



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

Petras Umbrasas

**TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS HIDRODINAMINIŲ
PROCESŲ TYRIMAS
HYDRODYNAMIC PROCESSES RESEARCH OF AIR CUSHION VEHICLE**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas **621E20003**

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS

TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

prof. Marijonas Bogdevičius

(Vardas, pavardė)

(Data)

Petras Umbrasas

**TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS HIDRODINAMINIŲ
PROCESŲ TYRIMAS**
HYDRODYNAMIC PROCESSES RESEARCH OF AIR CUSHION VEHICLE

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas **621E20003**

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

Sausumos transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2013

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
TRANSPORTO TECHNOLOGINIŲ ĮRENGINIŲ KATEDRA

Sausumos transporto inžinerija studijų kryptis

Transporto inžinerija studijų programa, valstybinis kodas **621E20003**

Transporto technologinių sistemų inžinerijos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

prof. Marijonas Bogdevičius
(Vardas, pavardė)

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei)
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:

.....

.....

patvirtinta 2011 m. gruodžio 27 d. dekanų potvarkiu Nr. 516ti

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas **2013-05-29**.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Sukurti transporto priemonės ant oro pagalvės prototipą. Nustatyti pagrindinius parametrus. Sukurti transporto priemonės ant oro pagalvės matematinį modelį. Atlikti eksperimentinius tyrimus, juos palyginti su teoriniais rezultatais. Pateikti bendrąsias išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....

.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas

(Paraša)

.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....

(Parašas)

.....

(Vardas, pavardė)

.....

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Transporto inžinerijos fakultetas

Transporto technologinių įrenginių katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 2

Data-....-....

Transporto inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Transporto priemonės ant oro pagalvės hidrodinaminių procesų tyrimas**

Autorius **Petras Umbrasas**

Vadovas habil. dr. prof. **Marijonas Bogdevičius**

Kalba

lietuvių

užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistranto darbe nagrinėjama sukonstruotos transporto priemonės ant oro pagalvės veikimas ir užsienio šalių patirtis šioje srityje. Išnagrinėti pagrindiniai transporto priemonės parametrai, kurie lemia jos eksploatavimą ant įvairių atraminių paviršių. Pateiktas realus sukonstruotas modelis, išanalizuotas jo funkcionavimas. Atlikus jėgos, reikalingos išjudinti transporto priemonės ant oro pagalvės modelį iš stacionarios padėties tyrimą ant 5 atraminių paviršių (betono, asfaltbetonio, smėlio, žvyro, skaldos) pateikti rezultatai. Sudarytas matematinis modelis, iš kurio gauti slėgių oro pagalvėje, tarpelio tarp oro pagalvės ir atraminio paviršiaus bei išeinančio oro srauto iš modelio svyravimai. Išnagrinėjus teorinius ir praktinius gautus rezultatus, pateikiamos baigiamojo darbo išvados.

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, tyrimo objektas, mokslinės literatūros analizė, modelio pagrindiniai parametrai ir jų analizė, transporto priemonės ant oro pagalvės matematinis modelis ir rezultatų analizė, eksperimentiniai tyrimai, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 59 p. teksto be priedų, 41 iliustr., 12 lent., 18 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: transporto priemonė, oro pagalvė, slėgių svyravimai, matematinis modelis, jėgos matavimas, atraminiai paviršiai.

Vilnius Gediminas Technical University
Transport Engineering Department
Department of Transport technological equipment

ISBN ISSN
Copies No. 2
Date-....-....

Master Degree Studies **Transport Engineering** study programme Master's Thesis

Title **Hydrodynamic processes research of air cushion vehicle**

Author **Petras Umbrasas** Academic supervisor habil. dr. prof. **Marijonas Bogdevičius**

Thesis language:

lithuanian

english

Annotation

In this final master paper for a master degree constructed hovercraft operation and foreign experience in this field are investigated. The main vehicle parameters have been studied that determine its exploitation on different thrust surfaces. The real constructed model is presented and its functioning is analysed. After the force, needed to propel the stationary vehicle, investigation on 5 thrust surfaces (concrete, asphalt concrete, sand, gravel, rubble) the results are provided. A mathematical model has been made in order to get pressure fluctuations in the air-cushion, the gap between the air-cushion and the thrust surface and the outgoing air flow. After the analysis of theoretical and practical results obtained, the final work conclusions are provided.

Structure consist of 8 parts: introduction, the object of study, the analysis of scientific literature, the basic parameters of the model and analysis of them, the hovercraft mathematical model, the results of the model analysis, experimental research, conclusions and bibliography.

Thesis consist of – 59 p. text without appendixes, 41 pictures, 12 tables, 18 bibliographical entries.

Keywords: vehicle, air-cushion, pressure fluctuations, mathematical model, force measurement, thrust surfaces.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012 m. m.
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Petras Umbrasas 20075942

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Transporto inžinerijos studijų programa, TTSfm – 11 grupė

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2013 m. gegužės 18 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Transporto priemonės ant oro pagalvės
hidrodinaminių procesų tyrimas“

patvirtintas 2011 m. gruodžio 27 d. dekanu potvarkiu Nr. 516ti , yra
savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai
panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Prenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai ir specialistai: lekt. A. Petrėtienė.

Mano baigiamojo darbo vadovas habil. dr. prof. Marijonas Bogdevičius

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių
sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

Petras Umbrasas

(Parašas)

(Vardas ir pavardė)

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
SIMBOLIAI	11
ĮVADAS	13
1. TYRIMO OBJEKTAS	14
2. MOKSLINĖS LITERATŪROS, SUSIJUSIOS SU TRANSPORTO PRIEMONE ANT ORO PAGALVĖS, ANALIZĖ	15
3. TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS MODELIS IR JO PAGRINDINIAI PARAMETRAI	30
3.1. Modelio pagrindiniai parametrai	30
3.2. Transporto priemonės ant oro pagalvės modelio konstrukciniai parametrai.....	36
3.3 Modelio teorinės charakteristikos.....	39
4. TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS MATEMATINIS MODELIS	43
4.1. Transporto priemonės ant oro pagalvės judėjimo lygčių sistema.....	43
4.2. Transporto priemonės ant oro pagalvės matematinio modelio rezultatų analizė	46
5. TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	49
5.1. Reikalingos traukos jėgos išjudinti transporto priemonės ant oro pagalvės nustatymas.....	49
5.2. Reikalingos traukos jėgos išjudinti transporto priemonę ant oro pagalvės rezultatų analizė .	53
IŠVADOS.....	57
LITERATŪRA	58
PRIEDAS 1	

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Eksperimento rezultatai	25
2.2 lentelė. Eksperimento gauti rezultatai	27
3.1 lentelė. Pasirinkti ir gauti parametrai	35
3.2 lentelė. Pasipriešinimo bangavimui X_b priklausomybė nuo TPAOP ilgio L	40
3.3 lentelė. Oro kiekio, praeinančio pro modelį, ir jo greičio priklausomybė nuo masės	41
5.1 lentelė. Paviršiai	49
5.2 lentelė. Matavimų protokolai	51
5.3 lentelė. Matavimų rezultatai ant betono paviršiaus	53
5.4 lentelė. Matavimų rezultatai ant smėlio paviršiaus	54
5.5 lentelė. Matavimų rezultatai ant asfaltbetonio paviršiaus	54
5.6 lentelė. Matavimų rezultatai ant žvyro paviršiaus	54
5.7 lentelė. Matavimų rezultatai ant skaldos paviršiaus	55

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. TPAOP veikimo schema	14
2.1 pav. Maišo ir pirštų sijonas	16
2.2 pav. TPAOP judėjimas per skirtingus paviršius	17
2.3 pav. TPAOP per skirtingo storio ledą (Козин, Погорелова 2003)	18
2.4 pav. Koeficientų A ir k_L priklausomybės, esant skirtingiems ω santykiams	18
2.5 pav. Koeficientų A ir k_L priklausomybės, esant skirtingiems vandens telkinio gyliams	19
2.6 pav. Vertikalaus TPAOP supimo amplitudės dažninė charakteristika	19
2.7 pav. Išilginio TPAOP supimo amplitudės dažninė charakteristika	20
2.8 pav. Trys TPAOP eksploatavimo režimai ant sausumos paviršiaus	21
2.9 pav. Piršto tipo sijono sąveika su įvairiais paviršiais	21
2.10 pav. Eksperimente naudoti modeliai	22
2.11 pav. Modelio schema	23
2.12 pav. Eksperimento schema	23
2.13 pav. TPAOP veikiančių jėgų schema	24
2.14 pav. Eksperimento schema	25
2.15 pav. TPAOP veikiančios jėgos su aptaku	26
2.16 pav. Eksperimento su aptaku schema	27
2.17 pav. Aptako atakos kampo ir greičio priklausomybė	28
3.1 pav. TPAOP schema	30
3.2 pav. Pagamintas oro pagalvės modelis	31
3.3 pav. Aviacinio tipo vartuvai	33
3.4 pav. TPAOP modelio sudedamosios dalys	36
3.5 pav. Nepripūsta oro pagalvė	37
3.6 pav. Pripūsta oro pagalvė	37
3.7 pav. Vairo padėtys	38
3.8 pav. TPAOP modelio matmenys	38
3.9 pav. PVC plėvelės matmenys naudojamos modelio gamybai	39
3.10 pav. Pasipriešinimo judėjimui ant vandens X_b priklausomybė nuo TPAOP ilgio L	39
3.11 pav. Oro kiekio praeinančio pro modelį ir jo greičio priklausomybė nuo masės	41
4.1 pav. TPAOP skaičiuojamoji 1 schema	43
4.2 pav. TPAOP skaičiuojamoji 2 schema	44
4.3 pav. Nusklęsto kelio x_c priklausomybė nuo laiko t	47
4.4 pav. Modelio pakilimo aukščio h priklausomybė nuo laiko t	48

4.5 pav. Slėgių p_i priklausomybė nuo laiko t	48
4.6 pav. Debito G_{3out} priklausomybė nuo laiko t	48
4.7 pav. Pakilimo aukščio perimetro ploto $S_{tarp.}$ priklausomybė nuo laiko t	49
5.1 pav. Dinamometras	50
5.2 pav. Bekontaktis tachometras	50
5.3 pav. Prietaisų jungimo 1 schema	51
5.4 pav. Prietaisų jungimo 2 schema	52
5.5 pav. Jėgos $F_{trin.}$ reikalingos trinčiai nugalėti ant skirtingų atraminių paviršių grafikas	55

SIMBOLIAI

A – bangavimo pasipriešinimo koeficientas;
 k_L – koeficientas, priklausantis nuo transporto priemonės ilgio L ir judėjimo greičio u ;
 ω – transporto priemonės ilgio ir pločio santykis;
 γ – santykinis vandens gylis koeficientas;
 H – vandens telkinio gylis, kuriame eksploatuojama transporto priemonė;
 L – transporto priemonės ant oro pagalvės ilgis;
 α – kampas tarp TPAOP ir bangų susikirtimo;
 $\bar{\omega}_e$ – susitikimo dažnis;
 $\bar{Z}$ – TPAOP judėjimas z ašyje;
 $S_{tarp.}$ – tarpo tarp atraminio paviršiaus ir apatinės korpuso sienelės perimetro plotas, m^2 ;
 v_o – oro ištekėjimo iš oro pagalvės greitis, m/s ;
 $p_{o.p}$ – slėgis oro pagalvėje, Pa ;
 ρ – oro tankis, kg/m^3 ;
 m – transporto priemonės masė, kg ;
 S – oro pagalvės plotas, m^2 ;
 P – perimetras, m ;
 Q – sunaudojamas oro kiekis, kuris praeina pro oro pagalvę, m^3/s ;
 η – oro sraigto naudingumo koeficientas;
 G – transporto priemonės sunkio jėga, N ;
 E – koeficientas, priklausantis nuo transporto priemonės ilgio ir pločio santykio bei greičio;
 v – transporto priemonės judėjimo greitis, m/s ;
 X_b – bangavimo pasipriešinimas, N ;
 β – vairo pasukimo kampas;
 φ – TPAOP pasisukimo kampas;
 F_{aerox} – oro pasipriešinimo jėga, N ;
 g – laisvojo kritimo pagreitis;
 p_1 – slėgi, TPAOP korpuse;
 p_2 – slėgis oro pagalvėje;
 p_3 – slėgis po TPAOP;
 A_{11} – slėgio p_1 , veikiančio korpuso vidinį viršutinę dalį, plotas;
 A_{12} – slėgio p_1 , veikiančio korpuso vidinį apatinę dalį, plotas;

A_3 – slėgio p_3 , veikiančio apatinę TPAOP dalį, plotas;
 p_{in} – įeinantis slėgis, Pa;
 c – masių centras;
 G_{in} – įeinantis oro srauto kiekis, m³/s;
 G_{out} – išeinančio oro srauto kiekis, m³/s;
 a_{xc} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O ašimi x iki masių centro, m;
 L_{OO1} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O iki vairo sukimosi centro O_1 , m;
 O_1 – vairo sukimosi centras;
 O_2 – taškas, kuriame pridėta jėga F_T ;
 O_{p4} – slėgio p_3 veikimo vieta;
 a_{yc} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O ašimi y iki masių centro c , m;
 a_i – atstumai ašimi y , m;
 b_i – atstumai ašimi x , m;
 F_{trix} – trinties jėgos veikimas taškuose i ($i = 1-4$) ašies x kryptimi;
 F_{triy} – trinties jėgos veikimas taškuose i ($i = 1-4$) ašies y kryptimi;
 V_1 – vidinio korpuso tūris, m³;
 V_2 – oro pagalvės tūris, m³;
 V_3 – tūris po TPAOP, susidarantis pakilus jai nuo atraminio paviršiaus, m³;
 $F_{trin.}$ – traukos jėga.

IVADAS

Šiuolaikinis gyvenimas neįsivaizduojamas be įvairių transporto priemonių, kurių srautas juda pasaulio keliais. Kadangi pasaulio vietovių yra labai skirtingų, visur nutiesti kelius ar geležinkelius yra sudėtinga ir brangu. Todėl yra konstruojamos netradicinės transporto priemonės, tokios kaip transporto priemonės ant oro pagalvės, kurioms atraminis paviršius (vanduo, sniegas, ledas, žemė, smėlis) nesudaro didelės įtakos jų eksploatacijai.

Siekiant nustatyti tokios transporto priemonės parametrus, buvo sukonstruotas realus transporto priemonės ant oro pagalvės modelis. Jį išbandžius pateikti pastebėjimai ir atlikti eksperimentiniai tyrimai ant skirtingų atraminių paviršių (betono, asfaltbetonio, smėlio, žvyro, skaldos).

Pagal sukonstruoto TPAOP modelio parametrus sudarytas matematinis modelis, iš kurio rezultatų nustatyta slėgių oro pagalvėje ir po ja bei išėinančio oro srauto iš po oro pagalvės, svyravimai.

Temos aktualumas. Mažai paplitusi transporto priemonė Lietuvoje, tačiau plačiai pasaulyje. TPAOP pranašumas prieš kitas transporto priemones – jai nereikalingas kelias ar specialus paviršius jos eksploatacijai, taip pat ji neardo atraminio paviršiaus.

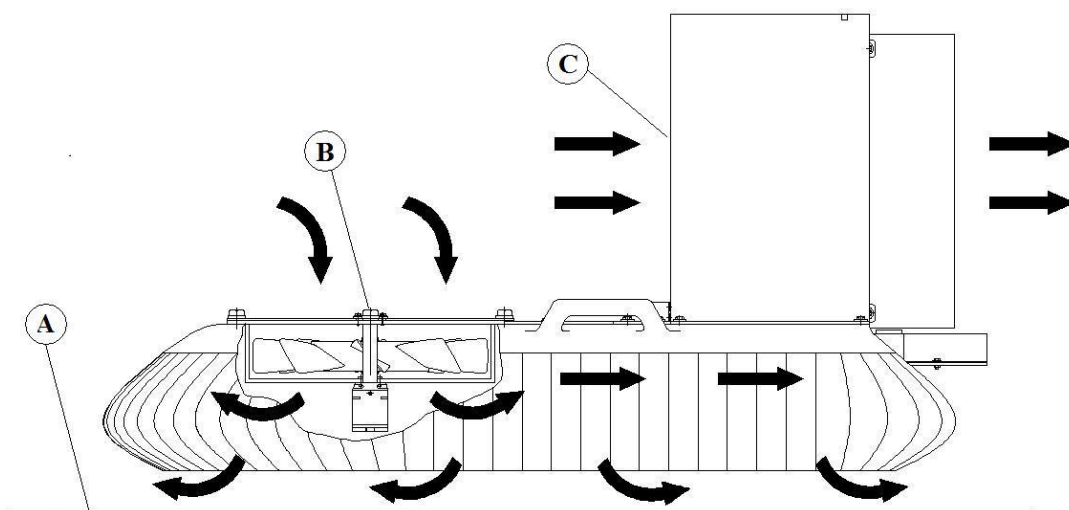
Tikslas. Šio darbo tikslas – sukonstruoti konkrečios konstrukcijos transporto priemonės ant oro pagalvės modelį ir nustatyti jo parametrus.

Uždaviniai:

- atlikti mokslinės literatūros analizę ir nustatyti, kokie autoriai ir kokiuose šaltiniuose nagrinėjo TPAOP;
- sukonstruoti TPAOP modelį;
- sukurti TPAOP matematinį modelį.

1. TYRIMO OBJEKTAS

Transporto priemonė ant oro pagalvės (TPAOP) – priemonė, kuri po savimi sukurdamą padidinto slėgio zoną sklendžia pakilusi nedideliu atstumu nuo atraminio paviršiaus (1.1 pav.). Oro srautas yra įtraukiamas pro ventiliatoriaus zoną B ir paskirstomas po oro pagalvę. Susidarius oro pagalvėje padidinto slėgio zonai, oras pradeda veržtis iš po oro pagalvės, tuo pačiu pakeldamas ją nedideliu atstumu nuo atraminio paviršiaus A. Trauką sukuria ventiliatorius, esantis C zonoje. Ši transporto priemonė juda ne taip aukštai, kad ją būtų galima priskirti aviacijai ir tuo pačiu ne tiek panirusi į vandenį, kad būtų galima vadinti laivu. Jau pagamintos ir eksploatuojamos transporto priemonės su oro pagalve, kurios gali sklęsti ir virš banguotos jūros paviršiaus (esant 3–4 m bangų aukščiui), ir virš griovių ar kanalų (kurių gylis iki 2 m), ir virš krūmų (kurių aukštis iki 2 m).



1.1 pav. TPAOP veikimo schema

TPAOP gali išplaukti iš vandens ant kranto, kurio pakilimo kampas ne didesnis kaip 30° . Žemėje yra daug vietovių, kur negalima naudotis jokia gerai žinoma transporto priemone. TPAOP gali įveikti negilius vandens telkinius, pelkes, ledo laukus, smėlio dykumas, aukštą žolę ir skirtingai negu lėktuvai ar sraigtasparniai, jie gali sustoti bet kuriame šių vietovių taške. Gaila, kad tokioms vietovėms beveik nereikia transporto priemonių, išskyrus tyrinėjimo darbams ir specialioms užduotims, (Zhou *et al.* 2003).

Lietuvoje transporto priemonė ant oro pagalvės yra priskiriama laivams ir yra apibrėžiama kaip savaeigė plaukiojimo priemonė. TPAOP ar jų sudedamosios dalys gali patekti į Lietuvos rinką (gali būti registruojami ir eksploatuojami) tik tuo atveju, jeigu atitinka Pramoginių laivų projektavimo, statybos, tiekimo rinkai ir atidavimo eksploatuoti techninio reglamento patvirtinto Lietuvos Respublikos susisiekimo ministro 2004 m. birželio 15 d. įsakymu Nr. 3–352, nuostatas.

2. MOKSLINĖS LITERATŪROS, SUSIJUSIOS SU TRANSPORTO PRIEMONE ANT ORO PAGALVĖS, ANALIZĖ

Transporto priemonė ant oro pagalvės yra pažangi jūrų ir sausumos transporto priemonė, kuri sklendžia ant nelygių paviršių, taip pat gali būti eksploatuojamos dideliais greičiais, kurių kita įprasta transporto priemonė negalėtų pasiekti. TPAOP besikeičiantis atraminis paviršius nesudaro kliūčių jų judėjimui, (Kubo *et al.* 2003). Yra naudojamos:

- gelbėjimo darbams;
- kelionėms į vandenį iš žemės, kai nėra laivų prieplaukų;
- karo tikslams;
- tarp valstybinių sienų ir vidaus saugojimui;
- apžvalgos darbams;
- keleivių ir krovinių gabenimui;
- gyvūnijos apsaugai arba moksliniams tyrimams atlikti, kur nėra kelių;
- pramoginiams tikslams: lenktynėms, kelionėms.

Lietuvoje TPAOP naudoja Lietuvos Valstybės sienos apsaugos tarnyba pasienio apsaugai, tačiau neretai ir gelbėjimo darbams.

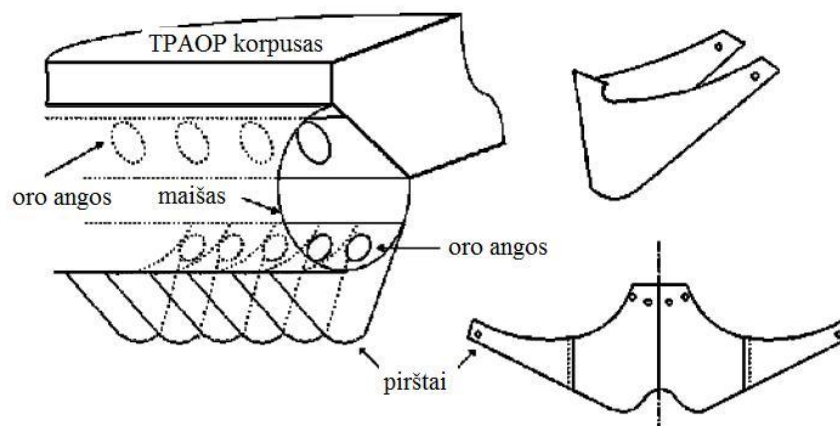
Šios transporto priemonės pagrindinis elementas yra lankstus sijonas, kuris gali būti pagamintas iš nailono ar polisterio. Pagrindiniai sijonų tipai yra:

- maišo;
- piršto ar segmentų;
- maišo ir piršto.

Maišo tipo sijonas – kai visą transporto priemonės dugną gaubia vientisas segmentas. Tokio tipo sijonus lengva suprojektuoti ir sumontuoti, tačiau su jais eksploatuoti TPAOP yra sudėtingiau. Pakilimo aukštis nuo atraminio paviršiaus yra mažesnis nei su piršto tipo sijonai, (Yun, Bliault 2000).

