

საკანონმდებლო ორგანოს დასვა დარტყმითი დატვირთვებისგან

ა. მაისურაძე
საქართველოს საპარლამენტო უნივერსიტეტი

ს. მებონია, მ. ჟელიძე
რაფიელ დვალის მანქანათა მექანიკის ინსტიტუტი

ბ. მღებრიშვილი
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

აბსტრაქტი

განხილულია საფრენი აპარატების ტურბორეაქტიულ ძრავასა და ფრინველების დარტყმითი ურთიერთქმედება. ნაშრომში ფრინველის ტანი განხილულია როგორც ბლანტი მასა, ხოლო დარტყმის დროს ფრინველის ტანში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები აღწერილია ჰიდროდინამიკური მოდელით. დარტყმის მომენტში მაქსიმალური წნევის ძალა განსაზღვრულია სისტემის მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების თეორემის მიხედვით. შემოთავაზებულია ძრავას დამცავი მოდულის უცხო სხეულებთან შეჯახების დროს წარმოქმნილი ძალების განსაზღვრის მეთოდიკა და მათემატიკური მოდელი დამცავი მოდულის დინამიკის შესწავლისათვის. მიღებულია ტურბორეაქტიული ძრავასა და დამცავი მოდულის მოძრაობის მეორე რიგის არაერთგვაროვანი დიფერენციალური განტოლება მუდმივი კოეფიციენტებით. დადგენილია, რომ მოდულის კონსტრუქციის დრეკადი ელემენტები ასრულებს დემპფირების ფუნქციას და ნაწილობრივ ახდენს დარტყმის ძალის შერბილებას. მოცემულია თვითმფრინავის ტურბორეაქტიული ძრავის მოდულის გარე ობიექტებთან, მათ შორის ფრინველებთან, დარტყმითი ურთიერთქმედებისგან დამცავი ბადის გაანგარიშების მეთოდი.

საკვანძო სიტყვები: საფრენი აპარატი, ტურბორეაქტიული ძრავა, დატყმითი ურთიერთქმედება, დამცავი მოდული, დამცავი ბადე

Analysis of aircraft impact loads and calculation of the protective device

A. Maisuradze
Georgian Aviation University

S. Mebonia, m. Chelidze
Raphael Dvali Institute of Machine Mechanics

b. Mghebrishvili
Georgian Technical University

Abstract

The shock interaction between turbojet engines of aircraft and birds is considered. In the paper, the bird's body is treated as a viscous mass, while the physical processes taking place in the bird's body during impact are described by a hydrodynamic model. The maximum force of pressure at the moment of impact is determined according to the theorem on the change in the momentum of the system. A technique and a mathematical model are proposed to determine the forces arising from the collision of the protective module of the engine with foreign bodies and to study the dynamics of the protective module. A second-order heterogeneous differential equation of motion of the turbojet engine protection module with constant coefficients is obtained. It is established that the elastic elements of the module design perform a damping function and partially soften the impact force. A method for calculating the protective grid from shock interactions with external objects, including birds, of the turbojet engine module of an aircraft is given.

Keywords: aircraft, turbojet engines, shock interaction, protective module, protective grid

შესავალი

მრავალრიცხოვანი ზემოქმედებისაგან საფრენ აპარატებზე განსაკუთრებული ადგილი უკავია დარტყმით დატვირთვებს. საფრენი აპარატის და ფრინველების დარტყმითი ურთიერთქმედება დაბლა წევს ფრენის უსაფრთხოების მაჩვენებლებს. მსხვილი ფრინველის მოხვედრა თვითმფრინავის ძრავაში ხშირად მთავრდება კომპრესორის ფრთების დამტვრევით და ძრავას მწყობრიდან გამოსვლით (Barber, Taylor and Wilbek 1978, 78; Goyal and Vasko 2013, 83-107; Gard , Groszos, Brevic and Lee 2009, 161-169; Gao and Li 1990, 335-338).

