

საჰაერო ხომალდის აირტურბინული ძრავებში შემავალ ჰაერის ნაკადში შერეული უცხო სხეულების მახასიათებლების ანალიზი, კლასიფიკაცია და მათი ძრავაში მოხვედრის პრევენციის გზები

რობერტ ხაჩიძე¹, ანდრო მაისურაძე²

^{1,2} საქართველოს საავიაციო უნივერსიტეტი

ქეთევან დედოფლის გამზირი №16, 0103 თბილისი, საქართველო

რეზიუმე: ნაშრომში განხილულია საჰაერო ხომალდების (თვითმფრინავები, ვერტმფრენები) საექსპლუატაციო პირობები, რომელთა დროსაც მათ ძრავებში ხდება უცხო მყარი ნაწილაკები (მტვერი, ქვიშა და სხვა) და იწვევს მათ დაზიანებას. შესწავლილია ძრავაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკების მახასიათებლები (ზომები, მასები, სიმკვრივები, აბრაზიულობა და სხვ.), რომლებიც განსაზღვრავენ ძრავის შემადგენელი ნაწილების (კომპრესორი, ტურბინა და სხვ.) დაზიანების სახეობასა და ხარისხს. შემოთავაზებულია ამ დაზიანებათა შემცირებისა და პრევენციის გზები.

საკვანძო სიტყვები: საჰაერო ხომალდი, ძრავა, ჰაერის ნაკადი, უცხო სხეული, მყარი ნაწილაკი, ძრავას დაზიანება

შესავალი

ცნობილია, რომ საჰაერო ხომალდების ექსპლუატაციის სხვადასხვა პირობებში მათ ძრავებში შესაძლოა მოხვდეს ისეთი უცხო სხეულები, როგორიცაა მტვერი, ქვიშა, ასფალტის, ბეტონის და ყინულის ნატეხები, ვულკანური ფერფლი და სხვა. თითოეული მათგანის ძრავაში მოხვედრის მიზეზები, პროცესები და თვითონ ამ სხეულების მახასიათებლები განსხვავებულია ერთმანეთისაგან, ისევე როგორც მათი ძრავაში მოხვედრით გამოწვეული დაზიანების სახეობები და საფრთხის დონეები. ცხადია, ეკონომიკური ზარალია ამ გაუთვალისწინებელი მიზეზების გამო საჰაერო ხომალდის დაზიანებული ძრავის იძულებითი მოხსნა, რემონტი და კვლავ დაყენება საჰაერო ხომალდზე, რადგან ეს მოითხოვს მნიშვნელოვან დამატებით ხარჯებს მისი მფლობელი ავიაკომპანიისაგან [1].

უცხო სხეულების მოხვედრა საჰაერო ხომალდის ძრავაში ძირითადად ხდება მისი მიწის ზედაპირზე აფრენისწინა მოძრაობის, აფრენის, დაფრენისა და დაფრენის შემდეგი მოძრაობისას (სურ.1). თვითმფრინავებისთვის ეს პროცესები ხდება სხვადასხვა სტანდარტული აეროდრომებზე ან იშვიათად არასტანდარტული ან არაბეტონირებული ასაფრენ-დასაფრენი ზოლების შემთხვევაში.



სურ. 1 მტვრიანი გარემოს მაგალითები თვითმფრინავის აფრენისა და დაფრენის დროს

სხვა სიტუაციაა ვერტმფრენების შემთხვევაში, რადგან ვერტმფრენებს ხშირად უწევთ მოუწესრიგებელი მიწიდან აფრენა და მიწაზე დაფრენა განსაკუთრებულ პირობებში [2].

გარდა ამისა ვერტმფრენის მბრუნავი ხრახნის პროპელერის ფრთები ქმნიან ჰაერის ტურბულენტურ მოძრაობას, რაც დამატებით იწვევს ვერტმფრენის გარშემო მტვრიანი გარემოს შექმნას (სურ. 2), საიდანაც მის ძრავაში ხვდება ჭარბი რაოდენობის მტვერი და ქვიშა, ასევე სხვა უცხო ნაწილაკები.