Piršto tipo sijonas yra sudarytas iš daugelio atskirų segmentų, kurie gali individualiai sklęsti per skirtingus paviršius. Su tokio tipo sijonais TPAOP idealiai tinka eksploatuoti dideliais greičiais virš bangų ir žemės. Pagrindiniai privalumai: mažesnė trintis nei maišo tipo ir sudilus vienam piršto tipo sijono segmentui TPAOP gali būti toliau eksploatuojama (Yun, Bliault 2000).

Maišo ir pirštų sijonas yra pripažintas kaip labiausiai atnaujinta ir pažangi sijono sistema, (Chung, Jung 2004).



2.1 pav. Maišo ir pirštų sijonas (Chung, Jung 2004)

Paveikslėlyje 2.1 pav. vaizduojama maišo ir pirštų sijonas. Oro srautas iš TPAOP pirmiausiai išeina į maišą (pirmąją sijono dalį), po to pasiskirsto pro oro angas į kiekvieną pirštą (antrąją sijono dalį).

Šiame straipsnyje, (Chung, Jung 2004), krepšio ir pirštų sijono sistemos geometrija yra optimizuota tam, kad sušvelnintų nepageidaujamą kilnojimąsi ir pagerintų sklendimo kokybę, naudojant genetinius algoritmus. Teorinis dvierdvinės krepšio ir sijono sekcijos kilnojimosi judėjimas yra ištirtas naudojant matematinį modelį. Nauja sijono geometrija, gauta pagal genetinius algoritmus, labai pagerina šį efektą, ir optimizuotos transporto priemonės sklendimo komfortas gali būti pagerintas lyginant su pradine konfigūracija, atsižvelgiant į apribojimus, tokius kaip: reikiamos transporto priemonės korpuso dydis ir svoris.

Optimizuota užuolaidų sistema padaryta tarpais su išoriniu krepšio ilgiu, periodiniame aukštyje ir srauto dydyje geresniam eksploatavimui ir stabilumui. Ši užuolaidų sistema labai pagerina sklendimo kokybę, palyginus su pradine sijono sistema. Užuolaidų sistemos optimizacija su įvairių medžiagų pasirinkimais taip pat buvo atlikta pagal genetinius algoritmus. Eksperimento rezultatai parodė, kad genetiniai algoritmai gali toliau optimizuoti užuolaidų sistemą su sumažintu užuolaidų ploto tankiu. Sumažintų užuolaidų masė pagerina sklendimo kokybę, taip pat atitinka sąlygų stabilumą, padarydama labai mažą antros smailės dydį. Apibendrinant abiejų transporto priemonių krepšys ir užuolaidos pagerino sklendimo kokybę, taip pat kaip ir stabilumą optimizuojant procesą genetiniais algoritmais.

Savo darbe, (Amiruddin *et al.* 2008), nagrinėja kompozitinių medžiagų efektyvumą, naudojant TPAOP gamyboje. Šiame tyrime buvo padaryta struktūrinė mišinio tinkamumo ir patikimumo oro pagalvės korpusui analizė, naudojant NASTRAN/PATRAN kompiuterines programas. Nustatė, kad svoris turi didelę įtaką, projektuojant TPAOP, kadangi korpusas turi būti stiprus, kad atlaikytų spaudimą ir tuo pačiu būtų lengvas.

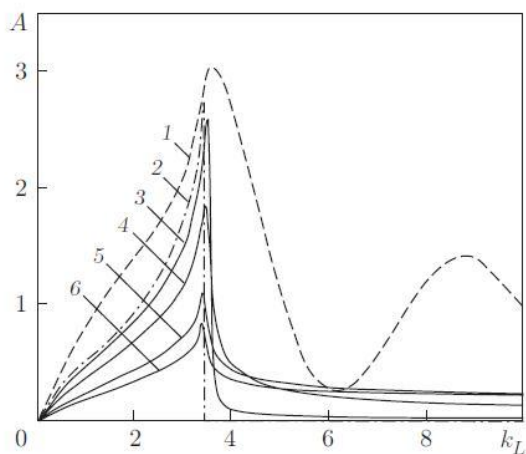
Kitame savo darbe, (Amiruddin *et al.* 2011), nagrinėja TPAOP realų modelį, kurio korpusas pagamintas iš aliuminio. Keisdamas svori TPAOP, pavertino ankstesnį savo darbą, kad ši transporto priemonė turi būti lengva. Nes rezultatai parodė, kad kuo TPAOP lengvesnis, tuo jis manevringesnis, nes jį veikia mažesnė inercijos jėga.

Oro pagalvės veikimas yra efektyvesnis, kai ji yra arčiau atraminio paviršiaus. Padidėjus sklendimo aukščiui išauga didesnis oro masių ištekėjimas iš oro pagalvės ir galingumas, reikalingas TPAOP sklendimui. Maksimalus TPAOP sklendimo aukštis, reikalingas įveikti jūros bangas. Esant didelėms bangoms ir mažiems TPAOP tai nesudaro problemų, kadangi TPAOP gali kopijuoti bangos kontūrą. Bangų viršūnės neturi smūgiuoti į TPAOP dugną. Tik vandenyje po oro pagalve atsiranda įdubimas, lygus 0,1 m kiekvienam $9,8 \cdot 10^{-6}$ Pa perteklinio slėgio.

Tokios transporto priemonės problema yra dylantis sijonas, kuris sudaro oro pagalvę. Tai labai priklauso, kokiomis sąlygomis yra eksploatuojama TPAOP. Jeigu ant nelygaus abrazyvinio paviršiaus, tai sijonas sudils greičiau nei ant vandens.

Pagrindiniai vandens paviršiai, su kuriais sąveikauja TPAOP yra vandens atraminis paviršius, vanduo su ledo lytimis (susmulkintas ledas) ir ledo paviršius.

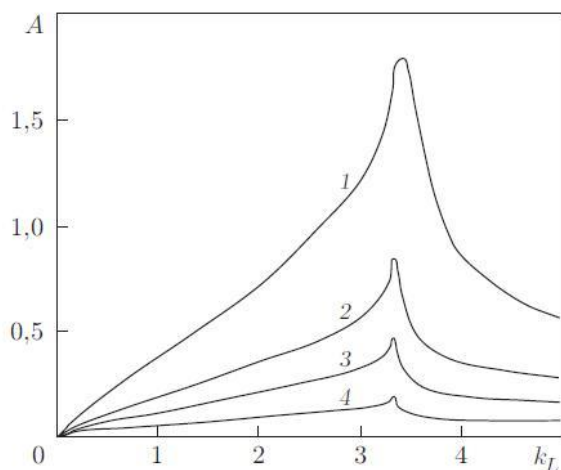
Savo darbe, (Козин, Погорелова 2003), atliko teorinius tyrimus, kurie leidžia nustatyti TPAOP pasipriešinimus bangavimui eksploatuojant ant ledo, šių pasipriešinimų priklausomybes nuo TPAOP savybių ir ledo parametrų.



2.2 pav. TPAOP judėjimas per skirtingus paviršius (Козин, Погорелова 2003)

Grafikuose, 2.2 pav., ir 2.3 pav., vaizduojama bangavimo pasipriešinimo koeficiento A priklausomybė nuo koeficiento k_L , kuris priklauso nuo TPAOP ilgio L ir judėjimo greičio u $k_L = \frac{qL}{u^2}$. Grafike, 2.2 pav., punktyrine linija 1 vaizduojama judėjimas TPAOP grynu vandeniui, esant transporto priemonės ilgio ir pločio santykiui $\omega = 2$, ir santykiniam vandens gyliui $\gamma = 0,3$.

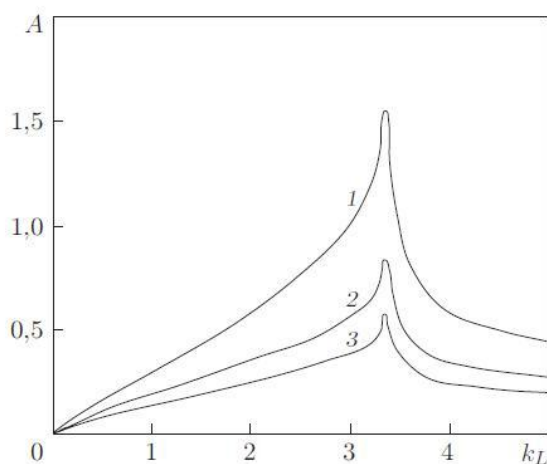
Linija 2 vaizduoja TPAOP judėjimą idealaus stangrumo ledo lytimi. Iš šios linijos matoma, kad iki kritinio greičio bangavimo pasipriešinimo nėra. Greičiai, prie kurių TP turi maksimalų bangų pasipriešinimą yra vadinama kritiniais greičiais. Kreivė 3 vaizduoja transporto priemonei judant elastingu ledu, bet esant mažiems greičiams yra nedidelis bangų pasipriešinimas. 4–6 linijos rodo, kada elastingo ledo atsistatymas yra greitesnis, (Козин, Погорелова 2003).



2.3 pav. TPAOP per skirtingo storio ledą (Козин, Погорелова 2003)

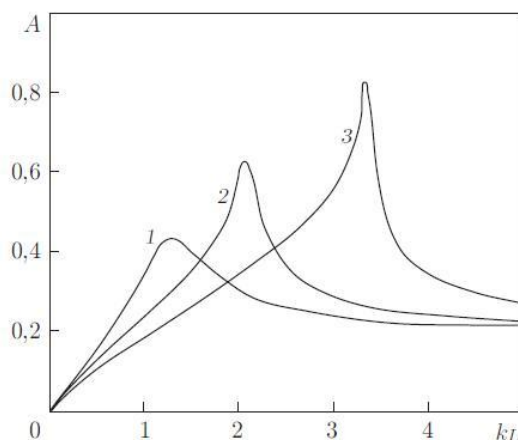
Grafikas, 2.3 pav., rodo pasipriešinimo bangavimui koeficiento A priklausomybę nuo koeficiento k_L , esant skirtingiems ledo storiams. 1 kreivė rodo, kai ledo storis yra 0,1 m, 2 – 0,2 m, 3 – 0,3 m, 4 – 0,5m. Esant 0,5 metrams ledo storiui pasipriešinimas beveik nepriklauso nuo koeficiento k_L , (Козин, Погорелова 2003).

Iš šių grafikų matyti, kad kuo atraminis paviršius yra tvirtesnis, tuo pasipriešinimo bangavimui koeficientas mažiau priklauso nuo TPAOP ilgio ir judėjimo greičio.



2.4 pav. Koeficientų A ir k_L priklausomybės, esant skirtingiems ω santykiams (Козин, Погорелова 2003)

Grafike, 2.4 pav., 1 linija vaizduoja ilgio ir pločio santykius: $\omega=1$, 2, kai $\omega=2$ ir 3, kai $\omega=3$ (Козин, Погорелова 2003). Iš grafiko, 2.4 pav., matyti, kad kuo TPAOP yra ilgesnė, tuo pasipriešinimas bangavimui yra mažesnis.

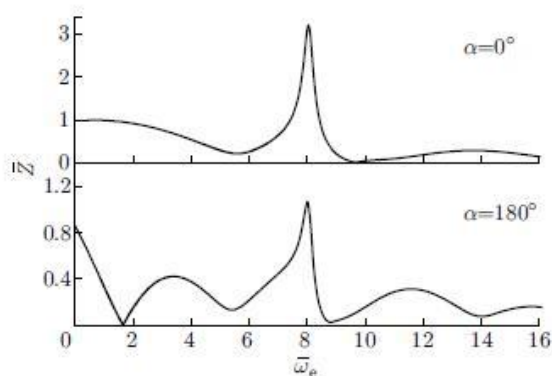


2.5 pav. Koefficientų A ir k_L priklausomybės, esant skirtingiems vandens telkinio gyliams (Козин, Погорелова 2003)

Grafike, 2.5 pav., vaizduojama priklausomybės, kada santykinis vandens gylio koeficientas 1 linija $\gamma=1$, 2, linija $\gamma=0,5$ ir 3 linija $\gamma=0,3$. Santykinis vandens gylio koeficientas yra vandens telkinio gylis H padalintas iš TPAOP ilgio L , $\gamma = H/L$. Kuo santykinis vandens gylis didesnis, tuo pasipriešinimas bangavimui mažiau priklauso nuo koeficiento k_L ir maksimalus pasipriešinimas bangavimui atsiranda didelių greičių srityje, (Козин, Погорелова 2003).

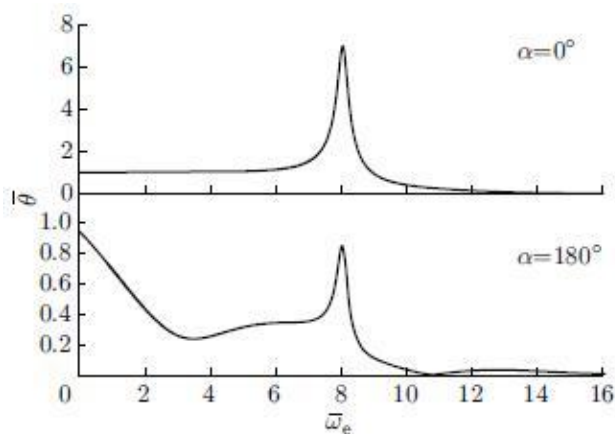
Straipsnyje (Zhou *et al.* 2009) nagrinėja TPAOP vertikalaus ir išilginio supimo charakteristikas pagal skirtingą bangų kryptį.

Atlikę skaičiavimus, gavo grafikus, kaip pasiskirsto vertikalaus ir išilginio TPAOP supimo amplitudės dažninės charakteristikos.



2.6 pav. Vertikalaus TPAOP supimo amplitudės dažninė charakteristika (Zhou *et al.* 2009)

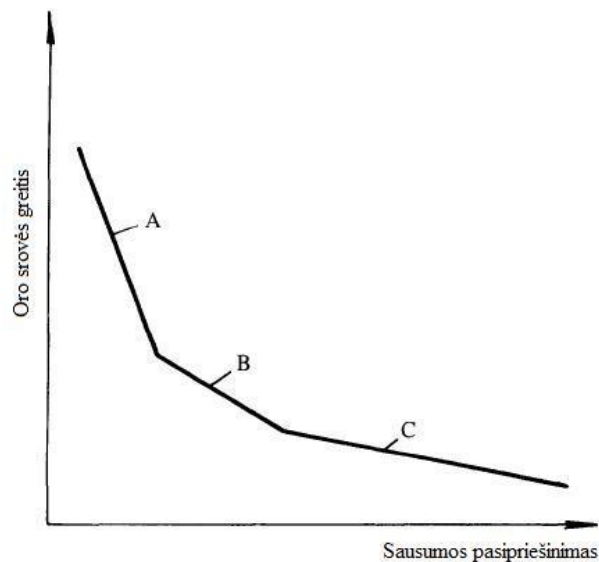
Schemoje, 2.6 pav., vaizduojama vertikalaus TPAOP supimo amplitudės dažninės charakteristikos. Pirmuoju atveju, kai kampas tarp TPAOP ir bangų susikirtimo $\alpha=0^\circ$, prieš bangas, antruoju kai $\alpha=180^\circ$, palei bangas. Matoma, kad didžiausi TPAOP modelio svyravimai – kai TPAOP sklendžia prieš bangas.



2.7 pav. Išilginio TPAOP supimo amplitudės dažninė charakteristika (Zhou *et al.* 2009)

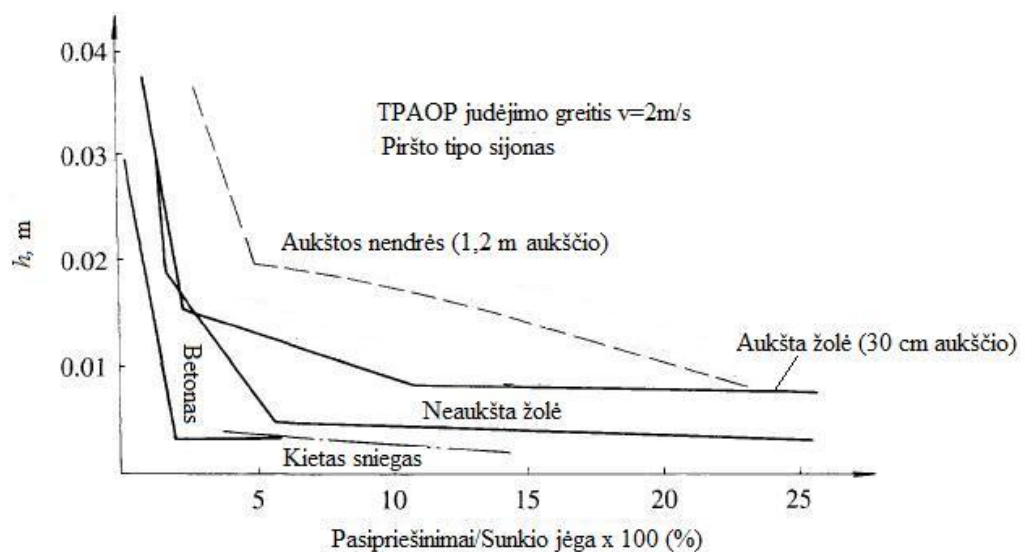
Išilginio TPAOP supimo schemoje, 2.7 pav., taip pat didžiausi sūpavimai yra sklendžiant TPAOP prieš bangas. Didžiausias pikas ties 8 vaizduoja TPAOP ir bangos susidūrimą (Zhou *et al.* 2009) nustatė, kad jeigu transporto priemonę veiktų iškart vertikalus ir išilginis svyravimai, jie būtų žalingi TPAOP normaliam darbui.

Slėgis oro pagalvėje reikalingas TPAOP išlaikyti virš sausumos yra didesnis nei išlaikyti virš vandens. Kadangi eksploatuojant TPAOP virš sausumos paviršiaus tarp apsauginio sijono ir atraminio paviršiaus susidaro didesnis oro tarpas nei tarp sijono ir vandens. Dėl to iš po oro pagalvės išteka didesnis oro kiekis, kuris sukuria slėgį reikalingą TPAOP eksploatacijai. Sausumos pasipriešinimas, kurį turi įveikti TPAOP, skirstomas į tris režimus, kontroliuojamus pagal oro pagalvės oro tėkmės greitį (2.8 pav.).



2.8 pav. Trys TPAOP eksploatavimo režimai ant sausumos paviršiaus (Yun, Bliault 2000)

Režimas A – kai pro oro pagalvę prateka maksimalus oro kiekis, sausumos pasipriešinimas yra mažas, nes TPAOP dėl pratekančio didelio oro kiekio pakilusi nuo atraminio paviršiaus ir mažai kontaktuoja su juo. Šio režimo metu tarpas tarp atraminio paviršiaus ir oro pagalvės būna didžiausias. Režimas B – kai pro oro pagalvę prateka vidutinis oro kiekis. Režimas C- kai pro oro pagalvę prateka minimalus oro kiekis, reikalingas išlaikyti eksploatacinį režimą. Šio režimo metu sausumos pasipriešinimas yra didžiausias, nes dėl nedidelio pratekančio oro kiekio pro oro pagalvę, ji yra pakilusi labai mažu atstumu nuo atraminio paviršiaus, eksploatacijos metu dažnai kontaktuoja su paviršiumi. Dėl to dyla oro pagalvės apsauginis sijonas, padidėja TPAOP variklio galingumas, reikalingas nugalėti pasipriešinimams, padidėja kuro sąnaudos, (Yun, Bliault 2000).

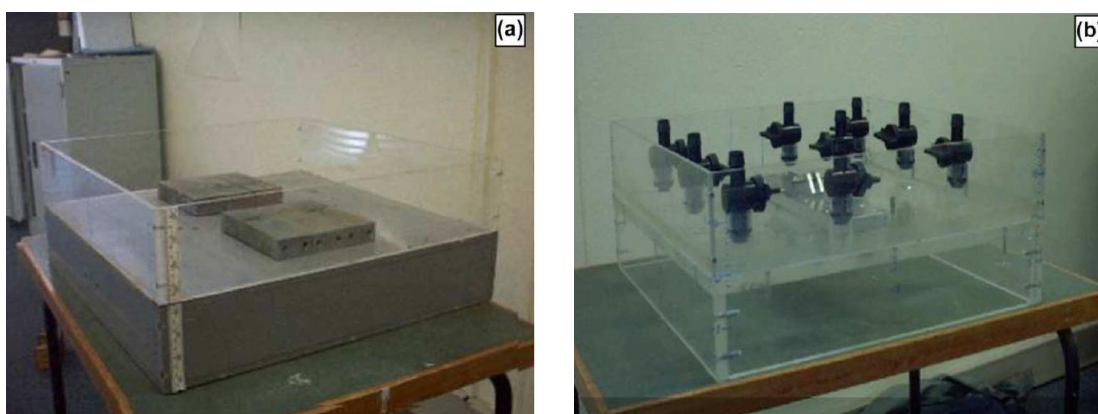


2.9 pav. Piršto tipo sijono sąveika su įvairiais paviršiais (Yun, Bliault 2000)

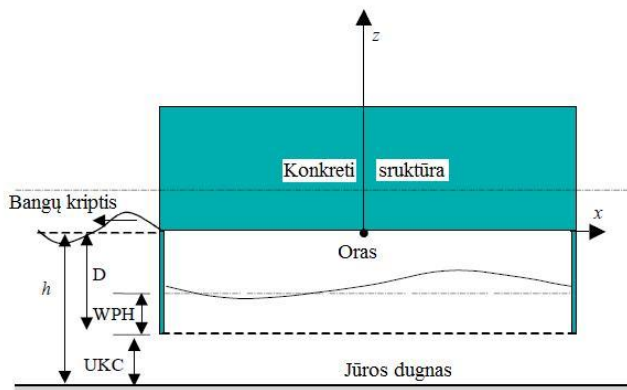
Atstumas h tarp atraminio paviršiaus ir TPAOP priklauso nuo to, su koku apsauginiu sijonu sklendžia TPAOP ir per kokį paviršių. Pagrindiniai sijonų tipai yra piršto, maišo ir piršo – maišo. Piršto tipo sijonas yra sudarytas iš daugelio atskirų segmentų, kurie gali individualiai sklęsti per skirtingus paviršius. Su tokio tipo sijonais TPAOP idealiai tinka eksploatuoti dideliais greičiais virš bangų ir žemės. Pagrindiniais privalumai, kad mažesnė trintis nei maišo tipo ir sudilus vienam piršto tipo sijono segmentui, TPAOP gali būti toliau eksploatuojama.

Grafike, 2.9 pav., vaizduojama, kaip priklauso pakilimo aukštis h nuo pasipriešinimo ir TPAOP sunkio jėgos, kai transporto priemonė juda su piršto tipo sijonu per skirtingus paviršius. Aukščiausiai TPAOP pakyla nuo aukštos žolės paviršiaus apie 0,038 m, kai pasipriešinimai yra maži, tačiau efektyviausiai TPAOP pakyla ir išlaiko pakilimą virš aukštų nendrių, kadangi jos apgaube oro pagalvės visą perimetrą ir oro srautui sunkiau išeit ir po oro pagalvės. Prasčiausiai pakyla nuo betono, nes lygus labai paviršius.

