

UDC 591.4:629.7.02

SCOPUS CODE 2202

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-3-276-287>**მქნევარმფრენის (ორნიტოპტერის) თეორიისა და შექმნის საკითხისადმი****ზურაბ****მჭედლიშვილი**

საინჟინრო გრაფიკისა და ტექნიკური მექანიკის დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68^ბ
E-mail: zurab.mch@mail.ru

რამინ ზუკაკიშვილი

მექანიკის ინჟინერიისა და სამრეწველო ტექნოლოგიების დეპარტამენტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68^ბ
E-mail: ramini.zukakishvili@gmail.com

გიორგი**გრატიაშვილი**

ნაგებობების, სპეციალური სისტემებისა და საინჟინრო უზრუნველყოფის ინსტიტუტი, საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი, საქართველო, 0160, თბილისი, მ. კოსტავას 68^ბ
E-mail: g.gratiashvili@gtu.ge

რეცენზენტები:

გ. სანაძე, სტუ-ის სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის ინჟინერიის ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: sanadzegivi05@gtu.ge

თ. ჩხაიძე, სტუ-ის სატრანსპორტო სისტემებისა და მექანიკის ინჟინერიის ფაკულტეტის პროფესორი

E-mail: t.chxaidze@gtu.ge

ანოტაცია. დედამიწაზე მოძინადრე არსებების ორი მესამედი სივრცეში გადაადგილებისას, იყენებს ქნევით ფრთებს. ფრთების ანალოგიური და მასზე აგებული საფრენი აპარატის შექმნა ადამიანისათვის აღმოჩნდა ძალზე რთული ამოცანა. დაფრინავენ მხოლოდ მცირე მოდელები, ხოლო პილოტირებული მქნევარმფრენით ჰაერში აფრენა ჯერჯერობით იშვიათად თუ ვინმემ მოახერხა, მიუხედავად იმისა, რომ ამასთან დაკავშირებით ბევრი მცდელობა იყო. ჩვენს ნაშრომში მოცემულია ადამიანის მიერ შექმნი-

ლი ასეთი აპარატების თეორიული ანალიზი და მოყვანილია ქნევითი ფრენის მექანიკის ზოგიერთი საკითხი.

საკვანძო სიტყვები: ამწევი ძალა; მასა; პროფილი; ფრთა; ფრინველი.

შესავალი

ერთი შეხედვით ფრინველისა და მწერის მიერ შესრულებული ქნევითი ფრენის პროცესის წარმო-

სახვა ძალზე მარტივია. როდესაც ადამიანებმა პირველად გადაწყვიტეს ფრენა ისინი აწყობდნენ მოძრავი ფრთების მქონე საფრენ აპარატებს (ორნიტოპტერებს), ფრთები მოძრაობდა ადამიანის კუნთების ძალის მეშვეობით. ამ საქმის პიონერი გახლდათ XV-XVI საუკუნეების მეცნიერი და ხელოვანი: ლეონარდო და ვინჩი, რომელმაც ფრინველებზე დაკვირვების საფუძველზე პირველმა ააგო ორნიტოპტერი და შეეცადა ადამიანი ჰაერში აეფრინა, მაგრამ ეს მცდელობა მარცხით დასრულდა. აეროდინამიკისა და ფრენის დინამიკის კანონების უცოდინარობამ კიდევ მრავალ მეცნიერსა და ენთუზიასტს შეუშალა ხელი ჰაერში აეწია მათ მიერ შექმნილი ჰაერზე მძიმე საფრენი აპარატები.

ჰაერფრენის ფუძემდებლების ნიკოლაი ეგორის ძე ჟუკოვსკისა და ოტო ლილიენტალის თავდაპირველი ნაშრომები ეფუძნებოდა ფრინველთა ფრენაზე დაკვირვებას და მათი ფრთების აგებულების გამოკვლევებს. კერძოდ იმასა თუ როგორ იქმნება პლანირებული ფრთის ამწევი ძალა. ასეთი გამოკვლევების შედეგი გახდა 1904 წელს თეორიულად მიღებული ფრთების ოპტიმალური პროფილები, რომლებიც ახლოსაა ფრინველის ფრთის პროფილთან. ასეთი პროფილების (ჟუკოვსკის პროფილები)

ამწევი ძალის ფარდობა ფრონტალური წინაღობის ძალასთან მაქსიმალურია. ისინი იდეალურია შედარებით დაბალი სიჩქარეებისათვის (რამდენიმე ათეული მეტრი წამში), რომლებიც ახასიათებს ფრინველთა ფრენას, ხოლო სრულებითაც არ არის ოპტიმალური დიდი სიჩქარეებისათვის, რომლებითაც დაფრინავენ თანამედროვე თვითმფრინავები. რაც შეეხება მწერებს, მათ ფრთებს არ გააჩნიათ პროფილი და ისინი ბრტყელი ფორმისაა. ზოგიერთ მწერს თითოეულ მხარეს აქვს ორ-ორი, სამ-სამი ცალი ფრთა.