სურ. 2 ვერტმფრენის ექსპლუატაციის მაგალითები მიწის ზედაპირთან ახლოს მტვრიან და ქვიშიან გარემოში

უცხო სხეულების მოხვედრა საჰაერო ხომალდის ძრავაში უფრო იშვიათად ხდება მათი კრეისერული ფრენის რეჟიმში მაღალ სიმაღლეებზე. ამ დროს ძრავაში შეიძლება მოხვდნენ (ძალზე იშვიათად) ზოგიერთი სახეობის ფრინველი (მაგალითად, კანადური ბატი) ან ვულკანური ფერფლი.

ძირითადი ნაწილი

უცხო სხეულებიდან, რომლებიც შეიძლება მოხვდნენ საჰაერო ხომალდის ძრავაში, განსაკუთრებული ადგილი უკავია მტვერსა და ქვიშას. მტვერი ორგანული ან მინერალური წარმოშობის წვრილი მყარი ნაწილაკებია, რომლის ზომები მერყეობს დაახლოებით 0,1 მიკრონიდან 0,1 მილიმეტრამდე. უფრო მეტი ზომის მყარი ნაწილაკები (5 მმ-მდე) წარმოადგენენ ქვიშას. ქვიშა წვრილნამსხვრევი ფხვიერი მთის დანალექი ქანია, რომელიც შედგება კვარცის, კირქვის, დოლომიტის, მინდვრის შპატის და ქარსის მარცვლებისაგან. იგი ასევე შეიცავს თიხისა და მტვრის ნაწილაკებს.

მტვრისა და ქვიშის გარდა მნიშვნელოვანი ადგილი უკავია ასევე ვულკანურ ფერფლს. ვულკანების ამოფრქვევისას ამოიფრქვევა ცხელი მაგმა, რომლისგანაც გამოიყოფა გარკვეული რაოდენობის ფერფლი და გაიტყორცნება მაღალ სიმაღლეზე, რომელზეც შეიძლება გადიოდეს თვითმფრინავის ეშელონური მოძრაობა. თუ თვითმფრინავის ძრავაში მოხვდება დიდი რაოდენობის ფერფლი, ძრავა შეიძლება გაჩერდეს. ასე მოხდა 1982 წელს ინდონეზიის თავზე, სადაც ახორციელებდნენ ფრენას British Airways-ის Singapore Airways კომპანიების ლაინერები, ასევე 1989 წელს ალიასკის თავზე. ბრიტანული აეროპლანის ოთხივე ძრავა გაითიშა, მხოლოდ ერთი ამუშავდა ბოლო მომენტში [3].

ქვიშას სხვა მრავალ თვისებათა შორის გააჩნია მრავალი გამორჩეული თვისება, რომელთაგან განსაკუთრებულია შემდეგი:

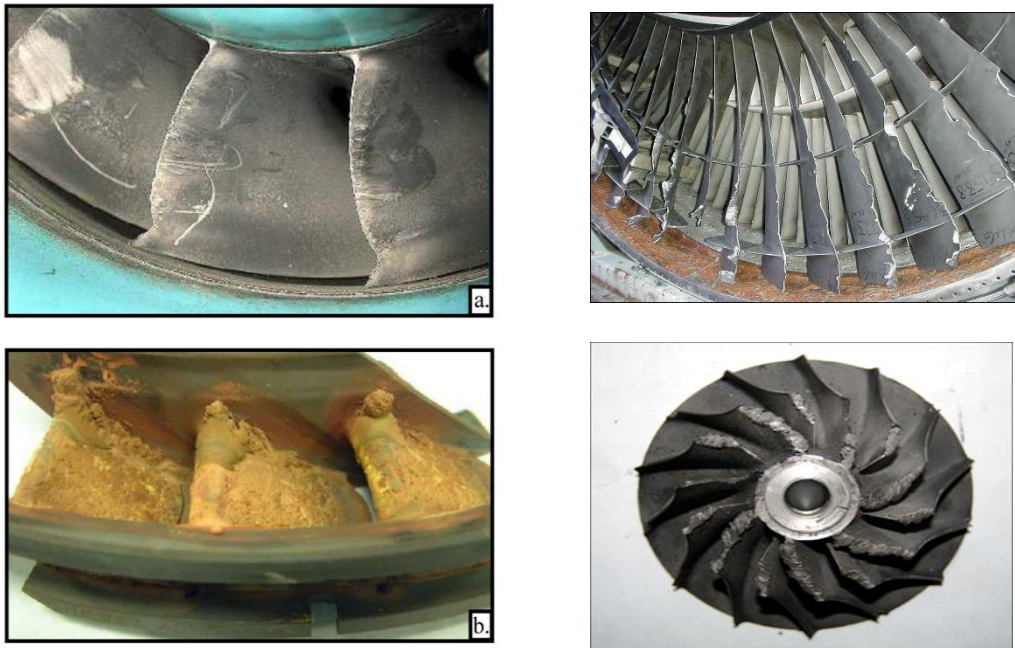
- რაიმე ჭურჭელში (მაგ. ძაბრში) ჩაყრილი ქვიშის გამოიხატება ჭურჭლის ნახვრეტიდან არ არის დამოკიდებული ჭურჭელში ქვიშის ფენის სიმაღლეზე ანუ რაოდენობაზე - ერთიდაიგივე ქვიშა ჭურჭლის ნახვრეტიდან გამოიხატება თანაბრად და ერთიდაიგივე სიჩქარით (ეს თვისებაა ქვიშის საათის მუშაობის საფუძველი);
- ქვიშა წყალგამტარია. რაც უფრო მსხვილია ქვიშის ნაწილაკები, მით უფრო სწრაფად ატარებს წყალს. ამავე დროს ის ატარებს მხოლოდ წყალს და არ ატარებს მასში არსებულ მინარევებს. ამ პრინციპზე მუშაობს ფილტრების უმრავლესობა;
- ქვიშას ახასიათებს გაბნევადობა. სუფთა და მშრალი ქვიშა არ ჩერდება დახრილ ზედაპირზე, მაშინ როცა სველი ქვიშის ნაწილაკებს გააჩნია ურთიერთშეჭიდულობის შესანიშნავი უნარი, რაც ფართოდ გამოიყენება მშენებლობაში;
- ქვიშა არ იკუმშება. ქვიშის ეს თვისება გამოიყენება წნევის წარმოსაქმნელად და გასანაწილებლად. თუ ჭურჭელში ჩავყრით მშრალ ქვიშას მასზე დაწოლის შემთხვევაში წნევა გადაეცემა როგორც ჭურჭლის ფსკერს, ისე გვერდებს, მაშინ, როცა სველი ქვიშის შემთხვევაში წნევა გადაეცემა მხოლოდ ფსკერს;
- ქვიშა აბრაზიულია, რაც განპირობებულია მასში კვარცის (SiO_2) უმეტესი შემცველობით (არანაკლებ 75%-სა).

სწორედ ჩამოთვლილიდან ქვიშის ამ უკანასკნელი თვისების გამოა საშიში მისი მოხვედრა ძრავაში.

ძრავაში მოხვედრილი მტვრისა და ქვიშის ნაწილაკების გარკვეული რაოდენობა აზიანებს მის ნაწილებს, განსაკუთრებით კომპრესორის ნიჩბებს, ასევე დიფუზორს, შუბლა ნაწილს, ტურბინის ნიჩბებს და სხვა კომპონენტებს, რომელთაც გარს ევლება მტვრისა და ქვიშის შემცველი დიდი ფარდობითი სიჩქარის მქონე ჰაერის ნაკადი.

ძრავას დაზიანება ძირითადად გამოიხატება მისი ნაწილების თანდათან მატებად ეროზიაში, ასევე მექანიკურ დაზიანებებში, რაც საბოლოოდ ამცირებს აირტურბინული საავიაციო ძრავების მარგი ქმედების კოეფიციენტს.

ეროზიის გარდა აირტურბინული ძრავაში ადგილი აქვს წვის კამერაში მოხვედრილი ნაწილაკების გადნობასა და მათ მიწებებას მის კედლებზე, ასევე ტურბინის ნიჩბებზე. აბრაზიული ნაწილაკების დიდი სიჩქარით დაჯახება ძრავს შემადგენელ ნაწილებზე, პირველ რიგში კომპრესორისა და ტურბინის ნიჩბებზე, იწვევს მათ მექანიკურ დაზიანებებს (სურ. 3).



