vznik bouří s vrcholy na FL 350 a FL 370.

Následující zprávy SIGMET přilehlých oblastí předpovídaly a později informovaly o pozorování vzniku stacionárních bouří a zvedání jejich vrcholů až na úroveň FL 450.

Průběh letu

Jak bylo naznačeno dříve, v souladu s leteckým plánem musel F-GZCP odletět z „Galeão“ v Rio de Janeiro 31. května 2009 v 22:00. Největší část tratě probíhala nad Atlantským oceánem

a jako bod destinace bylo určeno letiště „Charles de Gaulle“ v Paříži, kam se mělo dorazit za 13 hodin.

Letadlo odletělo se zpožděním 19 minut a vydalo se na sever podél pobřeží. Posádka měla v plánu stoupat na výšku 11 300 metrů (37 000 stop) s cílem úspory paliva, ale kvůli vysoké teplotě venku se jim to nepodařilo. Během prvních dvou hodin se jim také nepodařilo navázat spojení ADS-C s DAKAR Oceanic.

O pár hodin po zahájení letu vstoupil F-GZCP do oblačnosti, kde se objevila slabá turbulence nedaleko od bodu SALPU. O něco později, ve 0:30, byla obdržena zpráva o vzniku konvekční zóny mezi body SALPU a TASIL, což naznačuje riziko vzniku oblaků Cumulonimbus, bouří a zvýšení intenzity turbulencí. V 1:52 turbulence ustala, hlavní pilot předal řízení náhradnímu pilotovi a odešel do kabiny odpočívat. Po jeho odchodu se turbulence objevila znovu a začala sílit, v té době piloti zaznamenali, že se blíží ke bouřkové oblačnosti, a rozhodli se změnit kurz o 12 stupňů doleva. Také byla snížena rychlost letadla a zapnut ohřev motorů. V té chvíli zamrzla pitot-statická trubice, kvůli čemuž počítače letadla ztratily informace o vzduchovém tlaku. V 2:05 byl vypnut autopilot a automatický regulátor tahu.

V letadlech Airbus existuje ochranný systém, který brání nebezpečným akcím pilotů, nepovoluje jim vytvářet velké náklony nebo příliš silné zdvihání nosu. Avšak v případě ztráty informací z Pitotovy trubice tento systém nemůže poskytnout potřebnou ochranu a vypíná se.

Kvůli silnému nárazu větru se letadlo začalo naklánět doprava, a ovládání převzal druhý pilot. V té době si piloti všimli chybných údajů na palubní desce, kde se objevila nesprávná informace o poklesu rychlosti z 275 uzlů na 60 uzlů, a také o prudkém snížení výšky. Byly podniknuty pokusy o nápravu situace, ale kvůli neplatným datům letadlo na výšce 37 000 stop pokračovalo ve stoupání.

Od 2:10 se piloti snažili zavolat velitele letadla, ve stejnou dobu se opět ozval zvukový signál, oznamující nový náklon letadla doprava. Při snahách dostat letadlo do správné polohy piloti dosáhli maximální povolené výšky a letadlo přešlo do levého náklonu, nadále stoupalo, přičemž docházelo k ztrátě rychlosti. Rychlost stoupání dosáhla 35 m/s, což je pro tuto úroveň nepřijatelné. Displeje začínaly ukazovat nárůst výšky. Piloti se snažili provést korekci a klesat, ale tato akce však trvala kriticky dlouho a letadlo nadále stoupalo výše.

Na této výšce v podmínkách řídkého vzduchu letadlo začalo kývat ze strany na stranu, řídicí pilot se snažil bojovat s tím pomocí řídicí páky, čím způsoboval stále intenzivnější kmitání. Zazněl zvukový signál "STALL", varující před nebezpečím vývrtky. Při dosažení výšky 38 000 stop začal F-GZCP padat do Atlantského oceánu. Vývrтка postupovala, avšak piloti nebyli schopni situaci již zvládnout, a letadlo pokračovalo v pádu. V té době se do kabiny vrátil velící pilot, ale ani on nerozuměl situaci, která nastala. Zorientovali se až ve výšce 4000 stop, ale již nebylo možné podniknout žádné kroky, a letadlo spadlo do oceánu a rozpadlo se po nárazu do vody. Všech 228 lidí zahynulo. Na obrázku 12 je uvedena výsledná trať letu.



Obrázek 11 - Průběh letu

Zdroj: [12]

Výsledky

Po této letecké nehodě došlo k několika změnám, které se týkaly jak letecké společnosti, tak celé letecké legislativy. K 11. červnu 2009 Air France vyměnila pitot-statické trubice na všech svých letadlech, která spadala do této doporučení. Později, v roce 2010, společnost na vlastní iniciativu provedla další výměnu za vylepšenou verzi od společnosti "Goodrich".

EASA zkrátila interval mezi technickými údržbami pitot-statických trubic, což vedlo k častějšímu čištění trubek. Organizace také navrhla nové certifikační standardy pro lety v oblačnosti. Externí sondy leteckých přístrojů, Pitotových trubic, musí být navrženy

a instalovány tak, aby normálně fungovaly v prostředí s námrazou, včetně podmínek ledového znečištění s fází smíšeného ledu. Organizace se účastní mezinárodních výzkumů zaměřených na boj s námrazou ve vysokých výškách.

2.2. Soukromý let letadla F-JCEC

Základní informace

Tato letecká nehoda se stala dne 29. října 2020, a už sám tento fakt má důležitý význam z pohledu výzkumu námrazy. I když existují systémy chránící před vznikem ledu, jsou přijímána speciální opatření a prováděno odpovídající školení, námraza stále zůstává nebezpečným jevem, který vede ke katastrofálním výsledkům.

V této části bude pojednáno o nehodě spojené s ultralehkým letadlem Shark s registrační značkou F-JCEC. Letoun byl vyroben na Slovensku v srpnu 2012 společností SHARK.AERO S.R.O. V okamžiku začátku letu nebyly na letadle zjištěny žádné poruchy a všechny systémy fungovaly správně.

Letounem řídil 53letý Francouz, který získal letecké licence ve třech zemích: ve Francii, Polsku a České republice. ULL pilotní průkaz byl jeho poslední a platil od 3. 5. 2018. Stojí za zmínku, že během své letecké praxe, která začala v roce 2012, způsobil dva incidenty. Následně byl přeřazen k ústní rekvalifikaci, kterou však neabsolvoval, a byl nucen dočasně pozastavit svou pilotní činnost.

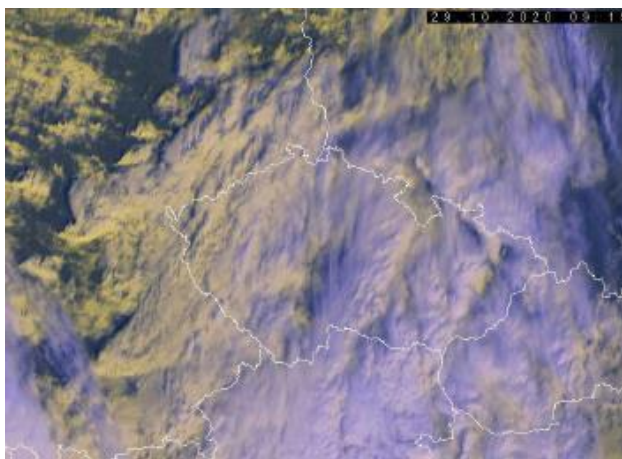
Meteorologické podmínky

V tomto období přecházela přes Českou republiku studená fronta, doprovázený bouřkovými oblaky Cumulonimbus. V den letu na sledovaném území byla dobrá viditelnost přesahující 10 kilometrů, zatímco bylo oblačno až zataženo. Na některých místech se objevovala mlha a dešťové srážky. Lze tvrdit, že všechny tyto jevy jsou charakteristické a očekávané při průchodu studenými frontami.