ძირითადი ნაწილი

სრულად განსხვავდება მფრინავი არსებების ფრთების ფორმები და ზომები. მარტო სხვადასხვა სახეობის მწერებისათვის ისინი სიდიდით შეიძლება განსხვავდებოდნენ 1000-ჯერ. მიახლოებით ამდენჯერვე განსვავდება ფრინველებისა (კოლიბრიდან ამერიკულ კონდორამდე და ალბატროსამდე) და სხვადასხვა თვითმფრინავის ფრთების ზომები. ხოლო ფრთების სიდიდეთა სხვაობა ყველაზე მცირე მწერებისა და ყველაზე დიდ თვითმფრინავებს შორის შეიძლება შეადგენდეს რამდენიმე ასეულ ათასს.



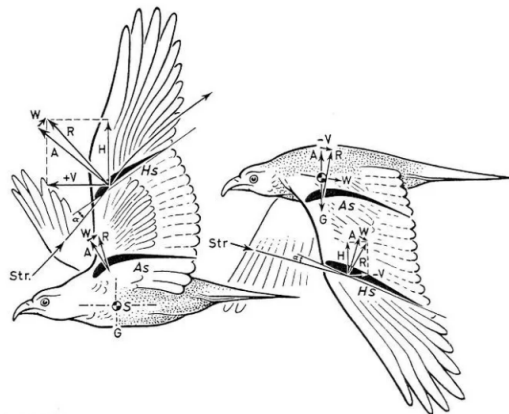
სურ. 1. სხვადასხვა სახეობის ფრინველების ფრთების კონსტრუქცია

აეროდინამიკური დამოკიდებულებები რომლებიც მართებულია მცირე მფრინავი ობიექტებისათვის, შეიძლება საერთოდ არ გამოდგეს დიდებისათვის. სრულიად აშკარაა რომ დღევანდლამდე არ არსებობდა მსგავსების ერთიანი კრიტერიუმები ჰაერზე მძიმე ყველა მფრინავი ობიექტისათვის, რაც თავისთავად აფერხებდა ეფექტური პილოტირებული ორნიტოპტერის შექმნას.

საქმე ისაა, რომ ორნიტოპტერმა უნდა განახორციელოს ფრინველის ფრენის იმიტირება. ფრინველის ფრენა ემყარება იმავე აეროდინამიკურ პრინციპებს, რასაც ხელოვნური საფრენი აპარატის ფრენა. ფრინველი არის არსობრივად ცოცხალი თვითმფრინავი, იგი იყენებს ფრთის, პროპელერის, ფრთაწინა და ფრთაუკანას მსგავს მოწყობილობებს, რომ-

ლებიც მას მისი ევოლუციის 150- მილიონწლიანმა პროცესმა შესძინა და რომლებიც მას ეხმარება აფრენისა და მიწაზე დაჯდომის დროს.

დაჩქარებული კინოგადაღებების მეშვეობით დადგინდა, რომ ფრინველი არ უბიძგებს თავის თავს წინ, ფრთების საწინააღმდეგო მიმართულებით ჰაერის მასებზე მიწოლის მეშვეობით. როდესაც ის ფრთებს უშვებს ქვემოთ ერთდროულად ის მათ გადაადგილებს წინ, ფრენის მიმართულებით და არა უკან. იმ დროს, როცა ფრინველი მაღლა სწევს ფრთებს, იგი არ კარგავს ფრენის სიმაღლეს, არამედ მდოვრედ გადაადგილდება ერთ დონეზე. ფრთა ამ შემთხვევაში მუშაობს არა მარტო თვითმფრინავის ფრთასავით, არამედ ვერტმფრენის ნიჩაბივითაც (სურ. 1).



