

Katonai helikopterek porkiválasztó rendszerei

Jelige: *IPS*

Pályamunka lezárásának időpontja: *2014. április 25.*

2015.

TARTALOMJEGYZÉK

Bevezetés	3
Alkalmazott jelölések	4
1 A porkiválasztás szükségessége	6
1.1 Kompresszor lapátok eróziója.....	6
1.2 Egyéb hatások	7
2 Porkiválasztó rendszerek.....	7
2.1 Porkiválasztó rendszerek, pro és kontra.....	9
2.1.1 A szűrési hatások.....	9
2.1.2 Környezetbe elvezetett levegő.....	9
2.1.3 A szennyezett levegő elvezetése.....	10
2.1.4 A porkiválasztón eső nyomásváltozás.....	10
2.2 Inerciális porkiválasztó rendszerek (IPS)	11
2.2.1 Axiális IPS szűrők	12
2.2.2 Radiális IPS szűrők.....	13
2.2.3 A központi test kialakítása.....	14
2.2.4 A szűrő öntisztítása (ejektálás).....	15
2.2.5 A szennyezett- és a tiszta tömegáram elkülönítése	16
2.2.6 A fejlesztések szükségessége	18
2.2.7 Értékelés	19
2.3 Örvénykeltős porkiválasztó rendszerek (VTS).....	20
2.3.1 A szennyezett levegő elvezetése.....	22
2.3.2 A lapátozás fontossága	22
2.3.3 Az szűrőrendszer elrendezése.....	23
2.3.4 Az örvénykeltő szűrő működése elve.....	25
2.3.5 Nyomásváltozások a szűrőrendszerben	27
2.3.6 Értékelés	28

2.4	Porkiválasztó szűrők (IBF)	29
2.4.1	A szűrőbetét kialakítása.....	31
2.4.2	Az IBF hatása a hajtómű paramétereire	33
2.4.3	Felszerelhetőségi lehetőségek	33
2.4.4	Az IBF szűrése	34
2.4.5	Az IBF modellezése.....	36
2.4.6	Értékelés	40
	Összegzés	42
	Irodalomjegyzék	45

BEVEZETÉS

Mind a civil, mind pedig a katonai repülésben elsődleges és elengedhetetlen szempont a végrehajtó személyi állomány, valamint az adott repülőeszköz biztonsága, épsége. Ennek egyik legfontosabb aspektusa, hogy a hajtómű minden körülmények között kielégítő teljesítményt szolgáltatson a repülő technika kielégítő üzeméhez. Ez természetesen nem csak a szabályozó rendszerek megfelelő működését, hanem a hajtómű külső, mechanikai szennyeződések elleni védelmét is magában foglalja, hiszen a forgó gépegységek (kompresszor, turbina) pontos áramlástan kialakítása, precíz illesztése és ezzel kielégítő üzeme is jelentős kárt szenved, ha a külső szennyeződések erodálják azt. Különösen nagy jelentőségű ez a helikopterek hajtóművei (turboshaft) esetében.

A forgószárnyas repülőeszközök feladataik nagy részét földközelségben hajtják végre, míg merevszárnyú társaik csak a fel- és leszállás fázisában kerülnek ilyen közel a talajszinthez. Emellett földi hajtóműpróba, kigurulás során is könnyen szívhat magába idegen anyagot a hajtómű. Nem is beszélve a nagy szennyezettségű területeken, sivatagokban szolgálatot teljesítő helikopterekről, amelyek hatványozottan ki vannak téve a beszívott por hajtómű károsító hatásának. Ezek a tények, valamint a korábbi hajtómű üzemeltetés során szerzett tapasztalatok indokolták egy olyan rendszer kifejlesztését, amely ilyen szélsőséges működési körülmények között is megszűri, elvezeti a beszívott levegőáram szennyeződéstartalmának jelentős részét.

Tanulmányaim során először a Mi-24 TV3-117 hajtóművének PZU (ПЗУ-Пылезащитное Устройство) típusú porkiválasztó rendszerével találkoztam. Ez egy inerciális elven működő porkiválasztó rendszer, amelynek megismerése után felkeltette az érdeklődésemet, hogy milyen más működési elvű, más kialakítású szűrőrendszereket használnak még a helikopterek szívócsatornája előtt és azok milyen hatással vannak a hajtómű üzemére.

Dolgozatom célja ezen porkiválasztó rendszerek elemzése, adott szempontok szerinti értékelése és összehasonlítása, valamint a hajtómű működésére gyakorolt hatásának bemutatása.

ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK

c :	részecske koncentráció [—]
$\dot{m}$:	teljes tömegáram [kg/s]
$\dot{m}_p$:	tisztítatlan tömegáram [kg/s]
ρ :	megtisztított tömegáram sűrűsége [kg/m ³]
ρ_p :	porrészecskék átlagos sűrűsége [[kg/m ³]
A :	porkiválasztó rendszer belépési keresztmetszete [m ²]
A_p :	környezetbe elvezett tisztítatlan levegőáram csatornájának átmérője [m ²]
c_1 :	megtisztított tömegáram áramlási sebessége [m/s]
c_2 :	tisztítatlan tömegáram áramlási sebessége [m/s]
$c_{bel.}$:	tömegáram átlagos belépési sebessége [m/s]
D :	aerodinamikai ellenállási erő [N]
d_p :	részecske átmérő [m]
μ :	dinamikai viszkozitás ¹ : [Pa s]
c_r :	áramlási sebesség radiális komponense [m/s]
c_t :	áramlási sebesség tangenciális komponense [m/s]
F_c :	részecskékre ható centrifugális erő [N]
B :	részecskékre ható felhajtóerő [N]
r :	részecskék forgó mozgásának görbületi sugara [m]
d_0 :	kollektor átmérője [m]
d_{pk} :	kritikus részecske átmérő [m]
ϑ :	tangenciális és axiális sebességkomponens aránya [—]
p :	VTS rendszer nyomásparamétere [—]
p_r :	nyomáscsökkenés a külső áram szűkülő keresztmetszetében [Pa]
p_e :	nyomáscsökkenés a belépő keresztmetszettől a szeparátorig [Pa]
$\dot{Q}$:	belépő térfogatáram [m ³ /s]
k :	permeabilitás [m ²]
Δx_b :	szűrőbetét vastagsága [m]
p_1 :	szűrőbe belépő környezeti nyomás [Pa]
p_2 :	szűrőből kilépő nyomás [Pa]
α :	porréteg ellenállására jellemző szám
Δx_p :	porréteg vastagsága [m]

¹ Az a nyíróerő, amely az áramló közegben az alakváltozással szemben hat.

V_p :	porréteg térfogata [m^3]
A_f :	effektív szűrési felület [m^2]
η :	szűrési hatásfok [%]
m_{ps} :	megszűrt részecskék tömege [kg]
m_p :	levegőáram teljes portartalmának tömege [kg]
ρ_c :	porréteg sűrűsége [kg/m^3]
$\frac{d\Delta x}{dt}$:	porréteg vastagságának időbeni megváltozása (első időderiváltja)
f :	leváló részecskék aránya a porrétegbe beépülő részecskékhez viszonyítva [—]
t :	idő [s]

A PORKIVÁLASZTÁS SZÜKSÉGESSÉGE

Kompresszor lapátok eróziója

Elsőként megvizsgálom, hogy a beszívott szennyeződések milyen hatással vannak a mozgó gépegységekre. Ezek közül is legfontosabb a kompresszor, hiszen a szívócsatorna után ez az a gépegység, amelyet károsít a forgó alkatrészek magas fordulatszáma miatt a különböző koncentrációban port tartalmazó levegő [1. ábra]. Különösképpen veszélyeztetettek ebből a szempontból a sivatagban szolgálatot teljesítő katonai helikopterek, ahol a levegő porkoncentrációja elérheti a $1,177 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$ értéket is. Ez azt jelenti, hogy egy közepes levegőszállítású helikopter, akár percenként 1 kg szennyező részecskéket tartalmazó levegőt is magába szívhat, amely a javításközi üzemidőt akár 90%-al is csökkentheti megfelelő szűrőrendszer alkalmazása nélkül. Ezt nagyon jól szemlélteti, hogy a vietnámi háború során a forgószárnyas repülőeszközök hajtóműveinek egy része 100 repült óra után teljesen használhatatlanná vált. Az angol terminológia használja a brown-out kifejezést, amely egy olyan földközeli repülési helyzetet definiál, amely során a forgószárny által felkavart por hatására a hajózó teljesen elveszti a látóképességét [2. ábra]. Egy ilyen esemény során a beszívott por akár a 2.5 g/m^3 koncentrációt is elérheti [1][4][7].



1. ábra Erodált kompresszorlapátok²

Ezeknek a negatív hatásoknak a vizsgálatát szélcsatornában végzik, amelybe magas por koncentrációjú levegőt vezetnek be. Egy kísérlet során axiál kompresszor egy fokozatát helyezték ilyen szélcsatornába és azt tapasztalták, hogy a belépő élek elkoptyak, a kilépő élek elvékonyodtak, a lapátok megrövidültek és a felületi érdességük is megnőtt [5].

Ezek a hatások rövidtávon a kompresszor munkavégző képességének csökkenéséhez

² Varga Béla okl. mk. alezredes: Katonai helikopter hajtóművek teljesítmény és hatásfok növekedésének műszaki technológiai háttere, valamint ezek hatása harcászati jellemzőikre, 2013. 101 p.

vezetnek, ami a nyomásviszony csökkenését eredményezi. Ez pedig egyértelműen negatív hatással van a gázturbinás hajtóművek termikus hatásfokára.³

Egyéb hatások

A kompresszorlapátok erózióján kívül természetesen hatással van a beszívott por a turbinalapátokra is.

Mivel a részecskék nagy része az első kompresszorfokozatoknál ütközik a lapátokkal, így az égőtérhez és a turbinához a por már csak kisebb koncentrációban jut el. Ennek ellenére eltömíthetik a turbinalapátok hűtőfuratait és az illesztések helyeit, üvegréteget képezhetnek a lapát felületén, ami erózióhoz és túlmelegedéshez vezethet.

Ezen kívül káros hatással lehet még a beszívott por a hajtómű olajrendszerére. Itt eltömítheti a csővezetékeket, és a szűrőket, ezzel gátolva a szivattyú működését, erodálhatja a tömítéseket, legrosszabb esetben belső tüzet is okozhat a hajtómű olajrendszerében.



2. ábra Brownout jelenség⁴

Eróziós szempontból nagyon lényeges a hajtómű mérete. Amíg a nagyobb gázturbináknál a forgó kompresszorlapátok végréseinek nagysága relatíve kicsi a lapáthosszhoz viszonyítva, addig a kisebb gázturbinás hajtóműveknél nagyon fontos a minél pontosabb, finomabb illesztés, hiszen itt sokkal jelentősebb a végrés viszonyított nagysága a lapáthosszhoz képest. Ezért a kis gázturbinák esetében az esetleges por okozta erózió szignifikánsabban jelentkezik, nagyobb mértékben befolyásolja a kompresszor nyomásviszonyát [3][8][9].

PORKIVÁLASZTÓ RENDSZEREK

1969-70-ben készült egy tanulmány, amely felvetette a hajtóműbe áramló levegő szűrésének

³ A termodinamika II. főtétele szerint a hő csak veszteségek során alakítható át mechanikai munkává, így

$$\eta_t = 1 - \frac{q_{ki}}{q_{be}}$$

⁴ <http://htka.hu/2012/01/17/itt-a-megoldas-brown-out-ellen/>

szükségességét, egy olyan rendszer létrehozásával, amely a szívócsatorna előtt helyezkedik el és annak szerves részét képezi. A tanulmány sikeresnek bizonyult, így az UH-60 típusú helikopter T-700-as hajtóműve volt az első, amelyen beépített porkiválasztó rendszert alkalmaztak. Ez a kialakítás durva por esetében 91,7 %-os, finom por esetében 64%-os szűrési hatékonyságot mutatott [4].

Mint már említettem ez a rendszer a hajtómű részét képezte, arról nem lehetett eltávolítani, így a hajtómű a szűrőrendszer minden negatív hatását magán viselte egész élettartama folyamán. Hiszen a repülőtechnika üzemeltetése kompromisszumok sorozata, így egy porkiválasztó rendszer alkalmazása is szűrési hatékonysága mellett a kompresszor végnyomását csökkenti, mert a levegő nem akadálytalanul áramlik be a szívócsatornán keresztül, hanem a szűrőben irányt vált, így az áramlási viszonyok kedvezőtlenebbül alakulnak, ennek következtében nem érjük el a megfelelő nyomást a kompresszor kilépő keresztmetszetében, amely valamelyest csökkenteni fogja a hajtómű termikus hatásfokát.

A porkiválasztó rendszereket manapság három fő csoportra oszthatjuk [3]:

- Inerciális porkiválasztó rendszerek (Inertial Particle Separator)
- Örvénykeltős porkiválasztó rendszer (Vortex Tube Separator)
- Porkiválasztó szűrők (Inlet Barrier Separator)

Ezen rendszerek összehasonlítását és vizsgálatát csak megfelelő standard körülmények között lehet objektíven végrehajtani.