Dažniausiai eksperimentiniai tyrimai su TPAOP yra atliekami ištirti sąveiką su vandens paviršiumi, kadangi ši transporto priemonė dažniausiai naudojama virš vandens paviršiaus ar nestabilaus atraminio paviršiaus. Savo darbe, (Thiagarajan, Morris 2006), atliko eksperimentą su dvejais 1:100 mastelio modeliais, Vakarų Australijos universitete, siekdami ištirti banguojančių ir sūpuojančių judesių dinamines priklausomybes atskirai kiekvieno modelio. Abiejų modelių gabaritiniai matmenys buvo, 0,5 m ilgis ir 0,5 m plotis. Pirmas modelis buvo su hermetiškai uždara apatine dėžute, kurios aukštis 0,1 m, o kitas modelis buvo atidaryta apačia, su sijonu, kurio ilgis buvo 0,1 m. Kiekvienas modelis plūduriavo esant pastoviai grimzlei 0,1 ir bandymo metu vandens gylis svyravo nuo 0,03 m (seklu) iki 0,8 m (gilu). Aplinką sudarė nuolatinis bangavimas su periodais nuo 0,6 iki 3,5 s ir amplitude 0,08 – 0,20.

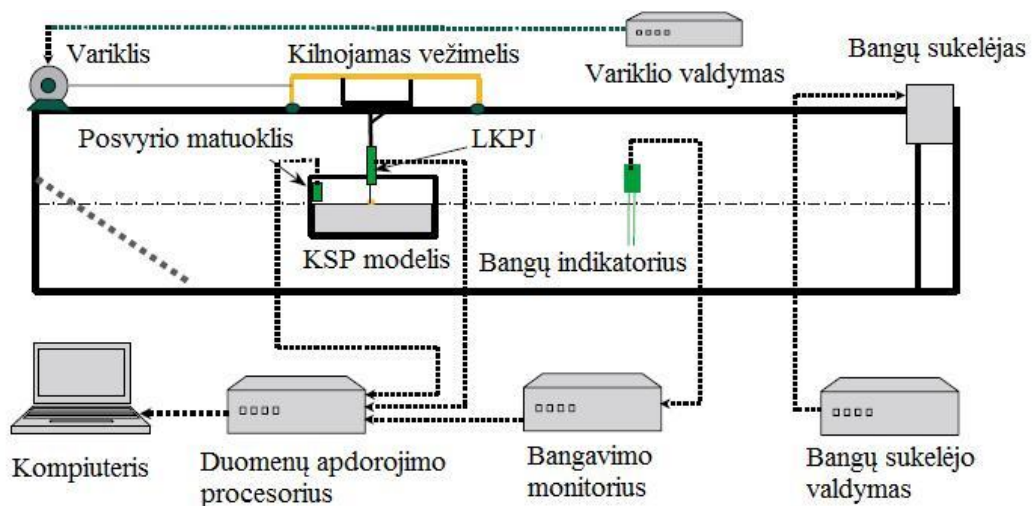


2.10 pav . Eksperimente naudoti modeliai; a – uždara apačia dėžės modelis, b – atidaryta apačia oro pagalvės modelis (Thiagarajan, Morris 2006)



2.11 pav. Modelio schema; h – vandens lygis, D – grimzlė, WPH – vandens lygis pagalvėje, UKC – atstumas iki dugno (Thiagarajan, Morris 2006)

Bangos latako matmenys buvo 50 m ilgio, 1,5 m pločio ir 1,8 m aukščio. Atviros apačios modelis buvo laikomas su oro pagalve, kurios matmenys: 0,49 m plotis, 0,49 m ilgis ir 0,08 aukštis. Svoriai buvo pridedami, kad išgauti 0,1 m gilio grimzlę abiem modeliams. Modeliai 1:100 mastelio pristatė konkretaus sunkio pagrindą su 50 m² plotu. Papildomai pagalvės modelis, pristatytas KSP su sijonu, kurio ilgis 10 metrų. Vandens lygis svyravo nuo gilaus iki seklaus. Slėgis oro pagalvėje buvo keičiamas siekiant pritaikyti įvairiems vandens aukščiams. Modelių ribinis statinis stabilumas reikalavo atidaus svorių paskirstymo ir milžiniškų pastangų dėka buvo gauti geri vandens aukščio įvertinimai. Mažo mastelio modeliams, bangų aukščiai turi būti labai maži tam, kad gautume tinkamą judėjimą neišleidžiant oro iš oro pagalvės.



2.12 pav. Eksperimento schema (Thiagarajan, Morris 2006)

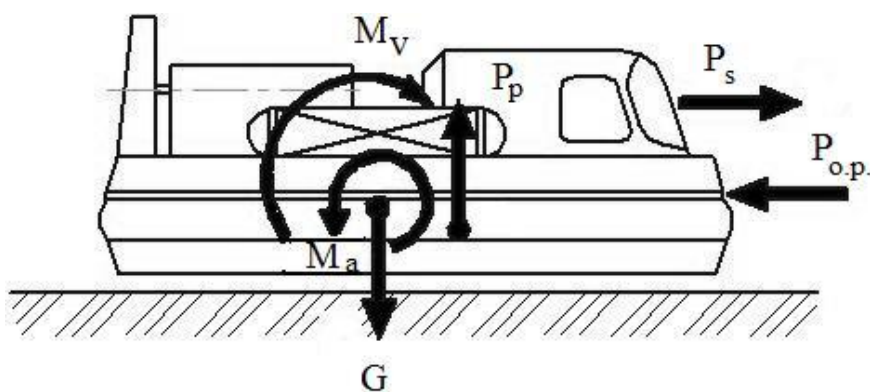
Buvo padaryta 100 bandymų, kuriuos išanalizavus naudojant Furje analizę buvo gauta amplitudžių ir fazių informacija. Modelių vertikalus ir išilginis supavimas buvo išmatuotas bangų periodo ir amplitudžių diapazonais. Linijinio kintamo poslinkio jutiklis (LKPJ) buvo naudojamas

matuoti vertikaliai sūpavimui. Vertikalaus sūpavimo rezultatai parodė, kad matavimai buvo nenuoseklūs. Išilginis sūpavimas buvo matuojamas su posvyrio matuokliu, kurio padalų suskaidymas mažesnis nei $0,1^\circ$, (Thiagarajan, Morris 2006).

Atlikto eksperimento rezultatai parodė, kad eksperimento tendencijos palyginti su analitiniu sprendimu yra geros, ypač ilgesniu nei natūraliu periodu. Taip pat rezultatai parodė, kad oro pagalvė paremta konkrečios sunkio jėgos konstrukcijos padidina sūpavimo priklausomybę, nors ir turėdama mažai įtakos judėjimui.

Kadangi šios transporto priemonės mažai arba beveik nekontaktuoja su atraminiu paviršiumi, jas yra sudėtinga vairuoti. Ypač išibėgėjus tampa sunkiau daryti posūkius – reikia didesnio spindulio posūkiams įveikti, (Jun *et al.* 2010). Šią problemą galima išspręsti sumontuojant du propelerius ant TPAOP. Darant posūkį vienas propeleris suktųsi lėčiau už kitą, (Fantoni *et al.* 2000).

Kita problema, kada TPAOP yra eksploatuojama dideliais greičiais – jos priekis, veikiamas oro pasipriešinimo, svyra link atraminio paviršiaus. Dėl to padidėja sijono dilimas, reikalinga variklio galia įveikti atsiradusią trinciai, padidėja tikimybė apversti TPAOP. Savo (Вавилов 2011) darbe nagrinėja TPAOP pastovumą ir būdai jam užtikrinti: Negatyvaus reiškinių – priekinės dalies „išsirausimo“ į atraminį paviršių judant dideliais greičiais. Judant TP horizontalioje plokštumoje veikia sraigto traukos jėga P_s , nukreipta išilgai sraigto ašies į judėjimo kryptį ir oro srauto pasipriešinimo jėga stabdanti transporto priemonę $P_{o.p.}$. Šios jėgos sukuria virtimo momentą M_v , kuris stengiasi prilenkti priekinę dalį prie atraminio paviršiaus. Vertikalioje plokštumoje transporto priemonę veikia pakėlimo jėga P_p ir svorio jėga G . Veikiant šioms jėgoms atsiranda atstatomasis momentas M_a ir šis momentas pakelia TP priekinę dalį ir išlygina virtimo momentą (2.13 pav).

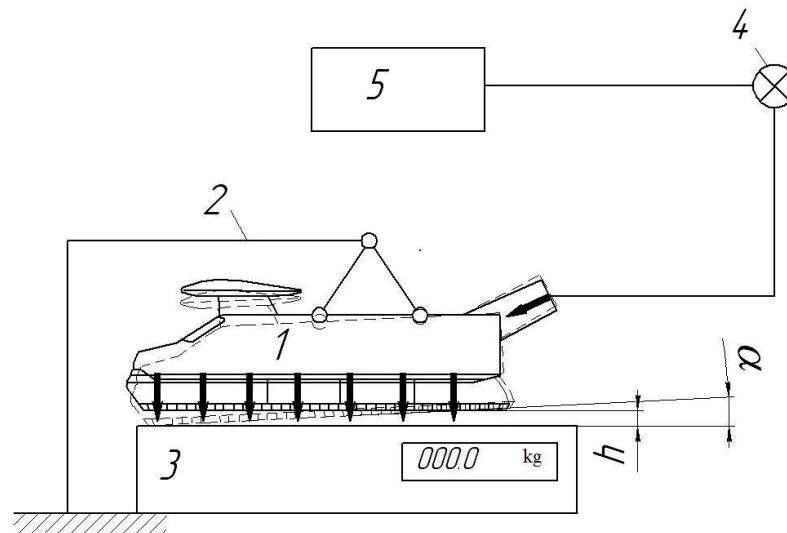


2.13 pav. TPAOP veikiančių jėgų schema (Вавилов 2011)

TP greitėjant išlyginamasis momentas keičiasi mažai ir jį galima laikyti pastoviu. Jo kitimas priklauso nuo TP svorio centro pasislinkimo, pvz.: judant keleiviams salone ar keičiantis

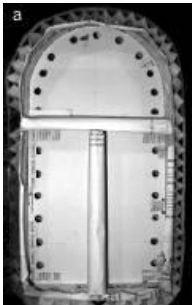
kuro kiekiui bakuose. Vertimo momentas yra greičio funkcija. Padidinus TP judėjimo greitį padidėja sraigto traukos jėga ir tuo pačiu padidėja oro pasipriešinimas, tai reiškia, kad tas virtimo momentas taip pat išauga ir transporto priemonei pasiekus kritinį greitį, virtimo momentas, pasidaro didesnis už atstatomąjį momentą ir aparatas „išsikasa“ priekine dalimi į atraminį paviršių. Paprasčiausias šios problemos sprendimas yra TP priekinėje dalyje įrengti aerodinaminį aptaką. Šio įrenginio veikimo principas – atsiranda papildomas atstatomasis momentas M_{ap} .

Bandymais buvo įrodyta, kad paskirstant oro srautus TP oro pagalvės dalyse, TP „išsirausimo“ į atraminį paviršių išvengti nepavyksta. Bandymams buvo pagaminta specialus įrenginys (2.14pav.), susidedantis iš aerodinaminio transporto priemonės modelio 1, elektroninių svarstyklių 3, ventilio 4 ir kompresoriaus 5. Eksperimente buvo vertinama du dydžiai: pakėlimo jėgos dydis N ir transporto priemonės horizontalaus pasvyrimo kampas. Bandymų rezultatai buvo sudėti į lentelę.



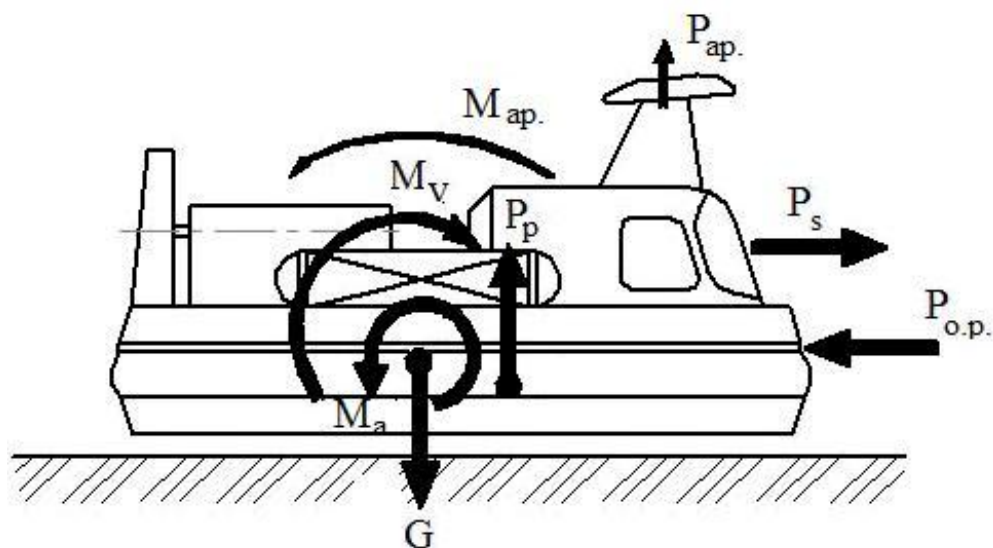
2.14 pav. Eksperimento schema (Вавилов 2011)

2.1 lentelė. Eksperimento rezultatai (Вавилов 2011)

Nr.		Bangymo tipas	m , kg	P , N	$\bar{P}$, N	α , °
1	1	Visos dalys atviros 	0,102	0,9996	1,0143	0
	2		0,105	1,029		
	3		0,104	1,0192		
	4		0,103	1,0094		

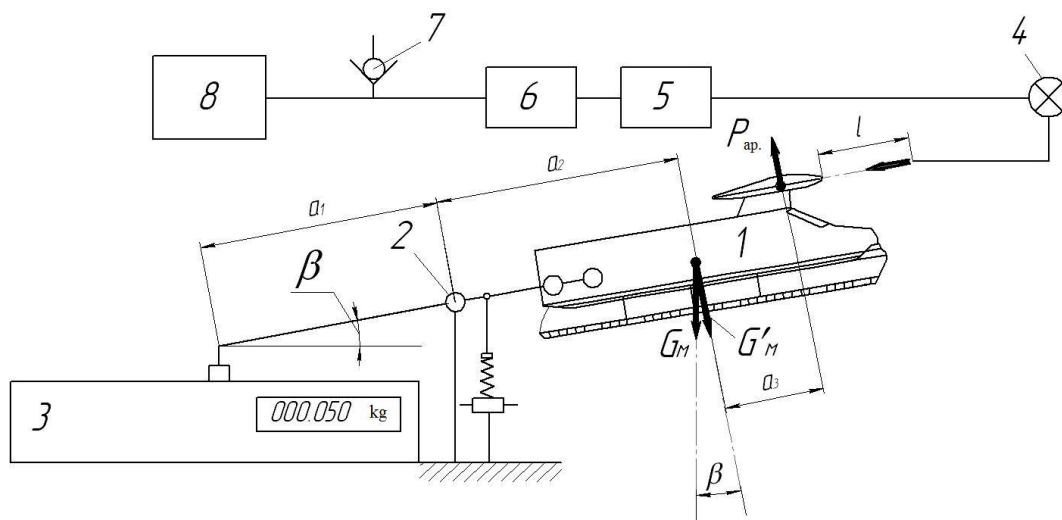
2	1	Priekinė dalis atvira	0,095	0,931	0,958	0
	2		0,099	0,9702		
	3		0,100	0,98		
	4		0,097	0,9506		
3	1	Galinė dalis atvira	0,098	0,9604	0,9775	0
	2		0,102	0,9996		
	3		0,099	0,9702		
	4		0,100	0,980		

Straipsnyje nagrinėjama, kaip transporto priemonės stabilumą galima padidinti aerodinaminiu būdu. Šiuo atveju prie transporto priemonės tvirtinamas aerodinaminis aptakas, kuris gali būti su fiksuotu arba keičiamu atakos kampų. 2.15 paveiksle parodyta schema su atsirandančiu papildomu atstatomuoju momentu, kuris atsiranda aerodinaminio M_{ap} pagalba. TP pastovumas užtikrinamas, kai $M_{virtimo} = M_{atstatomasis} + M_{aptako}$.



2.15 pav. TPAOP veikiančios jėgos su aptaku (Вавилов 2011)

Autorius apskaičiavo: atstatomąjį momentą, verčiantį momentą, aptako momentą, reikalingą aptako pakėlimo jėgos dydį, aptako plotį ir pakeliamosios jėgos koeficientą. Teoriniai paskaičiavimai leido pasiūlyti keletą rekomendacijų kaip panaikinti „išsirausimo“ reiškinį – reikia padidinti TP korpuso aptakumą, kaip galima toliau nuo svorio centro į priekį, įtvirtinti aptaką.



2.16 pav. Eksperimento su aptaku schema (Вавилов 2011)

Kad išbandyti oro aptako pakėlimo jėgą, buvo panaudotas eksperimentinis modelis. Jis susideda (2.16 pav.) iš: TP aerodinaminio modelio 1, perdavimo mechanizmo 2, elektroninių svarstyklių 3, ventilio 4, drėgmės atskirojo 5, filtro 6, apsauginio vožtuvo 7, kompresoriaus 8. Eksperimento metu buvo fiksuojami elektroninių svarstyklių rodmenys. Jėgos dydis, kuris sveria svarstyklės yra lygus aerodinaminės aptako pakėlimo jėgos ir TP svorio jėgos.

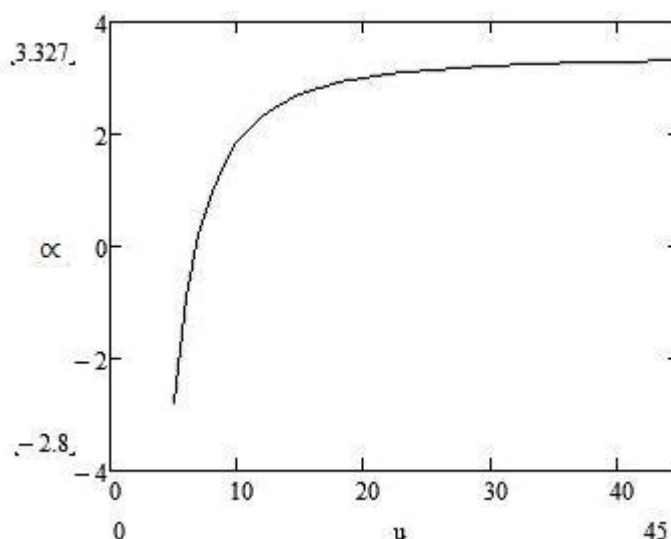
Eksperimento metu TP modelį veikia oro srovės trikdžiai dėl ko atsiranda elektroninių svarstyklių paklaidos. Šie trikdžiai atsiranda dėl oro srauto sąveikos su korpusu. Trikdžiai atsiranda modelio priekinėje dalyje. Eksperimento metu oro srautas nuo kompresoriaus buvo nukreiptas į aerodinaminį oro aptaką. Tuo pačiu dalis kinematinės srauto energijos greičiu u_k papildavo ant modelio korpuso, o srautas patekdavo ant korpuso kampu gama. Trikdžiai atsirandantys TP vidurinėje ir galinėje dalyje, atsiranda dėl tos pačios priežasties.

2.2 lentelė. Eksperimento gauti rezultatai (Вавилов 2011)

Nr.		l, m	m, kg	P, N	$\bar{P}, N$
1	1	0,12	0,11	1,078	1,1515
	2		0,12	1,176	
	3		0,13	1,274	
	4		0,11	1,078	

2	1	0,20	0,13	1,274	1,4455
	2		0,17	1,666	
	3		0,14	1,372	
	4		0,15	1,47	
3	1	0,22	0,23	2,254	2,37
	2		0,25	2,45	
	3		0,25	2,45	
	4		0,237	2,32	
4	1	0,25	0,07	0,686	0,833
	2		0,09	0,882	
	3		0,08	0,784	
	4		0,1	0,98	
5	1	0,36	0,11	1,078	0,98
	2		0,1	0,98	
	3		0,1	0,98	
	4		0,09	0,882	

Lentelėje 2.2 matoma, kad keičiant atstumą l tarp transporto priemonės ir oro išėjimo angos, kinta aptako pakėlimo ir TP svorio jėgos suma. Šio bandymo metu didžiausia jėga P yra kai atstumas l yra 0,22 m, tai reiškia, kad kai TP aptako atakos kampas yra pastovus, jo veikimas yra efektyvus tik vienu tam tikru momentu. Oro aptakams su reguliuojamu oro atakos kampu buvo išvesta atakos kampo priklausomybė alfa nuo judėjimo greičio, ši priklausomybė išvesta tam, kad transporto priemonė „nesiraustų“ į atraminį paviršių. Kai TP greitis yra 5 – 50 m/s esant tik oro pasipriešinimui, aptako atakos kampas $\propto$ priklauso nuo greičio u (2.17 pav.).



2.17 pav. Aptako atakos kampo ir greičio priklausomybė (Вавилов 2011)

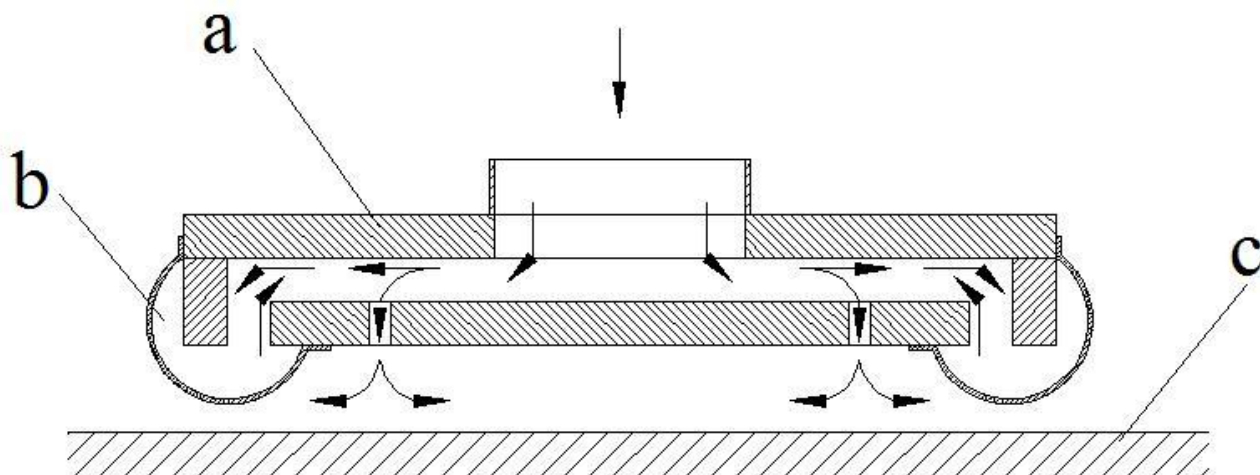
Eksperimento metu gauti duomenys leido papildyti rekomendacijų sąrašą kaip padidinti TP stabilumą – visais TP judėjimo režimais tikslinga naudoti aerodinaminį aptaką.