სურ. 3 აირტურბინული ძრავებში მოხვედრილი ნაწილაკების მოხვედრით გამოწვეული დაზიანებების მაგალითები (კომპრესორისა და ტურბინის ნიჩბები)

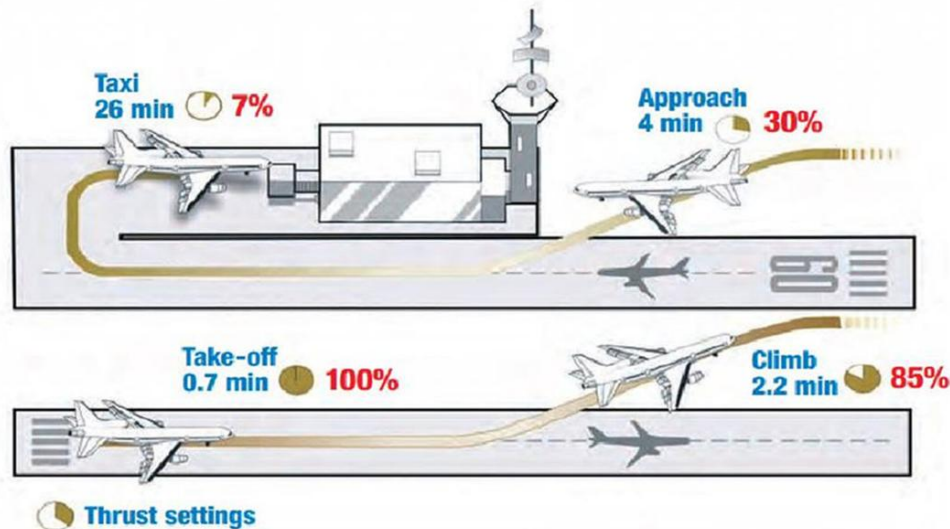
საჰაერო ხომალდების ეროზიის ხარისხი და დონე დამოკიდებულია რამდენიმე პარამეტრზე, მათ შორის ისეთებზე, რომლებიც ქვემოთ არის განხილული.

ა) საჰაერო ხომალდის ძრავის მუშაობის ხანგრძლივობა მტვრისა და ქვიშის შემცველ გარემოში.

ეს პარამეტრი თითოეული ტიპის საჰაერო ხომალდებისათვის განსზღვრულია შესაბამისი ნორმატიული და სახელმძღვანელო დოკუმენტებით მათი საექსპლუატაციო პირობებისათვის. მაგალითად, თვითმფრინავებისათვის, რომლებიც სარგებლობენ სტანდარტული აეროდრომებით, მათი აეროდრომზე მოძრაობისა და აფრენისა და დაფრენის პროცესების ხანგრძლივობები დადგენილია აფრენა-დაფრენის სტანდარტული ციკლით [4], რომელთა დაცვაც სავალდებულოა (სურ. 4). როგორც სურათიდან ჩანს, ასეთ შემთხვევაში საჰაერო ხომალდის ძრავის მუშაობის ხანგრძლივობა შეადგენს 29 წუთს. ფრენის დანარჩენი დრო ეთმობა ეშელონირებასა და საკრეისერო ფრენას, რა დროსაც გარემო სუფთაა უცხო სხეულებისაგან.

სხვაგვარადაა საქმე ვერტმფრენების შემთხვევაში, რომლებიც, როგორც ზემოთ აღინიშნა, აფრენა-დაფრენის დროს თვითონ დამატებით ქმნიან დამტვერიანებულ გარემოს საკმაოდ მაღალ

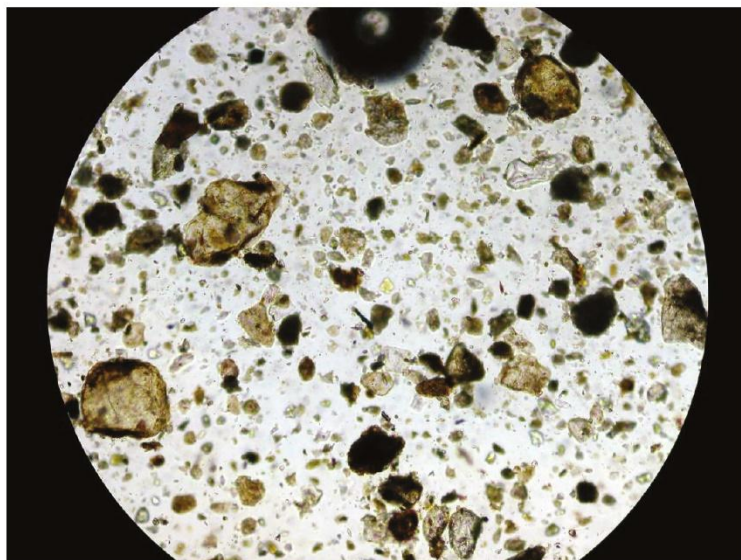
სიმაღლემდე. გარდა ამისა ხშირ შემთხვევაში ისინი ასრულებენ ფრენებს საგანგებო და განსაკუთრებულ პირობებში, სადაც მათ უწევთ თავისი ნამუშევარი დროის თითქმის 15-25% ნაწილის განმავლობაში მუშაობა [5, 6].