ფინეთის სატრანსპორტო ავიაციის უსაფრთხოების სააგენტოს მიერ 2000-2011 წლების ანგარიშებიდან შეგროვილია საჰაერო ხომალდის ფრინველებთან შეჯახების მონაცემები (Nikolajeff 20014, 49), რომელთა საერთო რაოდენობა იყო 1800-ზე მეტი. წლების მიხედვით ეს მაჩვენებლები მოცემულია 1-ლ ცხრილში.

წელი	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
შეჯახებ- ბათა რიცხვი	172	187	102	84	148	168	145	121	117	167	198	222
				min								max

ცხრილი 1

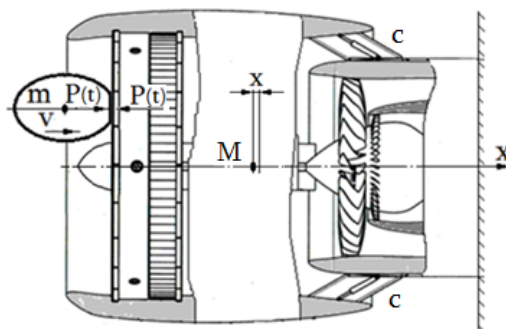
ევროპის საავიაციო უსაფრთხოების სააგენტოს გამოკვლევების (2009 წ) თანახმად ფრინველებთან შეჯახების შედეგად ძრავების დაზიანება 44%-ს შეადგენს. აქედან 53%-ით ტურბორეაქტიული ძრავების დაზიანება 53%-ს აღწევს, ტურბოპროპანსის - 38% და დეგუზიანი ძრავების - 6%-ს შეადგენს. (Ворожков 1959, 352).

აქედან გამომდინარე საფრენი აპარატების ფრინველებთან დარტყმითი ურთიერთქმედების შესწავლა ძალზე აქტუალურ პრობლემას წარმოადგენს.

ძირითადი ნაწილი

ცნობილია, რომ ფრინველის ტანი შედგება რბილი ქსოვილებისგან (ფრინველის მასის 50%), ჩონჩხისგან (მასის 10%-ზე ნაკლები) და სითხისგან (მასის 40%); აღსანიშნავია, რომ ზოგიერთ ნაშრომში სითხის მასა აყვანილია 70%-მდე. ამიტომ დარტყმის დროს ფრინველის ტანში მიმდინარე ფიზიკური პროცესები შეგვიძლია აღვწეროთ ჰიდროდინამიკური მოდელით ანუ წარმოვიდგინოთ ის როგორც სითხით ავსებული ცილინდრული ფორმის მოცულობა.

ფრინველის და თვითმფრინავის დარტყმით ურთიერთქმედებას განვიხილავთ როგორც სიჩქარით მოძრავი ცილინდრული ფორმის თხევადი სხეულის შეჯახებას ხისტ ზღუდესთან (ნახ. 1).



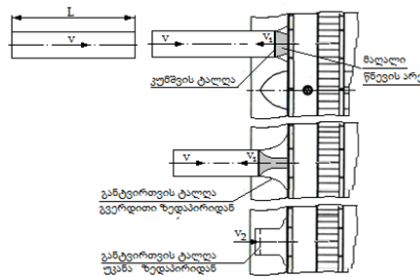
7y6

ნახ. 1. შეჯახების სქემა

შეხების მომენტიდან ცილინდრულ სხეულში სიჩქარით გავრცელებას იწყებს კუმშვის დარტყმითი ტალღა. თავისუფალი საზღვრებიდან იმავე დროს აირეკლება გაიშვიათების ტალღა, რომლის გავრცელების სიჩქარე აღვნიშნოთ ტალღების გავრცელების სქემა გამოსახულია ნახ. 2-ზე.