Pačios oro pagalvės gali būti naudojamos krovininiuose automobiliuose ar jų puspriekabėse, kad sumažinti apkrovas tenkančias kelio paviršiui, dėl kurių jis deformuojasi, (Dong *et al.* 2009). Tačiau tokios konstrukcijos minusas, kad oro pagalvei pakelti sunkią transporto priemonę yra reikalingas didelis oro srautas, kuriam sukurti reikalingi galingi kompresoriai. Kitas autorius (Rahman *et al.* 2008) savo darbe pateikė realų vikšrinį transporto priemonės modelį, kuriame papildomai buvo sumontuotas propeleris ir oro pagalvė. Modelis buvo išbandytas, kai atraminis paviršius yra pelkė. Bandant modelį su oro pagalve ir propeleriu, rezultatai parodė, kad pasipriešinimas judėjimui sumažėjo 12.63 %, kai modelis veikia paviršių 2,45 kN jėga ir 24.81 %, kai 3,43 kN, nei jį bandant, išjungus oro pagalvę ir propelerį. Į tą patį modelį įdiegus slėgio reguliavimo sistemą, buvo nustatyta, kad reguliuojant slėgį oro pagalvėje, kai ji yra eksploatuojama, galima sumažinti reikalingą energijos kiekį modelio eksploatacijai, (Hossain *et al.* 2011).

3. TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS MODELIS IR JO PAGRINDINIAI PARAMETRAI

3.1. Modelio pagrindiniai parametrai

Suprojektuojama transporto priemonė ant oro pagalvės ir nustatomi jos parametrai (Ежу 1983).



3.1 pav. TPAOP schema: a) korpusas; b) sijonas; c) atraminis paviršius

Projektuojant transporto priemonę ant oro pagalvės (3.1 pav.) reikia nustatyti šiuos parametrus:

transporto priemonės masę m , kg;

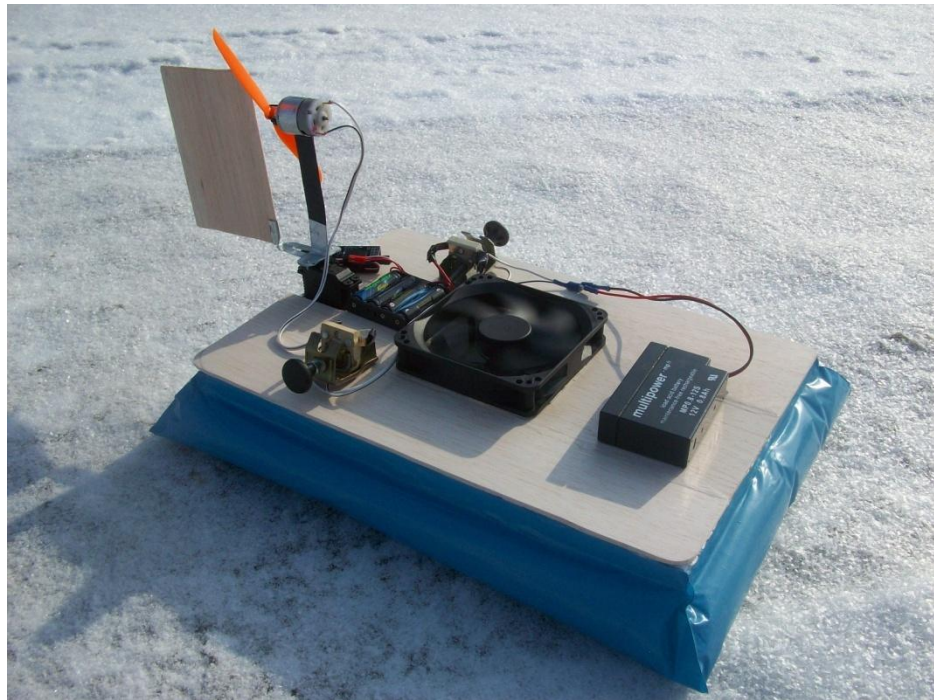
oro pagalvės plotą S , m^2 ;

korpuso ilgį L , plotį B ir formą;

variklio galingumą, reikalingą oro pagalvės eksploatacijai N_e , kW;

Priimama, kad transporto priemonės svoris bus 0,950 kg, ilgis $L=0,4$ m, aukštis 0,06 m. Kadangi projektuojama maža transporto priemonė ant oro pagalvės, jos pakilimo aukštis nuo atraminio paviršiaus bus nedidelis - 0,001 m.

Transporto priemonės plotį paskaičiuojame pagal santykį $L/B=(1,5 \div 2,0)$. Priimama, kad šis santykis yra $L/B=1,5$, todėl $B=0,27$ m, $S=0,108$ m^2 .



3.2 pav. Pagamintas oro pagalvės modelis

Apskaičiuojamas sunaudojamas oro kiekis Q , kuris praeina pro oro pagalvę:

$$Q = S_{\text{tarp.}} \cdot v, \text{ m}^3/\text{s}; \quad (3.1)$$

čia: $S_{\text{tarp.}}$ – tarpo tarp atraminio paviršiaus ir apatinės korpuso sienelės perimetro plotas, m^2 .

Tarpelio aukštis paprastai būna $0,7 - 0,8h$ (h – transporto priemonės sklendimo aukštis);

v – oro ištekėjimo iš oro pagalvės greitis, m/s .

Apskaičiuojamas oro ištekėjimo greitis v :

$$v_o = \sqrt{\frac{2p_{o,p}}{\rho}}, \text{ m/s}; \quad (3.2)$$

čia: $p_{o,p}$ – slėgis oro pagalvėje, Pa ;

ρ – oro tankis, $1,29 \text{ kg/m}^3$.

Apskaičiuojamas slėgis oro pagalvėje $p_{o,p}$:

$$p_{o,p} = \frac{m}{S}, \text{ Pa}; \quad (3.3)$$

čia: m – transporto priemonės masė, 0,950 kg;

S – oro pagalvės plotas, 0,108 m².

tada:

$$p_{o.p} = \frac{0,950}{0,108} = 8,8, \text{ kg/m}^2 = 86,29 \text{ Pa.}$$

Įstatomos gautos reikšmės į 3.2. formulę:

$$v_o = \sqrt{\frac{2 \cdot 86,29}{1,29}} = 11,57, \text{ m/s.}$$

Perimetro plotas tarp atraminio paviršiaus ir apatinės korpuso sienelės $S_{tarp.}$:

Priimame, kad transporto priemonės sklendimo aukštis $h = 0,001$ m.

$$S_{tarp.} = P \cdot h \cdot 0,7, \text{ m}^2; \quad (3.4)$$

čia: P – perimetras TPAOP, 1,34 m;

h – transporto priemonės sklendimo aukštis 0,001m.

tada:

$$S_{tarp.} = 1,34 \cdot 0,001 \cdot 0,7 = 0,938 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Įstatomos gautos reikšmės į 3.1 formulę:

$$Q = 0,938 \cdot 10^{-3} \cdot 11,57 = 0,011 \text{ m}^3/\text{s.}$$

Apskaičiuojamas galingumas reikalingas oro pagalvės eksploatacijai N_e :

$$N_e = \frac{Q p_{o.p}}{\eta}, \text{ W}; \quad (3.5)$$

čia: Q – sunaudojamas oro kiekis, kuris praeina pro oro pagalvę 0,011 m³/s;

$p_{o.p}$ – slėgis oro pagalvėje 86,29 Pa;

η – oro sraigto naudingumo koeficientas, kuris blogai suprojektuotu oro pagalvių būna

0,4, o gerai suprojektuotų 0,7. Priimu, kad $\eta = 0,7$.

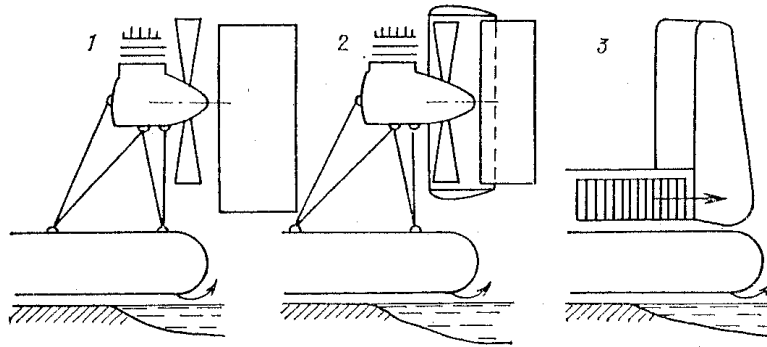
tada:

$$N_e = \frac{0,011 \cdot 86,29}{0,7} = 1,36 \text{ kW. } W = 0,00136 \text{ kW.}$$

Apskaičiuojama variklio galios N_e priklausomybė nuo pakilimo aukščio h tarp atraminio paviršiaus ir TPAOP modelio bei oro srauto praeinančio pro oro pagalvę Q .

Transporto priemonių su oro pagalve horizontali traukos jėga priklauso nuo transporto priemonės panaudojimo, reikalingo greičio ir valdymo savybių. Varytuvai, kurie sukuria horizontalią trauką galima skirstyti į oro, vandens ir ratinius. (Yun, Bliault 2000)

Kadangi projektuojama transporto priemonė judės ne tik vandens paviršiumi, bet ir sausuma. Parenkamas aviacinio tipo varytuvas 3.3 pav., kuris gali būti su žiedu arba be jo.



3.3 pav. Aviacinio tipo varytuvai:

1) be žiedo; 2) su žiedu; 3) reaktyvinis.

Parenkant oro sraigą reikia įvertinti visus pasipriešinimus, atsirandančius judėjimo metu.

Apskaičiuojamas aerodinamis pasipriešinimas X_0 :

$$X_o = C_x \frac{\rho v^2}{2} S_s, \text{ N;} \quad (3.6)$$

čia: C_x – Aerodinaminis oro pasipriešinimo koeficientas priklausantis nuo aparato formos, būna $(0,3 \div 0,5)$, priimu 0,4;

ρ – oro tankis, $1,29 \text{ kg/m}^3$;

v – transporto priemonės judėjimo greitis, $2,78 \text{ m/s}$;

S_s – aparato priekinio skerspjūvio plotas, m^2 .

Apskaičiuojamas aparato priekinio skerspjuvio plotas S :

$$S_s = HB, \text{m}^2; \quad (3.7)$$

čia: H – transporto priemonės aukštis, priimu 0,06 m;

B – transporto priemonės plotis, 0,27 m.

tada:

$$S_s = 0,06 \cdot 0,27 = 0,016 \text{ m}^2.$$

Istatomos gautos reikšmės į 3.6 formulę:

$$X_o = 0,40 \frac{1,29 \cdot 2,78}{2} \cdot 0,016 = 0,011 \text{ N}.$$

Apskaičiuojamas pasipriešinimas judėjimui X_b judant vandeniu:

$$X_b = \frac{4G^2 E}{\pi \rho v^2 L^2}, \text{N}; \quad (3.8)$$

čia: G – transporto priemonės sunkio jėga, $G = mg = 0,950 \cdot 9,81 = 9,32 \text{ N}$;

E – koeficientas, priklausantis nuo transporto priemonės ilgio ir pločio santykio bei greičio, 2,3;

ρ_v – vandens tankis, 1000 kg/m^3 ;

v – transporto priemonės judėjimo greitis, $2,78 \text{ m/s}$;

L – oro pagalvės ilgis, 0,4 m.

tada:

$$X_b = \frac{4 \cdot 9,32^2 \cdot 2,3}{3,14 \cdot 1000 \cdot 2,78^2 \cdot 0,4^2} = 0,206 \text{ N}.$$

Apskaičiuojamas impulsinis oro pasipriešinimas $X_{imp.}$:

$$X_{imp.} = \rho Q v; \quad (3.9)$$

čia: ρ – oro tankis, $1,29 \text{ kg/m}^3$;

Q – sunaudojamas oro kiekis, kuris praeina pro oro pagalvę $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$;

v – transporto priemonės judėjimo greitis, $2,78 \text{ m/s}$;

tada:

$$X_{imp.} = 1,29 \cdot 0,011 \cdot 2,78 = 0,04 N.$$

Apskaičiuojamas variklio galingumas reikalingas nugalėti pasipriešinimams N_{st} :

$$N_{st} = \frac{X_{sum.} / g v}{75 \eta}, Ag; \quad (3.10)$$

čia: X_{sum} – pasipriešinimų suma ($X_o + X_b + X_{imp.} = 0,011 + 0,206 + 0,04 = 0,257 N$);

v – transporto priemonės judėjimo greitis, 2,78 m/s;

η – sraigto naudingo veiksmo koeficientas, 0,6.

tada:

$$N_{st} = \frac{0,257 / 9,81 \cdot 2,78}{75 \cdot 0,6} = 0,0002 Ag \approx 0,00016 kW.$$

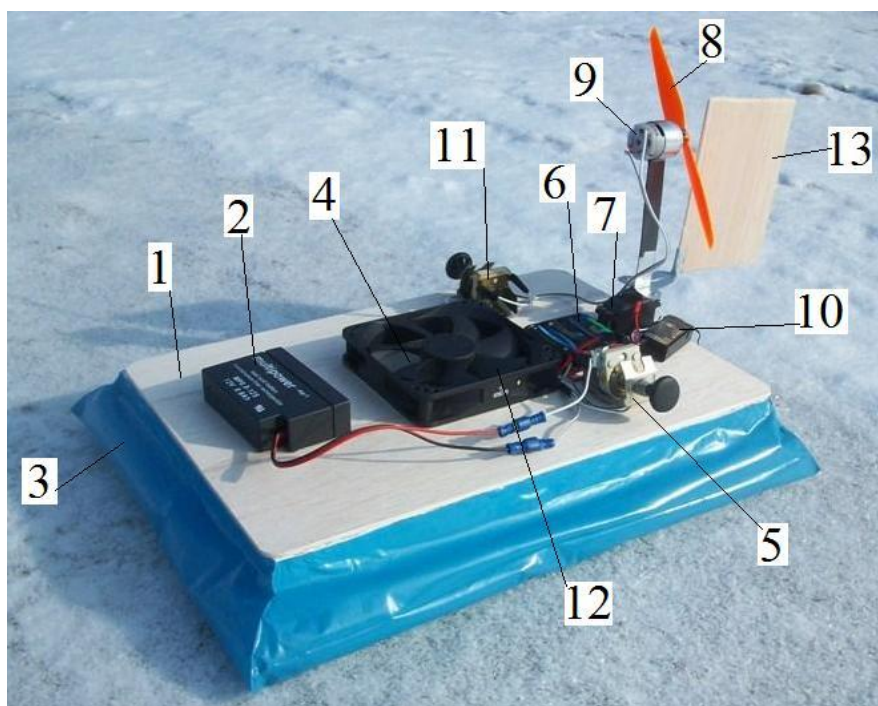
Užsiduoti ir gauti parametrai surašomi į 3.1 lentelę.

3.1 lentelė. Pasirinkti ir gauti parametrai

Pasirinkti	
TPAOP modelio ilgis L , m	0,40
Modelio plotis B , m	0,27
Modelio svoris m , kg	0,950
Modelio pakilimo aukštis h nuo atraminio paviršiaus, m	0,001
Gauti	
Modelio plotas S , m ²	0,108
Oro kiekis Q praeinantis pro oro pagalvės modelį, m ³ /s	0,011
Slėgis oro pagalvėje $p_{o,p}$, Pa	86,29
Oro greitis praeinančio pro oro pagalvės modelį v_o , m/s	11,57
Tarpo tarp atraminio paviršiaus ir apatinės korpuso sienelės perimetro plotas S_{tarp} , m ²	$0,938 \cdot 10^{-3}$
Modelio perimetras P , m	1,34
Variklio galingumas reikalingas oro pagalvės eksploatacijai N_e , W	1,36
Variklio galingumas reikalingas judėjimui N_{st} , W	0,16

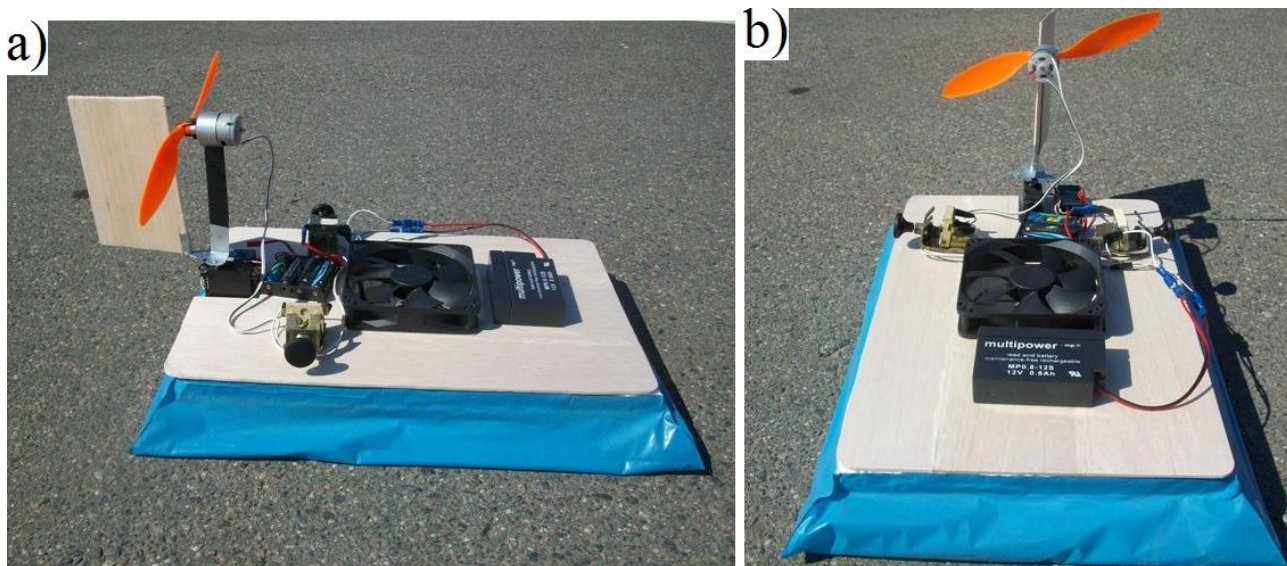
3.2. Transporto priemonės ant oro pagalvės modelio konstrukciniai parametrai

TPAOP modelį (3.4 pav.) sudaro: korpusas 1 pagamintas iš putų stirola, kurio storis 20 mm ir medienos, 12 V akumuliatorius 2, kurio talpa 0,8 Ah, jis maitina elektros variklius 4 ir 9. Variklis 4 yra sujungtas su ventiliatoriumi 12, kurio diametras 12 mm. Variklis 9 sujungtas su propeleriu 8, kurie sumontuoti ant servo variklio 7, kurį maitina baterijos 6. Elektros variklio 4 sūkius reguliuoja reostatas 5, o variklio 9 reguliuoja reostatas 11. Imtuvas 10 sujungtas su servo varikliu 7 ir baterijomis 6. Maišo tipo sijonas 3. Vairas 13.

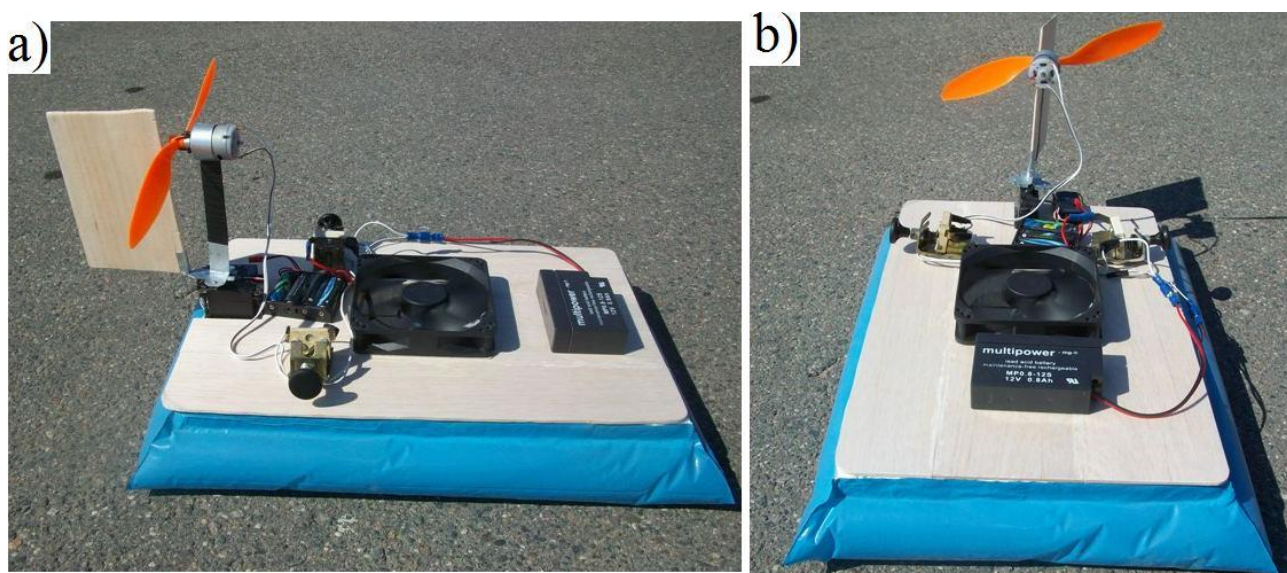


3.4 pav. TPAOP modelio sudedamosios dalys

Veikimo principas. Prijungiamas akumuliatorius 2 prie reostato 5, reostato svirtele reguliuojami elektros variklio 4 sūkliai, taip reguliuojamas patenkančio oro srauto kiekis į oro pagalvę 3. Prisipūtus oro pagalvei (3.6 pav.), TPAOP modelis ima lengvai sklęsti virš atraminio paviršiaus. Tada pasukant reostato 11 svirtelę yra įjungiamas elektros variklis 9, kuris suka propelerį 8, kuris pradeda stumti TPAOP modelį į priekį. Pulse stumdant svirtelę servo variklis 7 pasuka besisukantį propelerį 8, kartu su įtvirtintu stovė varikliu 9 į viena arba į kitą pusę. Paveiksle 3.5 pav. vaizduojama, kaip atrodo TPAOP modelis neeksploatuojamoje padėtyje a) iš šono ir b) iš priekio.

