

Dr. Óvári Gyula

BIZTONSÁGTECHNIKA A REPÜLÉSBEN: A REPÜLŐESZKÖZÖK JÉGTELENÍTŐ RENDSZEREI

Valamennyi légi jármű repülési biztonságát nagymértékben veszélyezteti a felületén kialakuló, ott megtapadó és tovább növekvő **jégréteg**. A jegesedésnek számos előfeltétele van, melyek bonyolult kölcsönhatásukban befolyásolják annak létrejöttét, növekedésének intenzitását, geometriai formáját, fizikai struktúráját. (Kellő pontosságú vizsgálatuk csak a matematikai statisztika módszereivel lehetséges. Közülük néhány alapvető fontosságú:

- a környezeti levegő hőmérséklete;
- a levegő (felhőzet) egységnyi térfogatában található vízmennyiség (tömeg), illetve a vízcseppek geometriai mérete;
- a felhőzet kiterjedése és meteorológiai jellemzői;
- a repülési sebesség és magasság.

A jegesedés folyamatának, hatásának megismeréséhez, valamint az ellene való hatékony védekezés módszereinek kimunkálásához, pontosan ismerni szükséges:

- a jégképződés fizikai (mennyiségi, minőség) sajátosságait;
- a jégképződésnek leginkább kitett szerkezeti elemeket.

A jegesedés fizikai jellemzői

A légijármű felületén megtapadó **jegesedés mennyiségi jellemzése** több mutató is használatos:

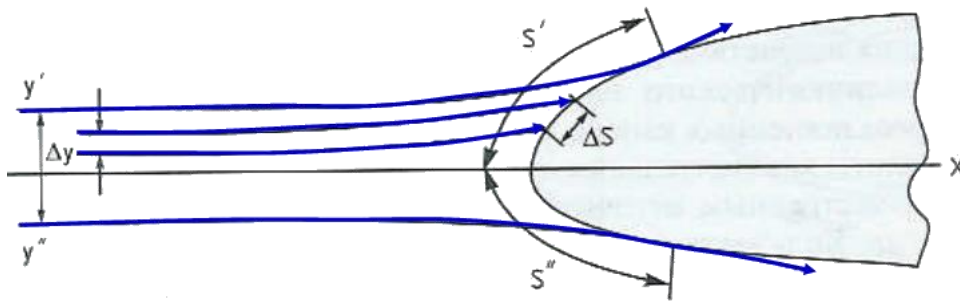
A **jegesedés általános intenzitása** (I_s), időegység alatt az a repülőeszköz teljes felületén létrejövő jégtömeg növekedését fejezi ki:

$$I_{s,jég} = E \cdot \rho_{vzpára} \cdot v_{\infty} \cdot A_{h,max} \quad [kg/s]$$

ahol:

E – általános vízcsepp megtapadási együttható, amely a profilt érintő, valamint a zavartalan áramlásban haladó vízcseppek pályája közötti távolság viszonya (1. ábra):

$$E = (y' - y'') : c_{max}$$



1. ábra

ρ - a környező közeg páratartalma [kg/m^3];

v_∞ - a zavartalan áramlás sebessége (azaz a repülési sebesség v_{rep}) [m/s];

$A_{h,\text{max}}$ - maximális homlok keresztmetszet;

c_{max} - maximális profil vastagság.

A **helyi jegesedés intenzitása** ($I_{A,\text{jég}}$), az egységnyi felületen létrejövő jégmennyiség gyarapodást fejezi ki:

$$I_{A,\text{jég}} = \varepsilon \cdot \rho \cdot v_\infty \quad [\text{kg/m}^2]$$

itt:

ε - helyi vízcsepp megtapadási együttható, a felület vizsgált pontján a jéggyarapodás intenzitását, mint a zavartalan áramlásban egymás mellett haladó vízcseppek távolságának (Δy), a sárkány felületén mérhető vetületének (Δs) hányadosaként fejezi ki:

$$\varepsilon = \Delta y / \Delta s \quad \text{ahol } \lim \Delta s \rightarrow 0$$

A **lineáris jegesedési intenzitása**, a felület tetszőleges pontján a jégréteg növekedésének sebességét fejezi ki:

$$I_{A,\text{jég}} = \varepsilon \cdot \rho \cdot v_\infty \cdot (\beta_{\text{jég}} \cdot \rho_{\text{jég}}) \quad [\text{m/s}]$$

az összefüggésben:

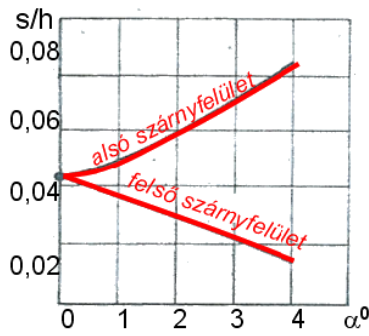
$\rho_{\text{jég}}$ - a lerakódott jég sűrűsége;

$\beta_{\text{jég}}$ - a kialakuló jég (rá-)fagyási együtthatója.

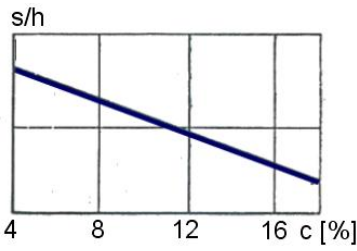
Az összefüggések ebben a formában csak közelítő vizsgálatra alkalmasak, mivel a légijármű környezetében lévő levegő, felhőzet víz- (pára-) tartalmának homogén diszperzióját feltételezik. Valós felhőzetben – függetlenül annak természetes, vagy mesterséges eredetétől – a víz (pára) diszperziója inhomogén, ezért a pontos mennyiségi analízis csak ennek figyelembe vételével lehetséges.

Merevszárnyú repülőgépeknél a jég megtapadását a húr mentén szokásos meghatározni. Ennek mérték több környezeti és profil-geometriai tényező is befolyásolja.

A szárny állásszögének (α^0) növekedésekor is nő a jegesedési zóna kiterjedése. Aszimmetrikus



2. ábra

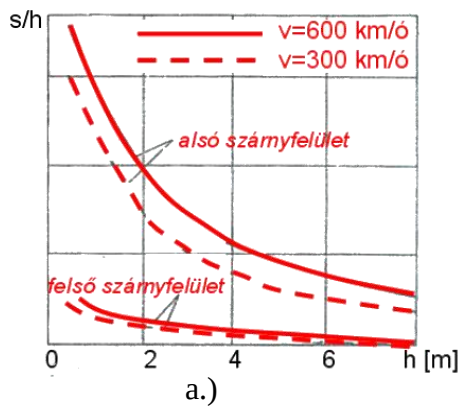


3. ábra

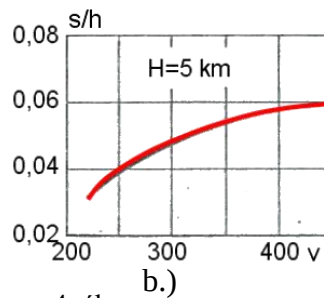
megfűvás és/vagy profilgeometria hatására, az alsó szárnyfelületen nagyobb, a felsőn kisebb a jegesedés mértéke (2. ábra).

Vékony profilok maximálisan a húr hossz 15 %-áig, vastagabbak ennél kisebb mértékben jegesednek (3. ábra).

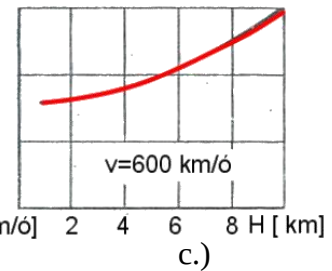
Tapasztalatok szerint a szárny, irányfelületek (abszolút) húr-hosszának növekedésével csökken felületén a jegesedési zóna (s/h) aránya (4.a. ábra). A geometriai adatokon kívül a jegesedési zóna hűrirányú (h) kiterjedését (s) a repülési magasság (H), sebesség (v) is befolyásolja. (4. b. és c. ábra).



a.)



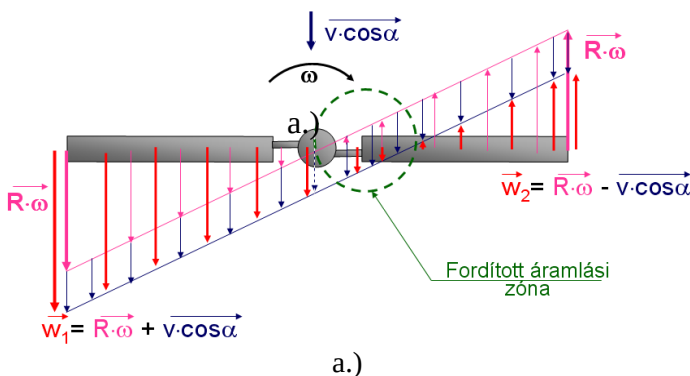
b.)



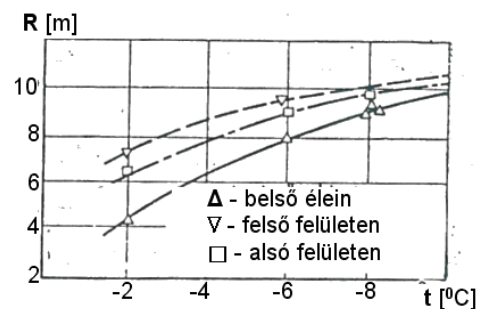
c.)