სურ. 4 თვითმფრინავის აფრენა-დაფრენის სტანდარტული ციკლი

ბ) ჰაერში შერეული მყარი ნაწილაკების კლასიფიკაცია, მათი ეფექტური ზომები და მასები.

მტვრისა და ქვიშის კლასიფიკაცია საკმაოდ რთულია (განსაკუთრებით მტვრის), რადგან ბუნებაში არ არსებობს ერთი და იგივე ფორმისა და ზომის მტვრის ან ქვიშის ნაწილაკები. ასევე მრავალგვარია მათი შემადგენლობა, მასა და წარმოშობის წყაროები. სურ. 5-ზე მაგალითისათვის წარმოდგენილია მყარი ნაწილაკების გადიდებული ნიმუშები ახლო აღმოსავლეთის უდაბნოებიდან.

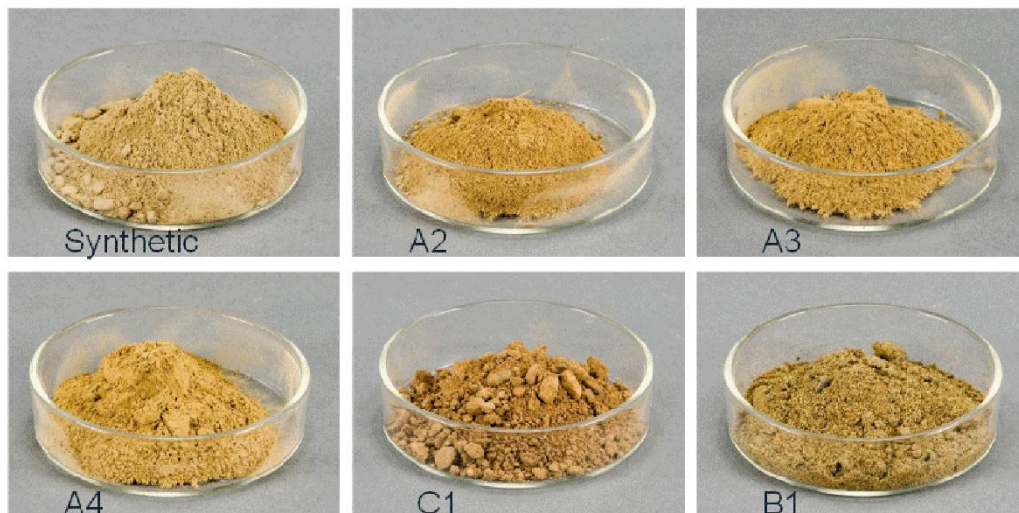


სურ. 5 ახლო აღმოსავლეთის უდაბნოებიდან აღებული ქვიშის ნიმუშის ნაწილაკების გადიდებული ფოტო