სურ. 2. ფრინველის ფრთების მოძრაობის სქემა

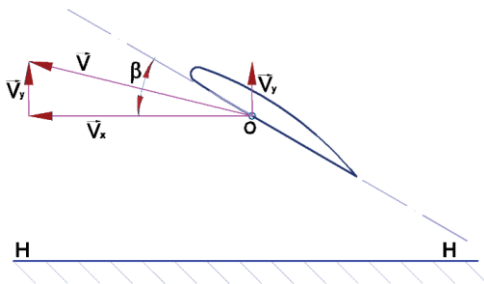
ნებისმიერი საფრენი აპარატის ფრენისათვის საჭიროა ამწევი და წევის ძალები. როგორც ცნობილია, თვითმფრინავისათვის ეს ძალები იქმნება ერთმანეთისაგან განცალკევებულად: ამწევი ძალა ფრთების, ხოლო წევის ძალა ხრახნის ან რეაქტიული ძრავების მეშვეობით.

ფრინველი და მწერი, ამწევ და წევის ძალებს წარმოშობს ერთობლივად, მქნევარა ფრთების მეშვეობით. ნახსენები ძალების შესაქმნელად ფრინველი (მწერი) აქნევს ფრთას და ერთდროულად აბრუნებს მას მისი გრძივი ღერძის გარშემო. ეს მობრუნება ფრინველს სჭირდება იმისათვის, რომ შექმნას ჰაერის ნაკადის მიმართ ფრთის სხვადასხვა შეტევის

კუთხეები. ფრთის სრული ქნევა იყოფა ორ ფაზად: ქნევა ზევით და ქნევა ქვევით.

იყო გავრცელებული მცდარი აზრი, რომ ფრინველის ფრთა სასარგებლო მუშაობას ასრულებს მხოლოდ ქვემოთ დაქნევისას, ხოლო ზემოთ აქნევა ენერგეტიკული თვალსაზრისით უსარგებლოა. ჩვენ დავინახავთ, რომ ზემოთ აქნევიდან სრულდება სასარგებლო მუშაობა და წარმოიქმნა ამწევი ძალა.

ჰორიზონტალური ფრენის დროს ფრთების ქნევა ახლოსაა ვერტიკალურთან. ფრთის მოძრაობა ჰაერის მიმართ განიხილება როგორც ორი მიმართულებით მოძრაობის ტოლქმედი: ფრთის მოძრაობა ვერტიკალურ სიბრტყეში და ფრთის წინსვლითი მოძრაობა ფრინველის კორპუსთან ერთად ჰორიზონტალურ სიბრტყეში.



სურ. 3

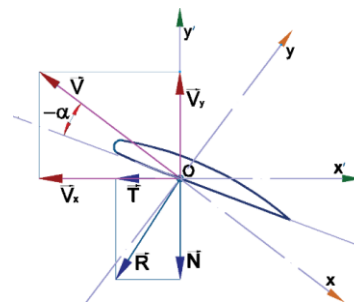
მე-3 სურ-ზე გამოსახულია ფრინველის ფრთის პროფილი. პროფილი დახრილია ჰორიზონტალური სიბრტყის მიმართ დადებითი β კუთხით. ფრთას აქვს ვერტიკალური $\vec{V}_y$ სიჩქარე, რომელიც პერპენდიკულარულია HH ჰორიზონტალური სიბრტყის და ჰორიზონტალური $\vec{V}_x$ სიჩქარე, რომელიც ამავე სიბრტყის პარალელურია. ჯამური სიჩქარის ვექტორი და მოდული გამოისახება ფორმულებით:

$$\vec{V} = \vec{V}_y + \vec{V}_x \quad (1)$$

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (2)$$

ფრთის შეტევის კუთხე სრული სიჩქარის ვექტორის მიმართ აღვნიშნოთ α -თი. შეტევის კუთხე შეიძლება იყოს ისეთი, რომ ფრთას ჰქონდეს ნაკადისადმი დადებითი რეაქცია ან ისეთი, რომ რეაქცია იყოს უარყოფითი. შეტევის ნულოვან კუთხედ ითვლება ისეთი, როდესაც $C_y = 0$. კუთხის ამისთანა ათვლისას ცხადია, დადებითი შეტევის კუთხის შემთხვევაში ჰაერის მიმართ ფრთის რეაქცია დადებითია, ხოლო უარყოფითი α -ს შემთხვევაში – ყოველთვის უარყოფითია.