4. ábra

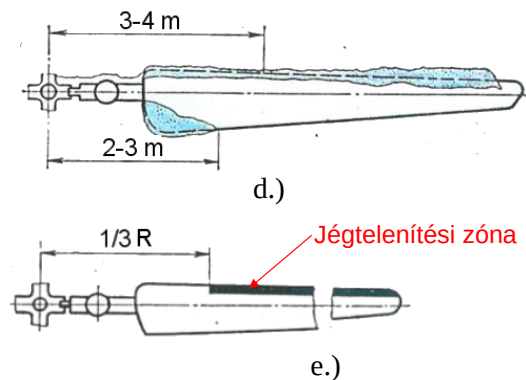
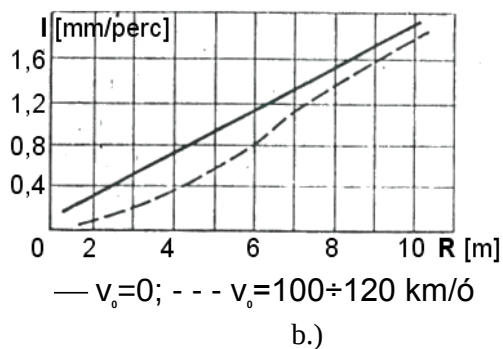
A helikopter vízszintes repülésekor a forgószárny terjedtsége mentén három jegesedési zóna különböztethető meg (5.d. ábra). A fordított áramlás zónájában a belépő élen, $R = 3\div 4$ m terjedtségig, a jegesedés nem különösen intenzív, ennél távolabb azonban a jégmennyiség lényegesen nő. A levegő magas páratartalma, illetve viszonylag nagy cseppátmérő esetén $R = 2\div 3$ m terjedtségig a kilépő él jegesedése is létrejöhet. (Az ábrán szereplő méter adatok a vizsgált forgószárny-lapátra vonatkoznak).



a.)



c.)



5. ábra

A helikopter forgószárny és faroklégcsavar jegesedési zónáinak húrirányú kiterjedése hasonló a merevszárnyéhoz. A helikopterek forgószárnyak (5. ábra) jegesedésének intenzitása (I) az üzemmód és a terjedtség függvényében változik (5.b; c, ábra).

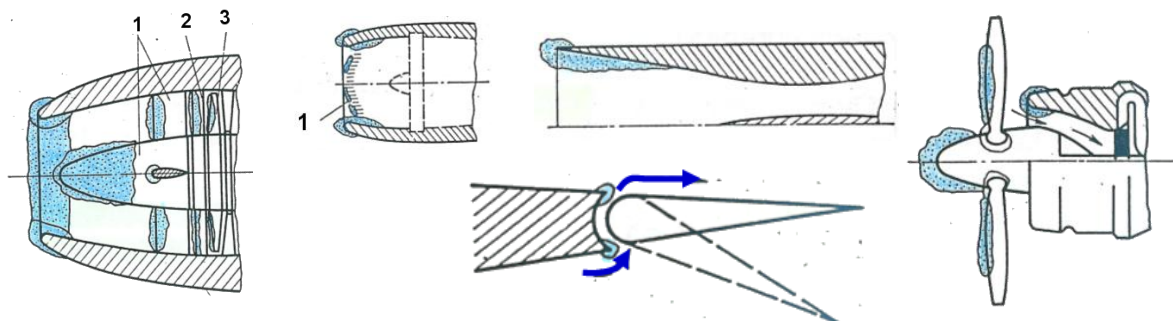
Ferde átláramlási üzemmódon ($v_0 = 100\div120$ km/ó) a lerakodott jég mennyisége a fordított áramlás zónájában a belépőélen $R=3-4$ m-ig, a kilépőélen $R=2-3$ m-ig a jégképződés folyamata lassúbb, kevesebb, vékonyabb.

Tengelyirányú átláramlási üzemmódon ($v_0 \approx 0$ km/ó) a lerakodott jég mennyisége (intenzitása) csak a fordulatszámától ($n_{FSZ} \sim \omega$) függ.

A jegesedési hajlam a terjedtség mentén a környezeti levegő hőmérsékletének függvényében a 5.c. ábrán látható. Ennek megfelelően a forgószárnylapát jégtelenítő berendezését a belépőelem a terjedtség $1/3$ -ától a lapát végéig szokták beépíteni (5.d. ábra).

A repülőeszközökön a jegesedésnek leginkább kitett szerkezeti elemek (6. ábra):

- a hajtóművek szívócsatornájának, porvédő-, áramlásterelő berendezéseinek belépő-keresztmetszetei;
- merev- és forgószárnyak, légcsavarok, faroklégcsavarok, vezérsíkok, irányfelületek orrdoboza;
- a vezetőfülkék üvegezése;
- a törzsön kívül elhelyezett antennák és a különböző műszerek érzékelői (Pitot-cső, állásszög-adó stb.).



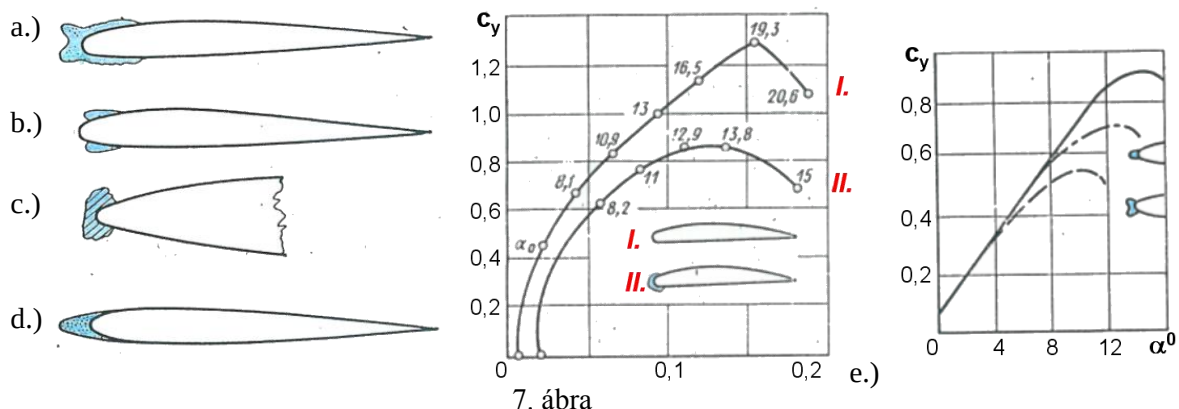
6. ábra

A jégképződés az alábbi – rendszerint nemkívánatos – következményekkel jár:

- megváltoznak (általában romlanak!) az aerodinamikai tulajdonságok;

- nő a gép súlya ($\rho_{\text{jég}} = 600-900 \text{ kg/m}^3$) és eltolódik a súlypontja, így változnak a stabilitási és kormányozhatósági tulajdonságai;
- a működő forgószárnyakról, légsavarokról a centrifugális erő hatására leváló jégdarabok a sárkány vagy a környezet súlyos sérülését eredményezhetik;
- a szívócsatorna belépőéléről a porvédő-, áramlásterelő berendezésekről leváló jégdarabok kompresszor sérüléséhez, illetve hajtómű leálláshoz vezethetnek;
- a fülke üvegezésén és a műszerek érzékelőin megtapadó jégréteg rontja a vizuális tájékozódást és pontatlanná teszi a mérhető adatok egy részét, ezáltal gátolhatja más berendezések (pl. robotpilóta) működését is;
- az egyenlőtlenül lerakódott – illetve szakaszosan leváló – jégréteg tömeg-kiegyensúlyozatlanságot okoz, amely a repülőszerkezetek káros rezgéseire, sérüléséhez vezethet.

A szárnyakon (forgószárnyakon) és irányfelületeken lerakódó jég különböző formájú lehet. A 7.a. ábrán látható jegesedési formát „szarv alakúnak” nevezik. Rendszerint közepes és kis sebességeken, $t = 0-(-7)^\circ\text{C}$ környezeti hőmérsékleten alakul ki. Ilyenkor a kicsapódó vízcseppek nem hirtelen, hanem a belépő él környékén alul és felül szétterjedve, szétfolyva fokozatosan fagynak meg, ezzel két jéggátat képeznek. A jéggátakra lerakódó újabb jégrétegek hatására fokozatosan jön létre a szarv alakú képződmény

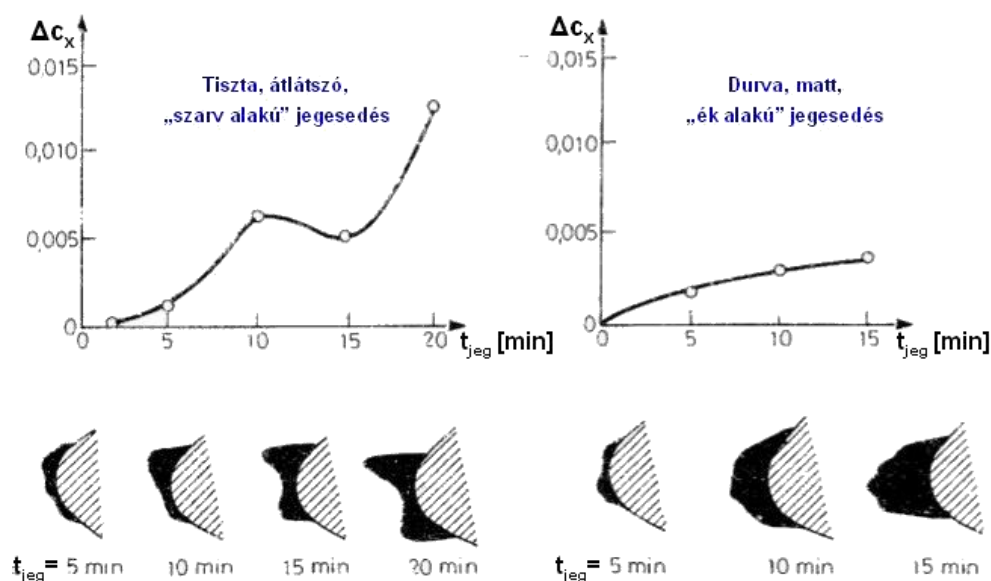


Amennyiben a környező levegő hőmérséklete $(-10) - (-15)^\circ\text{C}$ között van, rendszerint „ék alakú” jégképződmény alakul ki (7.d. ábra). Ez a forma annak a következménye, hogy alacsony hőmérsékleten a vízcseppek azonnal megfagynak és a légáramlat hatására ékalakot vesznek fel. Az ilyen jégképződmény sokkal kevésbé csökkenti a C_y és az α_{kr} értéket, mint a szarv alakú (7.b. ábra). Az ék alakú jegesedés rendszerint tejfehér, matt színű, mivel a gyorsan megfagyó vízcseppek között levegőzárványok maradnak.