Přízemní vítr se pohyboval ve směru 200-260° rychlostí 6-14 uzlů (11-26 km/h), ale byly také hlášeny nárazy o rychlosti 24-30 kt (44,4-55,6 km/h). V oblasti plánovaného letu (FL 120) byl směr větru 250° a rychlost 32 uzlů (59 km/h). V této době také informovali o slabé turbulenci,

kteřá se postupně zesilovala na mírnou. Očekávalo se také vyskytování námrazy s nízkou až mírnou intenzitou ve výšce nad 1800 metrů. V letové hladině 120 teplota činila přibližně -12 °C.

V SYNOP zprávách pro okolní oblasti byla zmínka o dešřových srážkách a rozšřivování oblačnosti typu Stratocumulus (kteřá se tvořila ve výšce 600 - 700 m nad zemí) a Stratus. Tyto údaje potvrzuje i níže uvedený družicový snímek (obrázek 13), pořizený ve 9:15. S časem se oblačnost rozvinula do Altopumulusu a Altostratusu.



Obrázek 12 – Oblačnost nad územím ČR dne 29. 10. 2020 v 09:15 UTC

Zdroj: [13]

Průběh letu

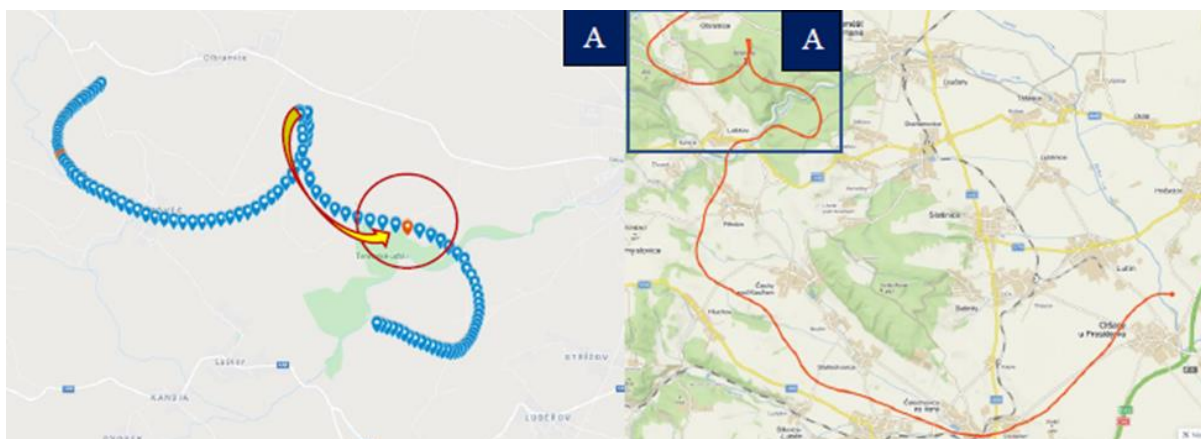
Let začal v souladu s letovým plánem na polském letišři Opole (EPKN) a měl skončit ve Francii na letišři „Ghisonaccia Alzitone“ (LFKG). Poblíž Ostravy v 9:00 pilot vystoupal na úroveň letové hladiny 120, kde pokračoval ve své cestě. Po 12 minutách hlásil problém s motorem a později i neplánovaný pokles rychlosti.

Vyšetřování později ukázalo, že v té době pilot vletěl do oblasti s námrazou, ve kteřé zamrzl karburátor. Stojí za zmínku, že během komunikace nepoužíval nouzovou frazeologii a jeho další zprávy byly většinou nečitelné.

Radiooperátorem byla nabídnuta letišře Bohuňovice a Šřichovice, kde by pilot mohl provést nouzové přistání. Přestože vzdálenost do naznačených letišř nebyla velká, pilot se rozhodl letět

do Olomouce a obdržel kurz pro další trať. Současně s tím se F-JCEC snižoval výšku s rychlostí 700-1000 ft/min. V korespondenci mezi operátory letišť byl letadlu přidělen stav nouze.

Po průletu západně obce Olšany u Prostějova, cca 4 NM před LKOL, pilot v 09:19:29 zahájil manévr nouzového přistání na pole. Přiblížení probíhalo příliš rychle a pod velkým úhlem, takže pilot přešel do pádu, což vedlo ke dvojitě srážce s terémem, daná část letu je znázorněna na obrázku 13. V důsledku druhého nárazu byla zcela zničena přední část letounu a pilot zahynul.



Obrázek 13 – Oblast strmého klesání (šipka označující bod s max rychlostí 270 kt GS)

Zdroj: [13]

2.3. Let SBI - 5219/5220

Základní informace

Poslední událost, která bude rozebírána v této kapitole, se stala relativně nedávno, v noci 2. prosince 2021. Naštěstí v tomto leteckém incidentu nedošlo k žádným obětem, ale riziko vzniku nehody spojené s námrazou zůstávalo pořád aktuální téměř od samotného vzletu. V noci z 1. na 2. prosince 2021 byl na letadle A-321-271 Neo společnosti Sibiř Airlines prováděn cestovní let SBI-5219/5220 na trati: Novosibirsk (Tolmačovo) - Magadan (Sokol) - Novosibirsk (Tolmačovo). Při provádění zpáteční části letu (Magadan – Novosibirsk) bylo na palubě 209 osob, z nichž 7 byli členy posádky.

Velícím pilotem letadla byl 56letý Michail Kulagin. V roce 2006 absolvoval školení pro piloty Airbusů v United Training Center v USA. Do okamžiku události nalétal na tomto typu

letadla 11 140 hodin, z toho 9 757 hodin jako kapitán. Druhým pilotem byl Oleg Balobanov ve stejném věku, který měl celkový nalétaný čas 6 398 hodin. Své školení absolvoval v letecké společnosti S7, kde i nadále pracoval.

Je třeba poznamenat, že oba piloti absolvovali samostatné školení v oblasti studia "Průvodce ochranou letadla proti námraze na zemi" a úspěšně složili zkoušky v listopadu 2021.

Letadlo s registračním číslem VQ-BGU bylo vyrobeno společností Airbus Industry v roce 2018. Od zahájení provozu na letadle bylo provedeno 3254 přistání. Při technické prohlídce letadla před odletem nebyly zjištěny žádné problémy.

Na rozdíl od ostatních prozkoumaných případů je v tomto incidentu třeba zmínit i personál pozemních služeb. Před odletem piloti rozhodli o provedení protinámrazové úpravy horních ploch stabilizátoru a křídla. Úprava byla rozdělena na dvě fáze:

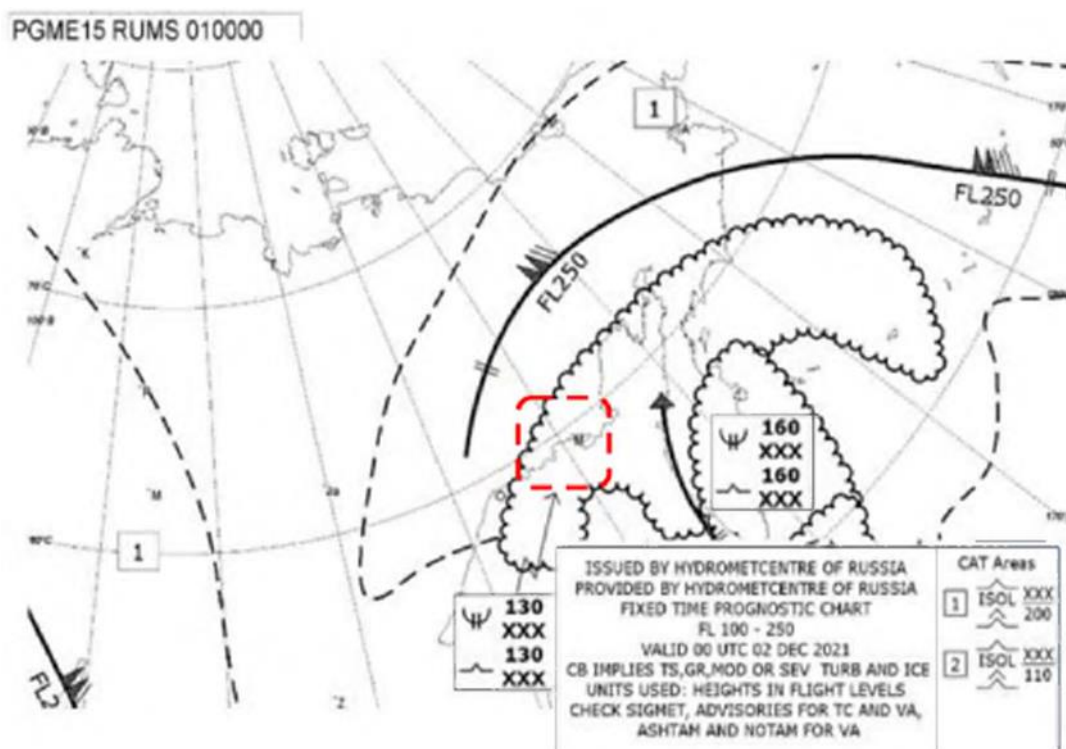
- První fáze – s použitím směsi protinámrazové kapaliny typu I a vody v poměru 25/75;
- Druhá fáze – s použitím 100 % protinámrazové kapaliny typu IV.

Meteorologické podmínky

Vzlet letu SBI-5219/5220 byl naplánován na 00:40 UTC v noci 2. prosince 2021, nicméně analýza meteorologické situace by měla začít o několik hodin dříve v 22:13 UTC. V té době letadlo provedlo přistání a později se přesunulo na stání venku na letišti v Magadanu. Teplota vzduchu v té době byla -11 °C, dohlednost na přistávací dráze se zhoršovala vlivem sněhu a nedosahovala ani 1300 m. Na letišti a v okolních stanicích byla pozorována souvislá oblačnost typu kumulonimbus. Od 23:41 UTC probíhala příprava a provedení protinámrazové úpravy letadla, kterou piloti požadovali okamžitě po přistání. Navzdory srážkám probíhala tato práce na otevřeném prostranství od 23:41 UTC, přičemž piloti požadovali provedení protinámrazové úpravy letadla okamžitě po přistání.

Během vzletové fáze letadla A-321 byly zaznamenány všechny podmínky pro výskyt námrazy a turbulence v oblačnosti Cumulonimbus, stejně jako různé intenzity stříhu větru v okolí letiště. Pro oblast mezi FL 100 a FL 250 na daném úseku tratě byla zveřejněna předpovědní meteorologická mapa PGME15 RUMS 010000² (obrázek 14). PGME je druh mapy,

který obsahuje grafické informace o nebezpečných meteorologických jevech pro území Dálného Východu. Tato mapa byla vydána vysílacím centrem sídlícím v Moskvě a platila od 21:00 UTC dne 1. prosince do 03:00 UTC dne 2. prosince 2021.



Obrázek 14 – Předpovědní meteorologická mapa PGME15 RUMS 010000²

Zdroj: [14]

Letiště (označené písmenem M) se nachází uvnitř oblasti, kde se očekávaly mírné turbulence a námraza. Tato informace byla také zahrnuta do místních zpráv ATIS.

Kromě údajů uvedených na mapě byla pro letiště také zveřejněna řada meteorologických varování, ve kterých byla oznámena mírná až silná turbulence, stříhy větru s nárazy až do 16 m/s (31 kt) a sněžení trvající déle než dvě hodiny. Později posádka potvrdila, že předpovídaná meteorologická situace plně odpovídala skutečnosti.

V rámci této analýzy je také nezbytné prozkoumat meteorologické podmínky, které byly potvrzeny na letišti v Irkutsku, kde pak došlo k přistání. V 05:00 UTC zde byl pozorován vítr ve směru 150° o rychlosti 2 m/s, dohlednost byla 10 kilometrů a teplota byla -1 °C. Byla pozorována rozptýlená oblačnost typu Kumulonimbus. Během přistání letadla na letišti

v Irkutsku nebyly hlášeny žádné meteorologické podmínky, které by mohly ztížit posádce letadla provádění přistání.

Průběh letu

V 00:33 UTC začalo letadlo pojíždět k přistávací dráze. V té době už byla dokončena protinámrazová úprava letounu, ale horní část povrchu zůstávala nevyčištěná. Na přiloženém obrázku 15 je zobrazen Airbus A321-271 Neo před zahájením pohybu. Je možné vidět hromadění sněhu na přední části trupu pod čelním sklem a okénkem druhého pilota.



Obrázek 15 – Stav letadla před začátkem poježdění

Zdroj: [14]

V takovém stavu letadlo začalo svou cestu. V 00:38 UTC dispečer předal pilotům aktuální informace o meteorologické situaci a udělil povolení k vzletu, který proběhl v 00:42 UTC. Předpokládá se, že sníh z horní části trupu se začal pohybovat v průběhu rozjezdu pro vzlet. V okamžiku, kdy se letadlo odlepilo od přistávací dráhy, nebyl na trupu žádný sníh. Pilotáž při vzletu byla prováděna z pravého pracovního místa.

Po 15 sekundách se VQ-BGU nacházel ve výšce 1930 ft a pohyboval se rychlostí 186 kt (344 km/h), tehdy byl zapnut autopilot č.2, následně i autothrottle (A/T). Po 60 sekundách se autopilot automaticky vypnul a o jednu sekundu později se ozvala signalizace „STALL“. Zvukový signál byl vyvolán kvůli blízkým hodnotám indikované rychlosti vzduchu (IAS) u levého pracovního místa a rychlosti přetažení. Signalizace trvala pouze jednu sekundu, ale následně bylo zaznamenáno varování „Vypnutí autopilota (samovolné nebo nucené)“ a krátkodobý signál „Master Warning“.

Všechny tyto poruchy byly způsobeny narůstajícím rozdílem mezi kalibrovanou rychlostí vzduchu (CAS) mezi pravým a levým pracovním místem pilotů. Stojí za to připomenout, že CAS je IAS, která byla upravena s ohledem na různé chyby, jako jsou chyby přístrojů a polohy. Do páté minuty letu byl rozdíl mezi ukazateli CAS dosáhl již 15 kt. Předpokládá se, že velící pilot letadla si všiml rozdílu dat a zapnul záložní stupnice výšky a rychlosti na levé části palubní desky. Tyto stupnice zůstaly zapnuté po dalších 28 minut. K této době byl také zapnut protinámrazový systém křídla, který nepřetržitě fungoval ještě 38 minut.

Po 68 sekundách od aktivace signalizace „STALL“ zazněl signál znovu kvůli krátkodobému zvýšení úhlu náběhu (α) na 10° . Tehdy si velící pilot převzal kontrolu nad letounem. V té době byla letová výška 7300 ft. Po 11 sekundách se vypnul autothrottle a letový povelový přístroj (Flight Director). Poté začal postupně stoupat pravý náklon a do jedné minuty dosáhl hodnoty 38° , PIC dokázal rychle stabilizovat náklon do úrovně 15° . Po dokončení tohoto manévru letoun procházel počátečním stádiem opuštění oblasti letiště. Tehdy se ozvala signalizace oznamující námrazu motorů a po dobu dalších tří minut pokračovala v informování o problému.