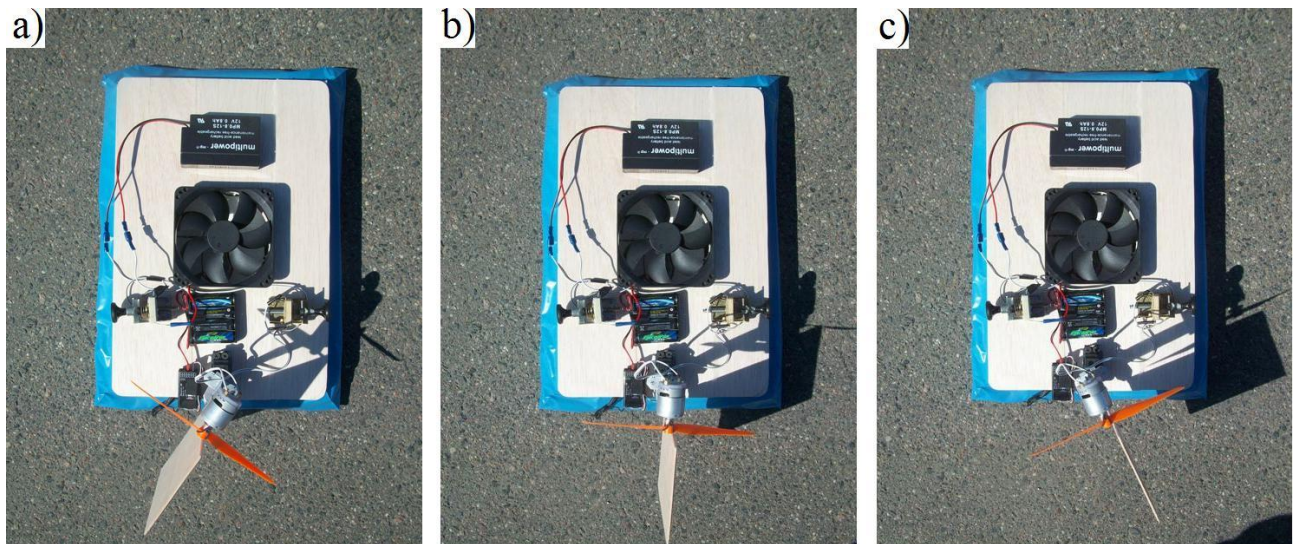


3.5 pav. Nepripūsta oro pagalvė: a) iš šono, b) iš priekio



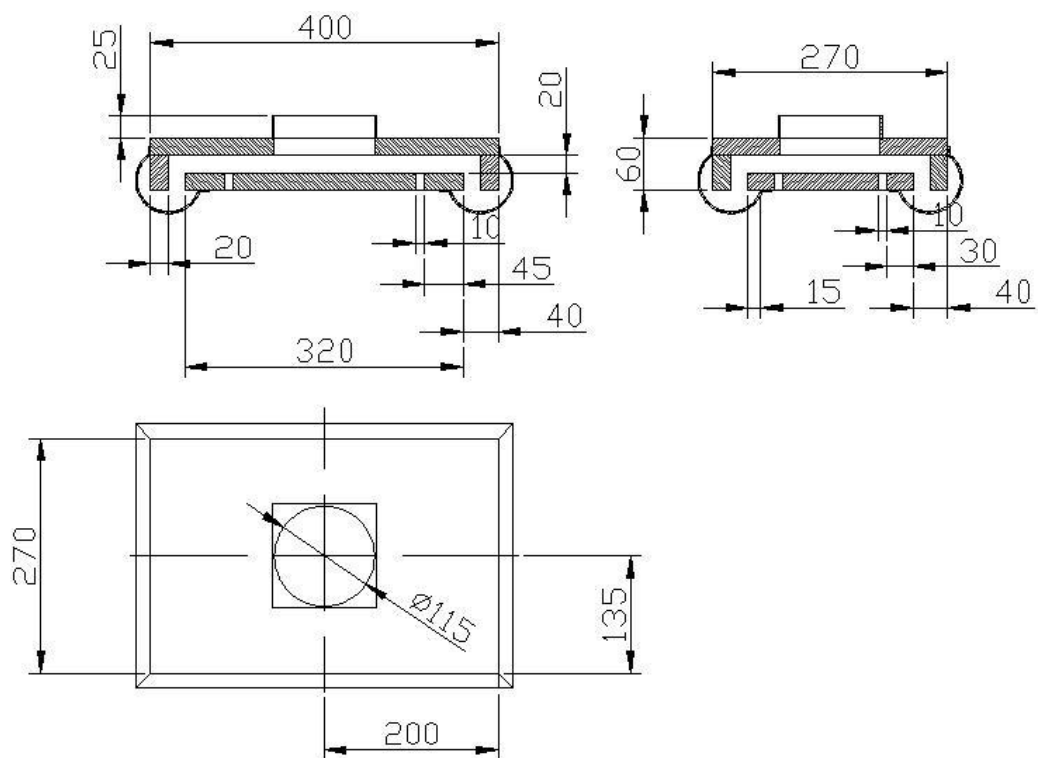
3.6 pav. Pripūsta oro pagalvė: a) iš šono, b) iš priekio

Išbandžius TPAOP modelį buvo pastebėta, kad prisipūtus oro pagalvei, reikia labai nedidelės jėgos išjudinti ją iš padinės padėties. Netgi jeigu yra nedidelė nuokalnė, modelis sklendžia žemyn ja. Labai svarbus yra svorio pasiskirstymas ant modelio korpuso, nes neišcentravus jo efektyvumas suprastėja, ta dalis kurioje būna daugiau svorio nusvyra ir kontaktuoja su atraminiu paviršiumi – dėl to netolygiai juda. Nustatyta, kad judėjimo greitis yra 1 m/s.

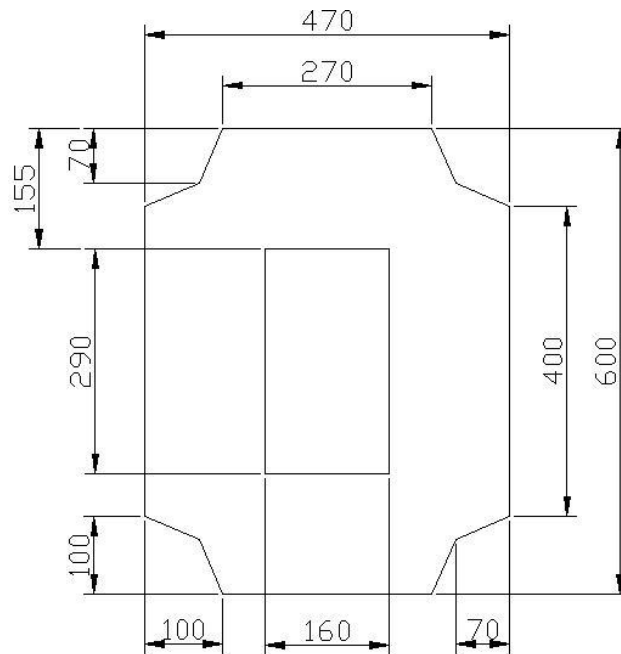


3.7 pav. Vairo padėtys

Paveiksle 3.7 pav. vaizduojamos vairo padėtys a) dalyje vairo (elektros variklis su propeleriu) pasuktas 60° kampu į dešinę pusę, tačiau TPAOP modelio judėjimo kryptis tampa priešinga – jis juda į kairę. Jeigu norima, kad modelis judėtų į dešinę, reikia vairo padėtį nustatyti priešingai (3.7 pav. c). Išibėgėjus TPAOP modeliui, tampa sunkiau daryti posūkius, reikia didesnio spindulio posūkiams įveikti.



3.8 pav. TPAOP modelio matmenys

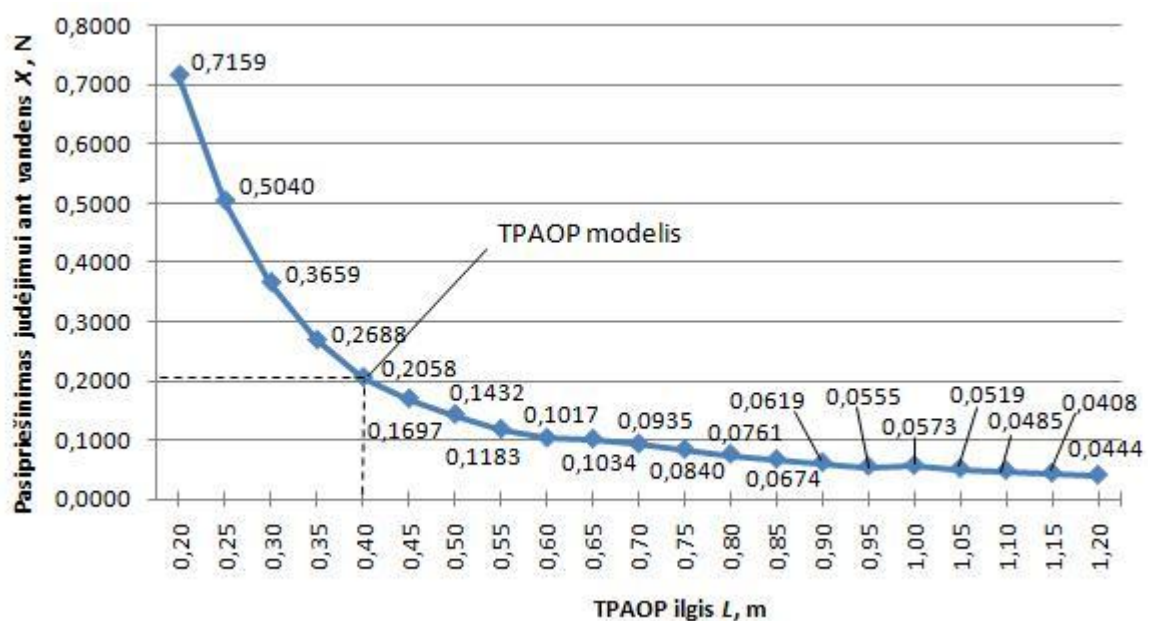


3.9 pav. PVC plėvelės matmenys naudojamos modelio gamybai

Pasirinkta oro pagalvės modelio sijono 3.9 pav. gamybai PVC (polivinilchloridas) plėvelė, kadangi ji yra lengva (tankis $1,37 \text{ g/cm}^3$), tvirta, atspari klimato temperatūros kaitai. Lengva ją apdirbti reikiamai TPAOP modelio sijono formai.

3.3 Modelio teorinės charakteristikos

Atlikti teoriniai palyginimai, keičiant vienus parametrus (modelio ilgį L , masę m), kaip keičiasi pasipriešinimas judėjimui ant vandens X_b , bei oro kiekis Q praeinantis pro modelį ir jo greitis v_o ir kokia įtaką jų kitimui turi.



3.10 pav. Pasipriešinimo judėjimui ant vandens X_b priklausomybė nuo TPAOP ilgio L

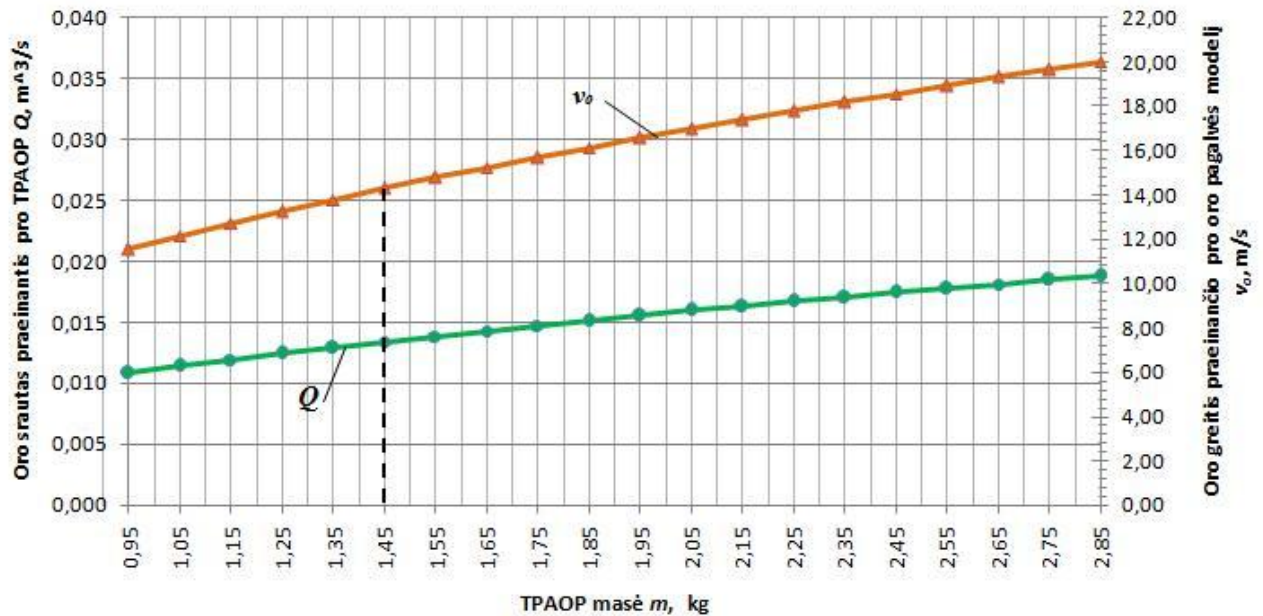
Grafike 3.10 pav. vaizduojama pasipriešinimo judėjimo ant vandens X_b priklausomybė nuo TPAOP ilgio L , kada lieka pastovus TPAOP modelio parametrai (greitis $v = 2,78$ m/s, plotis $B = 0,27$ m), o kinta tik ilgis L . Matoma, kad kuo trumpesnis modelis, tuo jį veikia didesnis pasipriešinimas, tuomet reikia didesnės galios variklio šiam pasipriešinimui nugalėti. Norint sumažinti šį pasipriešinimą reikia ilginti transporto priemonę. Grafike 3.10 pav. atidėta ties ilgiu $L = 0,40$, suprojektuoto TPAOP modelio suskaičiuotas teorinis pasipriešinimas judėjimui ant vandens $X_b = 0,2058$ N. Kintantis dydis L ir nuo jo pasikeičiantis dydžiai surašyti 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Pasipriešinimo bangavimui X_b priklausomybė nuo TPAOP ilgio L

L , m	L/B	Fr	E	X , N
0,20	0,74	1,98	2	0,7159
0,25	0,93	1,78	2,2	0,5040
0,30	1,11	1,62	2,3	0,3659
0,35	1,3	1,5	2,3	0,2688
0,40	1,48	1,4	2,3	0,2058
0,45	1,67	1,32	2,4	0,1697
0,50	1,85	1,26	2,5	0,1432
0,55	2,04	1,2	2,5	0,1183
0,60	2,22	1,15	2,6	0,1034
0,65	2,41	1,1	3	0,1017
0,70	2,59	1,06	3,2	0,0935
0,75	2,78	1,02	3,3	0,0840
0,80	2,96	0,99	3,4	0,0761
0,85	3,15	0,96	3,4	0,0674
0,90	3,33	0,94	3,5	0,0619
0,95	3,52	0,91	3,5	0,0555
1,00	3,7	0,89	4	0,0573
1,05	3,89	0,87	4	0,0519
1,10	4,07	0,85	4,1	0,0485
1,15	4,26	0,83	4,1	0,0444
1,20	4,44	0,81	4,1	0,0408

Grafike 3.11 pav. vaizduojama oro kiekio Q praeinančio pro modelį ir jo greičio v_0 priklausomybė nuo masės m . Suprojektuoto modelio masė yra 0,950 kg, o suskaičiuotas teorinis

praeinantis oro srauto kiekis yra $Q = 0,011 \text{ m}^3/\text{s}$ bei jo greitis $v_o = 11,57 \text{ m/s}$. Pridedant svorio kas $0,1 \text{ kg}$ matoma kaip didėja oro kiekis reikalingas išlaikyti oro pagalvės modelį eksploataciniame režime. Punktyrine juoda linija pažymėta ties $1,45 \text{ kg}$ TPAOP modelio riba, ties kuria jis pakrautas dar sklendžia virš atraminio paviršiaus nedideliu atstumu. Išbandyta buvo su įkrauta modelio bateriją ir ventiliatoriui sukantis maksimaliomis apsukomis.



3.11 pav. Oro kiekio praeinančio pro modelį ir jo greičio priklausomybė nuo masės

Kintantis dydis m ir nuo jo pasikeičiantis dydžiai surašyti 3.3 lentelėje.

3.3 lentelė. Oro kiekio praeinančio pro modelį ir jo greičio priklausomybė nuo masės

$m, \text{ kg}$	$p_{o,p}, \text{ Pa}$	$v_o, \text{ m/s}$	$Q, \text{ m}^3/\text{s}$
0,95	86,29	11,57	0,011
1,05	95,38	12,16	0,011
1,15	104,46	12,73	0,012
1,25	113,54	13,27	0,012
1,35	122,63	13,79	0,013
1,45	131,71	14,29	0,013
1,55	140,79	14,77	0,014
1,65	149,88	15,24	0,014
1,75	158,96	15,70	0,015
1,85	168,04	16,14	0,015

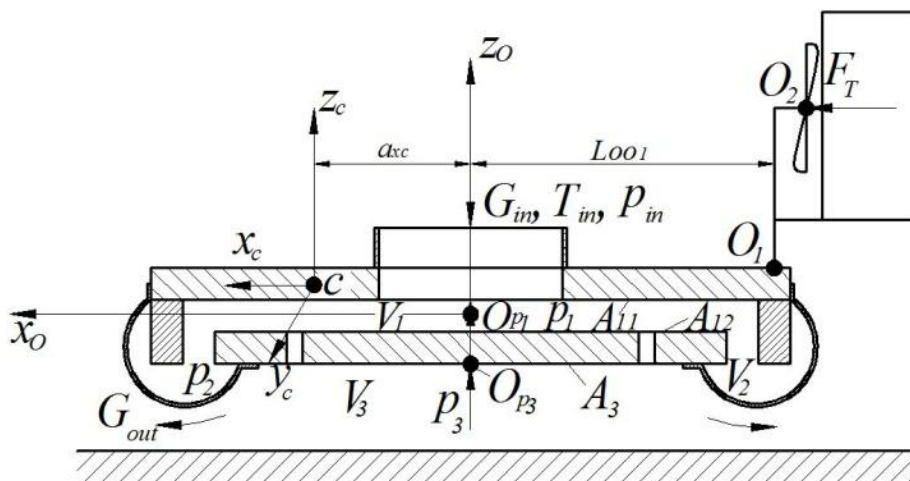
3.3 lentelė. tęsinys

1,95	177,13	16,57	0,016
2,05	186,21	16,99	0,016
2,15	195,29	17,40	0,016
2,25	204,38	17,80	0,017
2,35	213,46	18,19	0,017
2,45	222,54	18,57	0,017
2,55	231,63	18,95	0,018
2,65	240,71	19,32	0,018
2,75	249,79	19,68	0,018
2,85	258,88	20,03	0,019

4. TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS MATEMATINIS MODELIS

4.1. Transporto ant oro pagalvės judėjimo lygčių sistema

Nagrinėjant TPAOP judėjimą, įvesta bendroji koordinatinių sistema OXYZ, kurios atžvilgiu stebimas kūno masių centro koordinatinių ir kūno pasukimo kampų, kitimas. TPAOP veikiančios jėgos nurodytos 4.1 ir 4.2 paveiksluose.



4.1 pav. TPAOP skaičiuojamoji schema 1

Jėgos ir atstumai pažymėti 4.1 ir 4.2 pav.: F_T – traukos jėga; β – vairo pasukimo kampas; φ – TPAOP pasisukimo kampas; F_{aerox} – oro pasipriešinimo jėga; p_1 – slėgis TPAOP korpusė; p_2 – slėgis oro pagalvėje; p_3 – slėgis po TPAOP; A_{11} – slėgio p_1 veikiančio korpuso vidinį viršutinę dalį plotas; A_{12} – slėgio p_1 veikiančio korpuso vidinę apatinę dalį plotas; A_3 – slėgio p_3 veikiančio apatinę TPAOP dalį plotas; p_{in} – įeinantis slėgis; c – masių centas; G_{in} – įeinantis oro srauto kiekis; G_{out} – išeinančio oro srauto kiekis; a_{xc} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O ašimi x iki masių centro; L_{OO1} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O iki vairo sukimosi centro O_1 , O_1 – vairo sukimosi centras; O_2 – taškas, kuriame pridėta jėga F_T ; O_{p4} – slėgio p_3 veikimo vieta, a_{yc} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O ašimi y iki masių centro c ; a_i – atstumai ašimi y ; b_i – atstumai ašimi x ; F_{trix} – trinties jėgos veikimas taškuose i ($i = 1-4$) ašies x kryptimi; F_{triy} – trinties jėgos veikimas taškuose i ($i = 1-4$) ašies y kryptimi; V_1 – vidinio korpuso tūris, m^3 ; V_2 – oro pagalvės tūris, m^3 ; V_3 – tūris po TPAOP susidarantis pakilus jai nuo atraminio paviršiaus, m^3 .

Judėjimo lygtys TPAOP sudarytos remiantis (Bogdevičius 2012).