A környezeti levegő $(-7) - (-12)^\circ\text{C}$ -os hőmérsékleténél egyaránt előfordulhat szarv- és ék alakú jegesedés, valamint a 7.c. ábrán látható átmeneti formáció.

Megjegyzés: a helyi hőmérséklet az áramlási sebesség növekedése és nyomáscsökkenése során már $+(2\div 3)^\circ\text{C}$ környezeti hőmérséklet esetén is elérheti a fagyponthoz történő hőmérsékletcsökkenést.

A 7. a., b., c jégalakzatok, nemcsak a c_y értékét csökkentik számottevően, hanem a c_x -et is megnövelik (7.e. ábra).



8. ábra

Változatlan környezeti feltételek esetén, az idő előrehaladtával, a lerakódó jégmennyiség valamennyi formációja folyamatosan növekszik (8. ábra).

1. A JEGESEDÉS ELLENI VÉDELEM MÓDSZEREI, A JÉGTLENÍTŐ-RENDSZEREK SZERKEZETI KIALAKÍTÁSA

A légi járműveket olyan jégtelenítő rendszerrel szerelik fel, amely valamennyi repülési, valamint hajtómű üzemmódon átlagos időjárási körülmények között biztosítja a sárkány és hajtómű tartós, illetve az utóbbi rövid idejű védelmét szélsőséges viszonyok mellett is, különböző magasságokon, a statisztikai adatok segítségével meghatározott meteorológiai jellemzőknél.

Többhajtóműves repülőeszközöknél a jegesedésnek legjobban kitett szerkezeti elemek védelmét a hajtóművek egy részének működésképtelenné válása esetén is biztosítani kell. Megengedett viszont az olyan jegesedés, amely nem veszélyes sem a sárkányra, sem a hajtóműre és érdemben nem befolyásolja a gép stabilitását és kormányozhatóságát.

A jégtelenítő rendszer alapvető tartozéka a jegesedést érzékelő és jelző berendezés is. Ezek fény- és hangjelekkel figyelmeztetik a személyzetet, korszerű megoldásoknál automatikusan üzembe is helyezik a rendszert. A jégtelenítő berendezések üzeeme nem zavarhatja a repülőeszköz rádiólokátor, illetve navigációs műszereinek működését. A jégtelenítő rendszerek az alábbi módszerek valamelyikével valósítják meg feladatukat:

- mechanikus;
- fizikai – kémiai;

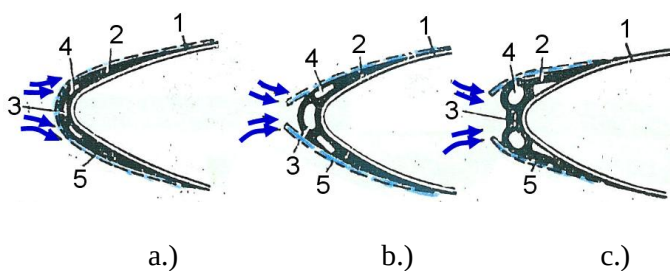
- termikus.

Mindezekből is megállapítható, hogy biztonságos repülésre csak az olyan légi jármű alkalmas, amely rendelkezik a jégképződés megelőzésére, illetve a már kialakult jegesedés időbeni jelzésére és eltávolítására szolgáló szerkezeti elemekkel, illetve berendezésekkel. Utóbbiakat együttesen **jégtelenítő rendszernek** nevezzük.

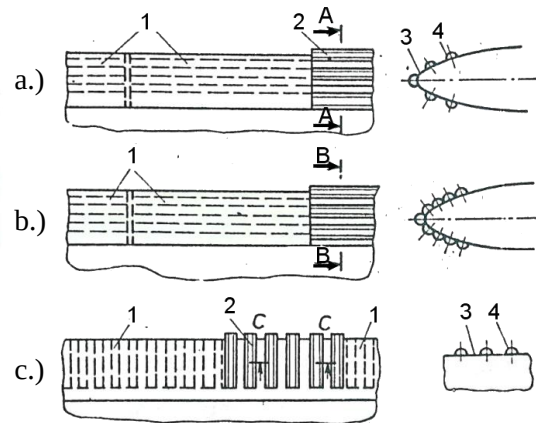
1.1. Mechanikus módszerek

A jég eltávolítása valamilyen mechanikai hatás segítségével (centrifugális erő, térfogatváltozás, nagyfrekvenciás rezgés stb.) valósul meg. Tapasztalatok szerint 4-5 mm vastag, a hőmérséklet, felületi minőség, tisztaság stb. függvényében négyzetcentiméterenként 85-160 N erővel a sárkányhoz tapadó jégréteg még viszonylag egyszerűen eltávolítható. Ennek megfelelően a jégtelenítő rendszernek – működési elvétől függetlenül – ciklikusan úgy kell működésbe lépni, hogy a lerakódó jégréteg vastagsága ne haladja meg ezt a vastagság értéket.

Pneumatikus jégtelenítővel ma már csak régebbi típusú merevszárnyú repülőgépeknél találkozhatunk. Működésük lényege, hogy a szárny, esetleg vezérsíkok belépő élét a húr hossz 5-6 %-ig vékony, felfújható gumiborítással látják el. A borítás (2) alaphelyzetben (9.a. ábra) közel ideális aerodinamikai formát képez. Üzembe helyezéskor a tömlőben kiképzett 3-10 db csatornába (pl. 3; 4) a kompresszortól nagynyomású levegőt vezetnek. Ilyenkor a borítás térfogata fokozatosan megnövekszik (9.b., c. ábra), a ráakódott jégréteg (5) összetöredezik és a légáramlás hatására leválik a szárny felületéről.



9. ábra



10. ábra

A levegő-bevezető csatornák nemcsak terjedtség, hanem húr irányba is elhelyezhetőek a borításon (10. ábra). Alapvetően az energia megtakarítás érdekében a felfújható borítást részenként, szekcióként helyezik nyomás alá. A pillanatnyilag üzemelő (2) és üzemben kívüli (1) szekciók a gép szimmetriasíkjától mindig azonos távolságra helyezkednek el, és ciklikusan szerepet cserélnek. Esetenként a működő szekción belüli szomszédos cellákat (4) is egymást követően helyezik nyomás

alá (10.a. és c. ábra). Ilyen módszerrel az egyébként egyszerű szerkezetű és viszonylag kis fajlagos súlyú ($29\div34 \text{ N/m}^2$) rendszer levegő-fogyasztása elfogadható értéken ($0,4\div0,6 \text{ kg/perc}$) tartható.

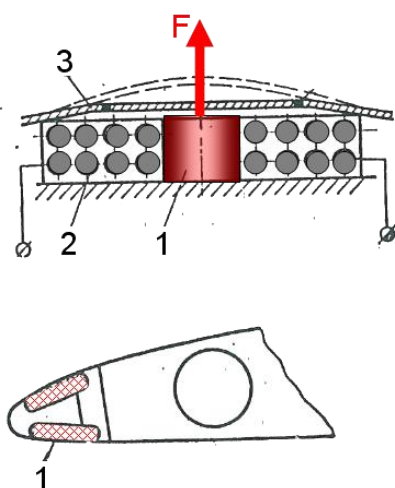
Az egyszerűsége mellett e megoldásnak számos hátránya van, ezért korszerű repülőgépeken már nem alkalmazzák. A hiányosságok közül néhány:

- üzemén kívüli helyzetben a szárny légellenállását 8-10 %-kal, a repülőgépét 2-3 százalékkal növelheti. Bekapcsolt helyzetben a légellenállás 100-110 %-kal is nagyobb lehet, ami a repülési sebesség fokozásával még növekedhet;
- a rugalmas borítás 500-600 km/ó repülési sebesség hatására önállóan is deformálódik, nemkívánatos légellenállás-növekedést és áramlásleválást létrehozva;
- a hegyes, tűszerű jégképződmények nehezen távolíthatóak el;
- a szélsőséges meteorológiai viszonyok között üzemelő, nagy dinamikus terhelésnek kitett gumi- (szövet-) borítás garantált üzemideje igen rövid.

A **víztasztó (hidrofób)** bevonatok kifejlesztése azért fontos, mert egyetlen jégtelenítési eljárás, ami nem igényel energia elvonást a repülőgép hajtómű-rendszereitől. Fizikai hatása azon alapul, hogy speciális bevonattal csökkentik, esetleg meg is szüntetik a sárkány felületének nedvesedő és jégmeggkötő képességét.