ვაჩვენოთ ის შემთხვევები, როცა თუ შეტევის კუთხე უარყოფითია, მაშინ ფრთა წარმოქმნის გამწევ ძალას, ხოლო თუ ეს კუთხე დადებითია, მაშინ ის წარმოქმნის წინაღობის ძალას.



სურ. 4

1-ელი შემთხვევა, როდესაც α კუთხე უარყოფითია (სურ. 4) .

ამ შემთხვევაში გვექნება

V_y – ფრთის ქნევის სიჩქარე.

V_x – ფრინველის ფრენის სიჩქარე.

V – ფრთის სრული სიჩქარე.

R – ფრთაზე მოქმედი ჯამური აეროდინამიკური ძალა.

თუ ამ ძალას დავშლით ორ მდგენელად, სიჩქარის ვექტორის მიმართულებით და მის პერპენდიკულარულად, მივიღებთ:

$$R = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3)$$

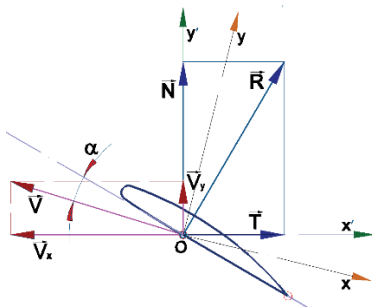
სადაც P არის ფრინველის ფრთის ამწევი ძალა, ხოლო Q – ჰაერის წინააღმდეგობის ძალა.

თუ დავშლით სრულ ჯამურ ძალას x' ღერძის მიმართულებით, რომელიც პარალელურია V_x -ის და y' -ის მიმართულებით, რომელიც ამ სიჩქარის პერპენდიკულარულია, მივიღებთ:

$$R = \sqrt{N^2 + T^2} \quad (4)$$

სადაც T არის ფრინველზე მოქმედი წინ გამწევი ძალა, ხოლო N – ნორმალური ძალა, რომელიც უშვებს ფრთას ქვემოთ.

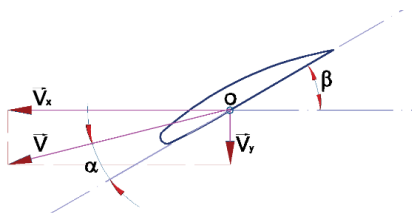
მე-2 შემთხვევა, როცა α კუთხე არის დადებითი (სურ. 5). ამ დროს N ძალა ეწევა ფრთას ზემოთ, ხოლო T ძალა – უკან.



სურ. 5

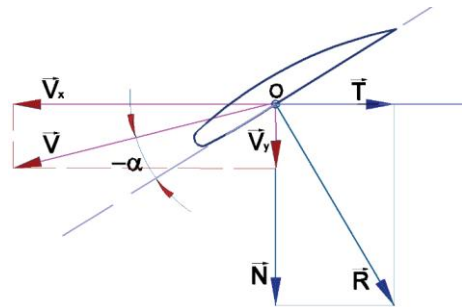
ქნევა ქვემოთ

ამ დროს ფრთის პროფილი ჰორიზონტალური სიბრტყის მიმართ ორიენტირებულია უარყოფითი კუთხით და V_x ქნევის სიჩქარე მიმართულია ქვემოთ (სურ. 6). აქაც შესაძლებელია ფრთის მოძრაობის ორი შემთხვევა:



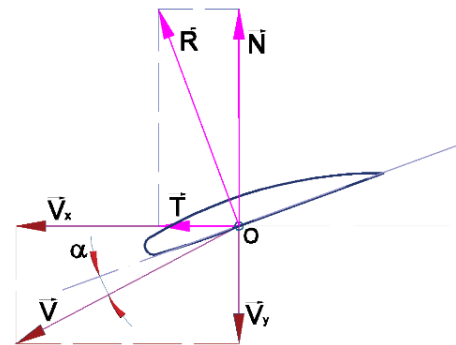
სურ. 6

1-ელი შემთხვევა, როცა შეტევის α კუთხე არის უარყოფითი (სურ. 7). თუ დავშლით ძალას წინა შემთხვევაში არჩეული ღერძების მიმართულებით, მივიღებთ N ძალას, რომელიც ჩამოუშვებს ფრთას, და T ძალას, რომელიც ფრთას ეწევა უკან.