დარტყმითი ტალღის ფრონტის მეორე მხარეზე წარმოიქმნება მაღალი წნევის არე. ზღუდეზე მაღალი წნევის მოქმედების დრო ძალიან მცირეა და განისაზღვრება განტვირთვის ტალღის შეხების ადგილის მიღწევის დროით. დარტყმის საწყის მომენტში ცილინდრული სხეულის უკანა ნაწილი ჯერ კიდევ ინარჩუნებს თავის ფორმას, ხოლო წინა ნაწილი დეფორმირდება და სითხე განიცდის ზღუდეზე განდინებას (იხ.ნახ. 2). ცილინდრულ სხეულში წარმოქმნილი დარტყმითი ტალღის ფრონტი მიაღწევს მის უკანა ნაწილს მაშინ,

როდესაც უკანა ნაწილი ზღუდემდე მივა, რაც პრაქტიკულად ერთდროულად ხდება. ამიტომ დარტყმის ხანგრძლივობა უდრის ცილინდრული სხეულის უკანა ნაწილის მიერ ზღუდემდე მიღწევის დროს და განისაზღვრება როგორც სხეულის სიგრძის და სიჩქარის შეფარდება, ე.ი. L/v .



ნახ. 2. ტალღების გავრცელების სქემა

დარტყმის მომენტში მაქსიმალური წნევის ძალის განსაზღვრისათვის ვიყენებთ სისტემის მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების თეორემას, რომლის თანახმად სისტემის მოძრაობის რაოდენობის ცვლილება დროის რაიმე მონაკვეთში უდრის სისტემაზე მოქმედი გარე ძალის იმპულსს.

დარტყმის მომენტში დამუხრუჭებული სითხის მასა, რომელიც მოდის ზღუდეს ფართობის ერთეულზე ტოლია:

$$\Delta m = \rho v_1 \Delta t, \text{ კგ/მ}^2,$$

სადაც ρ არის სითხის სიმკვრივე; v_1 – დარტყმითი ტალღის გავრცელების სიჩქარეა

მოცემულ მასალაში, რომელიც უდრის ამავე მასალაში ბგერითი ტალღის სიჩქარეს, მ/წმ; Δt – დროის მონაკვეთი, წმ.

ამ მასის მოძრაობის რაოდენობა უდრის:

$$\Delta m v = \rho v_1 \Delta t \cdot v,$$

სადაც v არის ცილინდრული თხევადი სხეულის სიჩქარე დარტყმის მომენტამდე;

ძალის იგულისხმება მაქსიმალური წნევა) იმპულსი უდრის $p_{\max} \Delta t$.

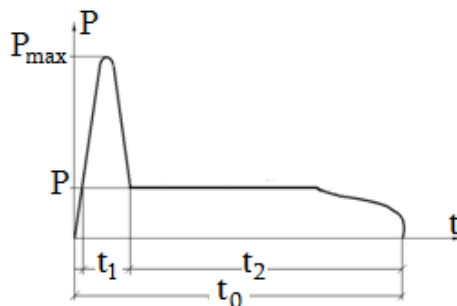
მოძრაობის რაოდენობის ცვლილების თეორემის თანახმად: $\rho v_1 \Delta t \cdot v = p_{\max} \Delta t$, საიდანაც სითხის

მაქსიმალური წნევა დარტყმის მომენტში უდრის: $p_{\max} = \rho v_1 v$.

მაქსიმალური დარტყმის ძალა უდრის მაქსიმალური წნევის და ცილინდრის განივი კვეთის ფართობის

ნამრავლს: $P_{\max} = p_{\max} S$.

განტვირთვის ტალღის მიერ შეხების ადგილის მიღწევისთანავე მყარდება ე.წ. კვაზიკავლური დინება. ამ ფაზაზე წნევა დარტყმის პროცესის დამთავრებამდე პრაქტიკულად უცვლელია. მაშასადამე, წნევის გრაფიკზე არის მაღალი წნევის მოკლე პიკი და შემცირებული წნევის შედარებით ხანგრძლივი პერიოდი (ნახ. 3).



ნახ. 3. დარტყმის ძალის ცვლილების მრუდი

განვიხილოთ ძრავას მოდულის მოძრაობა დარტყმითი ძალის ასეთი იმპულსის მოქმედების დროს. საანგარიშო სქემა მოცემულია ნახ. 1-ზე. ამ სქემაზე აღნიშნულია: $P(t)$ – ძალის იმპულსი; M – მოდულის მასა; c – ზამბარის სიხისტი; x – მოდულის გადაადგილება დარტყმის პროცესში.