Az eddigiekben alkalmazott folyékony, viszkózus (vazelin, parafin, különféle zsírok, viasz stb.) és szilárd anyagok (ftoroplaszt, szerves szilícium tartalmú vegyületek, teflon) azonban nem bizonyultak kellően hatékonyak. A jégréteg vastagsága túlzottan megnő mielőtt leválna, a védőréteg az intenzív igénybevételek következtében könnyen felrepedezik, rövid időn belül teljesen hatástalanná válik.

A **vibrációs jégtelenítők** működése azon alapul, hogy a borítást 1-2 másodpercenként $10^{-3}\div10^{-5}$ másodperc időtartamú intenzív rezgéseknek teszik ki.



11. ábra

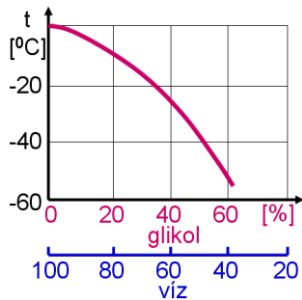
A rezgésforrásként ultrahangot vagy örvény-áramot alkalmaznak. Ez utóbbi induktora (1) vasmag nélküli szolenoid tekercs (2) (11. ábra). A szolenoid-ra bocsátott elektromos impulzus nagyfrekvenciás, váltakozó elektromágneses mezőt hoz létre a borítás-ban, ami a nagy energiakonzentráció következtében rugalmas alakváltozást szenved és a felületére rakódott jég összetöredezik. Ultrahang generátorul – kis súlya és alacsony levegőfogyasztása ($30\div40 \text{ kg/ó}$) következtében – célszerű gázugár generátort alkalmazni. Ez hatását kétféleképpen fejti ki. Vagy közvetlenül a borítást, vagy a környezeti levegőben levő túlhűlt folyadékcseppeket hozza rezgésbe még a géppel való ütközés előtt.

A vibrációs jégtelenítők széles hőmérséklettartományban ($-40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig), a termikus jégtelenítőhöz képest századrésznyi energiát felhasználva járulékos jégképződés nélkül üzemelnek.

1.2. Fizikai – kémiai eljárások

Merev- és forgószárnyas repülőgépeknél egyaránt alkalmazható megoldás. A lényege, hogy a védendő felületet olyan vegyi anyaggal vonják be, vagy nedvesítik, amely oldja a jeget, illetve lecsökkenti az olvadáspontját. Amennyiben csak az érintkező jégfelületet oldják fel, úgy a jég a légerők vagy a centrifugális erő segítségével válik le a szárny vagy a lapát felületéről. E módszer egyaránt alkalmas a jegesedés megelőzésére és a keletkezett jég eltávolítására.

A sárkányra előre felvitt oldódó, jégtelenítő bevonatként nátrium-nitrátot, nátrium-kloridot, kalcium-kloridot stb., jégtelenítő folyadékként etilalkoholt, szeszglicerines keveréket, glikol-vegyületeket használnak. A keverékeknel a jégtelenítő szer és az oldószer arányát a környezeti hőmérséklet határozza meg. Glikol esetében a keverési arány a 9. ábráról olvasható le.

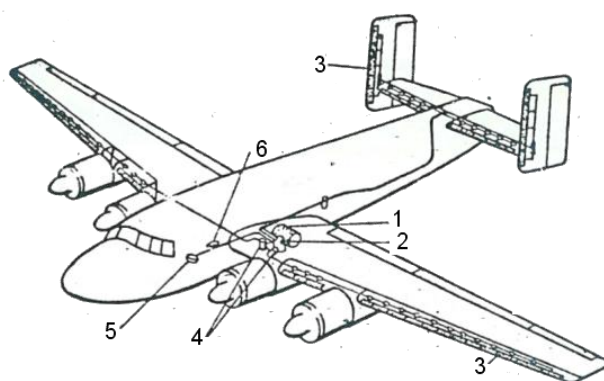


12. ábra

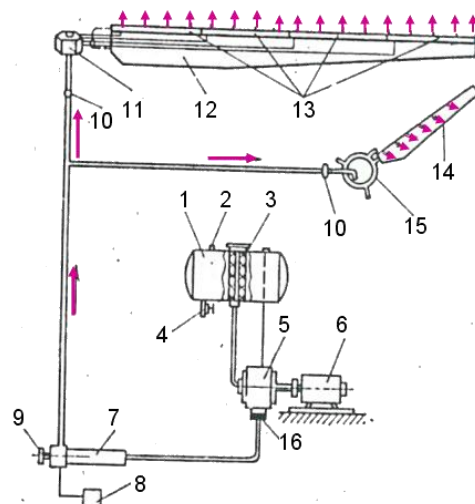
Valamennyi használatos vegyi anyagnak az alábbi követelményeket kell kielégíteni:

- jól megtapadjon a védendő felületen;
- könnyen keveredjen a lehűlt vízcseppekkel;
- ne lépjen kémiai reakcióba a gép sárkányával, ne idézzon elő azon korróziót.

Mint a 13. ábráról látható, nincs lényegi különbség a merev- és forgószárnyas repülőgép folyadékos jégtelenítő rendszere között. *Merevszárnyú repülőgépeknél* a központi tartályból (1) szivattyú (2) továbbítja szűrőn (4) keresztül a jégtelenítő folyadékot, az adagoló szelep (6) közbeiktatásával a szárnyba és a vezérsíkokban elhelyezett kollektorokhoz (3) (13.a. ábra). A rendszer az (5) kapcsolóval működtethető.



a.)



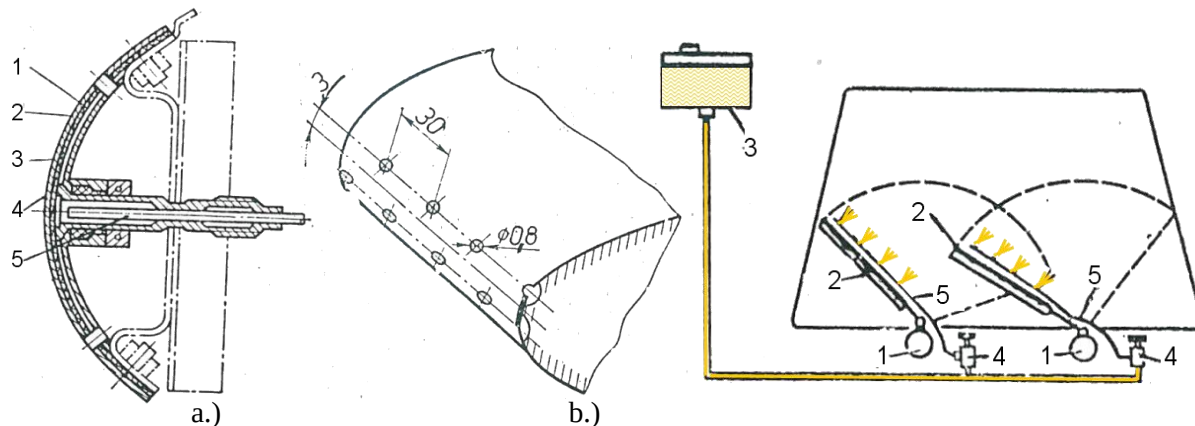
b.)

13. ábra

A *helikopter* (13.b. ábra) jégtelenítő tartályából (1) a folyadék beszállítása egyenáramú villamosmotorral (6) meghajtott, centrifugál szivattyúval (5) történik, amely a továbbiakban szűrőn (7)

és fojtószelepen (9) keresztül a forgószárny és faroklégsavar elosztó kollektoraihoz (10; 15), illetve a lapátok fűvókáihoz (14) kerül. A folyadékfogyasztás csökkentésére a forgószárny táplálása időben lépcsőzve, szekciónként (13) történik.

Az ilyen rendszerek átlagos folyadék felhasználása $1,6 \div 1,8 \text{ l/m}^2\text{ó}$, ciklikus üzemeltetés esetén.



14. ábra

15. ábra

A jégtelenítő folyadék két módszerrel juttatható a borítás külső felületére. Alacsony üzemi nyomás esetén a tápcsatornán (5) az elosztó csatornába (3) kerülő folyadék a kétrétegű, porózus borításon (1; 2) át kerül a külső felületre (14.a. ábra). Az elosztó csatorna belső fala fémlemez (4). Nagynyomású rendszereknél (14.b. ábra), helikopter forgószárnyaknál a tápcsatornából a terjedtség mentén 300 mm-enként elhelyezett $d=0,8 \text{ mm}$ átmérőjű furatokon keresztül jut a folyadék a sárkány felszínére.

A kis- és közepes sebességű légi járművek fontos részrendszere lehet a vezetőfülke homloküvegezésének jégtelenítő és mechanikus tisztító rendszere (15. ábra). A villamos motorral (1) vagy hidraulikusan meghajtott mechanikus ablaktörlő (2) megerősített változatába hajlékony tömlőn (5) keresztül jégtelenítő folyadékot vezetnek. A folyadék bevezetése az ablaktörlő működtetésétől függetlenül külön csappal (4) vezérelhető.