Mivel a szűrők kialakításuk figyelembe vételével különböző hatásfokkal működnek, így szükségessé vált egy olyan egységes vizsgálati módszer kidolgozása, amely egyértelműen feltünteti az egyes szűrők közötti hatékonyság különbségét. Egy ilyen egységes munkafolyamat életre hívásának a poros területek eltérő mivolta szabott gátat. Az egyes porok nagysága nagyon széles skálán mozoghat, amely megnehezíti a rendszerek egységes értékelését. Ennek kiküszöbölésére 1992 áprilisában az ISO/TC 22 tagjai jóváhagytak, egy új munka okmányt, amelynek célja az volt, hogy a hajtóművek porkiválasztó rendszereit egységes keretek között lehessen vizsgálni. Hiszen ha laboratóriumi körülmények között, ugyanolyan porkoncentrációjú levegőt használunk, amelyben ráadásul még a tartalmazott por paraméterei is megegyeznek, akkor sokkal inkább összehasonlíthatóvá válnak az egyes szűrő rendszerek, amely minden esetben elősegíti az optimális eszköz kiválasztását. A szabványosítás folyamán olyan tulajdonságokat, paramétereket vettek figyelembe, amelyek egzakt módon definiálják az egyes porfajtákat. A vizsgálathoz Arizonából származó port használtak, de emellett fontos volt a szemcsék nagysága, alakja, kémiai összetétele is, és

természetesen az sem elhanyagolható, hogy a por milyen koncentrációban van jelen a levegőben. Ezeket a paramétereket figyelembe véve az ISO 12103-1 szabvány négy különböző porfajtaát különböztet meg.

- A1: ultra finom por (0—10 mikron)
- A2: finom por (0—80 mikron)
- A3: közepes por (0—80 mikron)
- A4: durva por (0—180 mikron) [6]

Ezzel a szabványosítással lehetőség nyílt arra, hogy a különböző működési elvű porkiválasztókat érdemben, egységes keretek között vizsgálják, így a rendszerek paramétereinek összehasonlítására minden esetben ugyanazok a külső környezeti tényezők legyenek befolyással.

Porkiválasztó rendszerek, pro és kontra

A szűrés hatásfok

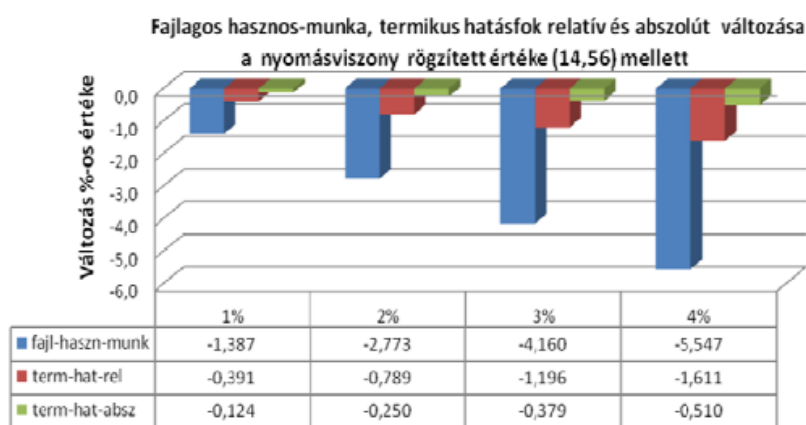
Ez az a tényező, amelyért alapvetően alkalmazzuk ezeket a porkiválasztó rendszereket. Ennek nagysága mutatja meg, hogy az adott koncentrációban jelen lévő szennyeződések hány százalékát képes megszűrni az adott kialakítású eszköz. Természetesen ez az érték a fent említett különböző finomságú porok tekintetében más és más, így a paraméter értékelésénél fontos összevetnünk, hogy az adott százalékos érték milyen finomságú porra vonatkozik, illetve, azt, hogy a forgószárnyas repülőeszköz működési környezetére milyen jellegű por jellemző. E két paraméter kielégítő ismerete segítheti elő az optimális szűrőrendszer kiválasztását.

Környezetbe elvezetett levegő

A tehetetlenségi elven működő porkiválasztó rendszerek sajátossága, hogy az áramlást irányváltásra kényszerítve szeparálják el a szennyeződések a tiszta levegőáramtól. Ennek negatív következménye, hogy a porrészecskékkel együtt az egyébként hasznos levegőáram egy részét is visszajuttatják a környezetbe. Ezért rosszabb esetben előfordulhat, hogy a hajtómű nem kapja meg a kielégítő működéshez szükséges levegőáramot. Így mind az elvezető csatorna, mind a központi, tiszta levegőt szállító csatorna keresztmetszetét, illetve a kettő arányát tervezéskor úgy kell meghatározni, hogy nagyobb porkoncentrációjú levegő elvezetésére is alkalmas legyen, ugyanakkor a hajtómű szükséges tömegárama is rendelkezésre álljon bármely működési körülmények között.

A szennyezett levegő elvezetése

Inerciális rendszerek esetén az elkülönítés után egy gyűjtőbe vezetett szennyezett levegő környezetbe juttatása, nagynyomású levegő (ejektor-levegő), vagy ventilátor felhasználásával történik. Ejektálás esetén a levegőt a nagynyomású kompresszor utolsó fokazataitól vezetik el, csökkentve ezzel a kompresszor nyomásviszonyát. Ennek értéke legrosszabb esetben is maximum 3% lehet.



3. ábra 1–2–3–4%-os turbina hűtő-levegő elvétel hatása a fajlagos hasznos-munkára és termikus hatásfokra⁵

Az 3. ábrán az 1—2—3—4%-os, kompresszortól megcsapolt levegő hatását látjuk a fajlagos hasznos munkára, illetve a termikus hatásfokra. Szemmel látható és jelentős romlás figyelhető meg a fajlagos hasznos munka tekintetében. Ha 3%-osnak feltételezzük az ejektálásra megcsapolt levegő mennyiségét, a fajlagos hasznos munka több mint 4%-al, a relatív termikus hatásfok majdnem 1,2%-al romlik. Ezek az értékek is mindenképpen a porkiválasztó rendszerek negatív hatásaként könyvelhetők el [1].

A porkiválasztón eső nyomásváltozás

Legyen az akár inerciális elven működő porkiválasztó, akár mechanikus szűrő, minden esetben az áramlás rajta nem akadálytalanul halad át. Vagy az irányváltás miatt, vagy a súrlódás hatására változnak meg az áramlás körülményei. Mindkét esetben a szűrő bemenő keresztmetszete és kimenő keresztmetszete között nyomáskülönbség lép fel. Természetesen ennek a hatása sem kedvező a hajtómű szempontjából, hiszen a kompresszornak nem a környezeti, hanem a környezetinél alacsonyabb nyomásról kell komprimálnia a levegőt, amely így kisebb végnyomást eredményez.

A pozitív és negatív tényezők ismeretében már részletesebben vizsgálhatók a porkiválasztó

⁵ Varga Béla okl. mk. alezredes: Katonai helikopter hajtóművek teljesítmény és hatásfok növekedésének műszaki technológiai háttere, valamint ezek hatása harcászati jellemzőikre, 2013. 74 p.

rendszerek egyes típusai.

Inerciális porkiválasztó rendszerek (IPS⁶)

Az inerciális porkiválasztó rendszerek, mint a nevük is mutatja tehetetlenségi elven működnek. [4. ábra] A beáramló levegőt hirtelen irányváltásra kényszerítik, így a nagyobb tömegű, nagyobb lendülettel rendelkező porrészecskék a szűrő falához szorulnak, innen egy csatornán keresztül egy gyűjtőbe kerülnek, ahonnan ejektor-levegő felhasználásával a környezetbe jutnak vissza.



4. ábra Mi-24 harci helikopter IPS szűrővel felszerelve⁷

Az IPS rendszerek méretben, alakban és kialakításban nagyon különbözőek lehetnek, attól függően, hogy milyen hajtómű szívócsatorna előtt kerülnek felhasználásra. Ezek a szűrők a hajtómű szerves részét képezik, arról nem leszerelhetőek, így a hajtómű teljesítményére negatív hatással vannak, akkor is, ha alkalmazásukat a külső környezet nem teszi indokolttá. Egyes kialakításoknál a jobb szűrési hatásfok elérése érdekében a VTS rendszereknél alkalmazott spirális örvénykeltő lapátozás kerülhet felszerelésre. Újabb típusoknál alkalmazhatnak aktív áramlásszabályozó elemeket, hogy a rendszer hatásosságát optimalizálják az adott repülési körülményekhez.

Az IPS szűrők leginkább elterjedt felosztása a belépő levegő iránya szerint történik. Ennek megfelelően megkülönböztetünk axiális és radiális bemenetű porkiválasztót.

Az axiális szűrőknél a levegőáram axiális irányú sebessége a központi test hatására radiális irányba változik, így egy gyűrűs csatornán keresztül gyorsulva eléri az áramlás leválasztót,

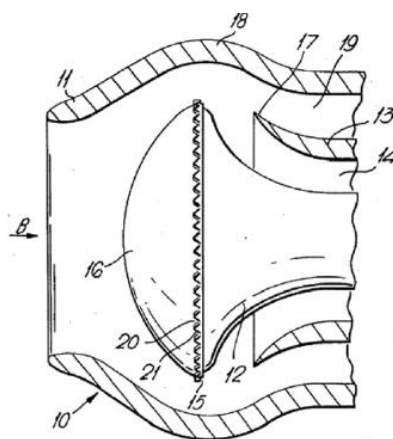
⁶ Inertial Particle Separator: Inerciális Porkiválasztó

⁷ <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ac/row/mi-24-20000217-f-8825t-0021.jpg>

ahol elkülönítésre kerül a szennyezett és a tiszta levegőáram. A radiális bemenetű rendszereknél az áramlásból kiváló nehezebb szennyeződések egy U alakú csatorna külső faláról jutnak egy gyűjtőbe, ahova egy fúvókán keresztül nagynyomású levegőt juttatunk. Ennek az ejektor-levegőnek a szívó hatása juttatja vissza a szennyezett levegőáramot a környezetbe [1][2][3][4].

Axiális IPS szűrők

A szűrő felépítése ennél a rendszernél egy központi testből (16) áll, egy ezt körülvevő burkolatból (18), valamint egy elosztóból (17), amelynek feladata a szennyezett (19) és a megtisztított levegő (14) elkülönítése [5. ábra].



5. ábra Axiális bemenetű IPS⁸

A központi test végzi az áramlás elterelését a gyűrűs csatornán keresztül úgy, hogy a burkolat kialakításának, valamint a központi test görbültségének köszönhetően az áramlásra merőleges keresztmetszet folyamatosan csökken, gyorsítva ezzel az áramlás sebességét. Pontosabban a központi testet egy gombaként lehet elképzelni, amely úgy van kialakítva, hogy egy bizonyos pontig a gyűrűs csatorna keresztmetszetének átmérőjét növeli, majd innentől egészen az elkülönítésig folyamatosan csökkenti. Abban a pontban, ahol a központi test áramlással szembeni gömbszerű felületének folytonossága megszakad, alakja megtörik, az áramlást hirtelen irányváltásra kényszeríti úgy, hogy a levegőáram szorosan a belső fal felületéhez tapadva halad tovább. Egészen eddig a pontig az áramlás tehát folyamatosan gyorsul, növelve ezzel mind a levegő, mind pedig a benne lévő szilárd részecskék tehetetlenségét. A porrészecskék nagy része, nagyobb tömegük, ebből fakadóan nagyobb tehetetlenségük miatt nem képesek a levegővel együtt a belső fal mentén maradni, így az osztott csatorna burkolat felőli részén keresztül távoznak, míg a megtisztított levegő a belső felület mentén a hajtómű

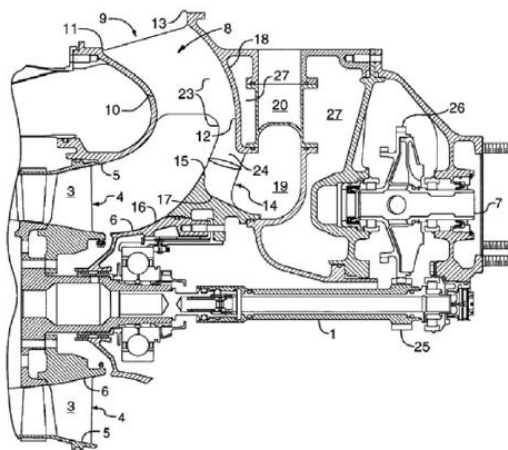
⁸ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 233 p.

kompresszorának belépő keresztmetszetére áramlik. Sajnos nem csak a szilárd szennyeződések távoznak az osztott csatorna külső ágába, de a teljes tömegáram egy része is, amelyet a csatorna keresztmetszetének változtatásával tudunk kompenzálni.

Természetesen nem elég csak elkülöníteni a szennyeződéseket a tiszta levegőáramtól, de meg kell oldani azoknak a kivezetését is, hiszen a külső csatornában lévő levegő mennyisége nem mindig elég, hogy a nehezebb részecskéket az ejektor gyűjtőjébe szállítsa [3][4].

Radiális IPS szűrők

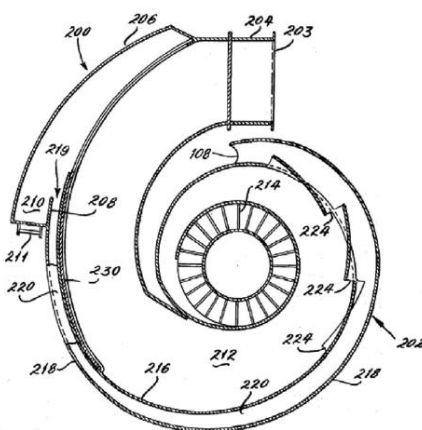
A radiális IPS rendszerek kialakításukat tekintve képezhetik szerves részét a hajtóműnek, mint ahogy azt a 6. ábrán is láthatjuk, de akár utólag felszerelhető kivitelben is alkalmazhatók.



6. ábra Radiális bemenetű IPS rendszer⁹

Ha az előbbi ábrát tekintjük a két szimmetrikusan elhelyezkedő radiális bemenet egyikét láthatjuk. A levegő ezen át (9) áramlik a csatornába, amely egy homorú megvezetésen (10) keresztül a kompresszor felé irányítja a levegőt, míg a csatorna jobb oldali külső ívelt fala (12) a tehetetlenségükönél fogva ide szoruló részecskéket egy elterelő csatornába (24) juttatja. A leválasztott részecskék ezen keresztül egy gyűjtőbe (19) kerülnek, ahonnan egy szivattyú segítségével a környezetbe jutnak vissza.