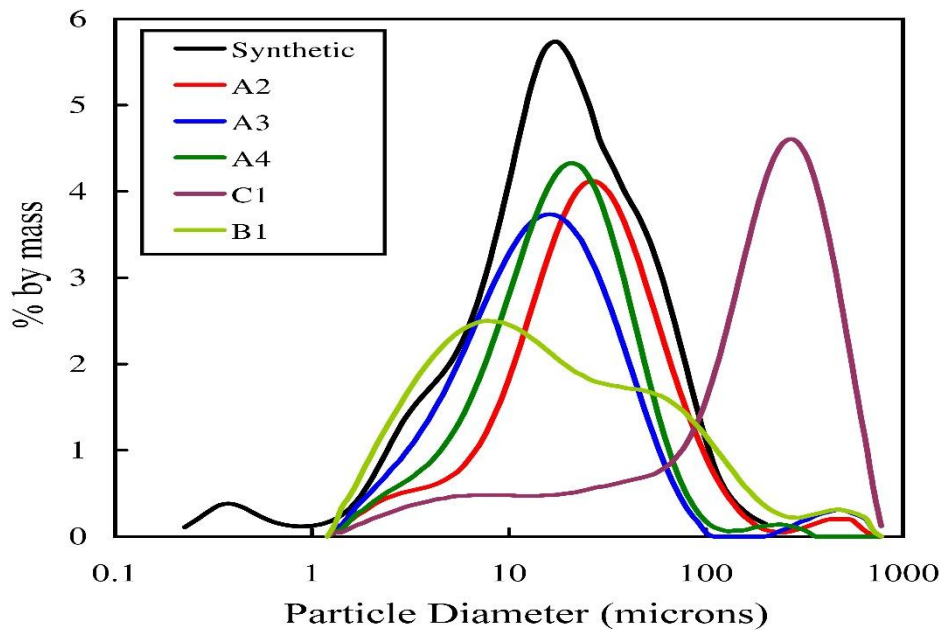
როგორც სურათიდან ჩანს, ქვიშის შემადგენელ ნაწილაკებს შეიძლება გააჩნდეთ მრავალგვარი ფორმა და ზომა, რომელთა მიხედვით მათი ზუსტი კლასიფიკაცია შეუძლებელია. საინჟინრო გათვლების ჩასატარებლად მიღებულია მათი წარმოდგენა ექვივალენტური სფერული ფორმის ნაწილაკის სახით, რომელსაც გააჩნია ისეთივე ფიზიკური თვისებები, როგორიც ორიგინალს. ასეთი მიდგომა იძლევა საშუალებას დაჯგუფდეს მტვრის/ქვიშის ნაწილაკები მათი ფიზიკური მახასიათებლების გარკვეული დიაპაზონების მიხედვით. მაგალითად, ჰაერში არსებული მცირე მყარი ნაწილაკები, რომლებიც წარმოიშობა სამშენებლო ინდუსტრიის ობიექტებზე და ვრცელდება ატმოსფეროში და რომელთა მოხვედრა ადამიანის ორგანიზმში საზიანოა მისი ორგანიზმისათვის, ზომის მიხედვით ძირითადად ორი ჯგუფად იყოფა: PM₁₀, რომელთა ეფექტური დიამეტრი შეადგენს 10 მკ-ს ან ნაკლებს, და PM_{2.5}, რომელთა ეფექტური დიამეტრი შეადგენს 2,5 მკ-ს და ნაკლებს. საერთოდ მტვრის ნაწილაკების ზომები, როგორც წესი, მერყეობს 0.1-დან 100 მიკრონამდე.

ზოგადად, მტვერი არის პოლიდისპერსიული არასტაბილური სისტემა, რომელიც შეიძლება იყოს ორგანული, არაორგანული ან შერეული წარმოშობის. წარმოშობის მიხედვით მათი ქიმიური შემადგენლობა შეძლება იყოს სხვადასხვაგვარი და გააჩნდეთ სხვადასხვა მახასიათებლები: დისპერსიულობა, სიმკვრივე, კუთრი ზედაპირი, მიწებების უნარი, სიფხვიერე, ჰიგროსკოპულობა, ტენშემცველობა, აბრაზიულობა და სხვა [7].

მტვრის ან ქვიშის ნაწილაკების მახასიათებლები, რომლებიც ხვდებიან საჰაერო ხომალდის ძრავაში, შეიცავს მათი ზომებისა და ფორმების გარკვეულ დიაპაზონს. სურ. 6, 7-ზე წარმოდგენილია ილუსტრაცია ქვიშაში მასების მიხედვით პროცენტული შემცველობის დამოკიდებულება მისი ნაწილაკების ეფექტურ დიამეტრზე ქვიშის ნიმუშებში, რომლებიც აღებულია მსოფლიოს ექვსი სხვადასხვა ადგილიდან [2].