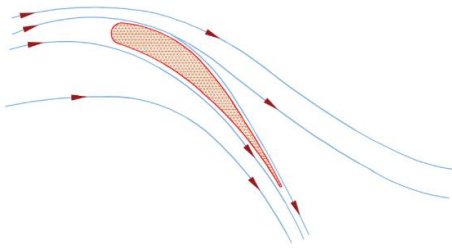
სურ. 7

მე-2 შემთხვევა როცა α კუთხე არის დადებითი (სურ. 8). თუ დავშლით ძალას წინა შემთხვევაში არჩეული, ფრინველზე ბმული ღერძების მიმართულებით (სურ. 10), მივიღებთ $\vec{N}$ ძალას, რომელიც ეწევა ფრთას ზემოთ, და $\vec{T}$ ძალას, რომელიც უბიძგებს ფრთას წინ.

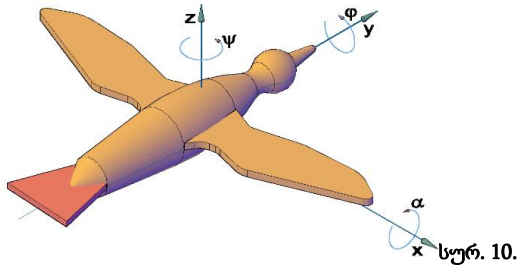


სურ. 8

განხილულიდან ჩანს, რომ ფრინველი იღებს ამწევ ძალას როგორც ფრთის ქვემოთ დაშვების, ისე მისი ზემოთ აწევის შემთხვევაში.



სურ. 9. ფრინველის ფრთის პროფილის გარსდენა ჰაერის ნაკადით



ფრინველზე ბმული საკოორდინატო სისტემა

ახლა გავაკეთოდ იმ ორნიტოპტერების კონსტრუქციების მოკლე მიმოხილვა, რომლებიც შეიქმნა სხვადასხვა დროს.

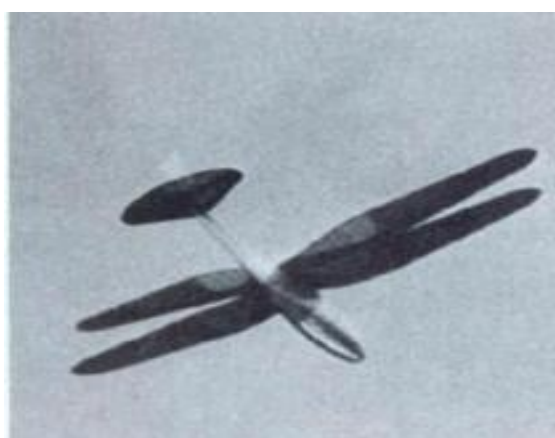
მე-11 სურათზე გამოსახულია ბ. ი. ჩერნავსკის მიერ 1921 წელს აგებული ორნიტოპტერი. მქნევარ-მფრენი წარმოადგენდა ბიპლანს, რომელიც მოძრაობდა პილოტის ფეხების კუნთების ძალის მეშვეობით. ამ აპარატის საფრენოსნო გამოცდისას, მნიშვნელოვანი შედეგები მიღწეული ვერ იქნა. კონსტრუქტორმა დროებით მიაწება თავი პროექტზე მუშაობას და მას დაუბრუნდა 13 წლის შემდეგ, როდესაც შექმნა ორნიტოპტერი БИЧ-16 (სურ. 12).



სურ. 11



სურ. 12



სურ. 13

ეს მოდელი წარმოადგენდა მონოპლანს, რომლის ფრთებიც მოძრაობდა წინას ანალოგიურად ფეხის პედლების მეშვეობით. ამ აპარატის კონსტრუქციამაც ვერ გაამართლა და ჩერნავსკი 1937 წელს შეუდგა შემდეგი ორნიტოპტერის БИЧ-18-ის შექმნას (სურ.13). აპარატს ჰქონდა ისეთივე, როგორც პლანერს, ფიუზელაჟი, მაგრამ ფრთების კონსტრუქცია იყო სულ სხვანაირი, ისინი წყვილ-წყვილად იყო შეერთებული საერთო საკისარზე, რომლებიც ფეხის პედლებს მოჰყავდა ქნევით მოძრაობაში. ეს აპარატი გამოსცადეს და გამოცდებმა აჩვენა დამაკმაყოფილებელი შედეგები, რის შემდეგაც კონსტ-

რუქტორი გაურკვეველი მიზეზების გამო მქნევარაფრთიანი აპარატების შექმნას აღარ დაბრუნებია.