⁹ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 233 p.



7. ábra Spirális radiális bemenetű IPS rendszer¹⁰

A 7. ábrán egy felszerelhető radiális IPS szűrő látható, amelynél az áramlás egy ívelt csatornán lép be, ahol spirálisan halad befelé a kompresszor belépő keresztmetszete felé. A részecskék itt is elkülönítésre kerülnek, a nehezebb szennyeződések nagyobb tehetetlensége miatt és egy másik csatornában haladnak tovább, ahonnan a kompresszortól elvezetett levegő ejektor-hatásának köszönhetően kerülnek vissza a környezetbe.

Összehasonlítva a két rendszert az axiális szűrők bemenete a tömegáram irányára merőleges, míg a radiális szűrők esetében párhuzamos. Így az előbbi szűrőrendszer kevésbé torzítja az áramlást, kisebb nyomásvesztést okoz. Fontos megemlíteni a két rendszer elhelyezkedését. Míg az axiális bemenetű szűrő minden esetben a forgószárny agy előtt helyezkedik el, minimálisra csökkentve ezzel a hajtómű által kibocsátott égéstermék újra beszívásának kockázatát, addig a radiális por kiválasztók sokszor a forgószárny agy mögött kerülnek kialakításra. Így ebben az esetben sokkal nagyobb az újra beszívás kockázata. Bár az előbb elmondott tények mindegyike az axiális rendszer alkalmazását szorgalmazza nem szabad elfelejtenünk, hogy a radiális szűrő kialakítása kisebb súlytöbbslettel jár, javítva ezzel a helikopter hasznos teherbírását [3][4].

A központi test kialakítása

A központi test két fő feladata az axiálisan beáramló levegő radiális irányba történő elterelése, valamint a pontosan tervezett kialakításának köszönhetően a leválasztott porrészecskék ejektáló gyűjtőbe juttatása. Fontos még, hogy a nehezebb részecskék, amelyeket az áramló levegő nem képes magával vinni, ne kezdjenek el a burkolat és az ívelt központi test között pattogni növelve ezzel annak kockázatát, hogy a megtisztított levegőáramba jutnak. Ez a

¹⁰ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 234 p.

jelenség nem csak a beszívott por alakjától, tömegétől és a méretétől függ, de szoros kapcsolatban áll a falak felületi minőségével. A pattogó részecskék erodálhatják azt, rontva ezzel a kiválasztó hatásosságát. Másik probléma a központi test felületén felhalmozódó nedvesség. Amennyiben a szennyeződések találkoznak ezekkel a vízcseppekkel tömegük annyira megnő, hogy ugyanaz a szituáció áll elő, amely a nehéz porszemcséknél, azaz a levegőáram nem képes elszállítani őket az ejektáló gyűjtőbe.

A központi test kialakításai nagyon különbözőek lehetnek. Ez függ a hajtómű belépő keresztmetszetének nagyságától, ami természetesen meghatározza a teljes rendszer nagyságát is, valamint a hajtómű tömegáram szükségletétől. A legtöbb esetben úgy alakítják ki a központi test kúposágát, hogy annak átmérője az egész szűrőrendszer átmérőjének legalább a 75 %-át elérje [3].

A szűrő öntisztítása (ejektálás)

Természetesen az ejektáló rendszer is az IPS szerves részét képezi, feladata a leválasztott, szennyezett levegőtömeg környezetbe juttatása, biztosítva ezzel az IPS szűrő öntisztító mivoltát. Kialakításánál a tervezők alapvetően szem előtt tartják, hogy a rendszer megfelelő szívóhatással rendelkezzen, ami minden körülmények között biztosítja a szennyeződések eltávolítását a gyűjtőből. Fontos még, hogy a rendszer minél kisebb tömeggel rendelkezzen, nagy szennyezettségű területen is mindig megbízhatóan működjön, de a legfontosabb követelmény az ejektor rendszerrel szemben, hogy megfelelően kapcsolódjon, integrálódjon a szűrőhöz. A megfelelő szívást a kompresszortól elvezetett nagynyomású levegővel biztosítják egy fűvókán keresztül, valamint a rendszer részét képezi még a kivezető nyílás, ahol a szennyezett levegő elhagyja a helikopter sárkányszerkezetét.

Néhány kialakításnál a szennyezett levegő kivezetése nem axiális, hanem radiális irányban történik. Egyszerűbb rendszereknél ez a megoldás előnyös, javítja a szívás hatásosságát, valamint súlymegtakarítást is eredményezhet. Ugyanakkor bonyolult kialakítású szűrőrendszereknél a megvalósítása nehézkes, és magában hordozza annak valószínűségét, hogy a hajtómű újra magába szívja a szennyezett levegőt.

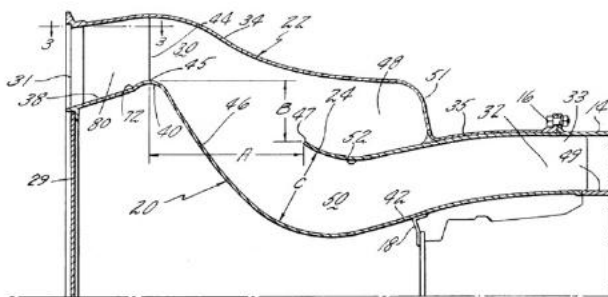
Az axiális elvezetésű IPS rendszereknél a leválasztott levegő először egy gyűrűs csatornába kerül, és innen távozik egy elvezető csatornán keresztül. Ez magában hordozza annak a veszélyét, hogy a kivezető nyílástól távolabb a csatorna kerületének mentén az áramlás tulajdonságai megváltoznak, egyenlőtlené téve ezzel a szennyezett levegő szívását, növelve a kockázatát annak, hogy a kerület mentén elhelyezkedő szennyezett részek a megtisztított áramlásba jutnak. Természetesen ezzel a tiszta levegőtömeg áramlását is instabillá teszik,

amely negatív hatással van a hajtómű kompresszorának hatásosságára is.

Sajnos a külső áramba került szennyeződések mellett a beáramló levegő egy része is távozik. Ennek nagysága nagyon lényeges mind az IPS rendszer, mind pedig a hajtómű szempontjából, mert ha a környezetbe elvezetett levegőmennyiség túl kicsi, akkor a szűrési hatásfokot, ha túl nagy, akkor pedig a hajtómű teljesítményét ronthatja jelentős mértékben. Abban az esetben, ha a szennyezett levegő elvezetését nem ejektorlevegő, hanem ventilátor felhasználásával valósítjuk meg, annak meghajtását a hajtómű biztosítja a fajlagos hasznos munka rovására. Ezt kiküszöbölendő, olyan megoldást is alkalmaznak, amelynél egy fűvókát helyeznek el a hajtómű gázelvezető rendszerében és ezt csatlakoztatják a szennyezett levegőt tároló gyűjtőhöz. Ennél a kialakításnál az égéstermék és a szennyezett levegő keveredése kedvező a kilépő gáz alacsonyabb hőmérséklete miatt is. Az elrendezés hátránya, hogy a gázelvezető rendszer a két áramlás megfelelő keveredése és a létrehozandó vákuum miatt jobban kinyúlik a sárkányszerkezetből, mint az egyébként szükséges lenne növelve ezzel a helikopter homlokkeresztmetszetét és tömegét [2][3][4].

A szennyezett- és a tiszta tömegáram elkülönítése

Az elkülönítő kialakítása pontos, precíz tervezőmunkát igényel, hiszen a két áramlás megfelelő elválasztása fontos sarokpontja a szűrőrendszernek, jelentősen meghatározza annak szűrési hatásfokát. A levegőáram irányának megváltoztatását egy csúcs végzi, a szennyezett és tiszta levegőáram szeparálásáért pedig az elkülönítő a felelős. E két elem távolsága és az áramlás szögelfordulása egyértelműen definiálja a szűrési hatásfokot és a levegő áramlása során létrejövő nyomáscsökkenést. A távolságra jelentős hatással van a szűrő részecskék mérete, hiszen ez a távolság minél nagyobb, annál rosszabb hatásfokkal szűri meg a kisebb átmérőjű szennyeződések. Ugyanez érvényes az áramlás irányváltására is, az minél lassabb, a kisebb részecskék annál nagyobb valószínűséggel jutnak el a tiszta levegőáramba, mert kisebb tömegüknél fogva tehetetlenségük is kisebb.



8. ábra IPS rendszer metszeti rajza¹¹

¹¹ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 236 p.

A nyomásesés és a szűrési hatásfok optimuma úgy valósítható meg, hogy az irányváltást végző csúcs (45) és az elkülönítő (47) közti axiális távolság (A) jóval nagyobb legyen a radiális távolságnál (B), mint azt a fenti ábrán láthatjuk [8. ábra]. A csúcs után a lejtő (20) meredeksége is lényeges paraméter, hiszen ez minél nagyobb, annál jobb a szűrési hatásfokunk, de azt sem szabad elfelejteni, hogy a meredekség növekedésével a keletkező nyomásveszteség is számunkra negatív irányban változik. Ezt a meredekséget az A/B hányadossal jellemezhetjük, amelynek számlálója a korábban említett csúcs és az elkülönítő axiális, nevezője pedig a radiális távolsága. Ez a paraméter abszolút betekintést nyújt az adott rendszer szűrési hatásfokába és a nyomásveszteségébe egyaránt. Az alábbi táblázat két különböző arányra tünteti fel mind a hatásfokot, mind pedig a nyomás változását. [9. ábra]

A/B	Δp (Pa)	η (%)
2	1300	88
4	620	83,5

9. táblázat A nyomás és a hatásfok változása A/B arányában¹²

Mint látható, mind a szűrési hatásfokot, mind pedig a nyomásesést jelentős mértékben befolyásolja ez az arányszám. Szembetűnő, hogy négyszeres axiális távolságnál a nyomásesés több mint a felére csökken, ami nagyon kedvező adatnak tűnik. De természetesen, mint a repülésben mindenhol, a pozitív változás negatív következményeket is von maga után. A hatásfok 4,5 %-os csökkenése igen jelentős érték, a hajtómű üzemidejét nagymértékben csökkentheti, főleg egy nagy porkoncentrációjú környezetben.

Egy másik módszer a szűrési hatásfok javítására, ha a gyűrűs csatorna torkolatánál, ahol a csúcs az irányváltást végzi, megnöveljük a tömegáram sebességét, így nagyobb lendületet adva a benne lévő részecskéknek, amelynek hatására a nehezebb szilárd szennyeződések intenzívebben szorulnak a külső falhoz, javítva ezzel a szűrő hatásosságát.

Ha ugyanazt a szűrési hatásfokot akarjuk elérni kisebb sebességű levegőárammal, akkor nagyobb mennyiségű levegőt kell megcsapolnunk a kompresszortól, amely tovább csökkenti a fajlagos hasznos munkát és termikus hatásfokot. Természetesen ennek a módszernek sem csak előnyei vannak. A nagyobb sebesség bonyolultabb, örvényes áramlást eredményez, amelyben megnő a nyomásveszteség. Ez másfélszeres sebességnövekedésnél több mint kétszeres nyomásveszteség növekedést is eredményezhet [3].

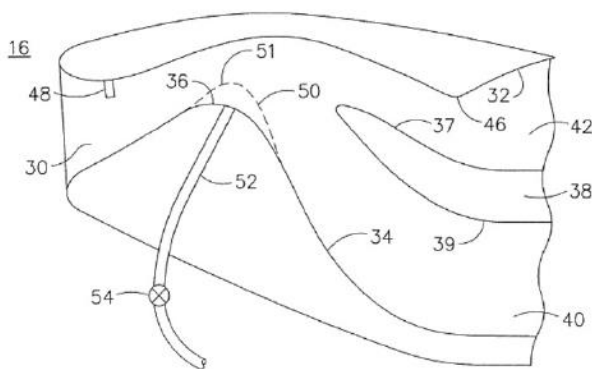
¹² Készítette a szerző

A fejlesztések szükségessége

Az IPS rendszer hatékonyságának optimalizálását az áramlási körülmények bizonyos egyszerűsítésével valósítják meg, állandónak és egyenletesnek feltételezve azt. Természetesen a valóságban ez nem így van, hiszen a helikopter végrehajthatja a feladatait tengelyirányú átáramlási üzemmódban (függés, függőleges emelkedés és süllyedés), valamint ferde átáramlási üzemmódban (vízszintes repülés, ferde pályán emelkedés, süllyedés) egyaránt, amelyekhez tartozó áramlási körülmények mások és mások. A helikopter forgószárnyáról a leáramlás változó, a hajtóműbe szívott levegő áramlása egyenetlen, örvényes. Azt korábban kifejtettem, hogy a szűrő geometriája egyértelműen meghatározza a szűrőn belüli áramlási körülményeket, ezzel együtt pedig az IPS szűrési hatásfokát. Mindazonáltal nem szabad figyelmen kívül hagynunk a szűrőbe belépő áramlás paramétereit, amelyek szintén jelentős befolyással lehetnek erre a hatásfokra.

Ahhoz, hogy ezeket a külső körülményeket számításba vehessük az optimális szűrés megvalósításához szükséges egy az áramlás sebességét mérő adó, egy hőmérsékletadó és egy olyan szenzor, ami a belső megtisztított levegőáramban a jelen lévő szennyeződések mennyiségét méri. Ezt a belső csatorna alakjának módosításával, az áramlás elkülönítését végző csatorna hosszának változtatásával, vagy a tiszta levegőáram csatornájának belépő keresztmetszetének szabályozásával érhetik el.

Létezik olyan kialakítás, ahol egy levegő túlnyomással működő rekesz (50) az áramlás irányváltását végző csúcs torokkeresztmetszet szabályozására szolgál [10. ábra].