TPAOP judėjimo lygtys:

$$m\ddot{x}_c = F_T \cos \beta \cos \varphi - F_T \sin \beta \sin \varphi - F_{aerox}; \quad (4.1)$$

$$m\ddot{y}_c = F_T \cos \beta \sin \varphi + F_T \sin \beta \cos \varphi - F_{aeroy}; \quad (4.2)$$

$$m\ddot{z}_c = -mg + p_3 A_3 + p_1 A_{11} - p_1 A_{12} + F_{z_1} + F_{z_2} + F_{z_3} + F_{z_4}; \quad (4.3)$$

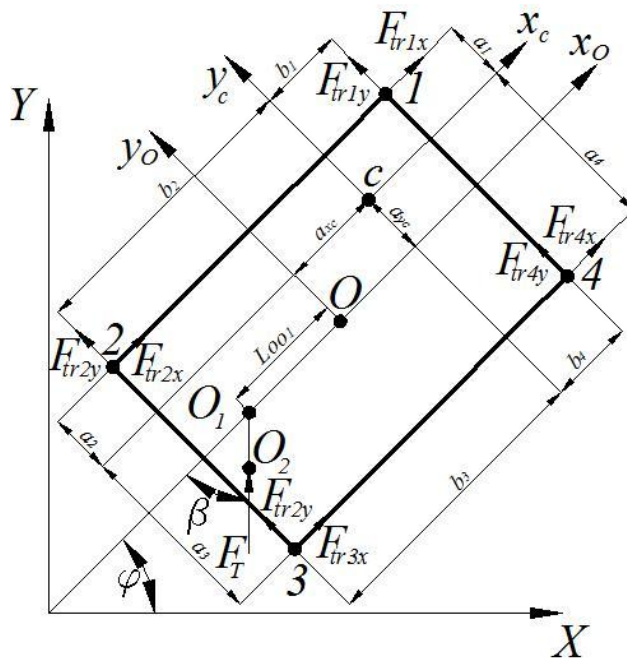
čia: m – TPAOP masė;

g – laisvo kritimo pagreitis.

$$I_{x_c} \ddot{\psi}_1 = M_{cx} + F_{z_1} a_1 + F_{z_2} a_2 - F_{z_3} a_3 - F_{z_4} a_4 - F_{z_3} a_{y_c} + \sum M_{xtri}; \quad (4.4)$$

$$I_{y_c} \ddot{\psi}_2 = M_{cy} - b_1 F_{z_1} - b_4 F_{z_4} + b_2 F_{z_2} + b_3 F_{z_3} + F_{p_3} a_{x_c} + \sum M_{ytri}; \quad (4.5)$$

$$I_{z_c} \ddot{\psi}_3 = M_{c_z} + \sum M_{ztri}. \quad (4.6)$$



4.2 pav. TPAOP skaičiuojamoji schema 2

Momentas apie masių centrą:

$$\{M_c\} = \begin{Bmatrix} -r_{O_z} F_T \sin \beta \\ r_{O_z} F_T \cos \beta \\ -r_{O_y} F_T \cos \beta + r_{O_x} F_T \sin \beta \end{Bmatrix}; \quad (4.7)$$

Momentas apie i – asias F_{tri} trinties jėgas:

$$\{M_{tri}\} = [\tilde{r}_{c_i}] \{f_{tri}\}; \quad (4.8)$$

$$\{r_{c_i}\}^T = [a_i, a_i, c_i]; \quad (4.9)$$

Momentas apie jėgą F_{tr1} :

$$\{M_{tr1}\} = \begin{bmatrix} 0 & -c & a_1 \\ c_1 & 0 & -b_1 \\ -a_1 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{tr1x} \\ f_{tr1y} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -c_1 f_{tr1y} \\ c_1 f_{tr1x} \\ -a_1 f_{tr1x} + b_1 f_{tr1y} \end{Bmatrix}. \quad (4.10)$$

Momentas apie jėgą F_{tr2} :

$$\{M_{tr2}\} = [\tilde{r}_{c_2}] \{f_{tr2}\}; \quad (4.11)$$

$$\{r_{c_2}\}^T = [-b_1, a_2, c_2]; \quad (4.12)$$

$$\{M_{tr2}\} = \begin{bmatrix} 0 & -c_2 & a_2 \\ c_1 & 0 & b_2 \\ -a_2 & -b_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{tr2x} \\ f_{tr2y} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -c_2 f_{tr2y} \\ c_2 f_{tr2x} \\ -a_2 f_{tr2x} - b_2 f_{tr2y} \end{Bmatrix}. \quad (4.13)$$

Momentas apie jėgą F_{tr3} :

$$\{M_{tr3}\} = [\tilde{r}_{c_3}] \{f_{tr3}\}; \quad (4.14)$$

$$\{r_{c_3}\}^T = [-b_3, -a_3, c_3]; \quad (4.15)$$

$$\{M_{tr3}\} = \begin{bmatrix} 0 & -c_3 & -a_3 \\ c_3 & 0 & b_3 \\ -a_3 & -b_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{tr3x} \\ f_{tr3y} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -c_3 f_{tr3y} \\ c_3 f_{tr3x} \\ a_3 f_{tr3x} - b_3 f_{tr3y} \end{Bmatrix}. \quad (4.16)$$

Momentas apie jėgą F_{tr4} :

$$\{M_{tr4}\} = [\tilde{r}_{c_4}] \{f_{tr4}\}; \quad (4.17)$$

$$\{r_{c_4}\}^T = [b_4, -a_4, c_4]; \quad (4.18)$$

$$\{M_{tr4}\} = \begin{bmatrix} 0 & -c_4 & -a_4 \\ c_4 & 0 & -b_4 \\ a_4 & b_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{tr4x} \\ f_{tr4y} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -c_4 f_{tr4y} \\ c_4 f_{tr4x} \\ a_4 f_{tr4x} + b_4 f_{tr4y} \end{Bmatrix}; \quad (4.19)$$

Slėgių kitimo lygtys sudarytos remiantis (Bogdevičius, Prentkovskis 2003).

Slėgio p_1 kitimas TPAOP modelio korpuse:

$$\dot{p}_1 = \frac{\gamma RT}{V_1} \left[G_{in} \text{sign}(p_{in} - p_1) - \right. \\ \left. - G_{13} \text{sign}(p_1 - p_3) \right]; \quad (4.20)$$

čia: $V_1 = \text{const.}$;

γ - dujų adiabatės rodiklis;

R – dujų konstanta;

T – absoliutinė temperatūra.

Slėgio p_2 kitimas oro pagalvėje:

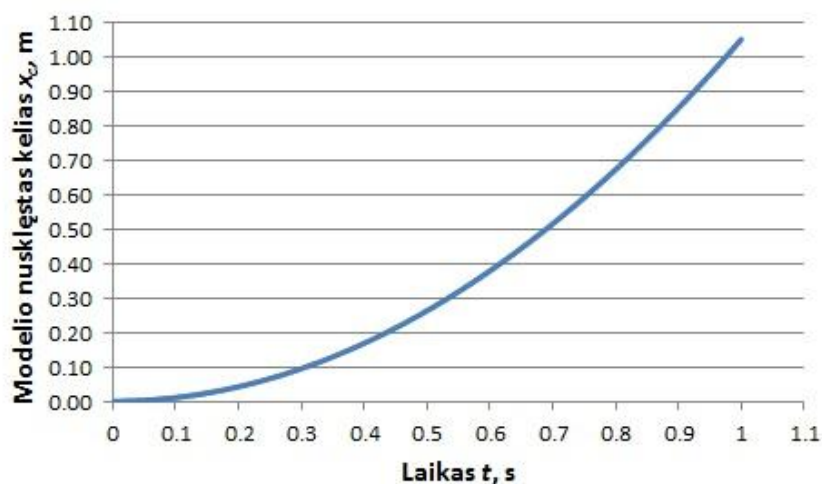
$$\dot{p}_2 = \frac{\gamma RT}{V_2} \left[G_{12} \text{sign}(p_1 - p_2) \right] - \frac{\gamma p_2}{V_2} \dot{V}_2; \quad (4.21)$$

Slėgio p_3 kitimas po TPAOP modeliui:

$$\dot{p}_3 = \frac{\gamma RT}{V_3} \left[G_{1,3} \text{sign}(p_1 - p_3) - \right. \\ \left. - G_{out} \text{sign}(p_3 - p_{\infty}) \right] - \frac{\gamma p_3}{V_3} \dot{V}_3. \quad (4.22)$$

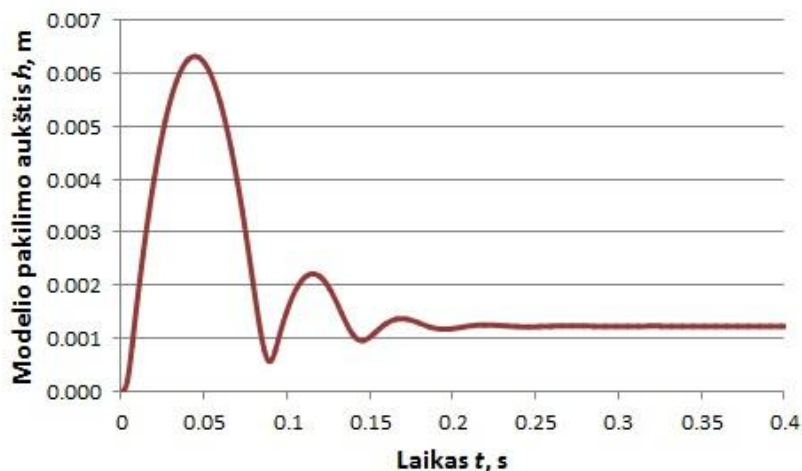
4.2 Transporto priemonės ant oro pagalvės matematinio modelio rezultatų analizė

Gauti rezultatai, kai matematinio modelio parametrai yra tokie patys kaip realaus sukonstruoto TPAOP modelio. Modelio masė $m = 0,950$ kg, ilgis $L = 0,4$ m, plotis $B = 0,27$ m, vairo pasukimo kampas $\beta = 0^\circ$, plotas $A_{11} = 0,0736$ m², $A_{12} = 0,0608$ m², $V_1 = 1,656 \cdot 10^{-3}$ m³, $V_2 = 2,381 \cdot 10^{-3}$ m³, $V_3 = 0,828 \cdot 10^{-3}$ m³, traukos jėga $F_T = 2$ N, debitas $G_{in} = 0,023$ m³/s. Užsiduota, kad atraminis paviršius yra lygus.



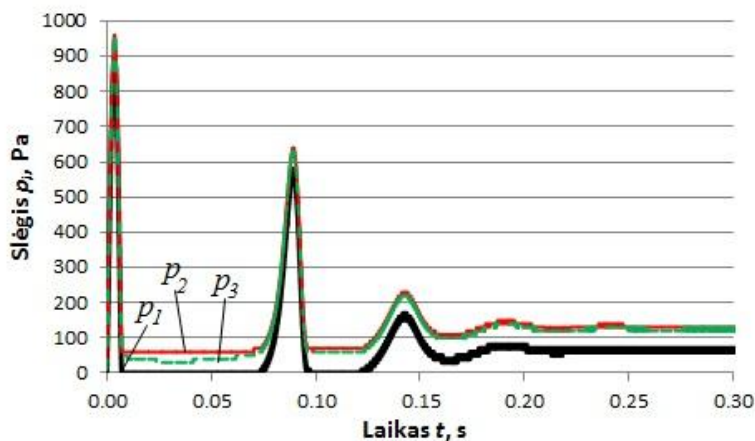
4.3 pav. Nusklęsto kelio x_c priklausomybė nuo laiko t

Iš gauto nusklęsto kelio x_c priklausomybės nuo laiko t grafiko (4.3 pav.) matyti, kad apskaičiuotas tiriamos transporto priemonės judėjimo greitis yra tolygus ir jis juda 1 m/s greičiu. Šis greitis yra artimas eksperimentinių tyrimų metu nustatytam TPAOP modelio judėjimo greičiui.



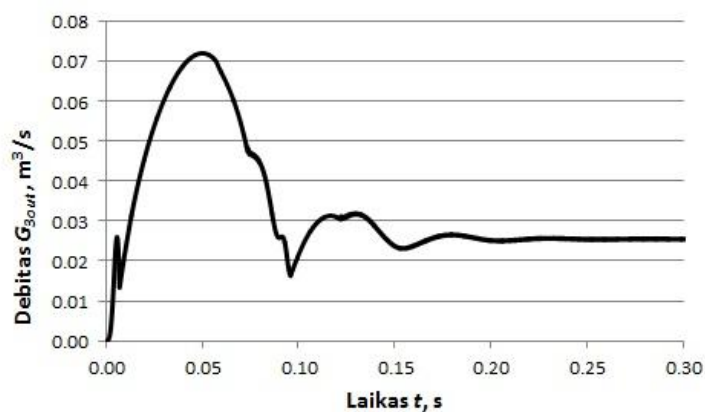
4.4 pav. Modelio pakilimo aukščio h priklausomybė nuo laiko t

Modelio pakilimo aukštis h (4.4 pav.) labai svyruoja pradžioje – didžiausias pikas pasiekiamas ties 0,05 s, kadangi susidaręs slėgis oro pagalvėje staigiai ją iškelia. Ties 0,2 s pakilimo aukštis nusistovi ir yra $h = 1,21 \cdot 10^{-3}$ m.



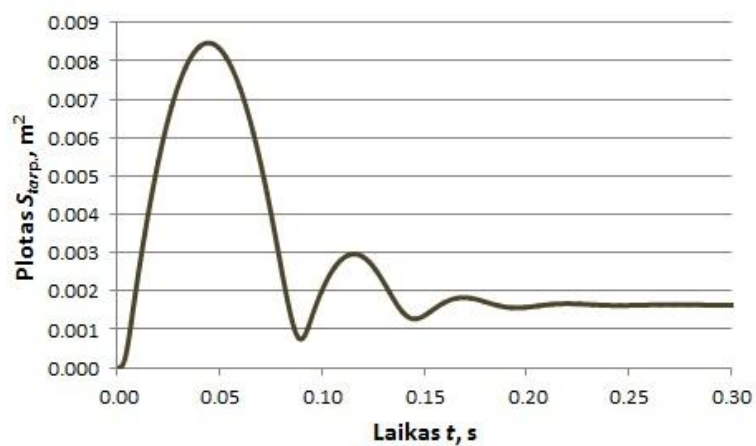
4.5 pav. Slėgių p_i priklausomybė nuo laiko t

Slėgiai: p_1 TPAOP korpuse, p_2 oro pagalvėje ir p_3 po TPAOP tai pat labiausiai svyruoja pradinio laiko momentu (4.5 pav.). Žemiausias slėgis p_1 yra TPAOP korpuse, kadangi jis nuteka į oro pagalvę ir po modeliu. Aukščiausią ribą pradinio laiko momentu pasiekia slėgis p_2 , nes jam nėra kur išeiti. Jis kaupiasi oro pagalvėje kol ji prisipučia. Tačiau jau nuo 0,2 s slėgiai nusistovi $p_1 = 70$ Pa, $p_2 = 130$ Pa, $p_3 = 130$ Pa.



4.6 pav. Debito G_{3out} priklausomybė nuo laiko t

Oro srauto debitas G_{3out} didžiausias pradiniu laiko momentu (4.6 pav.), kada didžiausias modelio pakilimo aukštis perimetro plotas $S_{tarp.}$ (4.7 pav.). Mažėjant perimetro plotui $S_{tarp.}$, mažėja debitas G_{3out} ties 0,05 s iki 0,09 s, todėl pradeda didėti slėgiai p_1 , p_2 ir p_3 , (4.3 pav.), nes susikaupusiam oro srautui sunkiau ištekėti pro mažą tarpelį.



4.7 pav. Pakilimo aukščio perimetro ploto $S_{tarp.}$ priklausomybė nuo laiko t

5. TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

5.1. Reikalingos traukos jėgos išjudinti transporto priemonės ant oro pagalvės nustatymas

Tyrimo objekto savybėms įtakos turintys veiksniai

TPAOP eksperimento rezultatai priklauso nuo to, kokioje temperatūroje atliekamas bandymas, nes skirtingose temperatūrose yra skirtingas oro tankis ar veikia aplinkos veiksniai (krituliai, vėjas). Kokia transporto priemonės forma, su kuria atliekamas eksperimentas, jos gabaritiniai matmenys, svoris, iš kokių medžiagų ji yra pagaminta. Su kokiais matavimo prietaisais bus renkami duomenys. Kokiais momentais bus renkami duomenys, kokiam oro srautui esant. Kiek yra įkrauta baterija.

Svarbiausi faktoriai, kurių įtaka tiriama

Tiriama keičiant atraminį paviršių (5.1 lentelė) ir ventiliatoriaus apsisukimus, traukos jėga F_{trin} , reikalingos išjudinti TPAOP iš pradinės padėties.

5.1 lentelė. Paviršiai

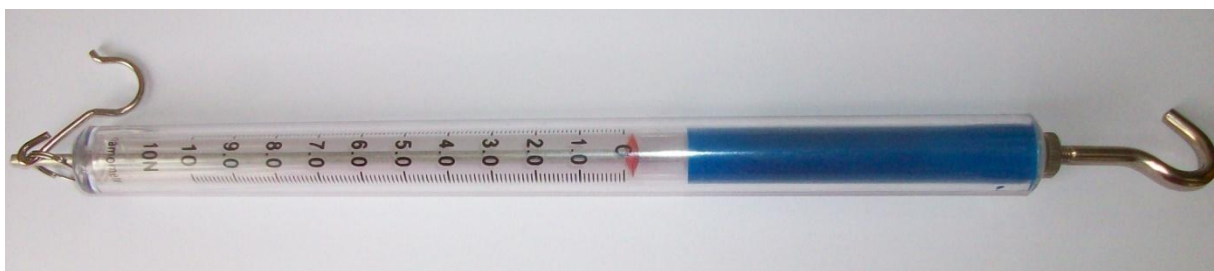
Paviršius		Paviršių parametrai
Betonas		Nevertinamas dangos šiurkštumas.
Smėlis		Nevertinamas dangos šiurkštumas.
Asfaltbetonis		Nevertinamas dangos šiurkštumas.
Žvyras		Nevertinamas dangos šiurkštumas. Frakcija 32 mm
Skalda		Nevertinamas dangos šiurkštumas. Frakcija 5–8 mm

Faktorių nustatymo būdai

Traukos jėga $F_{trin.}$ nustatoma naudojant dinamometrą, ventiliatoriaus apsisukimai n bekontakčiu tachometru.

Matavimo priemonės

Traukos jėga $F_{trin.}$ reikalinga išjudinti TPAOP iš pradinės padėties, matuojama dinamometru (5.1 pav.), kuris prikabinamas prie TPAOP modelio, kurio matavimo ribos 0–10 N, padalos vertė 0,1N.



5.1 pav. Dinamometras

Ventiliatoriaus apsisukimai n matuojami bekontakčiu tachometru „Photo Tach“ (5.2 pav.), kurio matavimo ribos 5–100 000 aps/min, matavimo atstumas 0,05–0,92 m.



5.2 pav. Bekontaktis tachometras

Tyrimo algoritmas

Eksperimentas atliekamas nevėjuotą ir be kritulių dieną lauke, nes šie aplinkos veiksniai turi didelę įtaką rezultatams. Oro temperatūra 20°C. Prieš eksperimentą prietaisai ir bandymo modelis nuvalomi, patikrinami, ar jie veikia, bei paruošiamas matavimo protokolas (5.2 lentelė).

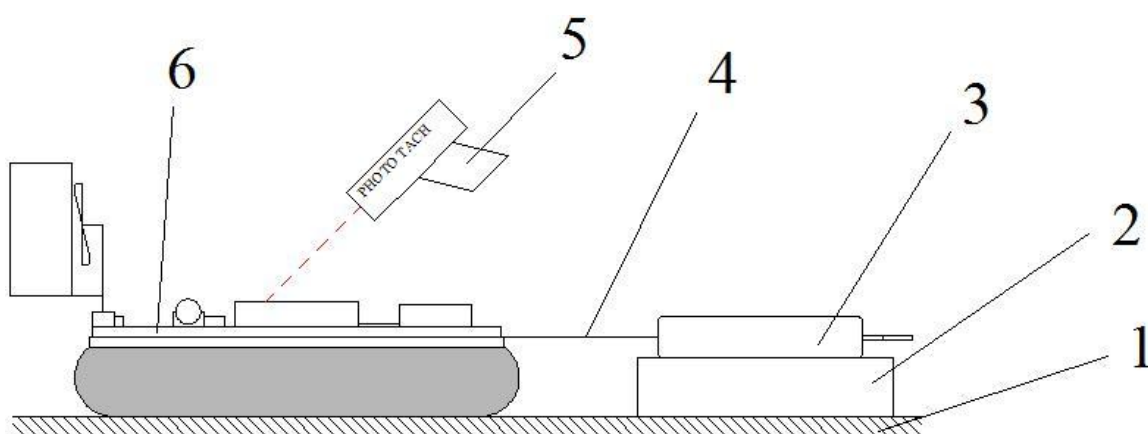
Sujungiami prietaisai pagal 5.3 pav. ir 5.4 pav. prietaisų jungimo schemas: išlyginamas atraminis paviršius 1, jeigu jis yra birus (smėlis, žvyras, skalda), nes nėra vertinamas paviršių nelygumas, pasižymima pradinė padėtis 8 ant atraminio paviršiaus ir pastatomas TPAOP modelis 6 ties ja. Taip pat priešais modelį 6 pastatoma dinamometro atrama 2, o ant jos padedamas 150 mm atstumu dinamometras 3. TPAOP modelis 6 sujungiamas valu 4 su dinamometru 3. Įjungiamas bekontaktis tachometras 5.

Atliekami trys bandymai, kurių kiekvieno metu matuojama traukos jėga $F_{trin.}$, kuri reikalinga nugalėti trinčiai ant atraminio paviršiaus, esant skirtingiems ventiliatoriaus 7 apsisukimams (0, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500 aps/min).

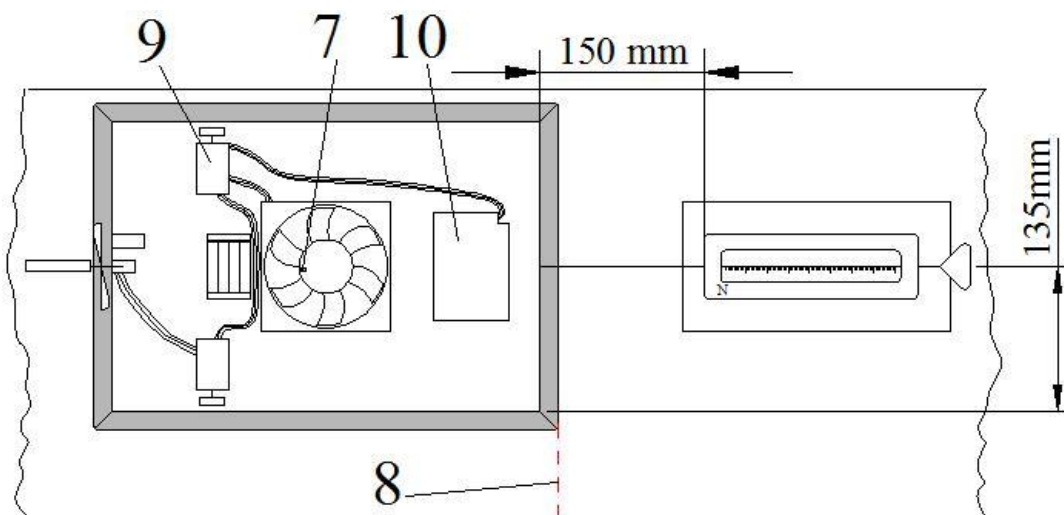
Matavimų protokolai

5.2 lentelė. Matavimų protokolai

Paviršius	n , aps/min	Nr.1 $F_{trin.}$, N	Nr.2 $F_{trin.}$, N	Nr.3 $F_{trin.}$, N	$\bar{F}_{trin.}$, N



5.3 pav. Prietaisų jungimo schema 1: 1 – atraminis paviršius; 2 – dinamometro atrama; 3 – dinamometras; 4 – valas; 5 – bekontaktis tachometras; 6 – TPAOP modelis



5.4 pav. Prietaisų jungimo schema 2: 7 – ventiliatorius; 8 – riba nuo kurios atliekami matavimai; 9 – reostatas; 10 – baterija

Tyrimo atlikimas

1. Patikrinama, ar visi prietaisai sujungti pagal nurodytas jungimo schemas (5.2 pav. ir 5.3 pav.).
2. Į matavimų protokolą (5.2 lentelė) užrašomas atraminio paviršiaus pavadinimas ant kurio atliekamas eksperimentas.
3. Įjungiamas bekontaktis tachometras 5.
4. Pirmasis bandymas pradedamas, kada TPAOP modelis yra išjungtas, ventiliatoriaus 7 apsisukimai yra 0 aps/min.
5. Traukiamas dinamometras 3 tol, kol modelis pradeda judėti.
6. Dinamometro duomenys užrašomi matavimų protokole į 5.2 lentelę.
7. TPAOP modelis pastatomas į pradinę padėtį ties 8 riba.
8. Įjungiamas TPAOP modelis, nutaikomas tachometras 5 į modelio ventiliatorių 7, su reostatu 9 nustatomi 2000 aps/min ventiliatoriaus sūkliai.
9. Traukiamas dinamometras 3 tol kol modelis pradeda judėti.
10. Dinamometro duomenys užrašomi matavimų protokole į 5.2 lentelę, TPAOP modelis išjungiamas.
11. TPAOP modelis pastatomas į pradinę padėtį ties 8 riba.
12. Įjungiamas TPAOP modelis, nutaikomas tachometras 5 į modelio ventiliatorių, su reostatu 9 nustatomi 2500 aps/min ventiliatoriaus sūkliai.
13. Traukiamas dinamometras 3 tol, kol modelis pradeda judėti.
14. Dinamometro duomenys užrašomi matavimų protokole į 5.2 lentelę, TPAOP modelis išjungiamas.