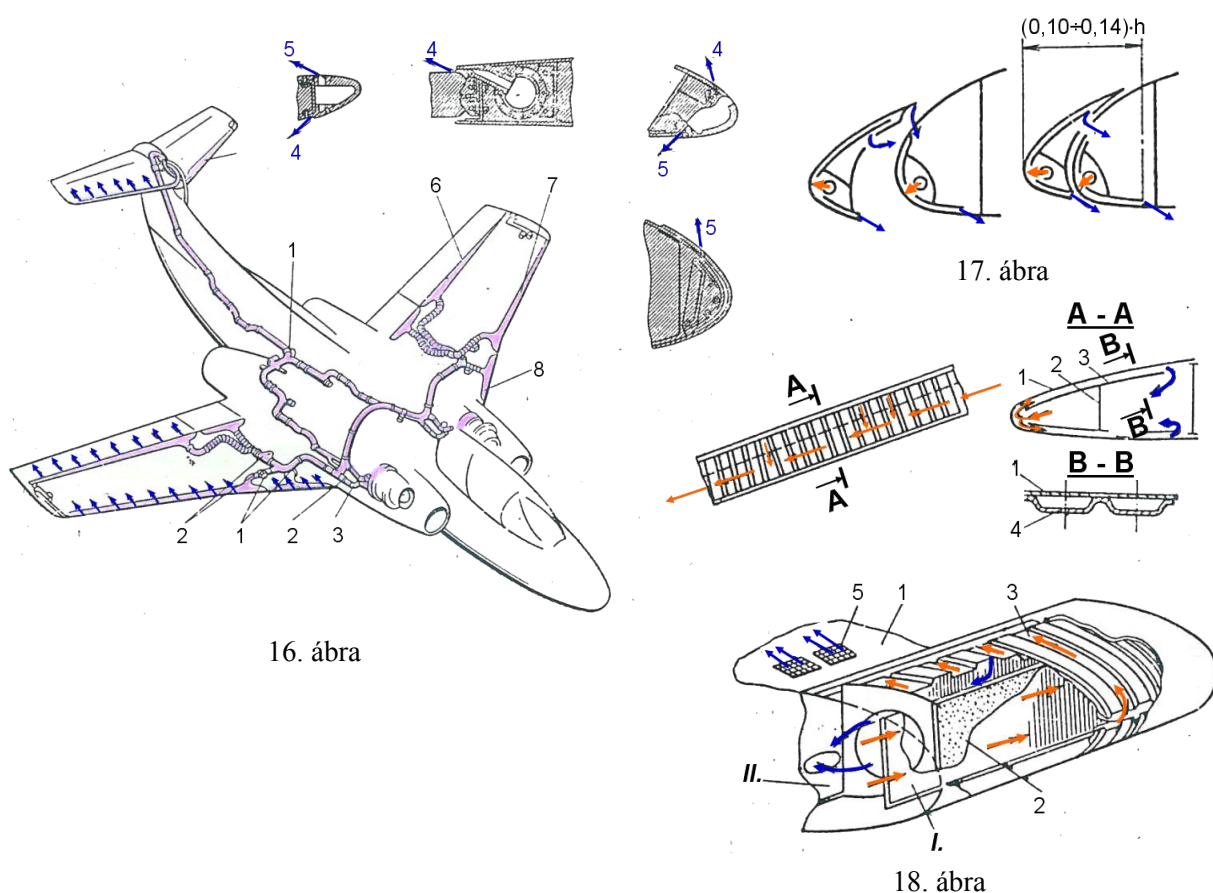
A folyadékos jégtelenítők *előnyös tulajdonsága*, viszonylagos egyszerűségük, késleltetés nélküli működésbe lépésük és hogy járulékos jegesedést, jéggát-képződést nem okoznak. *Hátrányos*, hogy a folyadék csak rövid ideig fejti ki hatását, ezért folyamatos utántáplálást igényel, ami egy repülés során korlátozott működési időt tesz lehetővé.

1.3. Termikus jégtelenítés

A termikus jégtelenítés lényege, hogy a védendő felületet olyan, fagypont feletti hőmérsékleten tartják, amely lehetetlenné teszi rajta a jégréteg kialakulását, illetve megkötését. Forgó- és merevszárnyon egyaránt alkalmazható. Melegítésre rendszerint a kompresszortól elvezetett forró levegőt, vagy elektromos fűtőszálakat, esetenként forró hajtóműolajat alkalmaznak. (Ez utóbbit általában a szívócsatornák falának és belépő keresztmetszetének melegítésére használják).

A **kompresszortól történő levegőelvezetés** egy lehetséges módja látható a 16. ábrán. A hajtómű kompresszorától elvezetett forró levegő a levegógyűjtőbe (3), innen a záró (2), illetve a nyomáscsökkentő (1) szelepekhez kerül. A szelepektől a csővezetékek a szárnytőhöz (8), szárnyvéghez (7), valamint a csűrőkhöz (6) és fékszárnyakhoz juttatják a levegőt. A szárny, vezérsíkok és mechanizációs eszközök teljes terjedtsége mentén a belépő-éltől számítva a húr hossz 1-1,5 százalékában 0,2-0,7 mm átmérőjű furatsoron át kerül a levegő a szárny alsó és felső felületére. A megoldás előnye, hogy a jégtelenítésen (5) kívül a cirkuláció vezérlése (4) is megvalósítható. Külön vezeték alkalmazásával a szárny orr-részére szerelt mechanizáció jégtelenítése is megvalósítható (17. ábra).

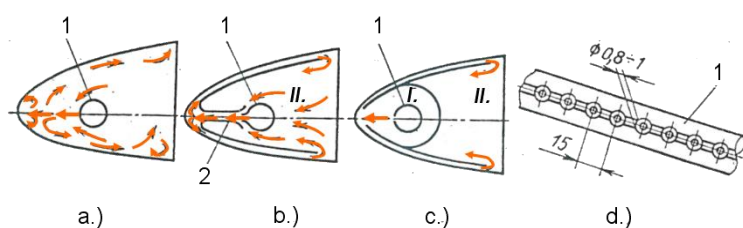
A levegőkivezetés úgy történik, hogy a szárny és orr-segéd szárny között ne keletkezhesen jégréteg. A kompresszortól elvezetett levegőt más megoldásnál csak a szárnyvégen vezetik a szabadba, mivel ilyenkor a borításra történő hőátadás jobb hatásfokú. A forgószárny-lapátok forró levegővel történő fűtését is így szokás megoldani.



Legegyszerűbb kivitelű a **hosszanti fűtőcsatornás** kialakítás (18. ábra). A fűtendő szárny (forgószárny) szakaszt kettős falúra képezik ki, ezzel a borítás (1) alatt egy szűk csatorna (3) kerül kialakításra. Emellett az orrdobozt hőszigetelt fallal (2) függőlegesen is két részre osztják. Az I. csatornába kerül a kompresszortól elvezetett forró levegő, amely az orr-rész furatán a falmenti csatornába (3) halad és melegíti a külső borítást (1). Innen a lehűlt levegő a II. csatornába jut, ahonnan részben a szárnyvégen, részben a szárny alsó és felső felületén kiképzett résekben (5) keresztül a szabadba távozik.

A rendszer hiányossága, hogy elég alacsony hatásfokú ($\eta = 0,35 - 0,4$) és a terjedtség mentén egyenetlen hőeloszlást biztosít.

Mindkét hiányosságot csökkenti az ún. „pikoló-csőves” kialakítás (19. ábra). E megoldás lényege, hogy

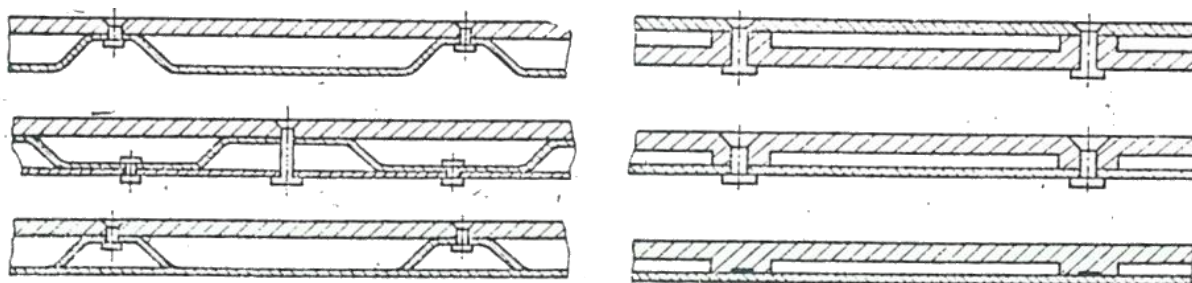


a forró levegő vékony csőben (1) vezetik, amelynek oldalán sorban, kis átmérőjű fűvókákat képeznek ki (19.d. ábra), amelyből a levegő közel hangsebességgel távozik.

19. ábra

A 19.a. ábrán látható kialakításnál a „pikoló-csőből” (1) kiáramló levegő intenzív cirkulációba hozza az orrdobozban lévő levegőt, megjavítva ezzel a borítás felmelegítésének hatásfokát. A 19.b. ábrán bemutatott megoldásnál a „pikoló-csőből” (1) kiáramló forró levegő ejektálja a II. csatornából a már egyszer felhasznált levegőt és a keverőtérből (2) ezt juttatja a fal melletti keresztirányú csatornába. Esetenként a „pikoló-csővet” (1) nagynyomású vezetékbe (I) helyezik el (19.c. ábra). Amennyiben a borítás alatti keresztcsatorna-magasság 1,5 mm körül van, az áramlási sebesség elég nagy, a bemutatott megoldások közül ennek legjobb a hőátadási hatásfoka.

A borítás és a belső lemez által képzett belső csatorna néhány tipikus szerkezeti megoldása látható a 20. ábrán. Gyártástechnológiailag a 6-os kialakítás tekinthető legkorszerűbbnek, mert a két lemez összeerősítése pont-, vagy vonalhegesztéssel történt.