სისტემის მოძრაობის დიფერენციალურ განტოლებას ასეთი სახე ექნება:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = P(t) - ncx,$$

აქ $P(t) = P_{\max} \text{Sin}pt$ არის ძალის იმპულსი; n – ზამბარების რაოდენობაა.

მცირე გარდაქმნის შემდეგ დიფერენციალური განტოლება ასე ჩაიწერება: $\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = \frac{P_m}{m} \text{Sin}pt + \frac{P}{m}$,

სადაც $\omega^2 = n \frac{c}{m}$ არის სისტემის საკუთარი რხევების სიხშირის კვადრეტი.

მიღებული გამოსახულება წარმოადგენს მეორე რიგის არაერთგვაროვან დიფერენციალურ განტოლებებს მუდმივი კოეფიციენტებით.

საწყისი პირობები ამ განტოლების ამოხსნისათვის ასეთია: როცა $t = 0$; $x(0) = 0$; $\frac{dx}{dt}(0) = v_0$, სადაც არის სხეულის სიჩქარე დარტყმის საწყის მომენტში.

დიფერენციალური განტოლების ერთგვაროვანი ნაწილის ამოხსნისა და სუპერპოზიციის პრინციპიდან გამომდინარე კერძო ამონახსნების განსაზღვრის შედეგად ვღებულობთ:

$$x = C_1 \text{Cos} \omega t + C_2 \text{Sin} \omega t + \frac{P_m}{(\omega^2 - p^2)m} \text{Sin}pt + \frac{P}{\omega^2 m}.$$

შევითანთ რა ამ გამოსახულება საწყის პირობებს, ვღებულობთ მუდმივი კოეფიციენტების შემდეგ

$$\text{მნიშვნელობებს: } C_1 = -\frac{P}{\omega^2 m}; C_2 = v_0 - \frac{P_m p}{(\omega^2 - p^2)m}.$$

მაშინ დიფერენციალური განტოლების საერთო ამონახსნი საბოლოო სახით ასეთი იქნება:

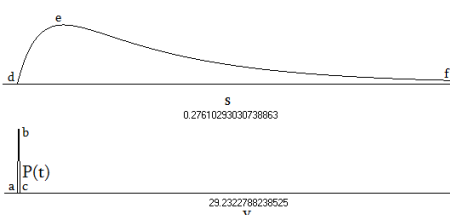
$$x = (1 - \frac{P}{\omega^2 m}) \text{Cos} \omega t + [\frac{v_0}{\omega} - \frac{P_m p}{\omega(\omega^2 - p^2)m}] \text{Sin} \omega t + \frac{P_m}{(\omega^2 - p^2)m} \text{Sin}pt.$$

დარტყმის ძალა, რომელსაც აღიქვამს ზამბარები ტოლია:

$$P(x) = m \{ (1 - \frac{P}{\omega^2 m}) \text{Cos} \omega t + [\frac{v_0}{\omega} - \frac{P_m p}{\omega(\omega^2 - p^2)m}] \text{Sin} \omega t + \frac{P_m}{(\omega^2 - p^2)m} \text{Sin}pt \}$$

ჩატარებული მათემატიკური ექსპერიმენტების შედეგები მოყვანილია ქვემოთ. ნახ. 4-ზე ნაჩვენებია $P(t)$ ძალის იმპულსის (ხამგრძლიობა 0,0025 ნმ) მოქმედების შედეგად გამოწვეული მოდულის გადაადგილება ზამბარების გათვალისწინებით.

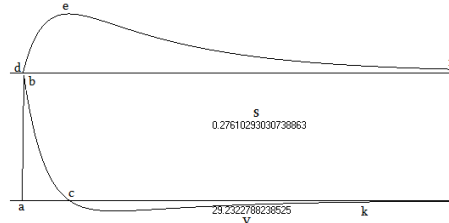
გრაფიკიდან ნათლად ჩანს, რომ de უბანზე მოდულის მოძრაობა მიმდინარეობს ძალის იმპულსის მოქმედების დამთავრების შემდეგ, ხოლო ef უბანი კი - შესაბამეა მოდულის უკუსვლით მოძრაობას, რომელიც გამოწვეულია მოდულის de გადაადგილების შედეგად შეკუმშული ზამბარის მიერ.