Ve výšce 8900 ft byl znovu zapnut A/T a přerušeno stoupání. Posádka se rozhodla provést obrát o 180° , odeslala nouzovou zprávu „MAYDAY“ a začala klesat rychlostí 550-600 ft/min. V deváté minutě letu se ukazatele indikované rychlosti snížily na úroveň aktivující signalizaci „STALL“, a velící pilot opět vypnul autothrottle. Od tohoto okamžiku probíhalo klesání s vertikální rychlostí 5900 ft/min. Během klesání byly podniknuty další 3 pokusy o zapnutí autopilota, ale nebyly úspěšné a tento systém zůstal vypnutý až do konce letu.

Ve výšce 4800 ft se letadlo dostalo na rychlost 370 kt, což vyvolalo signalizaci maximální rychlosti. PIC začal přenášet letadlo do polohy stoupání. Když A-321-271 Neo dosáhl požadované polohy při vertikální rychlosti 17300 ft/min, vzdálenost od země byla 3270 ft. Po 39 sekundách se letadlo již nacházelo ve výšce 12900 ft, rychlost se rovnala 170 kt, úhel náběhu činil 13° a opět zazněl signál „STALL“, doprovázený vibracemi letadla. Po aktivaci signalizace PIC krátkodobě odtáhl řídicí páku (knipl) „od sebe“ na doraz, což snížilo úhel náběhu na 9° a na několik sekund způsobilo zastavení signalizace STALL.

Po 4 sekundách byl A/T opět zapnut a ve výšce 13800 ft úhel náběhu překročil hranici 30° . To vedlo k vzniku levého náklonu s prudkým poklesem a rostoucí vertikální rychlostí. Autothrottle byl opět vypnut a kapitán letadla posunul knipl doprava na doraz a současně

sešlápnul levý pedál. Díky těmto akcím se zastavilo zvětšování levého náklonu, snížila se vertikální rychlost a úhel náběhu se stabilizoval na 20°, také se snížila vibrace letadla. Pedál a řídicí páka byly převedeny do neutrální polohy.

Následovalo zastavení zaznamenávání indikované rychlosti na obou indikátorech, což trvalo přibližně čtyři sekundy. Do 15. minuty letu byly kývavé pohyby téměř zcela zastaveny a amplituda náklonu nepřesáhla 10°, byl také stabilizován směr letu. Letadlo se zvedlo z 9300 ft na 12100 ft, rychlost vzrostla z 150 kt na 230 kt. Později knipl byl ovládán v neutrální zóně, úhel náběhu také začal klesat a zároveň se zastavila signalizace přetažení.

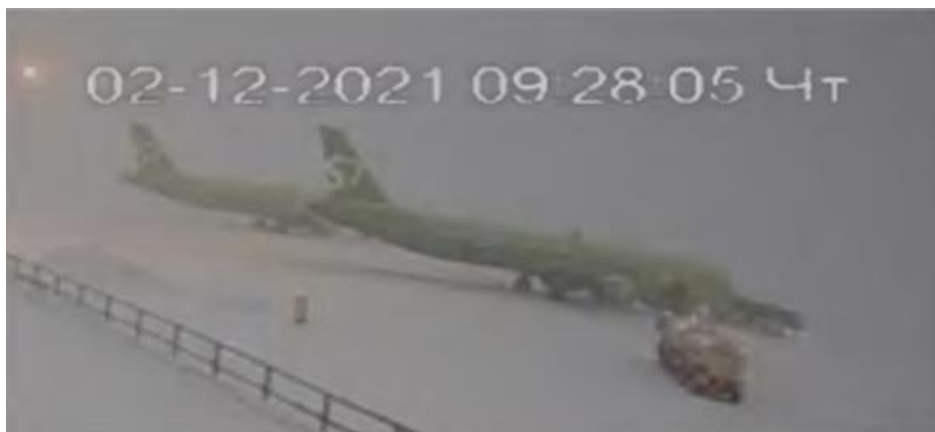
Půl hodiny po odletu se ovladatelnost letadla plně obnovila a zbytek cesty proběhl relativně klidně. V 02:35 UTC se posádka rozhodla směřovat na letiště v Irkutsku, kde VQ-BGU přistál v 05:15 UTC.

Po přistání proběhly kontrolní prohlídky letadla, během kterých byly nalezeny ledové nánosy na přední části trupu pod skly kabiny posádky, před přijímači statického tlaku, na ochranném krytu meteorologického radaru, a také na předních nevyhřívaných hranách křídla a ocasního kormidla.

Následná expertíza ukázala, že během procesu zpracování došlo k řadě chyb, které měly velmi nepříjemné následky. Za prvé, posádka a pozemní personál nedodrželi koncepci "čistého letadla" při organizaci a provádění protinámrazových úprav, kvůli čemuž nebyl odstraněn sníh v přední části trupu (obrázek 16). Za druhé, zpracování probíhalo během silného sněžení. Za třetí, výsledky analýzy vzorků protinámrazové kapaliny typu IV odhalily odchylku v ukazateli "dynamická viskozita při 20 °C" (1860 mPas při normě nejméně 2000 mPas). Tato odchylka může vést k horšímu udržení tekutiny na aerodynamických plochách letadla. Poslední chybou bylo šetření na protinámrazové kapalině typu IV: na zpracování křídla a stabilizátoru bylo spotřebováno 99 litrů, přestože doporučený objem pro tyto plochy je 230 litrů.

Kvůli nedodržení koncepce „čistého letadla“ zůstal sníh na povrchu přední části trupu až do okamžiku vzletu. Během stoupaní začaly sněhové nánosy tát a před přijímači statického tlaku vznikl překážkový led, což narušilo proudění vzduchu.

Stejně tak chyby při protinámrazové práci zhoršily aerodynamické vlastnosti letadla při vzletu a přispěly ke snížení úhlu náběhu do přetažení.



Obrázek 16 - Meteorologické podmínky během protinámrazového ošetření letadla

Zdroj: [14]

Výsledky

Po tomto vážném leteckém incidentu byla vypracována řada doporučení. Vedení letiště Magadan bylo navrženo, aby poslalo své zaměstnance na přeškolení v oblasti protinámrazových úprav letadel. Současně by měli posílit kontrolu nad protinámrazovými kapalinami, jejich kvalitou a lhůtami skladování.

Letecké společnosti "Sibiř" bylo nařízeno zvážit potřebu a možnost provádění změn ve školicím simulátoru pilotů.

Ještě v roce 2015 byly do Leteckého kodexu Ruské federace zahrnuty požadavky na vytvoření federálních leteckých pravidel pro pozemní obsluhu letadel, nicméně do doby letu VQ-BGU nebyly vydány. Proto bylo ruskému ministerstvu doporučeno urychlit vydání těchto požadavků, aby se zabránilo podobným chybám v budoucnosti. Toto doporučení bylo splněno v březnu 2022.

3. SYSTÉMY A METODY OCHRANY PROTI NÁMRAZE

Jelikož námraza představuje vážné nebezpečí pro letectví, byla vyvinuta řada systémů, které pomáhají bojovat proti ní. V této kapitole budou rozebírány metody prevence námrazy a způsoby odmrazování.

3.1 Protinámrazové systémy na letadlech

Nejlepší způsob boje proti námraze spočívá v prevenci vzniku, z tohoto důvodu je doporučeno při nepříznivých meteorologických podmínkách nebo při dlouhé přestávce v provozu udržovat letadla v hangárech. I když se jedná o nejefektivnější způsob, není vždy možné ho realizovat, protože mnoho letišť nemá dostatek prostoru pro všechna letadla. Bohužel, i když jsou k dispozici místa, tato možnost s sebou nese časové a finanční náklady, které letecké společnosti a majitelé často nejsou ochotni pokrýt. V malé letecké dopravě je situace usnadněna pomocí plachet, kterými lze letadlo zakrýt. Avšak i tento postup vyžaduje určitou ztrátu času a úsilí.