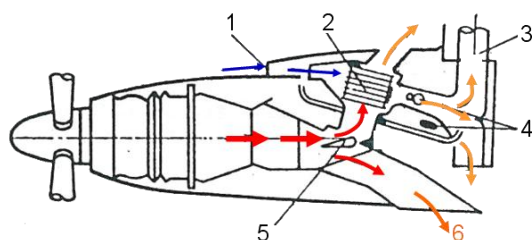
20. ábra

A jelenleg használatos jégtelenítési eljárások közül egyik leggyakoribb a meleglevegős módszer, bár néhány lényeges hiányossága van:

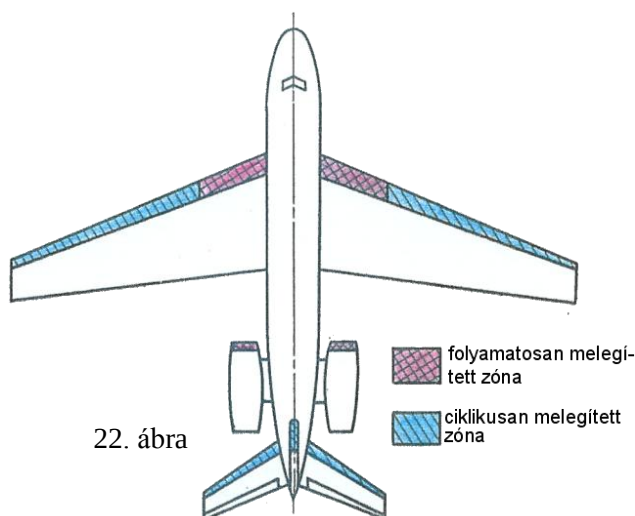
- egyenetlen hőmérséklet-megoszlás és alacsony hatásfok ($\eta = 0,35 - 0,5$);
- nagy levegőfogyasztás;
- a rendszer hatásfoka függ a hajtómű üzemmódjától;
- a nem fűtött borításdarabokon jéggátak képződnek;
- a kompresszortól elvont levegő rontja a hajtómű és a repülőszerkezet műszaki jellemzőit, különösen le- és felszálláskor.

Ez utóbbi hiányosság kiküszöbölhető légszaváros gázturbinás hajtóműveknél, ahol a kiáramló forró gázok (6) nem vesznek részt meghatározóan a toló-(vonó-)erő létrehozásában (21. ábra). Speciális

szeleppel (5) a forró gázok egy része a hőcserélőbe (2) jut, ahol felmelegíti a torlólevegő gyűjtőn (1) bevezetett környezeti levegőt. A lehűlt égéstermék kisméretű fűvócsövön át a szabadba, a felmelegedett levegő pedig elosztószelepen (4) keresztül a jégtelenítő rendszer csővezetékeibe (3) jut.



21. ábra



22. ábra

A hajtómű veszteségek csökkentésére a meleglevegős rendszer nagy részét is ciklikusan üzemeltetik. A sárkány azon részeit, ahonnan az esetleges jégleválás sérülést (pl. hajtómű) okozhatna, folyamatosan jégteleníteni kell (21. ábra).

Meleglevegős jégtelenítő rendszereknél, amennyiben a levegő hőmérséklete nem magasabb 200 °C-nál, alumínium csővezetékek és szerkezeti elemek is alkalmazhatóak 0,8-1 mm-es falvastagsággal (acél esetében ez 0,2-0,5 mm-re csökken). A csővezetékeknél gondoskodni kell a megfelelő hőszigetelésről és a dilatáció következtében hőkompenzátoros csöcsatlakozásról (általában 3 méterenként). A csövekben a levegő áramlása $v_{lev} \approx 100$ m/s, vagy ennél alacsonyabb sebességgel történik. A csővezeték keresztmetszete (A) az

$$A = \frac{m_{lev}}{3600 \rho v_{lev}}$$

összefüggéssel határozható meg, ahol

m_{lev} - óránkénti levegő szükséglete (kg/ó);

ρ - forró levegő sűrűsége;

v_{lev} - a levegő áramlási sebessége a számított csőszakaszon (m/s).

A forrólevegős jégtelenítő rendszer szerkezeti tömege – amennyiben a szárny cirkulációjának vezérlésére is használják (pl. 16. ábra!) – elérheti a gép tömegének 2 %-át is.

A termikus jégtelenítés másik korszerű és elterjedt módszere az **elektromos fűtés**. Ennek főbb *előnyei*, a forrólevegős eljáráshoz viszonyítva a következők:

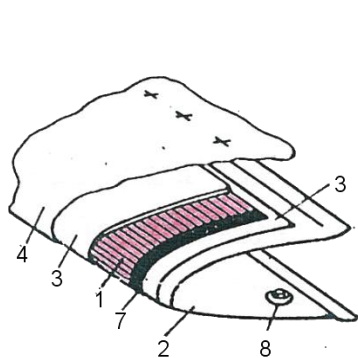
- magas hőátadási hatásfok ($\eta = 0,88-0,95$);
- kisebb a rendszer tömege (azonos energia kisebb tömegű elektromos vezetéken vezethető);

- olyan kis geometriai méretű berendezésekbe is beépíthető, amelyek jégtelenítése más módszerrel nem lehetséges;
- a működtetéshez szükséges energia nem függ a hajtómű üzemmódjától, a repülési magasságtól, sebességtől és a környezeti levegő hőmérsékletétől;
- a hajtómű üzemére jóval kisebb hatással van az elektromos generátor meghajtására levett teljesítménycsökkenés, mint a kompresszor levegőjének megcsapolása.

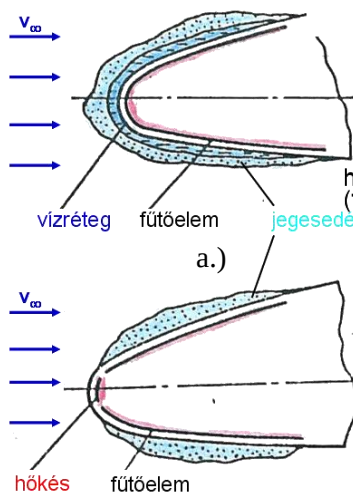
Az előnyök mellett e megoldás néhány *hátrányos tulajdonságával* is számolni kell. Ezek:

- bonyolultabb, mint a forrólevegős megoldás és meghibásodásának valószínűsége is nagyobb;
- földi kiszolgálása, javítása munkaigényesebb.

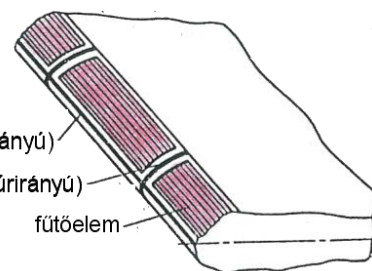
A közvetlen fűtőegység igen egyszerű kialakítású, a külső és belső borítólemez (4;2) közé ~25 mm hosszú fűtőszálakból (1) összeállított blokkokat (23. ábra) rögzítenek. Táplálásuk (~8 mm széles) réz vezetősínből (7) történik. A fűtőszálakat (1) a fémborítástól (2;4) kettős elektromos szigetelő réteg (3) védi.



23. ábra



b.)
24. ábra

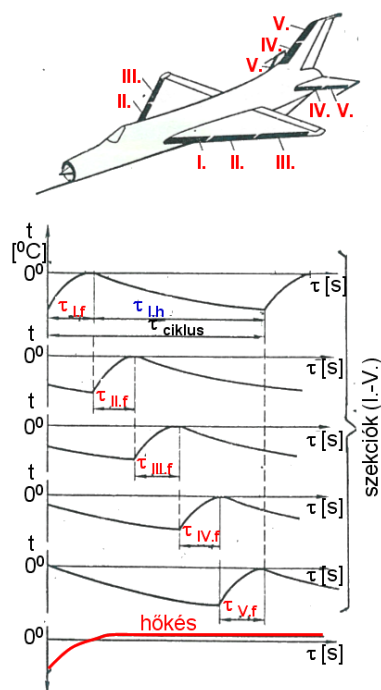


25. ábra

A különböző repülőeszközökön az elektromos jégtelenítő-rendszer táplálása általában háromfázisú, 115 vagy 208 V-os, 400 Hz-es váltakozó árammal történik. A felületegységre vonatkoztatott szükséges teljesítmény $6-15 \text{ kW/m}^2$ értékek között van. Belátható, hogy különösen nagyméretű repülőszerkezetek esetében ez több száz kW teljesítményigényt is jelenthet, így feltétlenül szükséges a ciklikus működtetés. Ilyenkor viszont megtörténhet, hogy a jégképződés intenzitása meghaladja a leolvasztását (2), a sárkány külső felülete és a jég között vékony vízréteg (1) jön létre (24.a. ábra) Ennek ellenére a jég nem tud leválni, hanem kívül még tovább gyarapszik.

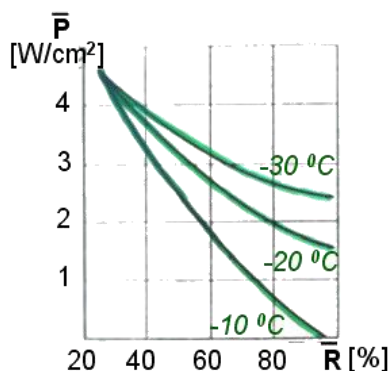
A jelenség megszüntethető az ún. **hőkés** (3) alkalmazásával, azaz a belépőél torlópont vonalának (3) állandó fűtésével (24.b. ábra). Ez két részre osztja a jégréteget és tapadásának megszüntetésekor (ciklikus fűtés) könnyen leválik az áramló levegő hatására.