ნახ. 4. ძალის იმპულსით $P(t = 0,0025 \text{წმ})$ გამოწვეული მოდულის გადაადგილება

მოდულის მოძრაობები მიღებულია მოდულის დინამიკის დიფერენციალური განტოლების $m\ddot{x} = -2n\dot{x} - x + P(t)$ [6] მათემატიკური მოდელირების გზით ჩატარებული კვლევის შედეგად; ამ განტოლებაში $P(t)$ არის იმპულსური ძალა, რომლის მოქმედების ხანგრძლიობა განისაზღვრება წმ-ის პერიოდით.

ცხადია, მოდულის de მოძრაობა, რომელიც იწყება ფრინველთან შეჯახების დამთავრების შემდეგ, გამონვეულია ფრინველთან შეჯახების ac მომენტის პერიოდში მიღებული კინეტიკური ენერჯის შედეგად, რასაც თვალნათლად ადასტურებს ნახ. 5-ზე ნაჩვენები მოდულის გადაადგილებების შესაბამისი სიჩქარეთა გრაფიკები.

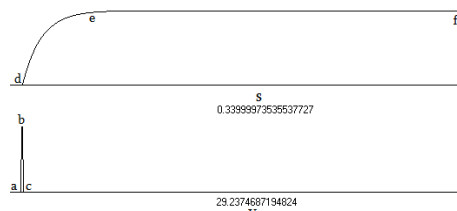


ნახ. 5. იმპულსური ძალის შედეგად გამონვეული მოდულის de და ef მოდულის გადაადგილება

გადაადგილებები სიჩქარის შესაბამისი ab, bc და ck მონაკვეთების თანხლებით

მართლაც, ფრინველთან შეჯახების მომენტში მოდული მყისიერად ღებულობს ab სიჩქარეს, ანუ კინეტიკურ ენერჯიას, რის შემდეგობითაც ხორციელდება მოდულის შემდგომი de მოძრაობა შესაბამისი bc სიჩქარის ვარდნის ფონზე, რომელიც მთავრდება c წერტილში, ანუ როდესაც მოდულის გადაადგილება აღწევს მაქსიმუმს e წერტილში. შემდგომ კი, შეკუმშული ზამბარის პოტენციური ენერჯიის ხარჯზე, მოდული იწყებს უკუსვლით ef მოძრაობას შესაბამისი cv სიჩქარის ფონზე.

დავადგინოთ ზამბარების როლი მოდულთან მიმართებაში ფრინველთან შეჯახების დროს. ამისათვის განვიხილოთ დიფერენციალური განტოლება დრეკადი ელფ-მენტის ანუ ზამბარის გარეშე: $m\ddot{x} = -2n\dot{x} + P(t)$ ამ განტოლება ანალიზის შედეგად მიღებულია ნახ. 6-ზე წარმოდგენილი გრაფიკები. აქ დინამიკური დატვირთვები იგივეა, რაც ნახ. 5-ზე, მხოლოდ ზამბარები მათემატიკურ მოდელიდან ამოღებულია:



ნახ. 6. მოდულის de და ef გადაადგილებები ზამბარების გარეშე

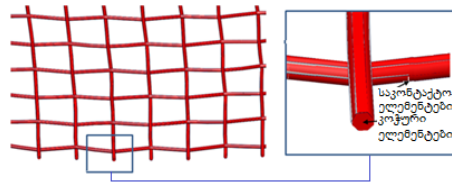
როგორც ნახ. 6-დან ჩანს de უბნის ფორმა იგივეა, მხოლოდ გაზრდილია გადაადგილება ზამბარების არარსებობის გამო. ამ შემთხვევაში არ ხდება ef უბანზე მოდულის უკან სვლა, ანუ ის აგრძელებს v სიჩქარით ef გადაადგილებას მანამ, სანამ არ დაეჯახება ძირითად აგრევატს.