10. ábra Változtatható csúcsátmérőjű IPS keresztmetszete¹³

Ha a helikopter relatíve kis szennyezettségű területen hajt végre feladatot, a rekesz teljesen hozzásimul a csúcsához (36), így a torokkeresztmetszet átmérője maximális. Nagy szennyezettségű környezet esetén egy szabályozó szelep (54) kinyit és a kompresszortól

¹³ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 237 p.

megcsapolt levegő felfújja a rekeszt, csökkentve ezzel a keresztmetszetet, nagyobb irányváltásra kényszerítve ezzel a tömegáramot, így javítva a szűrési hatásfokot. Természetesen a nyomásveszteség itt is annál nagyobb lesz, minél szűkebb a keresztmetszet, minél nagyobb az eltérítés szöge. A rendszer előnye, hogy a csúcs és a szűrő fala közti csatorna átmérője változtatható, így a nyomásesés is csökkenthető, amennyiben a működési környezet szennyezettsége a szűkebb keresztmetszetet nem indokolja [3].

Értékelés

Az IPS szűrők működése jól modellezhető, ennek köszönhetően meglehetősen magas valószínűséggel előre meghatározhatóak a szűrés szempontjából negatív jelenségek, mint a fallal való ütközés utáni lepattanás, vagy a szennyeződések ütközése miatti eltérülés, amelyek a részecskék tiszta levegőáramba jutását eredményezhetik. Maga a szűrés a tömegáram gyors irányváltásán alapul, amely után a szennyezett és a tiszta levegőt egy kettéosztott csatornában különítik el.

Ma már egyre kevésbé elterjedt ez a rendszer a helikopter hajtóművek védelmében, annak ellenére, hogy kialakításában ez a legkompaktabb, a legkisebb tömeggel rendelkező szűrő. Ami mégis az IPS ellen szól az az, hogy már a gyártás során a helikopter hajtómű szívócsatornájának belépő keresztmetszetére kerül, arról nem eltávolítható. Ennek oka, hogy a szűrő kialakítását jelentős mértékben befolyásolják a hajtóműben lévő helyi áramlási viszonyok, ezért nagyon fontos a pontos precíz kontúrozása a hajtómű belépő keresztmetszetéhez. A fentebb kifejtett kialakítások ugyan némileg csökkenthetik a szűrő okozta nyomásvesztést kis porkoncentrációjú környezetben, azonban azt teljesen megszüntetni sosem lehet. Az áramlást folyamatosan irányváltásra kényszeríti a szűrő, így mindig veszteséges lesz az alkalmazása, akkor is, ha a működési környezet egyébként nem indokolná a szűrőrendszer alkalmazását. A létrejövő nyomásvesztés a későbbiekben vizsgált VTS és IBF rendszerekhez képest ugyan alacsony, azonban a másik két említett porkiválasztó szűrési hatásfoka jóval meghaladja az IPS rendszerét. Ezen paraméterben már 1-2%-os csökkenés is súlyos hajtómű élettartam csökkenéshez vezet. Emellett az ejektáláshoz a kompresszortól megcsapolt levegő csökkenti a tömegáramot, ami a hajtómű teljesítményének csökkenését eredményezi. A szűrési hatásfok viszonylag széles skálán mozoghat, de legjobb esetben sem haladja meg a 85 %-ot, ami összehasonlítva egy IBF szűrőnél akár 98,5% is lehet.

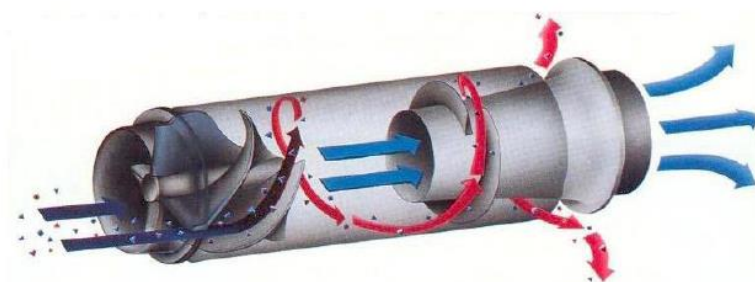
Mind az axiális, mind a radiális beömlésű változatnak vannak előnyei és hátrányai is. Az axiális IPS egyik legnagyobb előnye, hogy a keletkezett nyomásvesztés egy része

viSSzanyerhető. Egy másik érv, ami az axiális kialakítás mellett szól, hogy a helikopter hajtómű gázvezetőjétől relatíve messze helyezkedik el, így kicsi az esély arra, hogy a szűrőrendszerbe bejut a kibocsátott égéstermék. Ezek az előnyök a radiális IPS-k kialakításáról nem mondhatóak el, azonban ennek kialakítása kompaktabb, így tömege kisebb és axiális irányú kiterjedése is rövidebb.

Az IPS rendszer tehát viszonylagos egyensúlyt képez a szűrési hatásfok és nyomásvesztés között. Ezeket az értékeket egyértelműen meghatározza a szűrő geometriája különös tekintettel az áramlás irányváltását létrehozó csúcs és a kettéosztott csatorna kialakítására és egymástól mért axiális és radiális távolságára. Az aktív áramlás figyelő rendszerekkel és a szűrőrendszer adaptív felületeivel ezek az értékek tovább javíthatók, illetve úgy optimalizálhatók, hogy amennyire csak lehetséges alkalmazkodjon a szűrő a működési környezethez [1][3][4].

Örvénykeltős porkiválasztó rendszerek (VTS¹⁴)

Manapság ez az egyik legelterjedtebb gázturbína előtti kiválasztó berendezés. Működését tekintve tulajdonképpen ez a rendszer is inerciális elven alapul. Tartalmaz egy álló spirális lapátos részét, valamint egy ennél kisebb bemeneti keresztmetszetű csövet [11. ábra].



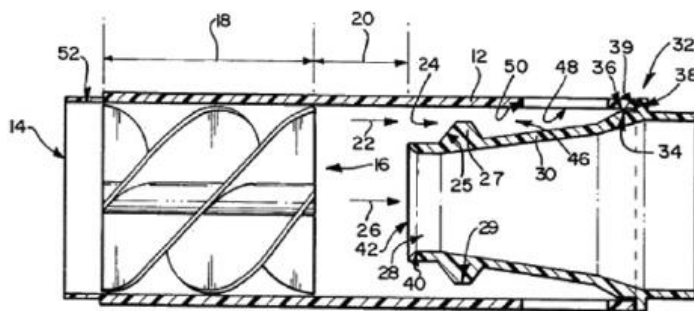
11. ábra VTS rendszer¹⁵

Ezek a kis szűrők egy panelbe rendezve biztosítják, hogy a kompresszorra a már megtisztított levegő áramoljon. Ezt az összeépített panelt nevezzük örvénykeltő porkiválasztó rendszernek. A hajtómű szívásának hatására a szennyezett levegő először a spirális lapátokra áramlik és a kialakítás hatására a levegő axiális sebessége radiális és tangenciális komponensekre bomlik, így a levegőtömeg örvénylő, forgó mozgásba kezd. Mivel a szilárd részecskék nagyobb tömeggel rendelkeznek, így rájuk nagyobb centrifugális erő hat, mint a levegőrészecskékre, ezért tehetetlenségük következtében a cső falának szorulnak. A belső, szűkebb keresztmetszetű cső elkülöníti egymástól a peremhez szorult szilárd szennyeződéseket a

¹⁴ Vortex Tube Separator: Örvénykeltő Porkiválasztó

¹⁵ J. Warren, C. Gorton, S. Hoff and F. Alby: Air, land, sea and space FOD issues

megtisztult levegőtől. A 12. ábrán látható egy ilyen elrendezés.



12. ábra VTS rendszer diffúzoros kollektorral¹⁶

A külső cső (12), a szűrőrendszer házát alkotja. Az örvénykeltő spirális lapátozás után látható a szűkebb keresztmetszetű divergens csatorna (30), ahol a megtisztított levegő tovább halad a hajtómű kompresszorába. A külső csőszakasz (20) az, ahol a szilárd szennyeződések a borítás falának szorulnak a centrifugális erő hatására. A belső csatorna diffúzoros mivolta ezen példa sajátja, más elrendezéseknél ez akár állandó keresztmetszetű is lehet. A gyűrűs kialakítású nyíláson (22) keresztül távozik a szennyezett levegő, majd egy gyűjtőbe érkezik (46), ahonnan a külső falon (48) keresztül az környezetbe távozik. Természetesen az így a gyűjtőbe került részecskék eltávolításához is szükség van levegőre, amit leggyakrabban a hajtómű nagynyomású kompresszorától csapolnak meg és juttatnak vissza a környezetbe. Látható tehát, hogy ennek a megoldásnak is ára van. Olyan kompromisszumot kell tehát kötnünk, amelyben sikerül elérni a lehető legnagyobb szűrési hatásfokot, a járulékos nyomásvesztéget viszont minimumon tarthatjuk.

Az örvénykeltő lapátok kialakítása mind a nyomásvesztés, mind pedig a porkiválasztás hatásossága szempontjából nagyon lényeges. Ennek folyományaként a gyártók specifikusan olyan lapátok kialakítására törekednek, amelyek az adott működési körülmények figyelembe vételével a legkedvezőbbek. Így egy helikopterre akár több, eltérő lapátozással kialakított rendszert is felszerelhetnek, tekintettel az éppen aktuális területen lévő levegő porösszetételére.

Az örvénykeltő szűrő hatásosságának nagyon kis mérvű 94 %-ról 95 %-ra történő javulása a hajtómű várható élettartamát megduplázhathatja, ha ugyanez az érték 97 %, akkor a javításközi üzemidő további kétszeresére növekedhet [1][2][3][4].

¹⁶ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 228 p.

A szennyezett levegő elvezetése

Ugyanúgy, mint az IPS rendszereknél, itt is jelentősen befolyásolja rendszerünk hatékonyságát a környezetbe elvezetett levegő mennyisége. Így tehát a lehető legnagyobb centrifugális erő és az örvénykeltő zóna hossza mellett, nagyon lényeges a környezetbe elvezetett szennyezett levegő tömegáramának aránya a megtisztított levegőjéhez viszonyítva. Az elsődleges cél természetesen az, hogy maximalizáljuk a hajtómű kompresszorára áramló megtisztított levegőt, úgy, hogy az elvezetett szennyezett tömegáram minimális legyen. Nagyon fontos a szűrőház megfelelő kialakítása, hiszen ha a külső csatorna, ahova a szennyezett levegő távozik, eltömődik, a szilárd porrészecskék visszaáramolhatnak a megtisztított levegőt szállító belső csatornába, jelentősen rontva ezzel a rendszer szűrési hatásfokát. Lényeges probléma még a levegő forgási sebessége, amely előfordulhat, hogy olyan nagy lesz, hogy az ejektor zónában is tovább folytatódik, csiszolva ezzel a csatorna falát. Ennek kiküszöbölésére a zóna bemeneti keresztmetszeténél egy karimát alkalmaznak, ami lassítja a szennyeződések forgási sebességét, de természetesen ez a megoldás is további veszteségeket okoz.

A kialakítás ekkora mérvű komplexitása nem csak a csatornák gyártásában okozhat nehézségeket, de az ejektor zónában kialakuló turbulencia veszélyét is magában hordozza, ami együtt jár a szennyezett és megtisztított levegő újrakeveredésével, negatívan befolyásolva a szűrési hatékonyságot [3].

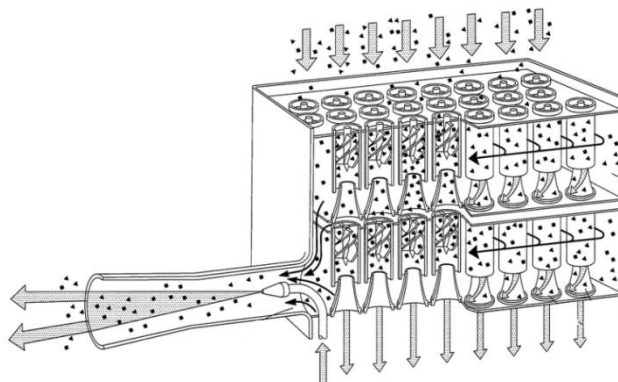
A lapátozás fontossága

Mint már arról korábban szót ejtettem az örvénykeltő lapátok fő feladata a rááramló levegő megforgatása és ezzel a centrifugális erő létrehozása. A kialakításuk szempontjából nagyon eltérőek lehetnek, függően a belépő- és kilépő él kialakításától, a lapátprofil alakjától, a húr hossz nagyságától, a felületi érdességtől. Ezek mind-mind jelentősen befolyásolják a szűrési hatásfokot és a csatornában kialakuló nyomásvesztéséget. A legtöbb esetben egy készlethez négy lapát tartozik, mindegyik egy 90 fokos ívhosszat elfoglalva a csatorna kerületéből, mint ahogy az a 12. ábrán látható. Ezek a lapátok egymással fedésben vannak, ez biztosítja aerodinamikailag az áramlás forgatását. A belépő él szöge az axiális áramláshoz viszonyítva meghatározza a keltett örvény forgási sebességét. Ennek növelésével javíthatjuk a szűrés hatékonyságát, ugyanakkor növeli a nyomásvesztésünket is. A két paraméter közötti kompromisszumot 55-70 fokos szögintervallumon belül találták meg, így ha a belépő él szöge e két érték között mozog, mind a szűrési hatásfok, mind pedig a nyomáskülönbség optimális értéket vesz fel. A lapátozás kialakítására megfelelő matematikai modellt még nem sikerült

felállítani, így csak a korábbi tapasztalatokra támaszkodva, lehet optimalizálni a szűrési hatásfokot és a nyomásvesztiséget. Voltak próbálkozások a minél jobb szűrési hatásfok elérésére, például egy második, a megtisztított tömegáramot vezető csatornába épített lapátozás kialakításával, ahol a finomabb részecskék szűrése zajlott, de amíg az örvénykeltő lapátok matematikai modellje nem megalapozott, addig az optimális kialakítást csak közelíteni lehet [3].