Hőkés a belépőél kívánt szélességében kialakítható elektromos fűtőszállal, forró levegővel csak a torlópont vonalában, de a leváló jégdarabok geometriai méretének (tömegének) korlátozására hűrirányba is elhelyezhetőek állandó működtetésű fűtőelemek (25. ábra).

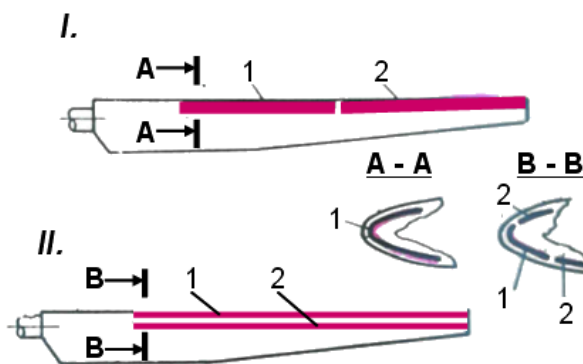


27. ábra

lapátról egyszerre távozzon a teljes jégmennyiség, rövid, de igen intenzív felmelegítéseket célszerű alkalmazni.



27. ábra

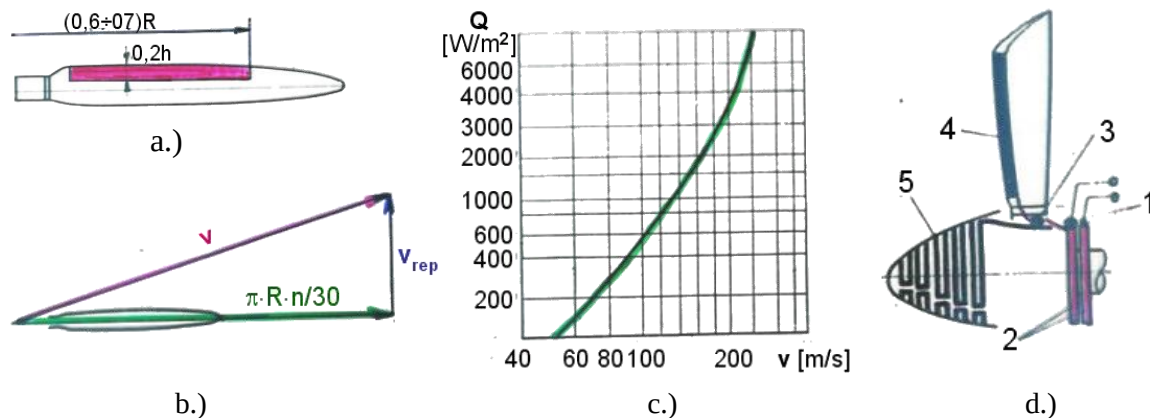


28. ábra

Jelentős energia takarítható meg, ha a légsavár (forgószárny) fűtési-hűlési periódusokból álló ciklusát a környezeti levegő hőmérsékletének függvényében vezérelük (1. táblázat).

1. táblázat

Üzem mód	Külső hőmérséklet [°C]	Fűtési	Hűtési
		Ciklusidő [s]	
I.	0-(-5)	20	100
II.	(-5) – (-10)	40	80
III.	(-10) –től	60	60



29. ábra

Az eddig megismertektől elvben semmiben nem különbözi a légsavarok, hajtómű szívócsatornák, áramlásterelő-kúpok, álló terelőlapát-koszorúk stb. jegesedés elleni védelme. Légsavaroknál főleg elektromos áramot, ritkábban folyadékot, a hajtómű elemeinél a minimális odavezetést igénylő forró levegőt vagy olajat használják jégtelenítésre, a kialakítandó jégtelenítési zóna főbb viszonylagos méretei a 29.a. ábrán láthatók.

A fűtés energia szükséglete a fűtendő felület nagyságától (29.a. ábra) és a lapát megfűvási sebességétől (v) függ (29.b;c. ábra). A légsavar-lapátokkal együtt (4) rendszerint a kúp jégtelenítését (5) is biztosítani szükséges (26.d. ábra). Az elektromos áram bevezetése (3) rendszerint szénkefés (1), csúszógyűrűs (2) érintkezővel oldható meg. A rendszer energiatakarékos működtetése a lapátok, 3-4 hajtómű esetén a légsavarok fűtésének időbeni lépcsőzésével biztosítható.

Megjegyzés: a légi járművek vezetőfülkéinek szerves üvegét függetlenül attól, hogy más eljárással is jégtelenítve van-e vagy sem (15. ábra), rendszerint fűtőegységgel (elektromos vagy meleglevegős) is ellátják. Kísérletileg bizonyított, hogy az üveg rugalmassága így lényegesen nagyobb és fokozott védelmet nyújt, pl. idegen tárgy becsapódásakor.

2. A JEGESEDÉS JELZÉSÉRE SZOLGÁLÓ BERENDEZÉSEK

A jegesedést korai, könnyen elhárítható szakaszában még nappal is igen nehéz vizuálisan érzékelni, egyes szerkezeti elemeken (vezérsíkok, szívócsatornák, szárny nem látható oldala stb.) éjszaka pedig nem is lehetséges. Éppen ezért a repülőeszközöket fel kell szerelni olyan megbízható érzékelő- és jelzőrendszerrel, amely időben tájékoztatja a személyzetet, szükség szerint akár működésbe is hozhatja a jégtelenítő-berendezéseket.

A jegesedés-jelző berendezések az alábbi követelményeknek kell megfeleljenek:

- valamennyi repülési üzemmódon a jegesedés megbízható jelzése, akármilyen formában is jelentkezzen az;
- üzembiztos működés;

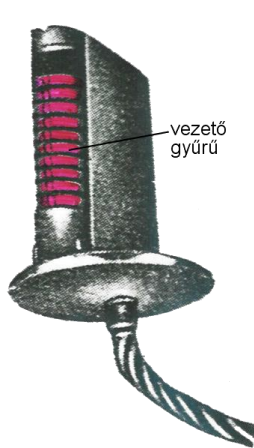
- nagyfokú érzékenység, késleltetés nélkül jelezze a jegesedés kezdetét, intenzitását és megszűnését;
- szerkezeti kialakítása tegye lehetővé a jégtelenítő-rendszer automatikus vezérlését (szükség szerint a környezeti levegő hőmérsékletének mérését is);
- egyszerű üzemeltethetőség;
- kicsi legyen az érzékelő (adó) légellenállása, geometriai mérete és tömege.

A jégtelenítő berendezések alapvető funkcionális egységei az érzékelő, jelátalakító, fény- és hangkijelzők.

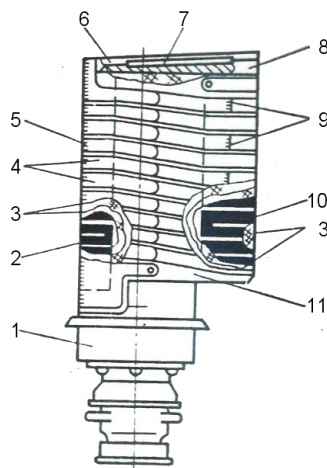
Működési elvük alapján az érzékelők a jegesedés **közvetett** és **közvetlen** jellemzőire reagálhatnak. Az első csoportba tartozók rendszerint a levegőben lévő vízcseppek megléte alapján jeleznek, amennyiben a levegő hőmérséklete is valószínűsíti a jegesedés kialakulását. A másik csoport a ténylegesen létrejött jegesedést érzékeli és jelzi. A két megoldás közül az első az érzékenyebb, a második a megbízhatóbb.

2.1. Közvetett működésű jegesedés-jelzők

A **kontaktusjelzők** a repülőeszköz külső felületén elhelyezett áramvonalazott testek (30. ábra), belsejükben egymástól izolált áramvezető gyűrűkkel. A légköri pára kicsapódása (vagy közvetlen a jégképződés) hatására a gyűrűk elektromosan összekapcsolódnak, a jegesedés-jelző áramköre záródik. Az érzékelőben periodikusan elektromos fűtőszál is működésbe lép, ami kiszárítja a gyűrűk közötti felületet, megszüntetve ezzel az áramkör zártóságát. A fűtés kikapcsolódása után, amennyiben a jegesedés feltételei továbbra is adottak, az ismételt párakicsapódás hatására a jelzőberendezés ismét működésbe lép.



30. ábra



31. ábra

Az **elektrokémiai** jegesedés-jelzőnél koncentrikus, ezüst szálakkal bevont hengerek között lítium kloriddal (száraz elektrolittal) átitatott üvegszálak szigetelés van. A légköri páratartalom hatására a lítium klorid vezetővé válik, zárja a jelzőberendezés áramkörét. A páras zónán kívül az üvegszálak anyag gyorsan kiszárad, jégkristályokra pedig nem reagál.

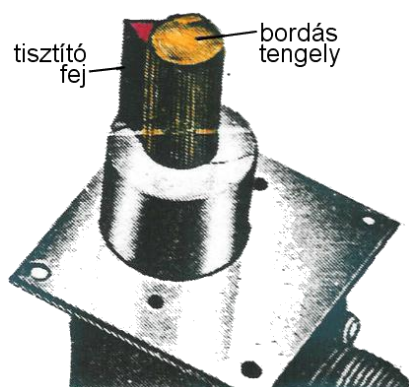
A **hőátadás és intenzitásjelző** $v_{m\ddot{u}sz} = 100\div 1000$ km/ó sebesség-tartományban használható (31. ábra). Működése azon alapszik, hogy az adott és ismert hőmérsékletűre felmelegített elem (2; 10) hőátadását hasonlítják össze a száraz levegőn mért adatokkal.