სურ. 6 მსოფლიოს სხვადასხვა ადგილებიდან აღებული ქვიშის ნიმუშები



სურ. 7 ქვიშის ნაწილაკების მასური განაწილება მათი ეფექტური დიამეტრების მიხედვით

როგორც სურათებიდან ჩანს მეტ-ნაკლებად კარგი თანხვედრაა ნიმუშებისათვის - Syntetic, A2, A3, A4 ნიმუშებისათვის, ხოლო C1 და B1 ნიმუშებისათვის მნიშვნელოვნად განსხვავებულია როგორც ერთმანეთისაგან, ისე სხვა დანარჩენისაგან.

საჰაერო ხომალდის ძრავაში მოხვედრილი უცხო სხეულებიდან წარმოდგენილ სტატიაში არ განიხილება ფრინველები, რადგან ისინი არ წარმოადგენენ მყარ სხეულებს (მათში წყალი დაახლოებით 70-74%-ია), მათი მოხვედრა ძრავაში იშვიათია და ერთეულ შემთხვევებს წარმოადგენს, თუმცა მათი მასა იმდენად დიდია ზემოთგანხილული ქვიშის ნაწილაკებზე, რომ დიდი ფარდობითი სიჩქარის გამო ძრავის პროპელერის ნიჩბებზე მათ დაჯახებას აქვს ძლიერი დამაზიანებელი ეფექტი [8,9].

გ) ჰაერში შერეული ქვიშისა მინერალოგიური შემადგენლობა და სიმკვრივე:

ქვიშა ზომების მიხედვით პირობითად იყოფა სამ ჯგუფად: მსხვილი (2,5-3,5 მკ), საშუალო (2-2,5 მკ), წვრილი (2 მკ-მდე).

მინერალური შედგენილობის მიხედვით ქვიშა არსებობს კვარციანი, გლაუკონიტ-კვარციანი, მინდვრის შპატიან-კვარციანი, ქარსიანი და სხვა.

საშუალო ხარისხის ბუნებრივი ქვიშა (სამშენებლო სამუშაოებში გამოყენების თვალსაზრისით) შეიცავს მტვრისა და თიხის გარკვეულ ნაწილს (არაუმეტეს 3%-სა). დაბალი ხარისხის ქვიშაში თიხოვანი და მტვროვანი ნაწილაკების რაოდენობა ძირითადად 5 %-ის ფარგლებშია, ხშირად კი 8-12 %-ს აღწევს, ხოლო დანარჩენი ნაწილი შეიცავს: SiO_2 -ს (75-85 %), Al_2O_3 -ს (3-12 %), Fe_2O_3 -ს (0.5-2 %), CaO -ს (0.3-2 %-ს), MgO -ს (0.1-1.5 %-ს) და SO_3 -ს (0.2-1 %).

ქვიშას ახასიათებენ ორგვარი სიმკვრივით: ყრილი სიმკვრივით და ნამდვილი სიმკვრივით. კვარცის (SiO_2) ქვიშის ყრილი სიმკვრივე მერყეობს 1300 – 1500 კგ/მ³ დიაპაზონში, ხოლო ნამდვილი სიმკვრივე - 2650 - 2750 კგ/მ³ დიაპაზონში [10].

როგორც კვლევებითაა დადგენილი [11-13], ზემოაღნიშნული მყარი ნაწილაკების დეტექტირებითა და მათი თვისობრივი მახასიათებლების (აბრაზიულობა, დნობადობა და სხვა) გათვალისწინებითა და რაოდენობრივი მახასიათებლების (მყარი ნაწილაკების კონცენტრაცია ნაკადში, შერეული ნაწილაკების საშუალო სიმკვრივე და მასური ხარჯი) გაზომვით შესაძლებელია დადგინდეს დროის გარკვეული მონაკვეთის განმავლობაში ძრავაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკების მასა და პერიოდული შედარება კრიტიკულ მასასთან.