V případech, kdy není možné dodržovat základní úroveň prevence, přichází na pomoc protinámrazový systém (anti-ice), který slouží k následnému zabránění vzniku námrazy. Do tohoto systému patří:

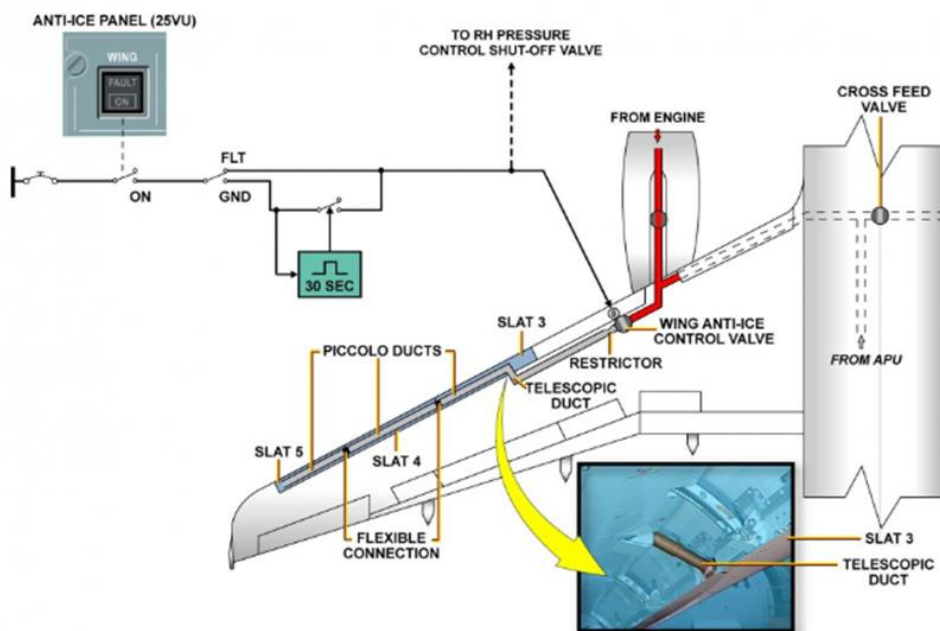
- Varovný návěsný systém (anti-icing advisory system);
- Ochrana motoru, která je zaměřena na ochranu náběžné hrany vstupního ústrojí;
- Ochrana křídla – zde jsou objekty zájmu náběžná hrana, štěrbinové sloty a klapky;
- Protinámrazové systémy pro vrtule, převážně pro náběžné hrany;
- Vytápění oken;
- Vytápění měřících trubic;
- Boční panely pro údržbu.

V současné době existuje několik protinámrazových metod, které mohou být použity samostatně nebo kombinovány v závislosti na situaci, typu letadla nebo části trupu, kterou je třeba zachránit.

Horkovzdušný systém

Horkovzdušný systém se považuje za nejčastěji používaný pro střední a velká letadla. Jak je z názvu zřejmé, princip tohoto postupu spočívá v průtoku horkého vzduchu, který odpařuje veškerou nežádoucí vlhkost při styku. Vzduch je přiváděn teplovzdušným potrubím k vyhříváním místům, kterými mohou být náběžné hrany, kormidla a vstupní hrdla motorů. V závislosti na typu motoru se může zdroj horkého vzduchu lišit. U proudových motorů je vzduch odebírán z kompresoru. [2]

Na obrázku 17 je možné vidět protinámrazový systém náběžné hrany levého křídla letadla Airbus A320. Po ohřátí vzduch přes ventily a vedené trubky proudí do tří krajních sekcí slotů (SLAT 3, 4 a 5), sloty 1 a 2 u tohoto letadla nepotřebují protinámrazovou ochranu kvůli aerodynamickým vlastnostem. [15] U pístových motorů je vzduch ohříván v tepelných výměnících od části výfukových plynů.



Obrázek 17- Systém protinámrazové ochrany křídla Airbus

Zdroj: [15]

Obecným problémem tohoto systému je přechodné snížení tahové síly letadla. Zjednodušeně řečeno, při použití horkovzdušného systému je část vzduchu přeměřována k ohřevu povrchů a tah se nepatrně snižuje.

TKS systém

Druhým názvem této metody je Weeping Wing (Plačící křídlo). Používá se k zábraně námrazy na téměř celém letadle, ale princip její fungování se trochu liší v závislosti na části letadla, která má být ošetřena.

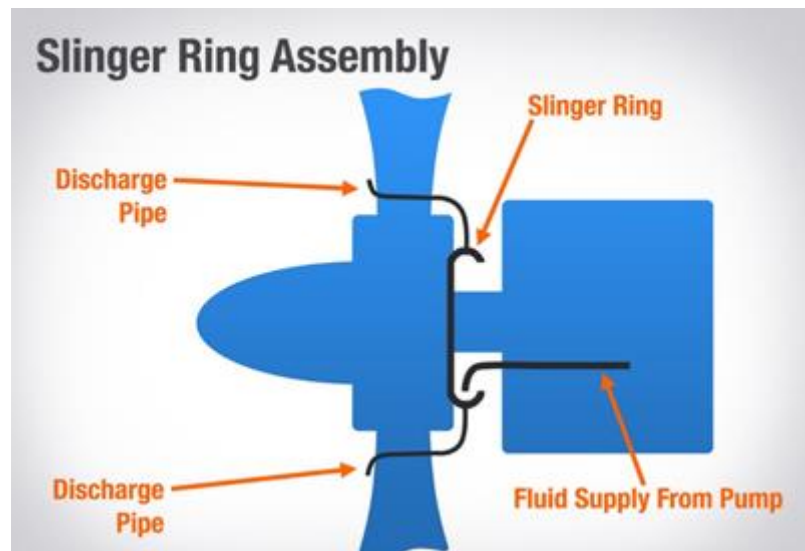
Nejprve jsou nádrže pro kapaliny naplněny protinámrazovou kapalinou TKS a pomocí čerpadel je chemikálie směřována buď k náběžným hranám (pro křídla, horizontální a vertikální stabilizátory), nebo k vývodným trubkám (pro vrtuli a čelní sklo). V prvním případě jsou na povrchu předem připravené otvory (vypálené laserem), odkud kapalina kape s kontrolovanou rychlostí (obrázek 18). Proud vzduchu, který prochází kolem letadla, přenáší kapalinu od předních hran a dále ji rozkládá po celé ploše, vytvářející ochranný film, který brání tvorbě námrazy. [16]



Obrázek 18 - Vylučování kapaliny TKS z křídla

Zdroj: [16]

V druhém případě kapalina vystupuje přes přední okraj vrtule (obrázek 19) a pokrývá vrtuli nebo pod sklem kabiny pilotů.



Obrázek 19 - Schéma fungování systému TKS vrtule

Zdroj: [16]

Použití tohoto systému se doporučuje při letu v podmínkách s předpokládanou námrazou. Je důležité poznamenat, že hlavní nevýhodou tohoto postupu je časový limit, protože nádrže pro kapalinu mají omezený objem a nelze je během letu doplňovat. [16]

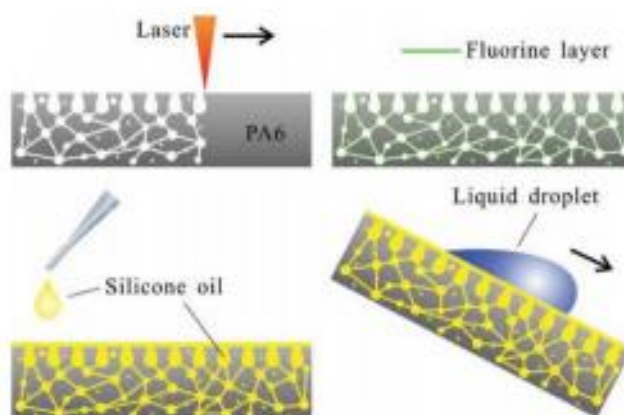
Elektrický systém

Pro povrchy s relativně malou plochou se obvykle používá elektrický protinámrazový systém. Tento systém je založen na topných cívkách zabudovaných do konstrukce letadla, které generují teplo pomocí řízeného elektrického proudu. Teplota ohřevu často nepřesahuje 90 °C, protože překročení této hranice by mohlo vést k deformaci přilehlého materiálu. Pro tento způsob ohřevu je zapotřebí poměrně hodně energie, proto je převážně využíván pro pitot-statickou trubicí, čelní sklo a aerometrické sondy. Nicméně v malé letecké dopravě může být elektrický systém použit i k ochraně náběžné hrany křídla, ale takové případy jsou vzácné. [4]