A melegítő elemek (2; 10), valamint a hideg és meleg forraszu hőérzékelők (5; 9) között üvegszálak szigetelő (3) található. A berendezést áramvonalas házban (1) építik be, amelyet menetes záró-fedéllel (8) látnak el. Végrehajtó blokkja a repülési magasság és a környezeti hőmérséklet adatait is figyelembe veszi.

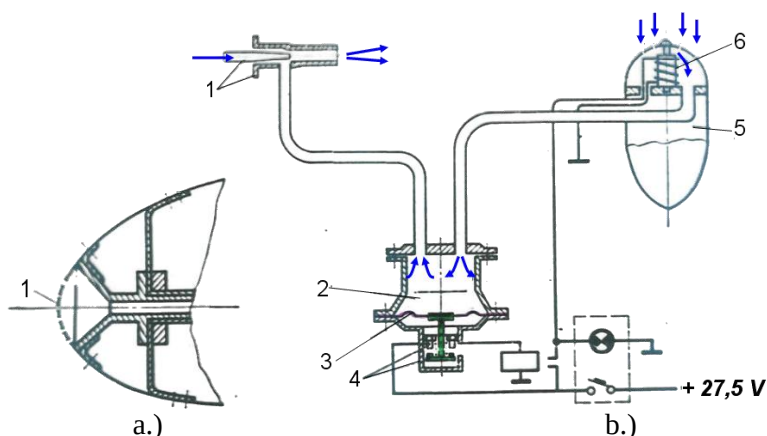
A **jegesedés előrejelzésére** lehetőséget nyújt a fedélzeti és földi rádiólokációs rendszer, valamint a vizuális megfigyelés. Keresik a lehetőségét az ultrahang és infravörös spektrumban történő előrejelzésnek is.

2.2. Közvetlen működésű jegesedés-jelzők

A **mechanikus jegesedés-jelzők** a legegyszerűbb szerkezeti kialakítású ilyen berendezések, mivel melegítőegységgel nincsenek felszerelve. Két fő szerkezeti egységük a rugalmas felfüggesztésű, elektromotorral forgatott bordástengely (1) és a késélű tisztítófej (2), melynek hengeres fala 0,1 mm-re van a bordástengelytől (32. ábra). Ez a rés elég a tengely akadálymentes forgásához. Jegesedés esetén a megnövekedett sűrűlódás következtében a tengely megszorul a tisztítófejhez képest, így csak a rugókkal felfüggesztett meghajtómotor fordulhat el néhány fokkal. Ebben a helyzetben kikapcsolja a motor áramkörét, illetve zárja a jelzőberendezését. A jegesedés megszűntekor a rugók eredeti helyzetbe állítják a motort és az újból forgatni kezdi a bordástengelyt.



32. ábra



33. ábra

Az **elektro-pneumatikus jelzőberendezések** felépítése hasonló a repülési magasság és sebesség mérésére használatos pitot-csőekével, rendszerint a szárny és a hajtómű szívócsatornájának belépő élén találhatók. A rendszer akkor lép működésbe, ha az érzékelő résein (1) keresztül megszűnik a torló levegő betáplálása (33.a. ábra).

Helikopterek számára kialakított jegesedés-érzékelő látható a 33.b. ábrán. Normál körülmények között a membrán (3) feletti tér (2) nyomását a statikus érzékelő (5) által jelzett nyomás és a hajtómű szívócsatornájában elhelyezett ejektor szívásának különbsége határozza meg. Jegesedéskor az érzékelő (5) résein a statikus nyomás bevezetése megszűnik, a membrán (3) a szívás hatására elmozdul felfelé, működésbe hozza a mikrokapcsolót, zárva ezzel a jelzőberendezés és az érzékelő (5) fűtőáramkörét (6).

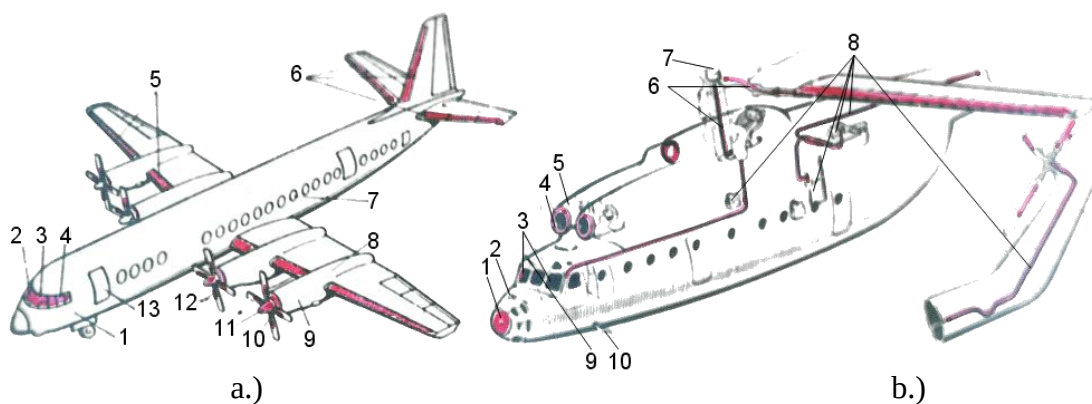
A hajtómű szívócsatornájába elhelyezett ejektor (1) következtében a berendezés egyaránt hatásosan működik repülés, függés és földi üzem közben járó hajtóműnél. E megoldás hátránya, hogy az érzékelő (5) szennyeződéssel való eltömődése esetén folyamatosan működni kezd a rendszer.

A hengeres érzékelő fej belsejében egy kapszulában radioaktív izotópot (Sr^{90} ; Y^{90}) helyeznek el, melynek kisugárzási intenzitását a borításon kiképzett ablakon keresztül a részecske-számláló érzékeli.

érzékelő fej
 sugárzó anyag
 lerakódott jegesedés
 fűtőszál kettős szigeteléssel
 falak
 ablak
 sugárzás számláló
 0,3
 0,2

Megjegyzés:

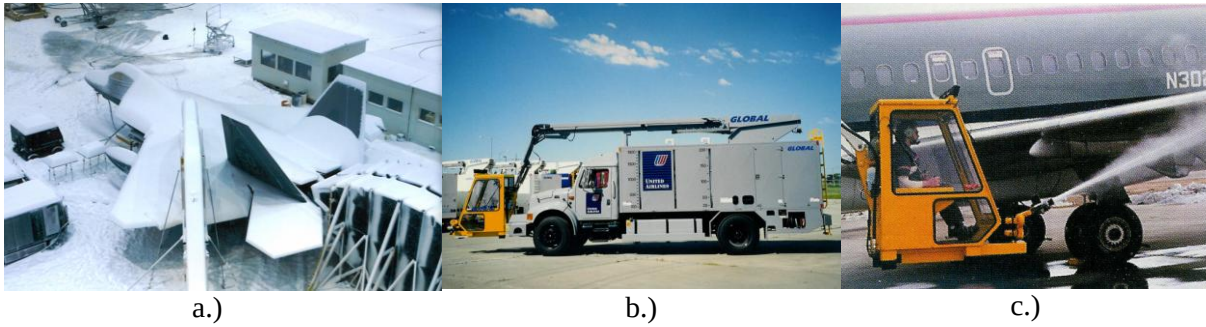
- az izotópos érzékelő jól alkalmazható automatikus jégtelenítő-rendszerek vezérlésére is;
- katasztrófát szenvedett légi jármű felkutatásánál különös gondot kell fordítani az izotópot tartalmazó kapszula felkutatására és előírásos tárolására, valamint elszállítására.



1, 2 – elektromosan fűtött ablak; 3 – fűtött ablak mechanikus törlő berendezéssel; 4 – szívócsatorna forrólevegős jégtelenítése; 5 – izotópos jegesedés-jelző; 6, 7 - forgószárny-lapátok elektromos fűtése; 8 – faroklégcsavar folyadékos jégtelenítése; 9, 10 – elektromos fűtésű antenna és érzékelő

35. ábra

A 35. ábrán, a megismert berendezésekből felépülő jégtelenítő- és jegesedés-jelző rendszerek egy-egy lehetséges kialakítása látható a merev- és forgószárnyas repülőgépek esetében.



36. ábra

Megjegyzés: A légijárművek fedélzeti rendszerei csak a repülés közben kialakuló jegesedés leolvasztására alkalmasak, az állóhelyen lerakódott hó és jég (36.a. ábra) eltávolítását külön földi szolgálat végzi, speciális célberendezésekkel (36.b. ábra). Utóbbiak rendszerint zárt, mozgatható gondolára épített speciális fúvókák segítségével (36.c. ábra), nagynyomású levegővel, speciális folyadékokkal alkalmasak a sárkány tetszőleges pontjának tökéletes megtisztítására.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Dimtrijev, V. G. szerk.: Proektirovanie, konsztrukcii i szisztemi szamoletov i vertoletov MASINOSZTRONIE, Moszkva, 2004.
- [2] Fielding John P.: Aircraft Design CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 1999.
- [3] Óvári Gyula: Merev- és forgósárnyas repülőgépek szerkezetana III. KGYRMF, 1990.