არ შეიძლება გვერდი ავუაროთ ჩვენი თანამემამულის ალექსი ვლადიმერის ძე შიუკოვის საკონსტრუქტორო შემოქმედებას. იგი იყო სამხედრო მფრინავი და ეკავა მაღალი სამხედრო თანამდებობები, მან 1908 წელს თბილისში მახათას მთიდან განახორციელა რამდენიმე გაფრენა მისივე კონსტრუქციის სხვადასხვა პლანერის მეშვეობით, რომელთაგან ერთ-ერთი წარმოადგენდა მქნევარმფრენს (ორნიტოპტერს). ფრენებმა წარმატებით ჩაიარა. მახათას მთაზე ფრენებიდან ნახევარი საუკუნის შემდეგ,

მოსკოვთან ახლოს ტუშინოს აეროდრომზე ა. ვ. შიუკოვმა წარმოადგინა თავისი ახალი კონსტრუქციის მოტორული ორნიტოპტერი დასახელებით: IIIA-1. საფრენი აპარატი დაპროექტებული იყო „იხვის“ სქემით, მისი სიმაღლის საჭე მდებარეობდა 6 მ სიგრძის ფრთების წინ ხოლო მიმართულების საჭე და მარეგულირებელი – მათ უკან. აპარატი იწონიდა 300 კგ-ს. საცდელი ფრენისას იგი ავიდა ჰაერში რამდენიმე მეტრით, მაგრამ მისი ძაღოვანი სქემის რამდენიმე დეტალი გატყდა არასაკმარისი სიმტკიცის გამო, რის შედეგადაც აპარატმა ფრენა ვეღარ განაგრძო. ამის შემდეგ, ერთ დღეს, თვით-

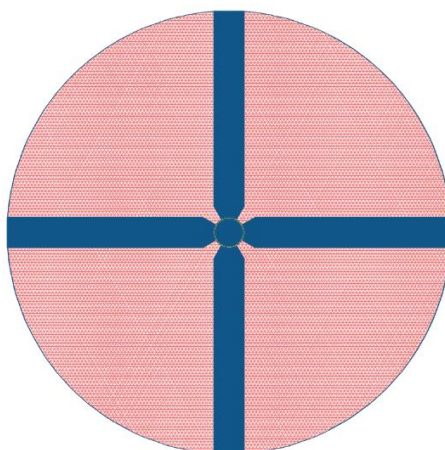
მფრინავების სადგომ ანგარში გაჩნდა ხანძარი და ა. ვ. შიუკოვის ორნიტოპტერი დაიწვა. კონსტრუქტორმა ვეღარ მოახერხა ამ საფრენი აპარატის აღდგენა და ორნიტოპტერით ფრენა მას მხოლოდ ოცნებად დარჩა. ასევე წარუმატებლად დასრულდა სხვა კონსტრუქტორების მიერ შექმნილი პილოტირებული ორნიტოპტერების ფრენებიც (სურ. 14). წარმატებით დაფრინავენ მხოლოდ მცირე ზომის უპილოტო ექსპერიმენტული ორნიტოპტერები (სურ. 15), რომლებზედაც ატარებენ ისეთი აპარატების საფრენოსნო ექსპერიმენტებს, რაც დიდი საპილოტო მოდელების შექმნისათვისა აუცილებელი.



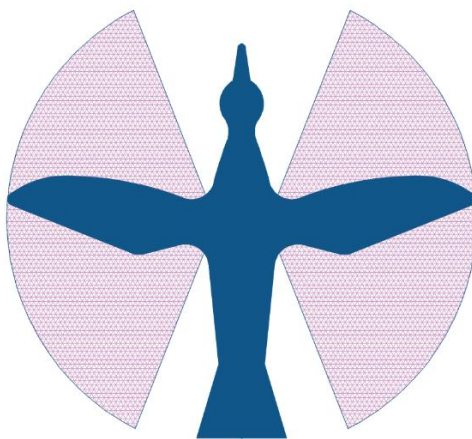
სურ.14



სურ. 15. ექსპერიმენტული უპილოტო ორნიტოპტერი



სურ. 16. ვერტიკალური ნიჟების მუშაობის აქტიური ზონა



სურ. 17. ფრინველის ფრთების მუშაობის აქტიური ზონა

საპილოტო მოდელისა და რეალური ორნიტოპტერის დაპროექტების მიზნით აუცილებელია გაკეთდეს ასეთი საფრენი აპარატის ფრენის ენერგეტიკული შეფასებები. როგორც ცნობილია ძალა, რომელიც მოქმედებს საფრენ აპარატზე ჰაერის მხრიდან, შეიძლება დაიყოს ორ მდგენელად: F_y ამწევ ძალად, რომელიც საფრენი აპარატის მოძრაობის v სიჩქარის პერპენდიკულარულია და F_x ჰაერის წინაღობის ძალად რომელიც ამ სიჩქარის პარალელურია. ცხადია, რომ რაც უფრო მეტია ამწევი ძალა, მით უფრო ნაკლებია ჰაერის წინაღობის ძალა და