Slippery liquid-infused porous surface

Tato technologie je jednou z nejnovějších mezi protinámrazovými systémy. Jejím základem je pokrytí povrchů letadla speciální tekutinou, vytvářející silnou tenkou vrstvu, která brání přilnutí vody k povrchu. Tento efekt snižuje riziko tvorby ledu a snižuje potřebu tradičních metod proti námraze, což může přispět k zlepšení aerodynamiky letadla a snížení spotřeby paliva. [17]

SLIPS může být aplikována na různé části letadla, včetně křídel, ocasu, vrtule, a dokonce i na skla kabiny. Tato technologie byla vyvinuta jako součást snahy o zlepšení bezpečnosti a efektivity letecké dopravy v nepříznivých povětrnostních podmínkách. Při správné aplikaci a péči může SLIPS povlak zůstat účinný po dlouhou dobu, až několika let. [17] Na obrázku 20 je ilustrován zjednodušený schéma SLIPS připravený femtosekundovým laserem.



Obrázek 20 - Zjednodušený schéma SLIPS připravený femtosekundovým laserem

Zdroj: [17]

3.2 Metody odmrazování na zemi

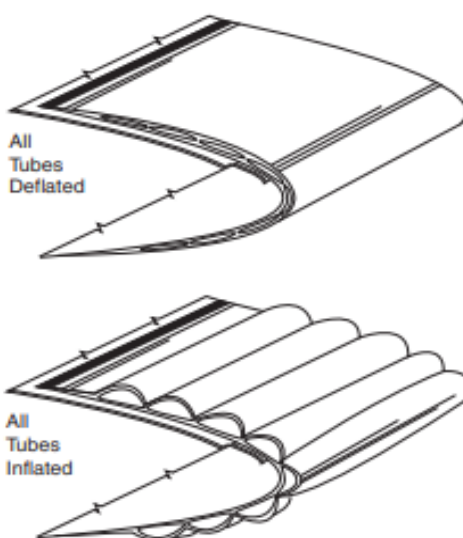
Odmrazování (de-icing) je proces odstranění již existujícího ledu z povrchu letadla. Metody se liší v zásadě podle místa, kde jsou prováděny. Některé z nich jsou aplikovatelné pouze na zemi, zatímco ostatní se provádějí během letu.

Horká voda

Podstatou metody je rozprašování horké vody na oblast pokrytou ledem. Teplota vody se může pohybovat od 60 °C do 90 °C. Tento způsob se obvykle používá při teplotách do -7°C. Je také důležité, aby do tří minut po použití této metody byla provedena ochrana proti námraze. V opačném případě by se voda mohla zamrznout a vytvořit novou vrstvu ledu. Z tohoto důvodu se tato metoda nepoužívá pro velká letadla. [6]

Pneumatický (mechanický) systém

Tento protinámrazový systém je snadno rozpoznatelný podle černé gumové obálky na povrchu náběžných hran. Díky přiváděnému vzduchu se gumový obal rozšiřuje a začíná tlakovat led zevnitř, což s časem způsobuje jeho praskání a odštěpování (obrázek 21). Gumové pokrytí v tomto systému není rovnoměrné, ale ve formě paralelních pásů, kvůli tomuto konstrukčnímu řešení tento systém nemůže být používán na pravidelné bázi, protože led může akumulovat v prohlubních mezi nafukovanými částmi. V takovém případě by mohl systém selhat nebo by mohlo být gumové krytí poškozeno. [4]



Obrázek 21 - Schéma pneumatického systému odmrazování

Zdroj: [4]

3.3 Ochrana proti námraze na zemi

Kapaliny

Celkem existují čtyři druhy odmrazovacích kapalin, liší se svým chemickým složením a vlastnostmi. Ošetření těmito kapalinami provádí pomocí speciálních vozidel vybavených nádržemi s oddělenými sektory pro protinámrazové a odmrazovací kapaliny.

Ochrana pomocí kapalin se rozděluje na dva druhy. Jednokrokový proces je založen na použití jedné kapaliny, která odstraňuje sníh a led, ale zároveň aplikuje ochranu proti další

tvorbě námrazy. K výhodám tohoto způsobu patří úspora času a zatížení personálu. Druhý způsob je dvoukrokový, pro něj se používají dva druhy kapalin: první odstraňuje led, a druhý chrání povrch před možným vznikem námrazy. Při použití této metody je důležité, aby před nanesením protinámrazové kapaliny bylo letadlo absolutně čisté, protože hromadění sněhu nebo ledu může snížit nebo zcela zničit účinnost ošetření. Tento způsob je vhodnější pro extrémní podmínky, kde je potřebná intenzivnější péče. [6]

Bez ohledu na druh kapaliny je důležité zabránit jejich pronikání do motorů a minimalizovat jejich dostupnost do podvozku a kolových šachet. To způsobuje riziko vzniku požáru, možnost poškození motoru kvůli možným usazeninám na turbínách, kompresorech a lopatkách, stejně jako snížením kvality mazání.

Kapalina I je určena k odmrazování. Obsahuje až 85 % glykolu, zbývající část tvoří voda a různé přísady. Tato směs má velmi nízkou viskozitu a je vhodná pro mechanické odmrazování. Po aplikaci kapaliny začne stékat z povrchu letadla spolu s nečistotami, které na něm byly před ošetřením. Hlavní nevýhodou této kapaliny je její krátkodobý účinek, který trvá od 5 do 15 minut, po kterých může začít vznikat nová vrstva námrazy. [6]

Kapaliny typu II mají protinámrazové vlastnosti a často se používají ve spojení s kapalinou I. Obvykle obsahují nejméně 50 % glykolu a korozivzdorné příměsi, což z nich činí viskóznější a schopnější kapalinu, která zůstává na povrchu letadla po dobu 20-45 minut po aplikaci (v závislosti na meteorologické podmínky). [19] Během svého účinku kapalina absorbuje a rozpouští námrazu, sníh nebo zamrzající usazeniny. Začne stékat z letadla při rychlosti pohybu nad 100 kt. [6]

Kapalina III je relativně nová a má vlastnosti mezi kapalinami typu I a typu II. Její účinnost nepřesahuje 25 minut a viskozita jí umožňuje zůstat na povrchu při rychlosti do 60 uzlů. [19] Ve většině případů se používá pro menší letadla. Například by to bylo skvělé řešení pro turbo propulzní letadlo s nízkou rychlostí odlupování při vzletu "Cessna Caravan".

Lze říct, že kapalina IV je vylepšenou verzí kapaliny II, jejich složení je dostatečně podobné, kvůli vysoké koncentraci zahušťovacích přísad zůstává tato směs aktivní až do 80 minut. [19]

4. Návrhy na vývoj

Na základě prozkoumaných leteckých nehod lze usoudit, že lidský faktor hraje klíčovou roli při setkání s námrazou. Často dochází k nehodám kvůli nedostatečnému dodržování letových procedur a bezpečnostních standardů nebo kvůli touze o ekonomické úspory, které mohou mít fatální následky pro velké množství lidí. Proto dále představuji několik návrhů na vylepšení ochrany proti námraze, díky nimž by se mohl zvýšit bezpečnostní standard v letectví.