Az szűrőrendszer elrendezése

Szó esett róla korábban, hogy a komplett szűrő rendszert több szűrőcsatorna összeépítésével hozzák létre olyan módon, hogy a csatornák tengelyei párhuzamosak legyenek az axiálisan beáramló levegővel. Az általános elrendezés az, hogy a szűrőket hat sorba helyezték el, így érhető el a lehető legnagyobb szűrési hatékonyság. Korábban alkalmaztak ennél sűrűbb elrendezést is, ahol jóval több csatorna alkotta a teljes szűrőrendszert. [13. ábra] Itt a csatornák alkotta panel egy hengert, dobozt alkot, ahol a szűrőt elkerülő csatornát hidraulikusan nyitható ajtó zár le, amit akkor használnak, ha a helikopter tiszta, pormentes környezetben üzemel, vagy ha a szűrőrendszer teljesen eltömődik.



13. ábra Az örvénykeltők elrendezése¹⁷

Ilyenkor a teljes levegőáram 100%-a akadálytalanul a hajtómű belépő keresztmetszetére áramolhat, anélkül, hogy fellépnének a szűrőrendszer okozta veszteségek.

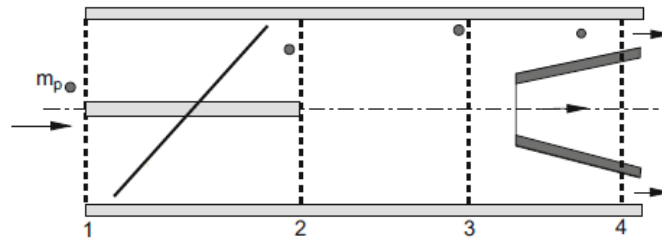
Manapság az egyre szigorúbb repülőtéri szabályozások hatására, a zajcsökkentés kérdése is előtérbe került. A helikopterek egyik, és talán a legfőbb zajforrása a kompresszorból származik, különösen felszálló üzemmódban, amikor a fordulatszám maximális. Az örvénykeltő porkiválasztó rendszerek bizonyos kialakításai alkalmasak ezen zaj csillapítására is. Így tehát az elsődleges porkiválasztás mellett, egy másodlagos feladat is felmerül, amelyet immár nem a nagy porkoncentrációjú levegő indokol, hanem a repülőterek közelében a

¹⁷ <http://atomictasters.com/2012/02/like-the-sands-of-time-through-an-hourglass/>

zajszennyezés csökkentése. Ezt úgy valósítják meg, hogy hangelnyelő paneleket építenek, közvetlenül a szűrő rész után, a már tiszta levegőt szállító csatornába. Ezeket elrendezhetik valamilyen görbe mentén, vagy akár derékszögben is egymásra. Működés elvét tekintve, úgy nyeli el a hanghullámokat, hogy a panelek eltérítik az áramlást axiális irányból. Hátránya, hogy jelentősen növeli a szűrő nyomásveszteségét, egy ilyen elrendezés alkalmazása, a szűrőrendszerben létrejövő teljes nyomásveszteség 50 %-át is kiteheti [3][4].

Az örvénykeltő szűrő működése elve

A főbb teljesítmény paraméterek vizsgálatához tekintsük az alábbi vázlatot [14. ábra]. A ferde bemenet a porszűrő lapátját jelenti.



14. ábra VTS rendszer elvi vázlata¹⁸

Négy különböző keresztmetszetet jelöl az ábra. A bemeneti keresztmetszetet (1), a lapátozás kilépő keresztmetszetét (2), a szennyezett részek gyűjtésére szolgáló kollektor központi keresztmetszetét (3), valamint a kilépő keresztmetszetet (4). Az ábrán látható konfúzoros kollektor kialakítás csökkenti a rendszer nyomásvesztését.

A szűrési hatásfok mellett fontos paraméter még a környezetbe elvezetett szennyezett levegőáram, a belépő keresztmetszet és a kollektor kilépő keresztmetszete közötti nyomáskülönbség (Δp_s), valamint a belépő keresztmetszet és a megtisztított tömegáram közti nyomáskülönbség (Δp_p), ezeket nyomásvesztéseként definiáljuk. Számítás során, ha kezdeti paraméterként ismerjük a szűrő bemeneti keresztmetszetének nagyságát (A), a folytonossági tétel alkalmazásával kiszámítható a bemeneti sebesség. Ez az eljárás akkor alkalmazható, ha a tömegáram sebességét megegyezőnek vesszük a porrészecskék sebességével. Bevezetjük, a por tömegkoncentrációját a tiszta levegőáramhoz viszonyítva, így ez a

$$c = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}} \quad (1)$$

összefüggéssel számítható, ahol $\dot{m}_p$ a porrészecskék tömegáramát jelenti, $\dot{m}$ pedig a levegő tömegáramát.

¹⁸ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 230 p.

A folytonosság tétele alapján felírható az alábbi összefüggés:

$$\dot{m} + \dot{m}_p = \rho c_1 (A - A_p) + \rho_p c_2 A_p \quad (2)$$

Feltételezve, hogy $A \gg A_p$ (így a $\rho c_1 A_p$ tag elhanyagolható) és azt, hogy a porrészecskék átlagos sebessége megegyezik a tömegáram átlagos sebességével, az alábbi egyenletből számítható az áramlás belépési sebessége:

$$c_{bel.} = \frac{\dot{m}(1+c)}{\rho A + \rho_p A_p} \quad (3)$$

Amint a részecskék belépnek a spirális lapátózású részbe perdületük hirtelen, ugrásszerűen megnő, egy bizonyos sugár körül örvénylő mozgásba kezdenek, sebességük radiális és tangenciális komponensekre bomlik. A részecskék csavarszerű forgó mozgása egy „r” sugár körül megy végbe. Minden részecske egy átlagos átmérővel (d_p), valamint egy sűrűséggel (ρ_p) rendelkezik. Alapvetően a porrészecskére ható három erő egyensúlyából, az „r” sugár számítható, hiszen a részecskére hat egy aerodinamikai ellenállási erő,

$$D = 3\pi d_p \mu c_r \quad (4)$$

a centrifugális erő,

$$F_c = m_p \frac{c_t^2}{r} = \frac{1}{6} \pi \rho_p d_p^3 \frac{c_t^2}{r} \quad (5)$$

valamint egy harmadik, a részecske és a közeg sűrűségkülönbségéből származó erő.

$$B = -V \rho \frac{c_t^2}{r} = -\frac{1}{6} \pi d_p^3 \frac{c_t^2}{r} \quad (6)$$

A három erő egyensúlya tehát:

$$F_c + B + D = 0 \quad (7)$$

Az összefüggéseket behelyettesítve, valamint az egyenletet „r”-re kifejezve meghatározható a görbületi sugár, amely körül a részecskék forgó mozgást végeznek.

$$r = \frac{(\rho_p - \rho) d_p^2 c_t^2}{18 \mu c_r} \quad (8)$$

A kapott összefüggésből világosan látszik, hogy egy d_p átlagos átmérővel rendelkező részecske, „r” egyensúlyi sugara d_p -vel és a tangenciális sebességkomponenssel négyzetesen arányos. Az egyenletben szereplő többi mennyiség konstans. A lapátokat ennek megfelelően úgy próbálják kialakítani, hogy a lehető legnagyobb perdület növekedést ériék el. A minél ideálisabb szűrés elérése érdekében empirikusan meghatároztak, hogy az egyensúlyi sugárnak nagyobbak kell lennie a megtisztított tömegáramot szállító kollektor átmérőjének (d_0) felénél. Ezt a peremfeltételt „r”-be behelyettesítve, valamint az egyenletet d_p -re kifejezve

megkapjuk az úgynevezett kritikus részecske átmérőt (d_{pk}).

$$d_{pk} = \sqrt{\frac{9\mu d_0 c_r}{\rho_p - \rho c_t^2}} \quad (9)$$

Ez az a szennyeződés átmérő, amelyet az adott paraméterekkel rendelkező VTS rendszer még képes elkülöníteni a tiszta levegőáramtól.

Természetesen más hatások is befolyásolják a szűrési paraméterek pontos kiszámítását, így figyelembe kell vennünk a véletlenszerűen kialakuló turbulens áramlást, valamint a részecskék egymással illetve a szűrő falával történő ütközését is. Ez utóbbi hatás, különösen nagy átmérőjű részecskénél a falról való visszapattanás jóvoltából a szűrés nagymértékű romlásához vezethet.

Adott belépési paramétereknél a tangenciális sebességkomponens nagysága a lapátózás kialakításának függvénye, így bevezethető egy új paraméter (ϑ), amelyet a tangenciális sebesség komponens és az axiális sebesség komponens hányadosaként definiálunk. Ennek alkalmazásával a kritikus sugár kiszámítása sokkal egyszerűbb, hiszen nem a tangenciális sebesség komponenssel kell számolnunk, hanem elég ismernünk csak az axiális beáramlási sebességet.

$$r = \frac{(\rho - \rho_p) d_p^2}{18\mu} \vartheta^2 \frac{c_x^2}{c_r} \quad (10)$$

A radiális sebességkomponens az örvénykeltő szűrő eszköz kialakításától, az axiális sebesség pedig a hajtómű paraméterektől, valamint a szűrőrendszer belépő keresztmetszetétől és az elhelyezett szűrők számától függ [3][4].

Nyomásváltozások a szűrőrendszerben

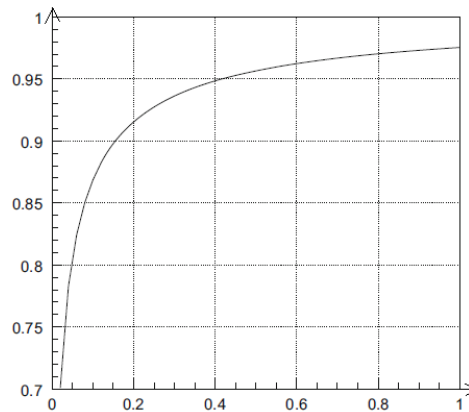
A vizsgálathoz három nyomásváltozást, illetve ezeknek a helyeit különböztetjük meg. Az ejektor oldalon, a szűkülő keresztmetszet miatt létrejövő nyomásváltozást (Δp_r), a megtisztított levegő magban bekövetkező átáramlása során létrejövő nyomásesést (Δp_c), valamint a belépő keresztmetszettől a kollektorig történő áramlás során létrejövő nyomásdifferenciát (Δp_e). A vizsgálathoz feltételezzük, hogy a külső áram és a főáram között nyomáskülönbség nincsen. Így az ejektor oldalon létrejövő nyomásesés a $\Delta p_e + \Delta p_r$, míg a magban létrejövő nyomásesés a $\Delta p_e + \Delta p_c$ összeggel határozható meg. A két érték hányadosa egy olyan paraméter, amely jellemző az adott szűrő rendszerre, és pontosan definiálja annak nyomásesését. Ha Δp_c értékét közel zérusnak feltételezzük, valamint elvégezzük az egyenleten a megfelelő átalakításokat, akkor az alábbi összefüggést kapjuk az örvénykeltő szűrő nyomásparaméterére:

$$p = 1 + \frac{\Delta p_r}{\Delta p_e} \quad (11)$$

Adott finomságú por figyelembevételével természetesen jelentősen befolyásolja a szűrő hatásfokát a kollektor diffúzorossága, tehát a belépő és a kilépő keresztmetszetek különbsége, valamint a spirális lapátok kialakítása, hiszen, mint azt már korábban említettem, a porrészecskék elkülönítése szempontjából nem mindegy, hogy mekkora perdületnövekedés jön létre, mert ez határozza meg, hogy a szennyeződések hány százaléka jut ki a külső áramba [3].

Értékelés

Számítások azt mutatják, hogy az örvénykeltő rendszerű szűrők hatásfoka a repülési sebesség növekedésével csökken. Az alábbi ábrán látható a szűrési hatásfok, a tangenciális és axiális sebesség arányának függvényében.



15. ábra A szűrési hatásfok, a tangenciális és axiális sebesség arányának függvényében¹⁹

Az állítás és a diagram elemzése során némi ellentmondás merülhet fel, hiszen az ábra azt mutatja, hogy a sebesség növekedésével nő a szűrési hatásfok. Ez azonban csak látszólagos, hiszen ahogy nő a repülési sebesség, a hajtómű szükséges teljesítménye úgy csökken, csökkentve ezzel a tömegáramot is, ami tulajdonképpen adott belépési keresztmetszetre az átlagos bemeneti sebesség csökkenését is jelenti, ami így a szűrőrendszer hatásosságát rontja.

Az örvénykeltő szűrők hatékonyságának vizsgálata bonyolult és összetett, a rendszer szinte minden elemének befolyása van arra, hogy mennyire tudjuk optimálisan használni az adott kialakítást. A spirális lapátozás a megfelelő intenzitású örvénylő mozgás létrehozásáért felelős, a kollektor geometriai formája meghatározza a nyomásvesztést mind a külső-, mind pedig a belső áramban. A szennyeződések ejektálásához szükséges kompresszortól

¹⁹ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 232 p.

megcsapolt levegő pedig csökkenti a tömegáramot, amely szintén káros hatással van a helikopter hajtóművére.

Modulos kialakítása miatt, ezeket a rendszereket bármely helikopter hajtóműhöz alkalmazhatják, azokra egyedileg legyárthatják. Szűrési hatásfokát tekintve kedvezőbb az inerciális rendszereknél, a szennyezett levegő 93-98,5%-át is megtisztíthatja, illetve a kialakítás miatti nyomásvesztés is kedvezőbb, mint az IPS-nél. Az utóbbi adat a durva por szűrésére vonatkozik. Hátránya a nagy térfogat, amelynek hatására növeli a helikopter homlokfelületét, így a légellenállási tényezőjét is. További nehézségeket okoz a jegesedés. Ha ez a jelenség megvalósul, a rendszer nagyon rossz hatásfokkal dolgozik.