15. Toliau kartojami 11, 12, 13 ir 14 punktai, didinant ventiliatoriaus apsisukimus kas 500 aps/min iki 4500 aps/min imtinai.
16. Atlikus pirmąjį bandymą, baterija 10 atjungiamą nuo TPAOP modelio 6 ir įkraunama.
17. Atliekamas antrasis bandymas, bandymo seka nuo 3 iki 16 punkto imtinai.
18. Atliekamas trečiasis bandymas, bandymo seka nuo 3 iki 16 punkto imtinai.
19. Atlikus bandymą prietaisai atjungiami ir išvalomi.
20. Atlikus bandymus apskaičiuojami gautų rezultatų vidurkiai, pagal formulę 5.1 dviejų skaičių po kablelio tikslumu.

$$\bar{F}_{trin.i} = \frac{F_{trin1.i} + F_{trin2.i} + F_{trin3.i}}{3}; \quad (5.1)$$

čia: $F_{trin1.i}$ – pirmojo bandymo i – asis rezultatas, N;

$F_{trin2.i}$ – antrojo bandymo i – asis rezultatas, N;

$F_{trin3.i}$ – trečiojo bandymo i – asis rezultatas, N;

21. Apskaičiavus $\bar{F}_{trin.i}$ nubraižomas grafikas jėgos, reikalingos trinčiai nugalėti ant atraminio paviršiaus.

5.2. Reikalingos traukos jėgos išjudinti transporto priemonę ant oro pagalvės rezultatų analizė

Gauti rezultatai, kai realaus TPAOP modelio parametrai yra tokie: modelio masė $m = 0,950$ kg, ilgis $L = 0,4$ m, plotis $B = 0,27$ m, plotas $A_{11} = 0,0736$ m², $A_{12} = 0,0608$ m², $V_1 = 1,656 \cdot 10^{-3}$ m³, $V_2 = 2,381 \cdot 10^{-3}$ m³, $V_3 = 0,828 \cdot 10^{-3}$ m³, debitas $G_{in} = 0,023$ m³/s esant maksimaliems ventiliatoriaus apsisukimams 4500 aps/min. Atraminiai paviršiai (betonas, smėlis, asfaltbetonis, žvyras, skalda) yra lygūs. Rezultatai pateikti 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 ir 5.7 lentelėse.

5.3 lentelė. Matavimų rezultatai ant betono paviršiaus

Paviršius	n , aps/min	Nr.1 $F_{trin.}$, N	Nr.2 $F_{trin.}$, N	Nr.3 $F_{trin.}$, N	$\bar{F}_{trin.}$, N
Betonas	0	3,3	3,5	3,7	3,50
	2000	1,9	2,2	2,3	2,13
	2500	1,5	1,5	1,6	1,53
	3000	0,2	0,3	0,3	0,27
	3500	0,2	0,2	0,1	0,17
	4000	0,1	0,1	0,1	0,10
	4500	0,1	0,1	0,1	0,10

5.4 lentelė. Matavimų rezultatai ant smėlio paviršiaus

Paviršius	n , aps/min	Nr.1 $F_{trin.}$, N	Nr.2 $F_{trin.}$, N	Nr.3 $F_{trin.}$, N	$\bar{F}_{trin.}$, N
Smėlis	0	5,4	5,3	5,3	5,33
	2000	4,5	4,3	4,3	4,37
	2500	3,8	3,5	3,7	3,67
	3000	1,5	1,4	1,6	1,50
	3500	0,8	0,9	0,8	0,83
	4000	0,5	0,4	0,4	0,43
	4500	0,3	0,3	0,3	0,30

5.5 lentelė. Matavimų rezultatai ant asfaltbetonio paviršiaus

Paviršius	n , aps/min	Nr.1 $F_{trin.}$, N	Nr.2 $F_{trin.}$, N	Nr.3 $F_{trin.}$, N	$\bar{F}_{trin.}$, N
Asfaltbetonis	0	4,3	4,4	4,3	4,33
	2000	3,8	3,9	4,0	3,90
	2500	2,8	3,0	2,9	2,90
	3000	1,5	1,6	1,5	1,53
	3500	0,4	0,5	0,5	0,47
	4000	0,2	0,2	0,3	0,23
	4500	0,1	0,1	0,2	0,13

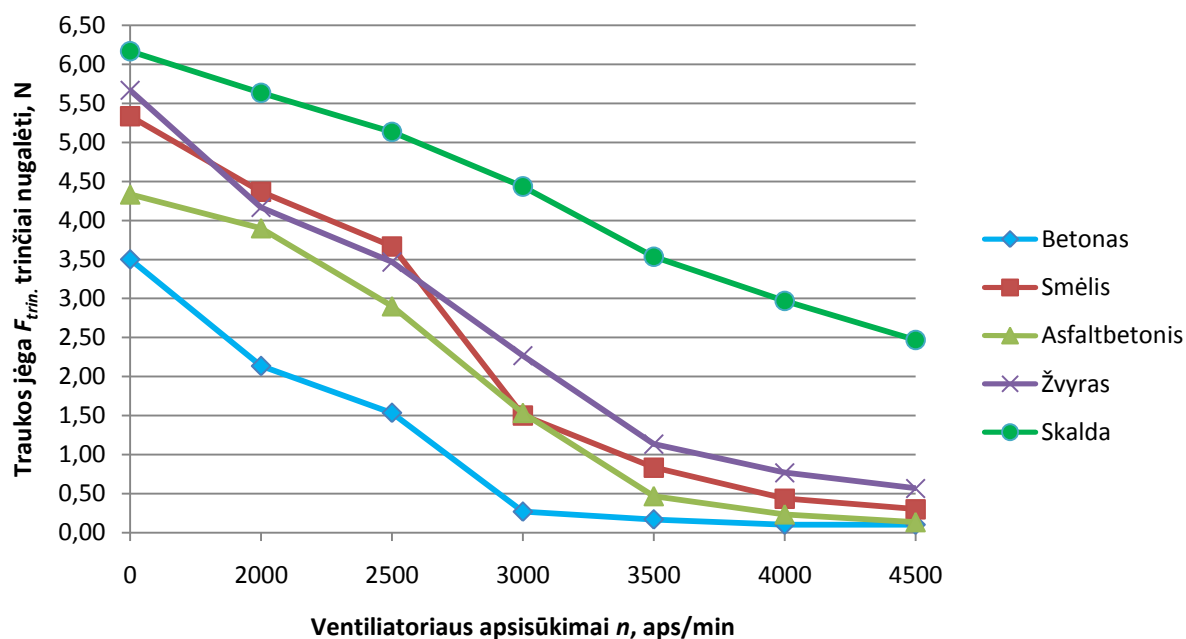
5.6 lentelė. Matavimų rezultatai ant žvyro paviršiaus

Paviršius	n , aps/min	Nr.1 $F_{trin.}$, N	Nr.2 $F_{trin.}$, N	Nr.3 $F_{trin.}$, N	$\bar{F}_{trin.}$, N
Žvyras	0	5,5	5,7	5,8	5,67
	2000	4,2	4	4,3	4,17
	2500	3,5	3,3	3,6	3,47
	3000	2,2	2,3	2,3	2,27
	3500	1,1	1	1,3	1,13
	4000	0,8	0,7	0,8	0,77
	4500	0,6	0,6	0,5	0,57

5.7 lentelė. Matavimų rezultatai ant skaldos paviršiaus

Paviršius	n , aps/min	Nr.1 $F_{trin.}$, N	Nr.2 $F_{trin.}$, N	Nr.3 - $F_{trin.}$, N	$\bar{F}_{trin.}$, N
Skalda	0	6,2	6	6,3	6,17
	2000	5,7	5,6	5,6	5,63
	2500	5,3	5,2	4,9	5,13
	3000	4,6	4,4	4,3	4,43
	3500	3,7	3,4	3,5	3,53
	4000	3,1	3	2,8	2,97
	4500	2,6	2,4	2,4	2,47

Gautos traukos jėgos $\bar{F}_{trin.}$ reikšmės kiekvieno atraminio paviršiaus atidedamos 5.5 pav. grafike.



5.5 pav. Traukos jėgos $F_{trin.}$ reikalingos trinčiai nugalėti ant skirtingų atraminių paviršių grafikas

Iš grafiko 5.5 pav. matoma, kad neprisipūtus oro pagalvei mažiausios traukos jėgos $\bar{F}_{trinB.0} = 3,50$ N reikia ant betono, kadangi šis paviršius labai lygus. Didinant ventiliatoriaus apsisukimus ši traukos jėga mažėja kadangi vis daugiau patenka oro į oro pagalvę. Pasiekus $n = 3000$ aps/min ant betoninio paviršiaus reikalinga traukos jėga trinčiai nugalėti nusistovi ir žymiai nebekinta didinant ventiliatoriaus apsisukimus.

Didesnės traukos jėgos $\bar{F}_{trinA.0} = 4,33$ N išjudinti TPAOP modelį reikia ant asfaltbetonio, kadangi jis yra grublėtas, TPAOP modelis kabinasi už nedidelių dangos išsikišimų. Prisiputinėjant

oro pagalvei jėga tolygiai mažėja. Ventilatoriui pasiekus 3500 aps/min jėga nusistovi ir kinta nežymiai.

Kada oro pagalvė neprisiputęs didžiausia jėga reikalinga trinčiai nugalėti yra ant birių paviršių (smėlio, žvyro, skaldos). Kadangi traukiant TPAOP modelį jis priešais save pradeda stumti atraminį paviršių, jam reikia nugalėti ne tik trinties jėgą, bet ir stumiamo paviršiaus pasipriešinimą. Tačiau ventilatoriui pasiekus $n = 3500$ aps/min traukos $\overline{F}_{trin,i}$ jėga ženkliai sumažėja, ant smėlio $\overline{F}_{trinS,3500} = 0,83$ N, o ant žvyro $\overline{F}_{trinŽ,3500} = 1,13$ N.

Prasčiausius rezultatus TPAOP modelis parodė ant skaldos paviršiaus. Oro pagalvei neprisipūtęs reikalinga traukos jėga trinčiai nugalėti net $\overline{F}_{trinSk,0} = 6,17$ N. Ventilatoriui tiekiant oro srautą į pagalvę traukos jėga $\overline{F}_{trin,i}$ tolygiai mažėja, tačiau jos mažėjimas nėra toks ryškus kaip ant pastarųjų paviršių, dėl didelių oro srauto nuostolių. Kadangi skaldos grudeliai nėra surišti, tarp jų yra oro tarpai, pro kuriuos oro srautas išeinantis iš po TPAOP modelio nuteka neleidamas susidaryti reikiamam slėgiui po TPAOP modeliu.

IŠVADOS

1. Neprisipūtus oro pagalvei, reikalinga jėga išjudinti TPAOP modelį iš stacionarios padėties ant birių paviršių yra didesnė nei ant kietų paviršių. Ant betono paviršiaus maksimali pasipriešinimo jėga yra lygi 3,50 N, asfaltbetonio – 4,33 N, smėlio – 5,33 N, žvyro – 5,67 N, skaldos – 6,17 N.
2. Prisipūtus oro pagalvei esant maksimaliems ventiliatoriaus apsisukimams $n = 4500$ aps/min, ant betono paviršiaus pasipriešinimo jėga sumažėja – 97 %, asfaltbetonio – 97 %, smėlio – 94 %, žvyro – 90 %, skaldos – 60 %. Didžiausi oro nuostoliai nuostoliai yra ant skaldos, nes tarp jos grūdelių yra oro tarpai.
3. TPAOP modeliui, judant paviršiais (betono, asfaltbetonio, smėlio, žvyro), kai ventiliatoriaus sūkliai pasiekia $n = 3500$ aps/min, reikalinga traukos jėga, išjudinti TPAOP modelį iš stacionarios padėties, nusistovi ir kinta nežymiai, todėl galima daryti prielaidą, kad ventiliatoriaus apsisukimai $n = 3500$ aps/min yra racionalūs ir didinti daugiau apsisukimus nenaudinga.
4. Iš matematinio modeliavimo rezultatų nustatyta, kad slėgių p_1, p_2, p_3 , debito G_{3out} , pakilimo aukščio vertės labiausiai svyruoja pereinamojo proceso metu. Pereinamasis procesas trunka 0,20–0,25 s.
5. Iš matematinio modeliavimo rezultatų nustatyta, kad TPAOP judėjimo greitis yra 1 m/s, kas sutampa su atliktais eksperimentiniais tyrimų rezultatais.

LITERATŪRA

- Amiruddin, A.K.; Sapuan, S.M.; Jaafar, A.A. 2011. Development of a hovercraft prototype with an aluminium hull base, *International Journal of the Physical Sciences* 6(17): 4185–4194.
doi: 10.5897/IJPS10.311
- Amiruddin, A.K.; Sapuan, S.M.; Jaafar, A.A. 2008. Analysis of glass fibre reinforced epoxy composite hovercraft hull base, *Journal of Materials & Design* 29(7): 1453–1458.
- Bogdevičius, M. 2012. *Transporto priemonių dinamika*. Vilnius: Technika. 205 p.
- Bogdevičius, M.; Prentkovskis, O. 2003. *Hidraulinių ir pneumatinių sistemų dinamika*. Vilnius: Technika. 261 p.
- Chung, J.; Jung, T. 2004. Optimization of an air cushion bag and finger skirt using genetic algorithms, *Journal of Aerospace Science and Technology* 8(3): 219–229.
- Dong, X.; Zhe, L.; Fan, Y. 2009. The computing of the optimal power consumption for semi – track air – cushion vehicle using hybrid generalized extremal optimization, *Applied Mathematical Modelling* 33(6): 2831–2844.
- Fantoni, I.; Lozano, R.; Mazenc, F.; Pettersen, K.Y. 2000. Stabilization of a nonlinear underactuated hovercraft, *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 10(8): 645–654.
- Hossain, A.; Rahman, A.; Mohiuddin, A.K.M. 2011. Cushion pressure control system for an intelligent air – cushion track vehicle, *Journal of Mechanical Science and Technology* 25(4): 1035–1041. doi: 10.1007/s12206-011-0216-3
- Jun, L.; Guo-liang, H.; Shu-zhi L. 2010. Four Degree of Freedom Course Stability of an Air Cushion Vehicle, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* 15(2): 163–167.
doi: 10.1007/s12204-010-8057-2

- Kubo, S.; Akimoto, H.; Moriwake, T. 2003. First – Aid Transportation by Hovercraft in a Disaster, *Natural Hazards* 29(3): 553–566. doi:10.1023/A:1024761800528
- Rahman, A.; Mohiuddin, A.K.M.; Ismail A.F.; Yahya, A. 2010. Development of hybrid electrical air – cushion tracked vehicle for swamp peat, *Journal of Terramechanics* 47(1): 45–54. doi: 10.1016/j.jterra.2009.06.003
- Thiagarajan, K.; Morris, T. 2005. Wave-induced motion of an air cushion structure in shallow water, *Journal of Ocean Engineering* 33(8): 1143–1160.
- Zhou, J.; Tang, W.; Zhang, S. 2009. Sea Keeping Analysis of Air Cushion Vehicle with Different Wave Angles under the Operation Resistance, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* 14(4): 471 – 475. doi: 10.1007/s12204-009-0471
- Zhou, S.; SHI, X.; SHI, Y.; BIAN, X. 2003. Simulation study of plane motion of air cushion vehicle, *Journal of Marine Science and Application* 2(2): 68–71.
- Козин, В. М.; Погорелова, А. В. 2003. Волновое Сопротивление Амфибийных Судов на Воздушной Подушке при Движении по Ледяному Покрову, *Журнал Прикладная Механика и Техническая Физика* 44(2): 49 – 55.
- Вавилов. И, 2011. Теоретико-экспериментальное исследование летательного аппарата на воздушной подушке. Омск
- Yun, L.; Bliault, A. 2000. *Theory and design of air cushion craft*. London: Arnold. 647p.
- Ежу, Б. 1983. Модели и любительские суда на воздушной подушке. Ленинград: Судостроение. 126р.

PRIEDAS 1

TRANSPORTO PRIEMONĖS ANT ORO PAGALVĖS HIDRODINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS

Petras Umbrasas¹

Magistrantas

Marijonas Bogdevičius²

Habil. dr. profesorius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas,

¹el. p. petras.umbrasas@gmail.com

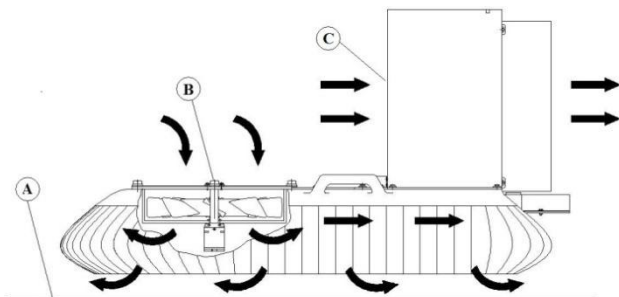
²el. p. marijonas.bogdevicius@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje pateikiama transporto priemonės ant oro pagalvės (TPAOP) veikimo principas, pagrindiniai parametrai, kuriais jos pranašesnės už kitas transporto priemones. Išvardinta, kokiems tikslams ji gali būti panaudojama. Pateikta pagrindinės problemos, susijusios su TPAOP ir jų sprendimo būdai. Aprašytas sukonstruotas TPAOP modelis. Pateiktas TPAOP matematinis modelis ir iš jo gauti rezultatai.

Raktiniai žodžiai: transporto priemonė ant oro pagalvės, dinamikos lygtys, oro srautas, sklendimas, slėgio kitimas.

1. Įvadas

Transporto priemonė ant oro pagalvės (TPAOP) – priemonė, kuri po savimi sukurdamą padidinto slėgio zoną sklendžia pakilusi nedideliu atstumu nuo atraminio paviršiaus. Oro srautas (1 pav.) yra įtraukiamas pro ventiliatoriaus zoną B ir paskirstomas po oro pagalvę. Susidarius, oro pagalvėje, padidinto slėgio zonai, oras pradeda veržtis iš po oro pagalvės, tuo pačiu pakeldamas ją nedideliu atstumu nuo atraminio paviršiaus A. Trauką sukuria ventiliatorius, esantis C zonoje.

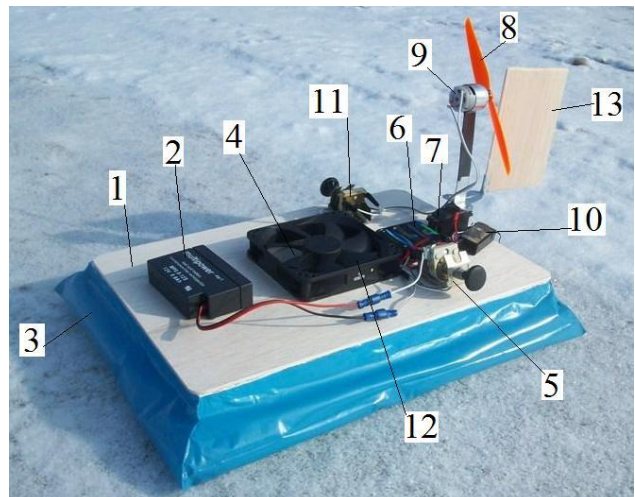


1 pav. TPAOP veikimo schema

TPAOP gali išplaukti iš vandens ant kranto, kurio pakilimo kampas ne didesnis kaip 30° . Žemėje yra daug vietovių, kur negalima naudotis jokia gerai žinoma transporto priemone. TPAOP gali įveikti negilius vandens telkinius, pelkes, ledo laukus, smėlio ir sniego dykumas, ir skirtingai negu lėktuvai ar sraigataspurniai, jie gali sustoti bet kuriame šių vietovių taške.

Tokios transporto priemonės nėra plačiai paplitusios Lietuvoje. Todėl buvo sukonstruotas TPAOP modelis (2

pav.), kurį sudaro: korpusas 1 pagamintas iš putų stirolo, kurio storis 20 mm ir medienos, 12 V akumuliatorius 2 kurio talpa 0,8 Ah, jis maitina elektros variklius 4 ir 9. Variklis 4 yra sujungtas su ventiliatoriumi 12, kurio diametras 12 mm. Variklis 9 sujungtas su propeleriu 8, kurie sumontuoti ant servo variklio 7, kurį maitina baterijos 6. Elektros variklio 4 sukįs reguliuoja reostatas 5, o variklio 9 reguliuoja reostatas 11. Imtuvas 10 sujungtas su servo varikliu 7 ir baterijomis 6. Maišo tipo sijonas 3. Vairas 13.



2 pav. TPAOP modelio sudedamos dalys

Išbandžius TPAOP modelį ant lygaus kieto atraminio paviršiaus buvo pastebėta, kad prisipūtus oro pagalvei, reikia labai nedidelės jėgos 0,31 N išjudinti ją iš padinės padėties. Netgi jeigu yra nedidelė nuokalnė, modelis sklendžia žemyn ją. Tačiau jeigu oro pagalvė nepripūsta

jai išjudinti reikia 2,85 N jėgos. Labai svarbus yra svorio pasiskirstymas ant modelio korpuso, nes neišcentravus jo efektyvumas sumažėja, ta dalis kurioje būna daugiau svorio nusvyra ir kontaktuoja su atraminiu paviršiumi – dėl to netolygiai juda. Maksimalus judėjimo greitis 1 m/s.