Na začátku je třeba zdůraznit, že led představuje obrovské riziko pro soukromé letectví. Letadla, která létají rychlostí do 500 km/h (270 kt), jsou zvláště náchylná k vystavení mírné až silné intenzitě námrazy. V rámci teoretického výcviku pro PPL(A) studenti zkoumají nebezpečné meteorologické jevy a způsoby, jak s nimi bojovat. Tato teoretická příprava je zásadní pro porozumění potenciálním nebezpečím a pro správné reakce v případě jejich výskytu. Nicméně, jak ukázala výše popsaná nehoda s ultralehkým letadlem, není vždy snadné využít výlučně teoretické znalosti ve výjimečném stavu. To může být způsobeno stresem, nedostatkem zkušeností přípravy nebo pozornosti. Tato situace dává důvod k zamyšlení nad tím, jak dobře povědomí mají piloti o metodách řešení problémů spojených s námrazou.

První návrh bude zaměřen na částečnou úpravu výcviku soukromých pilotů s cílem zlepšit jejich schopnosti a reakce v situacích spojených s námrazou. V leteckých školách by měly být prováděny praktické lekce zaměřené na rozpoznání a boj s námrazou. Tyto lekce by měly zahrnovat nejen teoretické informace o vzniku a šíření námrazy, ale také praktické ukázky postupů pro odstranění námrazy z letadla a prevenci jejího vzniku.

Samozřejmě bude problematické vystavovat celé letadlo námraze pro každého studenta. To souvisí s řadou faktorů, včetně technických obtíží a měnících se povětrnostních podmínek. Proto je třeba vytvořit výukové video, ve kterém bude podrobně ukázán celý proces odmrazování letadla. Tento video návod může ukazovat přípravu vybavení a materiálů, předvést, jaké nástroje a látky se používají k odmrazování, proces nanášení odmrazovacích kapalin na různé části letadla, a demonstrovat kontrolu výsledků odmrazování, vysvětlit, jak se ujistit, že letadlo je zcela očištěno od ledu a připraveno k letu.

Aby studenti mohli získat praktické dovednosti, lze použít jednotlivé části letadla, které lze snadněji zmrazit a zpracovat v podmínkách výukového centra. Například pro tyto účely budou

vhodné listy vrtule a klapky: tyto části jsou relativně kompaktní a lze je snadno zmrazit v průmyslových mrazničkách. Budoucí piloti si budou moci pod dohledem mechaniků procvičit dovednosti při zpracování částí strojů a nanášení odmrazovacích kapalin na skutečné díly.

Jako další možnost pro získávání zručnosti v protinámrazových úpravách by studenti mohli provádět ukázkovou údržbu přímo na povrchu letadel. Například setření hadrem náběžné hrany křídla letadlu nijak neuškodí, a zároveň lze vysvětlit, že v případě přítomnosti sněhu by se ho tímto způsobem dalo odstranit. Instruktoři mohou také ukázat aplikaci rozmrazovací kapaliny, přičemž by mohli použít čistou vodu jako demonstraci.

Je důležité, aby studenti byli seznámeni s různými metodami de-icingu a anti-icingu konkrétních typů letadel a měli možnost je prakticky vyzkoušet za asistence zkušených techniků údržby. Kromě toho je důležité, aby studenti měli možnost praktické výuky na leteckých simulátorech. Daný výcvik umožňují probírat různé letové situace včetně těch nepříznivých spojených s námrazou. Budoucí piloti by měli být pod vedením instruktorů vystaveni různým scénářům a měli by možnost procvičit své dovednosti a reakce v těchto podmínkách.

Jako další možnost pro zlepšení ochrany proti námraze, já bych chtěla nabídnout rozvod dynamické a lokální regulace teploty ohřevu povrchů při elektrickém odmrazování. Jelikož hlavní nevýhodou tohoto systému jsou energetické náklady, získání aktuálních informací o rozsahu námrazy během letu a kalibrace teplot by mohlo snížit tyto ztráty. Tento postup by také byl vhodný při použití teplovzdušného systému, čímž by se minimalizovaly ztráty tahové síly. Přítomnost ledu by mohla být detekována pomocí existujících indikátorů námrazy. Tím pádem odpadá potřeba dodávat maximální teplo na celý povrch letadla. Tímto způsobem vliv systému bude zaměřen pouze na oblasti, které byly vystaveny námraze. Pro zbývající část může být použita preventivní teplota, která odvrátí vznik ledu. Tento přístup by umožnil efektivnější využití zdrojů energie a minimalizoval by ztráty, což by přispělo ke zvýšení účinnosti a bezpečnosti letadla při letu za nepříznivých meteorologických podmínek.

Následující návrh směřuje k vylepšení protinámrazové metody Slippery liquid-infused porous surface (SLIPS). Tento inovační způsob ochrany letadel má mnoho výhod, které začínají ekologickým hlediskem a končí jeho vysokou úrovní odolnosti vůči námraze a dalším nežádoucím povětrnostním jevům.

Hlavní nevýhodou související s touto technologií je způsob kontroly stavu povrchu. Vzhledem k tomu, že SLIPS je považován za relativně novou technologii, není přesně stanoven interval mezi údržbami. Proto je nezbytné zavést mechanismus pro pravidelnou kontrolu jeho fungování.

Optimálním řešením by bylo začlenění kontroly stavu SLIPS do standardních předletových prohlídek letadla. To by mohlo být dosaženo přidáním fluorescenčního barviva do složení SLIPS, což by umožnilo snadnou vizuální kontrolu jeho stavu. Během předletové prohlídky by technici mohli použít speciální UV světlo k identifikaci případných poškození povrchu SLIPS. Společně s tím by bylo vhodné zařadit kontrolu systému SLIPS do pravidelné údržby, například jako součást B-checku. Tímto způsobem bude kontrola prováděna kvalitně a všechny možné problémy budou odhaleny včas.

Tento přístup by zabezpečil, že SLIPS bude udržován v optimálním stavu a bezvadně plnit svou funkci ochrany letadla před námrazou. Tím by se zvýšila bezpečnost letů a snížily náklady spojené s údržbou letadel.

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo popsat stávající metody ochrany proti námraze na základě leteckých incidentů a navrhnout zlepšení těchto systémů. Pomocí teoretických informací bylo potvrzeno, že led stále představuje vážné nebezpečí pro letectví. Problémy spojené s ním jsou nejen hrozbou pro letadla, ale také pro lidské životy.

Analýza leteckých nehod ukázala, že nebezpečí způsobené námrazou zůstává aktuální i v současné době. Navzdory široké škále metod boje proti ledu letadla stále zažívají katastrofy a lidé zahynou. Hlavní příčinou těchto událostí zůstává nedbalost a nezodpovědný přístup leteckého personálu k tomuto nebezpečnému meteorologickému jevu. Přestože existuje profesionální výcvik, veřejně dostupná literatura a platné předpisy, nebezpečí vzniku ledu zůstává podceňováno. Místo aby se zabránilo vzniku námrazy, piloti, letecké společnosti a letiště se stále potýkají s jejími následky. Nicméně v této oblasti často není místo pro chyby, úspory nebo lhostejnosti.