მით უფრო კარგად ასრულებს საფრენი აპარატი თავის ფუნქციას ტვირთის აწევისა და გადატანისას, ე. ი. მით უფრო ხარისხიანია საფრენი აპარატი. ხარისხი გამოისახება შემდეგი დამოკიდებულებით: $K = F_y/F_x$. მუდმივი სიჩქარით ჰორიზონტალური ფრენისას ამწევი ძალა აწონასწორებს სიმძიმის ძალას, ხოლო ძრავას წევის ძალა – ჰაერის წინაღობის ძალას.

თანაბარი ჰორიზონტალური ფრენისას $F_x v = N\eta_{აბ}$, თუ გამოვსახავთ F_x წინაღმდეგობის ძალას

$F_y = mg$ ამწევი ძალისა და K ხარისხის მეშვეობით, მივიღებთ:

$$\frac{mgv}{K} = N \cdot \eta_{\text{ამგ}} \quad (5)$$

სიდიდე $N \cdot \eta_{\text{ამგ}}$ არის სიმძლავრე, ანუ ამძრავის მიერ ერთ წამში წინააღმდეგობის ძალების საპირისპიროდ შესრულებული მუშაობა. წარმოვიდგინოთ, რომ დროის ნებისმიერ ერთეულში ამძრავი ხარჯავს საწვავის ერთსა და იმავე რაოდენობას ($[\mu] = \text{კგ/წმ}$). მაშინ dt დროის შუალედში საწვავის მასის ცვლილება იქნება $dm = -\mu \cdot dt$ კგ. თუ გავყოფთ (5) განტოლების ორივე ნაწილს $\mu = -dm/dt$ -ზე გვექნება:

$$-\frac{mgv}{K} \cdot \frac{dt}{dm} = \frac{N \cdot \eta_{\text{ამგ}}}{\mu} \quad (6)$$

თუკი $dx = v \cdot dt$ არის უსასრულოდ მცირე გადაადგილება ჰორიზონტალური მიმართულებით, მაშინ განტოლებას, რომელიც ასახავს საწვავის მასის ელემენტარულ ცვლილებას ტრაექტორიის გასწვრივ, ექნება შემდეგი სახე:

$$dx = -\frac{K \cdot N \cdot \eta_{\text{ამგ}}}{\mu \cdot g} \cdot \frac{dm}{m} \quad (7)$$

თუკი ამ განტოლებას გავაინტეგრირებთ სტარტის წერტილიდან ($x = 0, m = m_0$) ფრენის ბოლომდე ($x = L, m = m_0 - m_{\text{საწ}}$), მივიღებთ:

$$L = -\frac{K \cdot N}{\mu \cdot g} \cdot \ln \left(1 + \frac{m_{\text{საწ}}}{m_0} \right) \quad (8)$$

დროის ერთეულში ფრთის მიერ ჩამოტყორცნილი ჰაერის მასის კინეტიკური ენერგიის ცვლილება იქნება:

$$N = m_s \left(\frac{v_2^2}{2} - 0 \right) = m_s \cdot \frac{v_2^2}{2} \quad (9)$$

ორნიტოპტერის მუშა ორგანო შეიძლება განვიხილოთ როგორც ვენტილატორი, რომელიც გადალახავს წნევის ცვლილებას და ქმნის ამწევ ძალას. ეს წნევის ცვლილება განდევნის ზემოდან შემოწოვილ

ჰაერს ძირს v_1 სიჩქარით რისთვისაც საჭირო სიმძლავრე:

$$N = G \cdot v_1 \quad (10)$$

იმის გათვალისწინებით, რომ

$$G = m_s \cdot v_2 \quad (11)$$

ენერგიის ორივე გამოსახულებიდან შეგვიძლია მივიღოთ:

$$m_s \cdot \frac{v_2^2}{2} = m_s \cdot v_1 \cdot v_2 \quad (12)$$

აქედან გამომდინარე:

$$v_2 = 2v_1 \quad (13)$$

შემდეგ შეგვიძლია განვსაზღვროთ თუ როგორ გამოითვლება სიმძლავრე, რომელიც აუცილებელია საფრენი აპარატის N/G წონის ერთეულის ჰაერში დასაჭერად.