ამრიგად, ზამბარები, იმპულსური ძალის ზემოქმედების შემთხვევაში, მთლიანად ვერ იცავენ მოდულს დაზიანებისაგან. მაგრამ ზამბარები ასრულებს დემფერის, შემარბილებლის ფუნქციას, რაც საჭიროა იმისათვის, რომ მოდული ძირითად აგრევატს არ დაეჯახოს, ე. ი. ზამბარები, ფაქტობრივად, იცავს ძირითად აგრევატს მოდულთან იმპულსური დაჯახებისგან, რაც მეტად მნიშვნელოვანია.

ფრინველებისგან ძრავის დასაცავად შეიძლება გამოყენებულ იქნას ჰაერის მიძღვნილი დამონტაჟებული უსაფრთხოების ბადე, რომელიც უნდა იყოს მსუბუქი და მტკიცე, რომ გაუძლოს ფრინველის დარტყმას და არ დაუშვას მისი მოხვედრა ძრავის შიგნით. დამცავი ბადე ასევე შეიძლება გამოვიყენოთ ავიამშენებლობის რთულ ტექნიკურ სისტემებში, დიდი ზომის მრავალფუნქციური კონსტრუქციებში, მექანიკურ სისტემებში დარტყმითი ურთიერთქმედებისაგან დაცვის მიზნით (. მაისურაძე 2017, 601; Maisuradze, Chelidze and Mebonia 2020, 23-28).

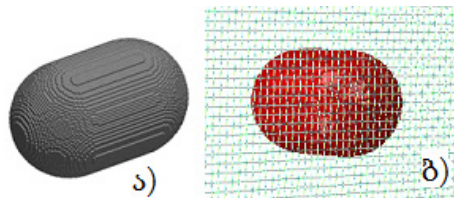
უსაფრთხოების ბადე (ნახ. 7), რომელიც გამოიყენება ძრავის დასაცავად, შედგება ერთმანეთთან

გადახლართული ლითონის მავთულის ღეროებისგან. ბადის მავთულის მოდელირებისათვის გამოიყენება კოჭური ელემენტები, ამასთან თითოეულ კოჭურ ელემენტს აქვს ექვსი დამატებითი საკონტაქტო ელემენტები გარე ზედაპირზე. ეს აუცილებელია ფრინველის მოდელთან დინამიკური კონტაქტის სწორი მოდელირებისთვის



ნახ. 7. დამცავი ბადე

მაღალსიჩქარიან პროცესებში ფრინველის სხეული სითხის მსგავსად იქცევა, ამიტომ გამოიყენება მასალის ჰიდროდინამიკური მოდელი (ნახ. 8) მასალა, რომელიც აღწერს რეალური ფრინველი საკმაოდ რთულ სტრუქტურას დარტყმითი ურთი-ერთქმედების დროს.

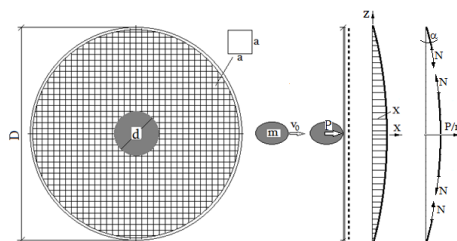


ნახ. 8. სარტყამის მოდელი (ა) და მისი შეჯახება ბადესთან (ბ)

მოდელირებისას შესაძლებელია ისეთი ეფექტის მიღება, როგორცაა ბადის დამტვრევა და ფრინველის იმპაქტორის მოღიანობის დარღვევა. ამ შემთხვევაში, იმპაქტორის უმეტესი ნაწილი დაკავებული იქნება დამცავი ბადით, მაგრამ მცირე ნაწილი მაინც გადის შიდა სტრუქტურაში და შეუძლია მისი დაზიანება.