დასკვნა

მიუხედავად მყარი ნაწილაკების საჰაერო ხომალდების ძრავაში თავიდან აცილების სხვადასხვა მეთოდებისა და ტექნიკური საშუალებების არსებობისა, მტვერი/ქვიშა არის ისეთი რამ, რისი ძრავაში მოხვედრის 100%-იანი თავიდან აცილებაც დღემდე ვერ ხერხდება, თუმცა შესაძლებელია ამ ნაწილაკების მახასიათებლების დადგენის საფუძველზე გაიზომოს ძრავაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკების მასა და მოხდეს მისი პერიოდული შედარება კრიტიკულ მასასთან. თუ ძრავაში მოხვედრილი მყარი ნაწილაკების მასის გაზომილი სიდიდე მიაღწევს კრიტიკულ მასას, ძრავა უნდა მოიხსნას ექსპლუატაციიდან მისი გარემონტების მიზნით, თუნდაც ეს მოხდეს ძრავას ტექნიკური მომსახურების რეგლამენტით დადგენილ ვადაზე ადრე, რათა არ გამოვიდეს იგი მწყობრიდან და შენარჩუნებული იქნას მისი საექსპლუატაციო მაჩვენებლები.

მადლიერება: კვლევა განხორციელდა შოთა რუსთაველის საქართველოს ეროვნული სამეცნიერო ფონდის მხარდაჭერით [FR-24-4684, ჰაერსატარ მოწყობილობებში მრავალკომპონენტური მყარი ნაწილაკების შემცველი ნარევი ნაკადების მახასიათებლების კვლევა, მათი გაზომვისა და დეტექტირების ეფექტური მეთოდოლოგიის დამუშავება].

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. “О проблеме попадания посторонних предметов в двигатель летательного аппарата“, АВИАЦИЯ, ПОНЯТНАЯ ВСЕМ, 2012, <https://avia-simply.ru>;
2. N. M. Bojdo, “Rotorcraft Engine Air Particle Separation”, School of Mechanical, Aerospace & Civil Engineering, 2012;
3. „Как вулканический пепел останавливает двигатели самолетов?“, Центр ФОБОС, 2010, <https://www.meteovesti.ru/news>);
4. ICAO, DOC 9889, 2020;
5. А. С. Гишваров, Р. Р. Аитов, А. М. Айтумбетов. “Исследование эффективности пылезащитных устройств вертолетных газотурбинных двигателей”, сб. Науч. Тр. Уфа. УГАТУ. ISSN 1992-6502. 2015;
6. Д.В. Павленко, Я. В. Двирник. “Закономерности изнашивания рабочих рабочих лопаток компрессора вертолетных двигателей, эксплуатирующихся в условиях запыленной атмосферы”, ISSN 1727-0219 Вестник двигателестроения №1.2016;
7. <https://fakel-f.ru/blog/01-04-18>;
8. Ahmed F. El-Sayed, „Bird Strike in Aviation: Statistics, Analysis and Management“, 2019;
9. R. Khachidze, A. Maisuradze, G. Tsutskiridze. „Analysis of The Statistics of Injuries Caused by Birds Getting into The Engine When They Collide with Aircraft and Estimation of The Costs to be Incurred for Their Elimination“, „Air Transport“, ISSN 1512- 4916, #1(17) 2023;
10. “Характеристики и свойства песка: основные параметры песка.” *Gruntovozov.ru*, accessed October 8, 2025. <https://gruntovozov.ru/chasto-zadavayemiye-voprosy/svoystva-peska>;
11. Yang, Shaoping, et al. “Characterization of Sand and Dust Particles for Turbomachinery Erosion Testing.” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 135, no. 6 (2013);
12. SAE International. *Aerospace Particle Separation and Filtration Systems*. Warrendale, PA: SAE International, 2018;
13. R. Khachidze, A. Maisuradze, V. Kelikhashvili. “Ways of measuring the number of foreign particles in the gas turbine engine air intake”, „Air Transport“, ISSN 1512- 4916, #1(16) 2022.

Analysis and Classification of Foreign Object Characteristics in the Airflow Entering Aircraft Gas-Turbine Engines, and Strategies for Preventing Their Ingestion

Robert Khachidze¹, Andro Maisuradze²

^{1,2}Georgian Aviation University

16 Ketevan Dedopali Avenue, 0103 Tbilisi, Georgia

Abstract: *The paper examines the operational conditions of aircraft (airplanes and helicopters) under which foreign solid particles (dust, sand, and others) enter their engines and cause damage. The characteristics of solid particles ingested into the engine, such as size, mass, density, abrasiveness, and other properties—are analyzed, as these parameters determine the type and extent of damage sustained by engine components (including the compressor, turbine, and other parts). The study also proposes methods for reducing and preventing such damage.*

Keywords: *Aircraft, engine, airflow, foreign object, solid particle, engine damage.*