განტოლებიდან

$$G = 2\rho s v_1^2 \quad (14)$$

გამოვსახავთ v_1 – ს

$$v_1 = \sqrt{G/2\rho s}. \quad (15)$$

ჩავსვამთ ამ განტოლებას N/G გამოსახულებაში და მივიღებთ:

$$\frac{N}{G} = \frac{1}{2\rho} \cdot \sqrt{\frac{G}{s}} \quad (16)$$

დასკვნა

ორნიტოპტერის ფრენის ტექნიკა შედგება მისი ფრთების აწევისა და დაშვებისაგან, რაც ხორციელდება სხვადასხვა სიჩქარითა და ქნევის ამპლიტუდით. ფრთის რხევითი მოძრაობის სიჩქარეები და ამპლიტუდები იცვლება საფრენი აპარატის ფრენის რეჟიმის მიხედვით. ცხადია, რომ ნებისმიერი რხევითი მოძრაობა არ ხდის შესაძლებელს განხორციელდეს საფრენი აპარატის ფრენა. თითქმის ორნიტოპტერის ყველა კონსტრუქტორი ცდილობს მოი-

გონოს თავისი აზრით ფრთის ქნევის საუკეთესო რეჟიმი. ორნიტოპტერის კონსტრუირებისას საჭიროა უპირველესად გაკეთდეს ფრინველის ფრთის მოძრაობის ანალიზი და შემდეგ გეზი იყოს აღებული ამ მოძრაობების სრულყოფისაკენ. ჩვენს ნაშრომში გაკეთებულია ფრთის მოძრაობის სიჩქარეებისა და მასზე მოდებული ძალთა სისტემის ანალიზი და შემდეგ მიღებულია საჭირო ფორმულები, რომლებიც განსაზღვრავს ორნიტოპტერის ფრენისას მისი ამძრავის ენერგეტიკულ დანახარჯებს.

ლიტერატურა

1. Tikhonravov, M. K. (1949). *The flight of birds and machines with flapping wings*. Moscow: Oborongiz. (In Russian)
2. Vinogradov, A. N. (1951). *Aerodynamics of soaring birds*. Moscow. (In Russian)
3. Vinokurov, A. A. (1951). *Aerodynamics of soaring birds*. Moscow. (In Russian)
4. Kaznevsky, V. P. (1955). *Aerodynamics in nature and in technology*. Moscow. (In Russian)
5. Krasnov, N. F. (1984). *Aerodynamics in questions and problems*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russian)

UDC 591.4:629.7.02

SCOPUS CODE 2202

<https://doi.org/10.36073/1512-0996-2025-3-276-287>

To the question of theories and the creation of a mahalet (ornithopter)

- Zurab Mchedlishvili** Department of Engineering Graphics and Technical Mechanics, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 68a, M. Kostava str.
E-mail: zurab.mch@mail.ru
- Ramin Zukakishvili** Department of Mechanical Engineering and Technologies, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 68a, M. Kostava str.
E-mail: ramini.zukakishvili@gmail.com
- Giorgi Gratiashvili** Institute of Structures, Special Systems and Engineering Maintenance, Georgian Technical University, Georgia, 0160, Tbilisi, 68^b, M. Kostava str.
E-mail: g.gratiashvili@gtu.ge

Reviewers:

G. Sanadze, Prof. Faculty of Transport Systems and Mechanical Engineering, GTU

E-mail: sanadzegivi05@gtu.ge

T. Chkhaidze, Prof. Faculty of Transport Systems and Mechanical Engineering, GTU

E-mail: t.chxaidze@gtu.ge

Abstract. Two-thirds of creatures living on earth use flapping wings. Creating similar wings and aircraft based on them for humans has proven to be a very difficult task. Only small models fly, but rarely anyone managed to fly into the air with manned machalets. Despite the fact that many attempts have been made to this end. In our work, a theoretical analysis of such devices created by man was made and some issues of flapping flight were considered.

Keywords: Bird; Lift; Mass; Profile; Wing.

განხილვის თარიღი 26.02.2025

შემოსვლის თარიღი 31.03.2025

ხელმოწერილია დასაბეჭდად 25.09.2025