Netradicinės transporto priemonės tokios kaip TPAOP, kurioms besikeičiantis atraminis paviršius nesudaro kliūčių jų judėjimui yra naudojamos:

- Gelbėjimo darbams;
- Kelionėms į vandenį iš žemės, kai nėra laivų prieplaukų;
- Karo tikslams;
- Tarp valstybinių sienų ir vidaus saugojimui;
- Apžvalgos darbams;
- Keleivių ir krovinių gabenimui;
- Gyvūnijos apsaugai arba moksliniams tyrimams atlikti kur nėra kelių;
- Pramoginiams tikslams: lenktynėms, kelionėms.

Lietuvoje TPAOP naudoja Lietuvos Valstybės sienos apsaugos tarnybą pasienio apsaugai, tačiau neretai ir gelbėjimo darbams.

TPAOP pranašumas prieš kitas transporto priemones – jai nereikalingas kelias ar specialus paviršius jos eksploatacijai. Šios transporto priemonės pagrindinis elementas yra lankstus sijonas, kuris gali būti pagamintas iš nailono ar poliesterio. Pagrindiniai tipai sijonų yra:

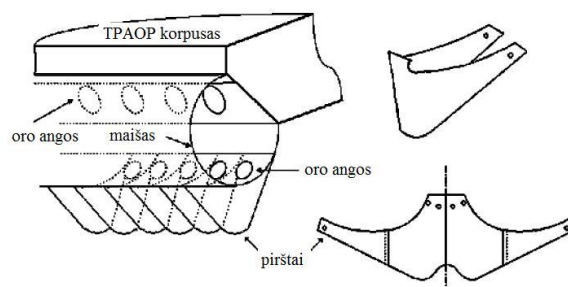
- Maišo;
- Piršto ar segmentų;
- Maišo ir piršto.

Maišo tipo sijonas – kai visa transporto priemonės dugną gaubia vientisas segmentas. Tokio tipo sijonus lengva suprojektuoti ir sumontuoti, tačiau su jais eksploatuoti TPAOP yra sudėtingiau. Pakilimo aukštis nuo atraminio paviršiaus yra mažesnis nei su piršto tipo sijonais. (Yun, Bliault 2000)

Piršto tipo sijonas yra sudarytas iš daugelio atskirų segmentų, kurie gali individualiai sklęsti per skirtingus paviršius. Su tokio tipo sijonais, TPAOP, idealiai tinka eksploatuoti dideliais greičiais virš bangų ir žemės. Pagrindiniai privalumai: mažesnė trintis nei maišo tipo ir sudilus vienam piršto tipo sijono segmentui, TPAOP, gali būti toliau eksploatuojama. (Yun, Bliault 2000)

Maišo ir piršto tipo sijonai (3 pav.) Dažniausiai yra naudojami didelėse TPAOP, kadangi žymiai sumažina galios poreikį, reikalingą pripūsti oro pagalvę. TPAOP su tokio tipo sijonais yra manevringesnės ir stabilesnės. (Chung, Jung 2004)

Tokios transporto priemonės problema yra dylantis sijonas, kuris sudaro oro pagalvę. Tai labai priklauso, kokiomis sąlygomis yra eksploatuojama TPAOP. Jeigu ant nelygaus abrazyvinio paviršiaus, tai sijonas sudils greičiau nei ant vandens.



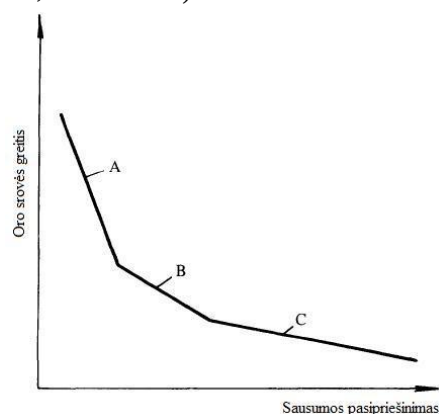
3 pav. Maišo ir pirštų sijonas (Chung, Jung 2004)

Kita problema, kada TPAOP yra eksploatuojama dideliais greičiais - jos priekis, veikiamas oro pasipriešinimo, svyra link atraminio paviršiaus. Dėl to padidėja sijono dilimas, reikalinga variklio galia įveikti atsiradusiai trinciai, padidėja tikimybė apversti TPAOP. Šią problemą galima išspręsti, padidinant transporto priemonės korpuso aptakumą kaip galima toliau nuo svorio centro į priekį arba suprojektuojant aerodinaminį aptaką TPAOP priekyje, kuris gali būti su fiksuotu arba keičiamu atakos kampu. (Вавилов 2011)

Kadangi šios transporto priemonės mažai arba beveik nekontaktuoja su atraminiu paviršiumi, jas yra sudėtinga vairuoti. Ypač įsibėgėjus tampa sunkiau daryti posūkius - reikia didesnio spindulio posūkiams įveikti. (Jun *et al.* 2010)

Oro pagalvės veikimas yra efektyvesnis, kai ji yra arčiau atraminio paviršiaus. Padidėjus sklendimo aukščiui išauga didesnis oro masių išteikėjimas iš oro pagalvės ir galingumas, reikalingas TPAOP sklendimui. Maksimalus TPAOP sklendimo aukštis reikalingas įveikti jūros bangas. Esant didelėms bangoms ir mažiems TPAOP tai nesudaro problemų, kadangi TPAOP gali kopijuoti bangos kontūrą. Kuo TPAOP yra ilgesnė, tuo pasipriešinimas bangavimui yra mažesnis. (Козин, Погорелова 2003)

Slėgis, oro pagalvėje, reikalingas TPAOP išlaikyti virš sausumos yra didesnis nei išlaikyti virš vandens. Kadangi eksploatuojant TPAOP virš sausumos paviršiaus, tarp apsauginio sijono ir atraminio paviršiaus susidaro didesnis oro tarpas, nei tarp sijono ir vandens. Dėl to iš po oro pagalvės išteka didesnis oro kiekis, kuris sukuria slėgį, reikalingą TPAOP eksploatacijai. Sausumos pasipriešinimas, kurį turi įveikti TPAOP, skirstomas į tris režimus (4 pav.), kontroliuojamas pagal oro pagalvės oro tėkmės greitį. (Yun, Bliault 2000)

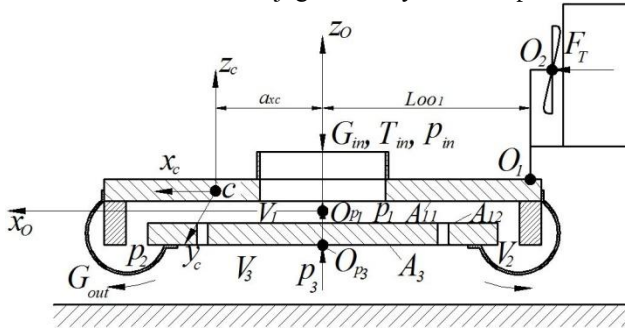


4 pav. TPAOP eksploatavimo režimai ant sausumos paviršiaus (Yun, Bliault 2000)

Režimas A – kai pro oro pagalvę prateka maksimalus oro kiekis - sausumos pasipriešinimas yra mažas, nes TPAOP dėl pratekančio didelio oro kiekio pakilusi nuo atraminio paviršiaus ir mažai kontaktuoja su juo. Šio režimo metu tarpas tarp atraminio paviršiaus ir oro pagalvės būna didžiausias. Režimas B – kai pro oro pagalvę prateka vidutinis oro kiekis. Režimas C - kai pro oro pagalvę prateka minimalus oro kiekis, reikalingas išlaikyti eksploatacinį režimą. Šio režimo metu sausumos pasipriešinimas yra didžiausias. (Yun, Bliault 2000)

2. Transporto priemonės ant oro pagalvės matematinis modelis

Nagrinėjant TPAOP judėjimą, įvesta bendroji koordinatinių sistema OXYZ, kurios atžvilgiu stebimas kūno masių centro koordinatinių ir kūno pasukimo kampų, kitimas. TPAOP veikiančios jėgos nurodytos 5 ir 6 pav.



5 pav. TPAOP skaičiuojamoji schema 1

Judėjimo lygtys TPAOP sudarytos remiantis (Bogdevičius 2012).

TPAOP judėjimo lygtys:

$$m\ddot{x}_c = F_T \cos \beta \cos \varphi - F_T \sin \beta \sin \varphi - F_{aerox}; \quad (1)$$

$$m\ddot{y}_c = F_T \cos \beta \sin \varphi + F_T \sin \beta \cos \varphi - F_{aeroy}; \quad (2)$$

$$m\ddot{z}_c = -mg + p_3 A_3 + p_1 A_1 - p_1 A_{12} + F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4}. \quad (3)$$

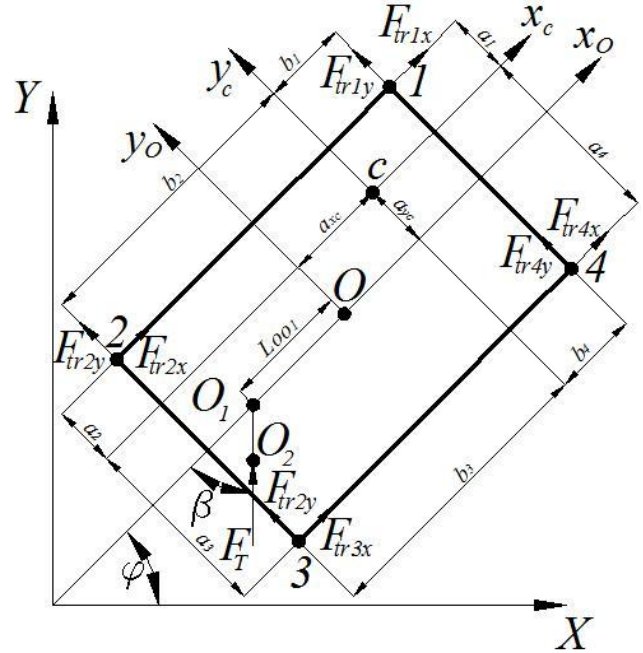
$$I_{xc} \ddot{\psi}_1 = M_{cx} + F_{z1} a_1 + F_{z2} a_2 - F_{z3} a_3 - F_{z4} a_4 - F_{z3} a_{yc} + \sum M_{xtri}; \quad (4)$$

$$I_{yc} \ddot{\psi}_2 = M_{cy} - b_1 F_{z1} - b_4 F_{z4} + b_2 F_{z2} + b_3 F_{z3} + F_{p3} a_{xc} + \sum M_{ytri}; \quad (5)$$

$$I_{zc} \ddot{\psi}_3 = M_{cz} + \sum M_{ztri}. \quad (6)$$

Jėgos ir atstumai pažymėti 5 ir 6 pav.: F_T – traukos jėga; p_{in} – įeinantis slėgis; p_1 – slėgis TPAOP korpuse; p_2 – slėgis oro pagalvėje; p_3 – slėgis po TPAOP; β – vairo pasukimo kampas; φ – TPAOP pasisukimo kampas; c – masių centras; G_{in} – įeinantis oro srauto kiekis; G_{out} – išeinančio oro srauto kiekis; A_{11} – slėgio p_1 veikiančio korpuso vidinį viršutinę dalį plotas; A_{12} – slėgio p_1 veikiančio korpuso vidinį apatinę dalį plotas; a_{xc} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O ašimi x iki masių centro; L_{OO1} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O iki vairo sukimosi centro O_1 ; O_1 – vairo sukimosi centras; O_2 – taškas kuriame pridėta jėga F_T ; O_{p4} – slėgio p_3 veikimo vieta, a_{yc} – atstumas nuo TPAOP geometrinio centro O ašimi y iki masių centro c ; a_i – atstumai ašimi y ; b_i – at-

stumai ašimi y ; F_{trix} – trinties jėgos veikimas taškuose i ($i = 1-4$) ašies x kryptimi; F_{triy} – trinties jėgos veikimas taškuose i ($i = 1-4$) ašies y kryptimi.



6 pav. TPAOP skaičiuojamoji schema 2

Momentas apie masių centrą:

$$\{M_c\} = \begin{Bmatrix} -r_{O2z} F_T \sin \beta \\ r_{O2z} F_T \cos \beta \\ -r_{O2y} F_T \cos \beta + r_{O2x} F_T \sin \beta \end{Bmatrix}; \quad (7)$$

Momentas apie i – ašias F_{tri} trinties jėgas:

$$\{M_{tri}\} = [\tilde{r}_{ci}] \{f_{tri}\}; \quad (8)$$

$$\{r_{ci}\}^T = [a_i, a_i, c_i]; \quad (9)$$

Momentas apie jėgą F_{tr1} :

$$\{M_{tr1}\} = \begin{Bmatrix} 0 & -c & a_1 \\ c_1 & 0 & -b_1 \\ -a_1 & b_1 & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{tr1x} \\ f_{tr1y} \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -c_1 f_{tr1y} \\ c_1 f_{tr1x} \\ -a_1 f_{tr1x} + b_1 f_{tr1y} \end{Bmatrix}. \quad (10)$$

Likusieji momentai apie F_{tr2} , F_{tr3} ir F_{tr4} trinties jėgas nustatomi tokiu pačiu principu.

Slėgių kitimo lygtys sudarytos remiantis (Bogdevičius, Prentkovskis 2003).

Slėgio p_1 kitimas TPAOP modelio korpuse:

$$\dot{p}_1 = \frac{\gamma RT}{V_1} \left[\frac{G_{in} \text{sign}(p_{in} - p_1) -}{-G_{13} \text{sign}(p_1 - p_3)} \right]; \quad (11)$$

čia: $V_1 = \text{const.}$;

γ – dujų adiabatės rodiklis;

R – dujų konstanta;

T – absoliutinė temperatūra.

Sėgio p_2 kitimas oro pagalvėje:

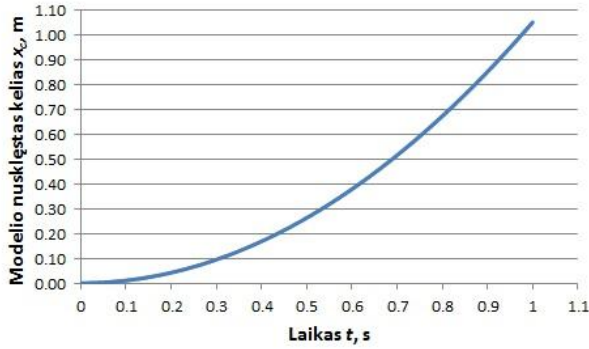
$$\dot{p}_2 = \frac{\gamma RT}{V_2} [G_{12} \text{sign}(p_1 - p_2)] - \frac{\gamma p_2}{V_2} \dot{V}_2; \quad (12)$$

Slėgio p_3 kitimas po TPAOP modeliu:

$$\dot{p}_3 = \frac{\gamma RT}{V_3} \left[G_{1,3} \text{sign}(p_1 - p_3) - \right] - \frac{\gamma p_3}{V_3} \dot{V}_3. \quad (13)$$

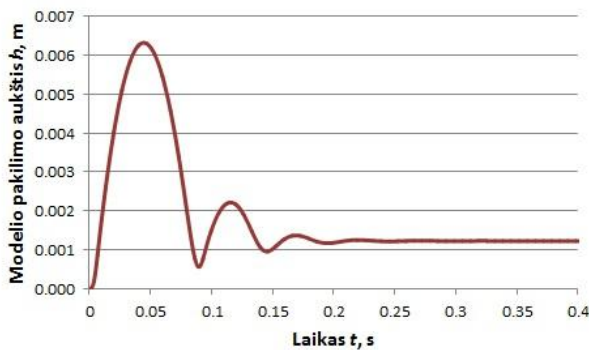
3. Matematinio modeliavimo rezultatai

Gauti rezultatai, kai matematinio modelio parametrai yra tokie patys kaip realaus sukonstruoto TPAOP modelio. Modelio masė $m = 0,950$ kg, ilgis $L = 0,4$ m, plotis $B = 0,27$ m, vairo pasukimo kampas; $\beta = 0^\circ$, plotas $A_{11} = 0,0736$ m², $A_{12} = 0,0608$ m², $V_1 = 1,656 \cdot 10^{-3}$ m³, $V_2 = 2,381 \cdot 10^{-3}$ m³, $V_3 = 0,828 \cdot 10^{-3}$ m³, traukos jėga $F_T = 2$ N, debitas $G_{in} = 0,023$ m³/s. Užsiduota, kad atraminis paviršius yra lygus.



7 pav. Nusklęsto kelio x_c priklausomybė nuo laiko t

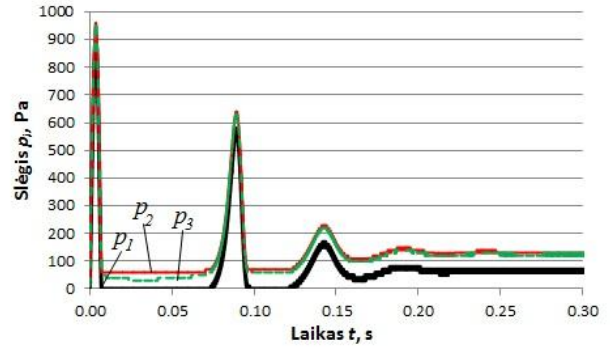
Iš gauto nusklęsto kelio x_c priklausomybės nuo laiko t grafiko (7 pav.) matyti, kad apskaičiuotas tiriamos transporto priemonės judėjimo greitis yra tolygus ir jis juda 1 m/s greičiu. Šis greitis yra artimas eksperimentinių tyrimų metu nustatytam TPAOP modelio judėjimo greičiui.



8 pav. Modelio pakilimo aukščio h priklausomybė nuo laiko t

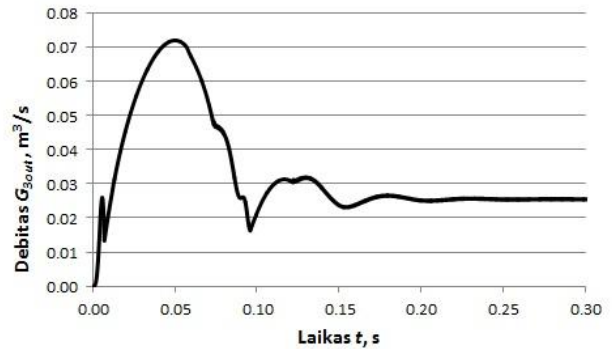
Modelio pakilimo aukštis h (8 pav.) labai svyruoja pradžioje – didžiausias pikas pasiekiamas ties 0,05 s, kadangi susidaręs slėgis oro pagalvėje staigiai ją iškelia.

Ties 0,2 s pakilimo aukštis nusistovi ir yra $h = 1,21 \cdot 10^{-3}$ m.



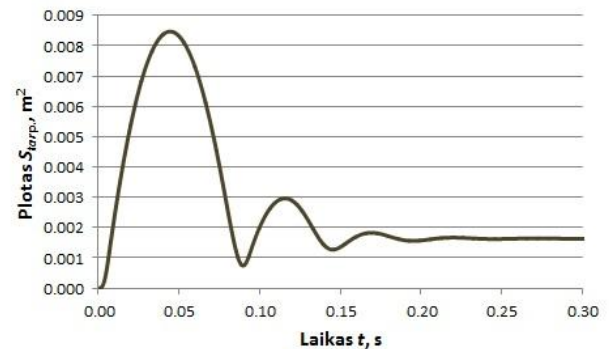
9 pav. Slėgių p_i priklausomybė nuo laiko t

Slėgiai p_1 TPAOP korpuse, p_2 oro pagalvėje ir p_3 po TPAOP tai pat labiausiai svyruoja pradiniu laiko momentu (9 pav.). Žemiausias slėgis p_1 yra TPAOP korpuse, kadangi jis nuteka į oro pagalvę ir po modeliu. Aukščiausią ribą pradiniu laiko momentu pasiekia slėgis p_2 , nes jam nėra kur išeiti. Jis kaupiasi oro pagalvėje kol ji prisipučia. Tačiau jau nuo 0,2 s slėgiai nusistovi $p_1 = 70$ Pa, $p_2 = 130$ Pa, $p_3 = 130$ Pa.



10 pav. Debito G_{3out} priklausomybė nuo laiko t

Oro srauto debitas G_{3out} didžiausias pradiniu laiko momentu (10 pav.), kada didžiausias modelio pakilimo aukštis perimetro plotas $S_{tarp.}$ (11 pav.). Mažėjant perimetro plotui $S_{tarp.}$, mažėja debitas G_{3out} ties 0,05 s iki 0,09 s, todėl pradeda didėti slėgiai p_1 , p_2 ir p_3 , (9 pav.), nes susikaupusiam oro srautui sunkiau ištekti pro mažą tarpelį.



11 pav. Pakilimo aukščio perimetro ploto $S_{tarp.}$ priklausomybė nuo laiko t

Išvados

1. Prisipūtus oro pagalvei, reikalinga jėga ją išjudinti iš stacionarios padėties yra 79% mažesnė nei jai neprisipūtus.
2. Iš matematinio modeliavimo rezultatų nustatyta, kad slėgių p_1, p_2, p_3 , debito G_{3out} , pakilimo aukščio perimetro ploto S_{tarp} vertės labiausiai svyruoja pereinamojo proceso metu. Pereinamasis procesas trunka 0,20 – 0,25 s kol parametrai nusistovi.
3. Iš matematinio modeliavimo rezultatų nustatyta, kad TPAOP judėjimo greitis yra 1 m/s, kas sutampa su atliktais eksperimentiniais tyrimų rezultatais.

Literatūra

- Bogdevičius, M. 2012. *Transporto priemonių dinamika*. Vilnius: Technika. 205 p.
- Bogdevičius, M.; Prentkovskis, O. 2003. *Hidraulinių ir pneumatinių sistemų dinamika*. Vilnius: Technika. 261 p.
- Chung, J.; Jung, T. 2004. Optimization of an air cushion bag and finger skirt using genetic algorithms, *Journal of Aerospace Science and Technology* 8(3): 219 – 229.
- Jun, L.; Guo-liang, H.; Shu-zhi L. 2010. Four Degree of Freedom Course Stability of an Air Cushion Vehicle, *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* 15(2): 163 – 167. doi: 10.1007/s12204-010-8057-2
- Yun, L.; Bliault, A. 2000. *Theory and design of air cushion craft*. London: Arnold. 647 p.
- Козин, В. М.; Погорелова, А. В. 2003. Волновое Сопротивление Амфибийных Судов на Воздушной Подушке при Движении по Ледяному Покрову, *Журнал Прикладная Механика и Техническая Физика* 44(2): 49–55.
- Вавилов, И. 2011. Теоретико - экспериментальное исследование летательного аппарата на воздушной подушке. Омск.