Természetesen a hatásos működést itt is befolyásolja a beszívott por koncentrációja, a részecskék nagysága, anyaga és alakja. Az örvénykeltő lapátok kialakítása mind a nyomásvesztés, mind pedig a porkiválasztás hatásossága szempontjából nagyon lényeges. Ennek folyományaként a gyártók specifikusan olyan lapátok kialakítására törekednek, amelyek az adott működési körülmények figyelembe vételével a legkedvezőbbek. Az örvénykeltő rendszer első, és nagyon meggyőző alkalmazására az első Öböl háborúban került sor 1990-ben. A háború során a szűrők hatásosságát nagyon jól szemlélteti a következő idézet:

„A RAF CH-47 Chinook helikoptereit látták el a Pall Aerospace által gyártott „EAPS” rendszerekkel. Ezek a helikopterek átlag 145 repült órát teljesítettek sivatagi környezetben, amelyből 10% volt az ún. „brownout” környezet anélkül, hogy egyetlen hajtóművet idő előtt cserélni kellett volna. Ugyanakkor a US Army ugyanezen típusainál védelem nélkül 20-40 hajtóművet kellett cserélni 1000 repült óránként.”²⁰

Üzemeltetési szempontból nem elhanyagolható, hogy a rendszer a szennyezett levegő eltávolítása miatt öntisztító, szinte semmilyen karbantartást nem igényel. [3] [4]

Porkiválasztó szűrők (IBF) [16. ábra]

A gázturbinás hajtóművek védelmére szolgáló szűrőrendszerek harmadik típusa a porkiválasztó szűrő. Első felhasználásukra az amerikai hadseregben került sor az 1960-as években, a Dél-kelet Ázsiában szolgálatot teljesítő helikoptereken. A szűrés elve merőben különbözik az előbbieken tárgyalt, tehetetlenségi elven dolgozó örvénykeltő és inerciális porkiválasztókhoz viszonyítva, hiszen itt a szennyeződések hajtóműbe jutásának

²⁰ Varga Béla okl. mk. alezredes: Katonai helikopter hajtóművek teljesítmény és hatásfok növekedésének műszaki technológiai háttere, valamint ezek hatása harcászati jellemzőikre, 2013.

megakadályozása úgy valósul meg, hogy a szűrőrendszer fizikai gátat szab a nagyobb, szennyező részecskék bejutásának. Szűrési hatások szempontjából ez a rendszer mutatja a legkedvezőbb paramétereket, a porrészecskék akár 99,3 %-át is eltávolíthatja a levegőáramból.



16. ábra Különböző típusú helikopterek IBF rendszerei²¹

Természetesen minél tovább üzemeltetik az IBF rendszert karbantartás nélkül, ez a nyomásvesztés annál jelentősebb nagyságú lesz, hiszen a felfogott szennyeződések egy idő után eltömíthetik a szűrő pórusait, gátolva így a megfelelő mennyiségű levegőáram hajtóműbe jutását. Ezt a problémát csak rendszeres karbantartással, tisztítással lehet kiküszöbölni.

A szűrőrendszer kialakítása szendvicsszerkezetű, amely úgy valósul meg, hogy egy harmonikaszerűen hajtogatott gyapotszövet szűrőbetétet két drótháló fog közre. Viszonylag könnyen igazítható adott hajtóműtípusra és mivel szűrési hatásfoka kiemelkedően magas, egyre gyakoribb, hogy ezt a rendszert használják a helikopter hajtóművek szívócsatornája előtt. Régebbi típusoknál fel- és leszerelhető változatban használták, újabbnál, mint például az AS 350 Eurocopter, a hajtómű szerves részét képezi, arról nem eltávolítható. Működése nagyon egyszerű, a szűrő pórusainak átmérőjénél nagyobb részecske fennakad a szűrőbetéten, így nem jut el a kompresszor belépő keresztmetszetéig, hogy erodálja annak lapátjait. A hajtóműveket úgy tervezik, hogy a kompresszorra minél egyenletesebb, stabilabb áramlású levegő érkezzon, így ennek figyelembe vételével az IBF rendszerek pórusainak nagyságát úgy kell méretezni, hogy a hajtóműbe mindig a megfelelő mennyiségű tömegáram jusson.

A helikopterek nagyon változatos feladatok végrehajtására képesek, ennek megfelelően, például ha előre haladó mozgásból függésbe megy át egy forgószárnyas repülő eszköz, a dinamikus nyomás nagysága hirtelen, ugrásszerűen csökken. Ebből kifolyólag a porkiválasztó

²¹ Varga Béla okl. mk. alezredes: Katonai helikopter hajtóművek teljesítmény és hatások növekedésének műszaki technológiai háttere, valamint ezek hatása harcászati jellemzőikre, 2013. 107 p.

szűrőket próbálják úgy tervezni, hogy ezek a nyomásugrások a szűrési hatásfokot és a hajtóműbe juttatott tiszta levegő mennyiségét a lehető legkisebb mértékben befolyásolják. Tervezés szempontjából lényeges kérdés még, hogy az esetlegesen utólag beépített szűrőrendszer mennyivel növeli a helikopter homlokkeresztmetszetét. Ezt úgy próbálják csökkenteni a tervezők, hogy az IBF rendszer minél inkább beleolvadjon a sárkányszerkezetbe, minél áramvonalasabb legyen. Hiszen ha nő a homlokkeresztmetszet, akkor nő a légellenállási tényező, ami aerodinamikai szempontból mindenképpen hátrányos, nem is beszélve arról, hogy jelentősen növeli a fajlagos tüzelőanyag fogyasztást.

Fontos érinteni a jegesedés kérdését, hiszen a jég, ugyanúgy, mint a karbantartás nélkül üzemeltetett IBF-nél a porrészeccskék, eltömítheti a pórusokat, gátolva ezzel a megfelelő tömegáram bejutását a hajtóműbe. Hideg időszakban erre fokozottan figyelni kell.



17. ábra Kabin visszajelzés az IBF eltömődéséről és a megkerülő nyílás nyitásáról²²

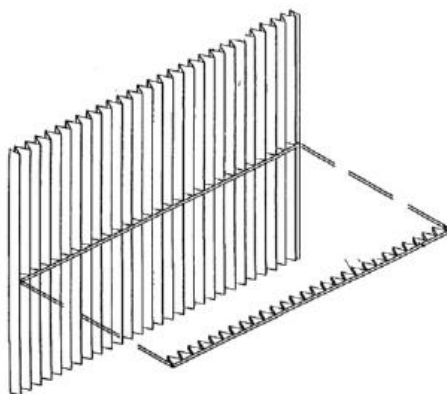
Az IBF rendszerhez tartozik még a szűrőn kívül egy védőfedél, amelynek feladata, a sárkányszerkezet folytonosságának fenntartása, valamint esetenként egy hidraulikus működtetésű csatorna fedél, amely a szűrő eltömődése esetén utat nyit a szűretlen levegőnek, hogy a kompresszor belépő keresztmetszetére áramoljon, megakadályozva ezzel a hajtómű leállítását. Normál üzem esetén tömítés biztosítja, hogy a szennyezett levegő ne szivárogon át az IBF-n szűrés nélkül, valamint egyes kialakításokhoz tartozik még egy nyomásadó, amely tájékoztatja a hajózt arról, hogy a nyomásveszteségi értékek a technológiában meghatározott tűréshatáron belül vannak e [1][3][4][17.ábra].

A szűrőbetét kialakítása

Az IBF legfontosabb része a szűrőbetét, hiszen ez az, ami döntően befolyásolja a rendszerünk szűrési hatásfokát és ezzel az egész hajtómű élettartamát. Ez a legtöbb esetben poliészterből, nemezből, vagy gyapotszövetből készül. Ezeket a rétegeket harmonikászerűen hajtogatják, majd két epoxi-gyantával bevont alumínium vagy rozsdamentes acél drótháló közé illesztik

²² Varga Béla okl. mk. alezredes: Katonai helikopter hajtóművek teljesítmény és hatásfok növekedésének műszaki technológiai háttere, valamint ezek hatása harcászati jellemzőikre, 2013.

[17. ábra].



18. ábra A szűrőbetét harmonikaszzerű hajtogatása²³

Sok esetben a szűrőbetétre felvisznek még egy olajréteget is. Ennek kettős funkciója van, egyrészt segíti felfogni a finomabb részecskéket, azokat, amiket esetlegesen a szűrőbetét pórusainak átmérője nem tesz lehetővé, valamint az olaj elszíneződése jelzi a levegő szennyezettségének intenzitását. Emellett, mivel az olaj taszítja a vizet, megakadályozza a folyékony szennyeződések hajtóműbe jutását, tovább növelve ezzel a hajtómű élettartamát.

Természetesen ennél a rendszernél is elsődleges a lehető legkisebb nyomásvesztés mellett minél nagyobb szűrési hatékonyság. Biztosítani kell, hogy a hajtómű minden üzemmódján megfelelő mennyiségű levegőt engedjen át a szűrő. Ismerve a hajtómű levegőfogyasztását, valamint az effektív felületelem területegységre jutó áteresztő képességét, az effektív felület számítható. Nagyon sokszor a sárkányszerkezet méretei limitálják a szűrőrendszer homlokfelületének nagyságát. Ebben az esetben a hajtogatás magasságával befolyásolható az effektív felület. Ennek nagysága 2,5-7 cm között mozog, a hajtogatás sűrűsége pedig 2,4 db cm-enként. A harmonikaszzerű hajtogatás hatszorosára növeli az effektív felületet a teljes homlokfelülethez viszonyítva, valamint a minél sűrűbb hajtogatás növeli a szűrőbetét merevségét.

A rendszer szerkezeti stabilitását és erózió elleni védelmét tovább növeli a két réteg drótháló, amely a harmonikaszzerűen hajtogatott gyapotszövet réteget fogja közre. Ezt minden esetben korrózió-, és kopásálló fémből készítik, ami legtöbbször rozsdamentes acél vagy alumínium. A drót vastagsága 0,02-0,06 mm között változhat.

Mivel ennél a rendszernél nincs lehetőség az összegyűjtött por felületről történő eltávolítására, tehát nem öntisztító, ezért az inerciális rendszerekhez képest relatíve nagyobb

²³ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 239 p.

odafigyelést, karbantartást igényel. Ha az IBF rendszerek tisztítására nem fordít kellő időt és energiát a repülő műszaki állomány, a szűrő pórusai idővel eltömődnek, csökkentve ezzel a szűrés hatékonyságát, és jelentősen növelve a nyomásvesztést [1][3].

Az IBF hatása a hajtómű paramétereire

Az IBF rendszer használatának legnagyobb fegyverténye a kiemelkedően magas szűrési hatások. Előnyei még az inerciális és az örvénykeltő rendszerekkel szemben, hogy előállítás olcsóbb, kisebb szerkezeti tömeggel rendelkezik, valamint a beáramló levegőt nem kényszeríti akkora irányváltásra, így a nyomásvesztés értéke is jobb a fent említett rendszerekhez viszonyítva. Ez a paraméter újonnan felszerelt IBF-nél 500 Pa körül mozog. Ami viszont a porkiválasztó szűrők hátránya, hogy ez a nyomásvesztés erősen szennyezett környezetben, 100 repült óra után, akár a 3000 Pa-t is elérheti, ami már meghaladja mind az inerciális, mind pedig a vortex rendszerek nyomásesését. Természetesen ez a nyomásváltozási paraméter abban az esetben helytálló, ha az IBF rendszert nem tisztítják rendszeresen, így folyamatosan növekszik a szűrőbetét előtt felhalmozódó szennyező réteg [3].

Felszerelhetőségi lehetőségek

Az IBF könnyű szerelhetősége miatt minden típusú és méretű helikopteren alkalmazható. Az UH-60 Black Hawk megépítésénél még nem volt elsődleges szempont a hajtómű megóvása a szennyezett levegő erodáló hatásától [18. ábra].



19. ábra UH 60 Black Hawk típusú helikopter IBF szűrővel²⁴

Ennek megfelelően, amikor előtérbe került a porkiválasztó szűrő használata ezen a típuson, a sárkányszerkezetet át kellett alakítani, hogy a rendszer felszerelhető legyen. Az IBF és a sárkányszerkezet áramvonalas kialakításának optimalás összeegyeztetése nagyon fontos

²⁴ <http://theaviationist.com/wp-content/uploads/2013/10/UH-60-highlight.jpg>

kérdés. Különösen nehéz ez nagy teljesítményszükségletű, két hajtóműves helikoptereknél, ahol a hajtóműgondola kiemelkedik a sárkányból. Egy hajtóműves forgószárnyas repülőeszközöknél ez könnyebb, hiszen itt a hajtómű sokszor a sárkányba van süllyesztve, megkönnyítve ezzel a szűrőrendszer felszerelését. Az ilyen helikoptereknél a gyártók sokszor hagynak egy légkamrát a szívócsatorna előtt, hogy a vásárló igény szerint, a számára legmegfelelőbb a szűrőrendszert szereltethesse be. Így van ez a Bell 206B típusú helikopternél is, ahol a szűrőrendszer a sárkányba van süllyesztve [19. ábra][3][4].



20. ábra Bell 206B/OH-58A/C IBF szűrővel felszerelve²⁵

Az IBF szűrése

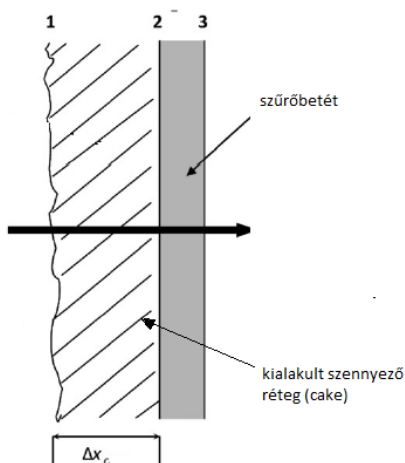
Az IBF rendszereknél fellelhető meglehetősen hiányos szakirodalmi repertoár nem teszi lehetővé, hogy a témát megfelelő mérnöki alapossággal tárgyaljuk. Azonban a szűrés témaköre a mérnöki irodalomban meglehetősen bőven tárgyalt, így a kettő vegyítésével az IBF szűrés elmélete kellő mélységben kivesézhető.