დამცავი ბადის დეფორმაცია დარტყმის დროს ნაჩვენებია ნახ. 9-ზე. ამ ნახაზის მიხედვით ბადე აღიქვამს დარტყმას m მასის სხეულის მხრიდან, რომელიც მოძრაობს v სიჩქარით. ვერტიკალური ღეროების რაოდენობა, რომლებიც აღიქვამს დარტყმას P ძალით უდრის n_1 და ჰორიზონტალური ღეროების რაოდენობა n_2 .

$$\text{კონკრეტულ შემთხვევაში } n_1 = n_2 = \frac{n}{2}.$$



ნახ. 9. ბადის საანგარიშო სქემა

შევადგინოთ ძალების წონასწორობის განტოლება ჰორიზონტალური ღერძის გასწვრივ:

$$\frac{P}{n_1 + n_2} - 2N \cdot \sin \alpha = 0,$$

სადაც P არის დარტყმის ზემოქმედების ძალა, რომელიც აღიქმება ღეროებით;

N – ღეროს გრძივი გამჭიმავი ძალა;

α – ღეროს გადახრის კუთხე ვერტიკალური ღერძიდან.

ამ განტოლებიდან ღეროში მოქმედი გრძივი ძალის სიდიდე ტოლია
$$N = \frac{P}{2(n_1 + n_2)\sin\alpha}.$$

ეს ძალა გამოიწვევს ღერძული გამჭიმავი ძაბვების წარმოქმნას ბადის ღეროებში, რომლებიც ტოლია:

$$\sigma = \frac{N}{S},$$
 სადაც S არის ღეროების განივი კვეთის ფართობი.

დასკვნა

1. მიღებულია ტურბორეაქტიული ძრავის დამცავ მოდულზე დარტყმითი დატვირთვის საანგარიშო ფორმულები, რომელთა საშუალებით შეიძლება განისაზღვროს სხვადასხვა სხეულებთან ძრავას შეჯახებით გამონვეული ძალები.
2. მათემატიკური მოდელირებით დადგენილია, რომ დრეკადი ელემენტების არსებობის შემთხვევაში მოდულის კინეტიკური ენერჯია გადადის ამ ელემენტების პოტენ-ციურ ენერჯიაში, რის შედეგად ხდება დარტყმების შემცირება.
3. შემოთავაზებულია თვითმფრინავის ტურბორეაქტიული ძრავის მოდულის გარე ობიექტებთან დარტყმებისაგან დამცავი ბადის გაანგარიშების მეთოდიკა.

გამოყენებული ლიტერატურა

- Barber J., Taylor H., Wilbek J. "Bird Impact Forces and Pressures on Rigid and Compliant Targets". Air Force Systems Command Wright-Patterson Air Force Base. University of Dayton, Research Institute, Dayton, 1978.-78.
- Goyal V., Vasko T. 'Particle Hydrodynamic Approach for Bird-Strike Analysis Using LS-DYNA.' Am Trans Eng Appl Sci, #2(2), 2013. – Pp. 83-107.
- Gard K., Groszos M., Brevic E., Lee G. "Spatial Analysis of Bird-Aircraft Strike Hazard for Moody Air Force Base Aircraft in the State of Georgia" (Report). Georgia Journal of Science, #65 (4), 2009. - Pp.161-169.
- Gao X., Li J. "Analytical and Experimental Investigation of Bird Impact on Blades." J. Aerosp Power, #5(4), 1990. – Pp. 335-338.
- Nikolajeff J. "Analysis of the Birds Strike Reports Received by the Finnish Transport Safety Agency between the Years 2000 and 2011." Granfield University. Trafi Research Report, 7/2014. - 49 p.
- Воронков И. "Курс теоретической механики.М.:Высшая школа," 1959. – 352 с.
- მაისურაძე ა. "საავიაციო აირტურბინული ძრავები. აირტურბინული ძრავების თეორია." წიგნი 1-ლი. თბილისი, საქართველოს მეცნიერებათა აკადემიის გამომცემლობა, 2017. – 601 გვ.
- Maisuradze A., Chelidze M., Mebonia S. "Method for Calculating the Protective Grid of the Turbojet Engine Module." Problems of Mechanics, № 3(80).Tbilisi,2020. - Pp. 23-28.