V této práci byly také představeny systémy boje proti námraze, mezi nimiž byly popsány jak staré metody, tak nové vývoje. Naštěstí se v této oblasti neustále pokračuje a vytvářejí se nové přístupy, které postupně posouvají leteckou bezpečnost na novou úroveň. Na základě těchto technologií jsem představila několik návrhů, které by mohly být užitečné pro další rozvoj spolehlivosti tohoto oboru.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DVOŘÁK, Petr, 2017. Letecká meteorologie 2017. Cheb: Svět křídel. ISBN 978-80-7573-014-5.
- [2] Učebnice pilota: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost, 2003. Cheb: Svět křídel. ISBN 80-85280-89-2.
- [3] ČMeS - Elektronický meteorologický slovník, [Online], [Citace: 30.04.2024]
<http://slovník.cmes.cz/>
- [4] James J. Ballough; Pilot Guide: Flight In Icing Conditions [Online], [Citace: 1.05.2024]
https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_91-74A.pdf
- [5] KERUM J; Flying Revue Speciál B – Meteorologie, 2020.
- [6] Vašíček. J. Námraza. Praha. Český hydrometeorologický ústav, 2007.
<https://docplayer.cz/6355285-Publikace-slouzi-ke-skoleni-jak-letajicich-tak-meteorologu-na-olm-namraza.html>
- [7] Sahrai, D; Nebezpečné meteorologické jevy: Námraza I [Online], [Citace: 30.04.2024]
<https://www.airguru.cz/clanky/namraza-i>
- [8] Králová, M; Atmosférické fronty [Online], [Citace: 30.04.2024]
<https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/meteorologie/atmosfericke-fronty>
- [9] Učebnice pilota 2019: pro žáky a piloty všech druhů letounů a sportovních létajících zařízení, provozujících létání jako svou zájmovou činnost, 2019. Cheb: Svět křídel. ISBN 978-80-7573-049-7.
- [10] ROYCE, Rolls. The jet Engine. 5. Derby, England: The Technical Publications Department, 1996. ISBN 0-9021-21-235.

[11] Sanderson, J; Guided flight discovery – Private pilot handbook, 2004, [Online], [Citace: 02.05.2024]

<https://aviationdose.com/wp-content/uploads/2020/03/Jeppesen-Private-Pilot-Manual.pdf>

[12] BEA; Final Report On the accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203 registered F-GZCP operated by Air France flight AF 447 Rio de Janeiro – Paris, 2012, [Online], [Citace: 01.05.2024]

<https://bea.aero/docspa/2009/f-cp090601.en/pdf/f-cp090601.en.pdf>

[13] ÚZPLN; ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVAo odborném zjišťování příčin letecké nehody UL letoun SHARK poznávací značky F-JCEC na poli u obce Olšany u Prostějova dne 29. října 2020, 2023, [Online], [Citace: 02.05.2024]

<https://uzpln.cz/pdf/20230628174533.pdf>

[14] Нерадько, А; ОТЧЕТ по результатам расследования серьезного авиационного инцидента с самолетом A321-271N VQ-BGU АО «Авиакомпания «Сибирь», 2021, [Online], [Citace: 02.05.2024]

https://web.archive.org/web/20220405011350/https://aviaforum.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/data/attachment-files/2022/01/1659736_c08e2316ec004d1cf7ab9afa500f4e2c.pdf

[15] AIRBUS S.A.S.; SINGLE AISLETECHNICAL TRAINING MANUALMAINTENANCE COURSE - TIICE & RAIN PROTECTION, 2005, [Online], [Citace: 30.04.2024]

<https://docplayer.net/60255300-Single-aisle-technical-training-manual-maintenance-course-t1-ice-rain-protection.html>

[16] CUTLER, C; How A TKS System Works, 2016, [Online], [Citace: 30.04.2024]

<https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/how-a-tks-anti-ice-system-works/>

[17] ZENG, Xi; GUO, Zhiguang a LIU, Weimin; Recent advances in slippery liquid-infused surfaces with unique properties inspired by nature, 2021, ISSN 2096-5524, [Online], [Citace: 03.05.2024]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42242-021-00133-8>

[18] C. Williams, J; Progress in structural materials for aerospace systems, 2003, [Online], [Citace:03.05.2024]. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645403005020?via%3Dihub>

[19] Struk, P; A Pilot's Guide to Ground Icing: Module III - Fluid Basics, 2022 [Online], [Citace: 6.05.2024]

https://aircrafticing.grc.nasa.gov/2_3_3_1.html

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Tvar profilové námrazy	12
Obrázek 2 - Tvar žlábkové námrazy	12
Obrázek 3 - Tvar hrbočkovité námrazy.....	13
Obrázek 4 – Symboly front na meteorologických mapách	16
Obrázek 5 – Průběh letu v oblačnosti Stratus	18
Obrázek 6 - Usazená námraza na modelu křídla letadla	19
Obrázek 7 - Pitot-statický systém.....	21
Obrázek 8 - Náskres pístového motoru.....	22
Obrázek 9 - Popis částí turbínového motoru	22
Obrázek 10 - TEMSI graf překrývající se s infračerveným obrazem v 0 hodin 00 minut	26
Obrázek 11 - Průběh letu	28
Obrázek 12 – Oblačnost nad územím ČR dne 29. 10. 2020 v 09:15 UTC.....	30
Obrázek 13 – Oblast strmého klesání (šipka označující bod s max rychlostí 270 kt GS).....	31
Obrázek 14 – Předpovědní meteorologická mapa PGME15 RUMS 010000 ²	33
Obrázek 15 – Stav letadla před začátkem pojiždění.....	34
Obrázek 16 - Meteorologické podmínky během protinámrazového ošetření letadla	37
Obrázek 17- Systém protinámrazové ochrany křídla Airbus.....	39
Obrázek 18 - Vylučování kapaliny TKS z křídla	40
Obrázek 19 - Schéma fungování systému TKS vrtule	41

Obrázek 20 - Zjednodušený schéma SLIPS připravený femtosekundovým laserem	42
Obrázek 21 - Schéma pneumatického systému odmrazování.....	43

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Hodnocení intenzity námrazy	13
---	----

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A/T - Autothrottle

Ac – Altocumulus

ADS-C – Automatický závislý přehledový systém – kontrakt (Automatic Dependent Surveillance- Contract)

As - Altostratus

ATIS – Automatická informační služba koncové řízené oblasti (Automatic Terminal Information Service)

C – Celkový tlak

CAS – Kalibrovaná rychlost (Calibrated Airspeed)

Cb - Cumulonimbus

Cc - Cirrocumulus

Ci - Cirrus

ČR - Česká republika

Cs - Cirrostratus

Cu cong - Cumulus congestus

D – Dynamický tlak

d - Deficit teploty rosného bodu

EASA – Evropská agentura pro bezpečnost letectví (European Union Aviation Safety Agency)

EPKN - Letiště Opole

FIR – Letová informační oblast. (Flight Information Region)

FL – Letová hladina (Flight Level)

I - Intenzita námrazy

IAS – Indikovaná vzdušná rychlost (Indicated Airspeed)

LFKG - Ghisonaccia Alzitone Airport

LKOL - Letiště Olomouc

MEL – Seznam minimálního vybavení (Minimum Equipment List)

Ns - Nimbostratus

PGME - Grafické informace o speciálních meteorologických podmínkách pro oblast Dálného východu

PPJ - Pístová Pohonná Jednotka

PPL (A) - Pilotní průkaz soukromého pilota letounů (Private Pilot Licence)

RMP - Panel ovladačů rádiové soustavy (Radio Management Panel)

RV - Relativní vlhkost

S – Statický tlak

Sc - Stratocumulus

SIGMET - Význačné meteorologické jevy (Significant meteorological phenomena)

SLIPS – Povrch nasáklý kluzkou tekutinou (Slippery Liquid-Infused Porous Surface)

St - Stratus

SYNOP - Zpráva o přízemních meteorologických pozorováních z pozemní stanice (Surface Synoptic Observations)

t – Teplota vzduchu

t_d - Teplota rosného bodu

TEMSI – Graf Významného času (Temps Significatif chart)

ULL - Ultralehké letadlo

USA - Spojené státy americké (United States of America)

UTC - Koordinovaný světový čas (Universal Time Coordinated)

v – Rychlost letu

VHF - Velmi vysoká frekvence (Very High Frequency)

XXX - Základna oblačnosti pod hladinou FL 100

α - Absolutní vlhkost

δ - Vodnatost oblaků

λ - Tepelná vodivost