A szűrésnek két fő típusa van. Az egyik a mélységi szűrés, amely során, a szűrendő részecskék bejutnak a nagyobb átmérőjű részecskékből álló szűrőbe és ott letapadnak. Emiatt ez a rendszer többször nem felhasználható, folyamatosan cserélni kell. A másik fő szűrés mechanizmus a felületi szűrés. Itt a szűrő tulajdonképpen úgy dolgozik, mint egy szita. A pórusainál nagyobb átmérőjű részecskék fennakadnak a szűrőn, míg a megtisztított levegő rajta keresztül tovább áramlik. Itt a szűrés finomságát a betét pórusainak átmérője határozza meg. A felületi szűrő folyamatos üzeme során a felgyülemlett részecskék egy falat képeznek, amely idővel tovább javítja a kiválasztás hatékonyságát, ám ezzel egyidejűleg növekvő nyomásvesztéssel is jár, hiszen a fokozatosan vastagodó fal akadályozza a tiszta levegő áramlását is. Mivel ez a szennyező réteg a felületi szűrők esetében viszonylag könnyen eltávolítható, így ez a típus, ellentétben a mélységi szűrőkkel, folyamatos karbantartással és

²⁵ www.AFSfilters.com/

tisztítással hosszú ideig felhasználható. Ebből, valamint a kiemelkedően magas részecske kiválasztási hatékonyságból kifolyólag kerül alkalmazásra ez a fajta szűrési eljárás a helikopterek szívócsatornája előtt.

A felületi szűrők szűrési hatásfokának meghatározásához több tényezőt is figyelembe kell vennünk. Az egyik legjelentősebb ezek közül a rendszeren átáramló levegő nyomásvesztesége. Teljesen nyilvánvaló, hogy minél kisebb ez a nyomásveszteség, a szűrő annál kevésbé gyakorol negatív hatást a helikopter hajtóművére. A nyomás megváltozását az átáramló levegő súrlódása okozza, mind a folyamatos üzem során kialakuló porrétegen, mind pedig a betét összekapcsolódó pórusain. Ez a nyomásesés a folyadékok áramlására vonatkozó Darcy-törvénnyel modellezhető, ami kimondja, hogy a homogén szűrőbetéten átáramló folyadék nyomásesése egyenesen arányos a szűrő vastagságával, a folyadék tömegáramával és viszkozitásával, fordítottan arányos pedig a szűrő keresztmetszetével, valamint egy „k” tényezővel, amit permeabilitási együtthatónak nevezünk.



21. ábra A szűrőbetét és a rá rakódott szennyező réteg²⁶

A permeabilitást jelen esetben a folyadék hidraulikus vezetőképességeként definiálhatjuk, amely megmutatja, hogy mennyire könnyen áramlik át a folyadék a szűrő pórusain. Ez függ a pórusok nagyságától, alakjától, valamint az egységnyi felületre eső lyukacsok számától. Ennek megfelelően tehát a permeabilitás egy a szűrőre jellemző állandó, amely pontosan meghatározza annak áteresztő képességét specifikusan az adott kialakításra. A szűrő imént említett tulajdonságai jól definiáltak, azonban az IBF rendszernél figyelembe kell vennünk az üzem során folyamatosan vastagodó porréteget a belépő keresztmetszet előtt [20. ábra]. Az itt felgyülemelő részecskék tulajdonságai nagyon széles spektrumon belül mozoghatnak, így a

²⁶ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 240 p.

rendszer teljes áteresztőképességének meghatározása már nem olyan egyszerű feladat. Ezt figyelembe véve a kialakult porréteg permeabilitását tapasztalati úton határozzák meg. Egy ilyen tapasztalatokon alapuló eredmény azt mutatja, hogy minél nagyobb a belépő tömegáram sebessége, annál nagyobb a kialakult porrétegen ébredő nyomófeszültség, mintegy összetömörítve azt. Ennek hatására a rétegen áthaladó levegő nyomásesése is arányosan növekszik, illetve szintén ezen tanulmány eredménye, hogy a szűrőbetét vastagságának 1 mm-el történő növelése a szűrési hatások 0,686 %-os javulását eredményezi.

Mint azt már korábban taglaltam, a szűrőbetétet legtöbbször gyapotszövetből készítik, harmonikaszzerűen hajtogatják és két réteg epoxi bevonatú drótháló közé helyezik, így ezek egy szendvicsszerkezetet alkotnak. Ezek mellett még jelentősen befolyásolja a szűrő jóságát, hogy megtartja-e a megfelelő mennyiségű port, előre meghatározott, technológiában rögzített nyomásesés mellett. Ezt nevezzük portmegtartó képességnek, ez minél nagyobb annál ritkábban kell a rendszert karbantartani, növelve ezzel a rendszer élettartamát. Ezt az értéket a betét fogazásának kialakítása, a drótháló rácskialakítása ugyanúgy befolyásolja, mint az anyagi minőség.

Az IBF rendszereket legtöbbször közvetlenül a forgószárny alá helyezik. Ebben az esetben, fontos, hogy a szűrő működését a forgószárny leáramlási zónája minél kevésbé befolyásolja, így azt egy meghatározott sugáron belül építik a szívócsatorna belépő keresztmetszete elé [3].

Az IBF modellezése

A szűrőn áthaladó tömegáram meghatározásához, a korábban említett Darcy-törvényt alkalmazzuk. Így tehát egy „A” keresztmetszetű szűrőn áthaladó tömegáram:

$$\dot{Q} = \frac{kA(p_1 - p_2)}{\mu \Delta x_b} \quad (12)$$

Ahol „k” a szűrőbetét permeabilitása, Δx a betét vastagsága, μ pedig a levegő dinamikai viszkozitása, p_1 a belépő környezeti nyomás, p_2 pedig a szűrőből kilépő levegőáram statikus nyomása.

Ezt az egyenletet felírhatjuk, külön a szűrőbetétre és külön a porrétegre is, természetesen ebben az esetben mind a vastagság, mind pedig a permeabilitás az adott részre jellemző, így külön nyomásesés is tartozik mindkettőhöz.

Ha a szűrő üzeme alatt a permeabilitást állandó értéknek vesszük, akkor a szűrő teljesítménye csak és kizárólag a porréteg karakterisztikájától, paramétereitől függ. Ennek megfelelően a keletkező porréteg ellenállását jellemezhetjük egy „ α ” tényezővel, amely a

$$\alpha = \mu \frac{\Delta x_p}{k} \quad (13)$$

összefüggésből számítható. A szorzat egyes tényezői pedig a fentebb felírt képlet tényezőivel megegyeznek, csak nem a szűrőre, hanem specifikusan a porrétegre vonatkoznak. A 13-as képletből világosan látszik, hogy a vastagság növekedésével az ellenállás, ezzel pedig természetesen a kialakult szennyező rétegben átáramlásakor keletkező nyomásváltozás is növekszik, a permeabilitás nagysága pedig fordítottan arányos az ellenállással.

Ezek szerint a kialakult porréteg vastagsága nagy jelentőséggel bír a szűrő teljesítményében. Nyilvánvaló, hogy az üzem során ez az érték folyamatosan növekszik, ennek időbeni változására az alábbi összefüggés mutat rá.

$$\Delta x = \frac{V_c}{A_f} \quad (14)$$

Itt V_c a porréteg térfogata, A_f pedig az effektív szűrő felület. Teljesen evidens, hogy az üzem során eltöltött minél több idő a térfogatot növeli, az effektív felületet csökkenti. Így világosan látszik, hogy az üzem során a porréteg vastagsága folyamatosan növekszik.

A szűrési hatásfokot η -val definiálhatjuk, amely a megszűrt por tömegének és a teljes beszívott szennyező részecskék hányadosának adódik.

$$\eta = \frac{m_{ps}}{m_p} \quad (15)$$

Természetesen ez az érték mindig egynél kisebb, és meghatározza, hogy a megszűrt por tömege, hány százaléka a beszívott por tömegének. Minél nagyobb a szűrőbetéten fennakadó részecskék száma, annál kedvezőbb a szűrési hatásfok, annál jobban közelít 1-hez. Így a porréteg vastagságát meghatározó összefüggésbe m_{ps} értékét behelyettesítve, valamint felhasználva a $\rho = \frac{m}{v}$ összefüggést, a porréteg vastagsága kiszámítható a felfogott por tömegének felhasználásával is,

$$\Delta x = \frac{m_{ps}}{\rho_c A_f} \quad (16)$$

Ebben a képletben ρ_c a szűrőbetét előtt kialakult porréteg átlagos sűrűsége.

Fontos meghatároznunk a porréteg vastagságának időbeni megváltozását, hiszen ez az, ami pontosan definiálja nekünk a szűrőben keletkező nyomásvesztéset és így az IBF rendszer jószágát is. Így felhasználva az előbbi összefüggést, valamint bevezetve a $c = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}}$ porkoncentrációt, Δx időbeni megváltozása meghatározható az alábbiak alapján.

$$\frac{d\Delta x}{dt} = \frac{\dot{m}_{ps}}{\rho_c A_f} = \frac{\eta \dot{m}_p}{\rho_c A_f} = \frac{\eta c \dot{m}}{\rho_c A_f} \quad (17)$$

Ez az érték, akkor és csak akkor felhasználható, ha feltételezzük, hogy a szűrőbetéten

fennakadt részecskék közül, az összes beépül a porrétegbe. Természetesen a valóságban ez nem így van, hiszen a szennyező elemek egy része a porrétegről visszapattan, a forgószárny leáramlási zónájában kialakuló légmozgás hatására a betétől legtávolabb lévő szennyeződések leválhatnak a porrétegről és még számos hatás befolyásolhatja a beépülő részecskék százalékos arányát. Ennek meghatározása nehézkes, csak tapasztalati úton kivitelezhető, így bevezették a leváló részecskék arányát, amelyet „f”-el jelölünk. Értéke megadja, hogy a szűrőbetét által felfogott részecskék hány százaléka épül be a porrétegbe. Mint említettem, a pontos érték meghatározása nagyon nehéz, így a leváló részecskék aránya egy tapasztalati úton meghatározott állandó, amelyet a fenti érték korrekciójára használunk fel. Ennek tükrében a porréteg vastagságának aktuális megváltozása az alábbiak szerint módosul:

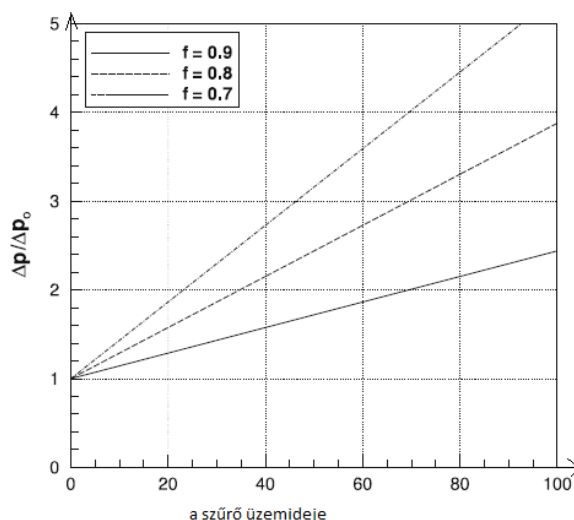
$$\frac{d\Delta x}{dt} = \frac{\eta c \dot{m}}{\rho_c A_f} (1 - f) \quad (18)$$

A teljesség kedvéért a leváló részecskék meghatározása egy differenciál egyenletrendszer megoldásából adódik, amelyben az ismeretlenek, a szűrőbe belépő levegőáram sebessége, a porréteg vastagsága, a szűrőben keletkező nyomásesés, a szűrési hatások, valamint a porréteg áteresztő képessége. Állandó permeabilitást feltételezve a differenciálegyenlet megoldása megadja azt a függvényt, amely bármely időpillanatban jellemzi a porréteg vastagságát. Ez az alábbiak szerint adódik.

$$x(t) = \frac{\eta c \dot{m}}{\rho_c A_f} (f - 1)t \quad (19)$$

Számításokkal meghatározták, hogy a porréteg vastagságának növekedése, átlagosan 0,72 mm/h, ha a porkoncentrációt $c=0,0001$ -nek, valamint a leváló és visszapattanó részecskék arányát 0-nak feltételezzük.

Ennek tükrében a porréteg vastagságának változása természetesen jelentős hatással van a keletkező teljes nyomásvesztésre is. Az alábbi ábrán látható a nyomásesés növekedése $\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right)$ a működési idő függvényében. A három egyenes, három különböző „f” értékre adja meg a növekedést az idő függvényében.



22. ábra Különböző "f" értékekre a nyomásváltozás növekedése az üzemidő függvényében²⁷

Ami szembetűnő, hogy a nyomásesés nagysága az idő függvényében annál kisebb, minél nagyobb a porrétegből leváló, arról visszapattanó részecskék száma, hiszen ebben az esetben az adott időponthoz tartozó porréteg vastagság is kisebb, így a rajta keletkező nyomásletörés sem akkora mértékű. Mint látható mindhárom esetben a növekedés lineáris és függ mind a porréteg, mind pedig a szűrőbetét karakterisztikájától, mint ahogy az a felvett koordináta rendszer ordinátáján fel is lett tüntetve. Ha megnézzük a t=80 órához tartozó egyes nyomásarány értékeket, az alábbi eredményt kapjuk:

	f=0,9	f=0,8	f=0,7
$\frac{\Delta p}{\Delta p_0}$	2,2	3,3	4,45

23. táblázat A 80 óra üzemidőhöz tartozó nyomásnövekedési értékek²⁸

Ebből levonható a következtetés, hogy 80 óra üzemidő után egy IBF rendszeren keletkező porrétegen eső nyomásváltozás (f=0,7-nél) akár 4,5x akkora is lehet, mint a szűrőbetét nyomásletörése. Felveti tehát a kérdést, hogy a kialakult porréteg okozta szűrési hatások növekedés mennyire éri meg, ha a keletkező nyomásvesztés akár jelentősebb mértékben is ronthatja a hajtómű termikus hatásfokát. A cél tehát egy olyan kompromisszum megtalálása, amely kihasználja a porréteg kettősségéből adódó előnyöket úgy, hogy közben a nyomásvesztéset a minimális értéken tartja. Ez az ismert függvény mellett úgy optimalizálható, hogy megfelelő időközönként, amikor a nyomásesés növekedése még nem olyan nagymértékű, az IBF rendszert tisztítani kell, a porréteget a szűrőbetét belépő

²⁷ Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010. 242 p.

²⁸ A szerző készítette

keresztmetszetéről el kell távolítani [3][4].

Értékelés

Az IBF rendszer nagy népszerűségnek örvend a helikopter piacon, figyelembe véve kiemelkedően magas szűrési hatásfokát, amivel nagymértékben növeli az adott forgószárnyas repülőeszközön alkalmazott hajtóművek élettartamát. Működését tekintve tehát fizikai gátat szab a szennyezett levegőben található nagyobb átmérőjű porrészecskéknél. A benne található szűrőbetét 3-6 hajtogatott, legtöbbször gyapotszövet réteget tartalmaz, egy speciális olajjal impregnálva, amely elősegíti a folyékony szennyeződések szűrését is. A szűrőbetét két acélból vagy alumíniumból készült fémrács között helyezkedik el, lehetővé téve így a betét harmonikaszerű hajtogatását, amely az effektív szűrő felületet akár a hatszorosára is növelheti. Ezt a fajta hatékonyságot beárnyékolja az átáramlás során keletkező nyomásvesztés nagysága, amely az első telepítésnél az inerciális rendszerekhez viszonyítva ugyan nem számottevő (kb. 500 Pa), de az üzem során a fentebb feltárt okok következtében akár a 3000 Pa értéket is elérheti, amely a korábban vizsgált rendszereknél az idő függvényében jelentős növekedést nem eredményez.

A rendszer üzemideje meglehetősen széles tartományban mozoghat (1000-5000 h), hiszen minden esetben figyelembe kell venni a működési környezet porkoncentrációját, illetve az ott fellelhető szennyeződések fizikai paramétereit. Ugyanezek a tényezők befolyásolják, a javításközi üzemidőt is, amely 30-500 h intervallumban mozoghat függően a szűrő előtt kialakult porréteg vastagságától. A keletkező nyomásesés nagyban függ mind a szűrőbetét mind pedig a porréteg áteresztő képességétől, valamint a részecske megtartó tulajdonságuktól. Mint az a korábbi elemzésből kiderült a nyomásesés lineáris függvénye az eltelt időnek, természetesen hatással van rá a lepattanó és leváló részecskék száma is, amelynek növekedésével a nyomás megváltozása arányosan csökken. Ez természetesen a valóságban nem ilyen egyszerű, hiszen ez a fajta ideális működés minden körülmény figyelembe vételével igen valószínűtlen. A reális működési diagramban a kezdeti nyomásesés után ugyan lineárisan növekszik a nyomásesés, azonban van egy pont, ahol a függvény meredeksége drasztikusan megnő. Ez az a pont, ahol az IBF rendszer annyira eltömődik, hogy az üzem nem elégíti ki a minimális feltételeket. Ennek oka természetesen a szűrőbetét előtt felhalmozódott túl nagy mennyiségű szennyeződésréteg, amely arányosan csökkenti a betét áteresztő képességét. Itt fontos megemlíteni a permeabilitás kettős mivoltát. Korábbi vizsgálataimnál említettem, hogy a kialakult porréteg és a szűrőbetét áteresztő képességét differenciáltan kell elemezni. Ezt a fentebb lévő diagram lineáris emelkedése igazolja, hiszen

ha csak a szűrőbetét permeabilitását vizsgáljuk, annak áteresztő képessége konstans, így a rajta eső nyomásváltozás is állandó értékű. Ugyanez a porrétegről nem mondható el, hiszen ez a működés során folyamatosan vastagodik, egyre jobban gátolva ezzel az átáramló közegmennyiséget, és így a nyomásesésben lineáris növekedést okozva. Ez az a tény, ami a nyomásugrás nagyságát időben változóvá teszi. A nyomás letörés megváltozására jelentős befolyással van még az áramlási körülmények folyamatos változása. Az áramlás sebességének növekedése, a részecskék nagyobb tömörödése következtében a kialakuló porréteg tömegárammal szembeni ellenállását arányosan növeli. Hasonló hatással van porréteg tulajdonságaira a hőmérséklet csökkenése is, amely nem csak a levegőáram viszkozitásának megváltozása miatt rontja az áteresztő képességet, de egy bizonyos hőmérséklet határ alatt belső jegesedés is megindulhat, amely akár a porréteg teljes eltömődését is eredményezheti, gátolva ezzel a megfelelő mennyiségű levegő hajtóműbe áramlását.

Természetesen, mint a korábban vizsgált inerciális rendszereknél is, a legfőbb tulajdonság, ami a szűrőrendszer jóságát meghatározza, a szűrési hatásfok. Adott típushoz választott szűrő esetén mindenképp ez a prioritás, az első adat, amelyet a helikoptergyártó, vagy utólagos felszerelés esetén a tulajdonos figyelembe vesz. Nem szabad azonban figyelmen kívül hagynunk a többi fontos paramétert sem. Az IBF rendszereknél ezek közül az egyik legmarkánsabb a permeabilitás, amely nem csak a jól definiált, pontos adatokkal rendelkező szűrőrendszer tulajdonságait mutatja meg nekünk, de figyelembe veszi a működés során kialakuló porréteg tulajdonságait, időbeni megváltozását is. Az utóbbi tényezők figyelembe vétele csak megfelelő mennyiségű adat kiértékelése után, tapasztalati úton valósítható meg. Így tehát a kialakuló porréteg vastagságának növekedése jól behatárolható és szintén egy fontos tulajdonsága az IBF-nek. A fenti tényezők elemzése mellett külön vizsgálandó az átáramlás során keletkező nyomás letörés, amely befolyásolja a helikopter hajtóművének teljesítményét, rontja annak termikus hatásfokát [1][3].

ÖSSZEGZÉS

A különböző szűrőrendszerek eltérő paramétereket mutatnak a hajtómű szívócsatorna előtti alkalmazásuk figyelembevételével. Ennek figyelembevételével az alábbi szempontok alapján lehet kielégítő módon összehasonlítani a három rendszer jósági mutatóit:

- szűrési hatások (általában jelentősen eltér finom és durva homokszemcséknél, ennek megfelelően sok esetben mind a két értéket megadják);
- nyomásveszteségi tényező (az okozott nyomásveszteség analóg a szívócsatorna nyomásveszteségi tényezőjével, ahhoz hozzáadódva csökkenti a fajlagos hasznos munkát (teljesítményt), illetve a termikus hatásfokot (növeli a fajlagos tüzelőanyag-fogyasztást);
- a környezetbe vezetett szennyezett levegő tömegáramának és a teljes hajtómű tömegáramának viszonya (más szemlélettel, de ugyanazon mutató a szennyezett levegőáram és a tiszta hajtóműbe vezetett tömegáram viszonya);
- a szennyezett levegő környezetbe juttatásához (ejektálásához) a hajtóműtől elvezetett levegő mennyisége, illetve nyomása (másik megoldás esetében ugyanezt a levegőáramot mozgó ventilátor teljesítmény szükséglete);

[1]

A fent említett paraméterek szemléletes összehasonlítását az alábbi táblázat alapján tehetjük meg.

	IPS	VTS	IBF
Porkiválasztás (durva) [%]	65-85	90-93	>98,5
Porkiválasztás (finom) [%]	~65	nincs adat	nincs adat
Nyomásveszteség [Pa]	1500-2000	<500	500-3000
Környezetbe vezetett levegő [%]	>10	<10	0
Kompresszortól elvezetett levegő [%]	2-3	1-2	0
Karbantartás	minimális	minimális	rendszeres

24. táblázat A három porkiválasztó rendszer legfontosabb paraméterei²⁹

Mint látható a szűrési hatások szempontjából nagyon kedvező paramétereket mutat az IBF rendszer durva por esetén. A VTS és IBF szűrők esetében nem áll rendelkezésre megfelelő adat finom por esetére, de valószínűleg hasonló szűrési hatásokbeli eltéréseket kapnánk, mint

²⁹ Varga Béla okl. mk. alezredes: Katonai helikopter hajtóművek teljesítmény és hatások növekedésének műszaki technológiai háttere, valamint ezek hatása harcászati jellemzőikre, 2013. 110 p.

az a durva pornál látható. Az inerciális szűrő meglehetősen alacsony hatásossága alátámasztja azt a tényt, hogy alkalmazása a másik két rendszer fejlődésével lassan idejétmúlttá válik. Azoknál a típusoknál, ahol a gyártás során IPS került felszerelésre a hajtómű előtt, ma már legtöbbször egy másik, vagy akár mindkét másik szűrő felszerelésére is alkalmas a sárkányszerkezet.

Nyomásveszteség szempontjából a legkedvezőbb paramétereket a VTS rendszer mutatja, de ha csak a kezdeti nyomásveszteséget vesszük figyelembe az IBF is elfogadható értékeket mutat (500 Pa). Itt ugyanakkor az akár 3000 Pa-os nyomásváltozás a szűrő előtt kialakuló porréteg eredménye, amelynek megfelelő karbantartása az IBF üzemeltetésének egyik fontos sarokpontja. Ezen paraméter vizsgálatánál is az IPS mutatja a legkedvezőtlenebb adatot, amely ugyan kisebb, mint a szennyezett IBF esetében, azonban, nem szabad figyelmen kívül hagynunk, hogy míg a mechanikus szűrő tisztítható, addig az inerciális rendszer folyamatosan ezt a nyomásesést produkálja, hiszen ez a kialakítás a hajtómű részét képezi, arról nem eltávolítható.

A környezetbe elvezetett szennyezett levegőáram és az ejektáláshoz a kompresszortól megcsapolt levegő aránya a teljes tömegáramhoz viszonyítva az IPS és a VTS szűrők összehasonlítása során nem mutat nagy eltérést, de még itt is inkább az örvénykeltő rendszer felé billen a mérleg nyelve. Ami nagymértékben az IBF felhasználása mellett szól, az az, hogy ennél a rendszernél mindkét említett tömegáram paraméter zérus. Mivel a mechanikus szűrő működése során nem használunk szeparátort, ahol a szennyezett levegőt elvezetjük, ezért a levegőtömeg egésze a hajtómű szívócsatornájába áramlik. A másik két rendszer öntisztító mivolta miatt szükség van ejektor-levegő felhasználására, amelyet a kompresszortól csapolnak meg. Az IBF szűrőnél ettől is eltekinthetünk.

Ami esetlegesen az inerciális rendszerek alkalmazása mellett szól, az az imént említett ejektálás kérdése. Ez ugyan az alkalmazás során kedvezőtlen, ám ennek köszönhetően mind az IPS, mind pedig a VTS karbantartásigénye minimális. Ezzel szemben a mechanikus szűrőket rendszeresen ellenőrizni kell, a felrakódott porréteget megfelelő időközönként el kell távolítani. Azonban az ehhez a karbantartáshoz szükséges idő és munka befektetése nem túl nagy, így alkalmazásuk pozitív hatásai bőven kompenzálják ezt a negatív tényezőt.

Ezek a főbb jellemzők szemléltetik egy szűrőrendszer hatásosságát. Emellett természetesen más tényezőket is figyelembe vesznek egy-egy rendszer alkalmazásának vizsgálatánál, úgy, mint, tömeg, az áramlással szembeni keresztmetszet, ár, a felszereléshez szükséges idő. Az

egyértelmű cél tehát az, hogy a szűrési hatások maximális értéke mellett az összes többi paramétert a lehető legkisebb értéken tartsuk.

Az összehasonlítás során tehát kiderült, hogy a legkedvezőtlenebb mutatók az IPS rendszerénél fedezhetők fel. A ma már egyre fejlettebb IBF szűrők használata igen elterjedt, főként kiváló szűrési hatások paramétere miatt. Azonban nem lehet egyértelműen egyik, vagy másik rendszer alkalmazása mellett érvelni, hiszen rendkívül sok külső tényező befolyásolhatja az optimális szűrő kiválasztását. Figyelembe véve az adott helikopter típus priori működési feltételeit, a felhasználónak magának kell eldöntenie, hogy az adott körülmények között mely rendszer alkalmazása a legmegfelelőbb.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Varga Béla okl. mk. alezredes: Katonai helikopter hajtóművek teljesítmény és hatásfok növekedésének műszaki technológiai háttére, valamint ezek hatása harcászati jellemzőikre, 2013.
- [2] Mórocz László Gyula: A Mi-24-es helikopter porkiválasztó berendezésének vizsgálata 2004.
- [3] Antonio Filippone, Nicholas Bojdo: Turboshift engine air particle separation, 2010.
- [4] J. Warren, C. Gorton, S. Hoff and F. Alby: Air, land, sea and space FOD issues
- [5] RL. Loud&A.A. Slaterpryce: Gus turbine inlet air treatment, url: <http://www.muellerenvironmental.com/documents/GER3419a.pdf>
- [6] ISO Standard 12103-1
- [7] A. Hamed and W. Tabakoff: Erosion and Deposition in Turbomachinery, 2006.
- [8] Csák Attila: Helikopterek nagy szennyezettségű területen történő üzemeltetésének speciális kihívásai és a negatív hatások csökkentésének lehetőségei 2013. II. szám, Repüléstudományi közlemények
- [9] Óvári Gyula: Helikopter szerkezetan II. rész, TK445

