

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Nataļja SIDENKO**

**AERODINAMISKO STENDU CILVĒKA BRĪVAJAM LIDOJUMAM  
PARAMETRU OPTIMIZĀCIJA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

**Rīga 2012**

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**

**Transporta un mašīnzinību fakultāte**

Aeronautikas institūts

**Natalia SIDENKO**

Doktora studiju programmas „Transports” doktorants

**AERODINAMISKO STENDU CILVĒKA BRĪVAJAM LIDOJUMAM  
PARAMETRU OPTIMIZĀCIJA**

**Promocijas darba kopsavilkums**

Zinātniskais vadītājs

Dr. habil. sc. ing., profesors

**V. UŠAKOVS**

**Rīga 2012**

UDK 533.6.07(043.2)

Si 094 a

Sidenko N. AERODINAMISKO STENDU  
CILVĒKA BRĪVAJAM LIDOJUMAM  
PARAMETRU OPTIMIZĀCIJA  
Promocijas darba kopsavilkums.-R.:RTU, 2012.-36  
lpp.

Iespiests saskaņā ar AI institūta 2012.gada  
12.aprīlī lēmumu, protokols Nr.15A00/17-03



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

*This work has been supported by the European Social Fund within the project «Support for the implementation of doctoral studies at Riga Technical University».*

*Эта работа выполнена при содействии Европейского социального фонда в рамках проекта «Поддержка развития докторантуры РТУ».*

**ISBN 978-9934-10-390-2**

**PROMOCIJAS DARBS  
IZVIRZĪTS INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI  
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.g. 28.janvārī plkt. 15.00 Rīgas Tehniskās universitātes Transporta un mašīnzinību fakultāte, Aeronautikas institūts Lomonosova iela 1, 1.korp., 220 auditorijā.

**OFICIĀLIE RECENZENTI**

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Aleksandrs Januševskis  
Rīgas Tehniskā universitāte (Rīga, Latvija)

Profesors, Inženierzinātņu doktors Viktors Gopeenko  
Informācijas sistēmu menedžmenta augstskola (Rīga, Latvija)

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Vladimirs Šestakovs  
Rīgas Tehniskā universitāte (Rīga, Latvija)

**APSTIPRINĀJUMS**

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Nataļja Sidenko .....(Paraksts)

Datums: .....

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 3 nodaļas, secinājumus, literatūras sarakstu, 82 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 130 lappuses. Literatūras sarakstā ir 96 nosaukumi.

## SATURS

1.	Tēmas aktualitāte.....	2
2.	Pētījuma mērķi un uzdevumi .....	3
3.	Teorētiskais pamatojums un pētījumu metodes.....	4
4.	Zinātniskā novitāte.....	5
5.	Praktiskā nozīme un realizācija.....	6
6.	Disertācijas darba struktūra .....	6
7.	1. Nodaļa. Atvērta tipa aerodinamiskās caurules ar liela diametra vertikālo gaisa strūklu parametru aprēķina metodika izmantojot modelējošo cad/cae programmu kompleksu.....	8
8.	2. Nodaļa. Aerodinamiskā stenda cilvēka brīvajam lidojumam galveno elementu raksturlielumu skaitliskais aprēķins un optimizācija.....	14
9.	3. Nodaļa. Aerodinamisko stendu, kas paredzēti cilvēka brīvajam lidojumam, parametru datormodelēšana un optimizācija .....	24
10.	Nobeigums, galvenie secinājumi .....	32
11.	Publikāciju saraksts .....	33
12.	Patentu līdzautors.....	35
13.	Konferenču saraksts.....	35
14.	Projektu saraksts.....	36

## 1. TĒMAS AKTUALITĀTE

Pašlaik lidojumi aerodinamiskā stenda vertikālā gaisa plūsmā vairākumam izpletņlēkšanas komandu ir neatņemama trenniņu procesa sastāvdaļa.

Virszemes aerodinamiskais stends cilvēka lidojumam vertikālā gaisa strūklā modelē izjūtas, ko izpletņlēcējs piedzīvo brīvajā lidojumā. Ja izpletņlēcēja brīvais lidojums ilgst aptuveni vienu minūti, tad brīvā lidojuma ilgumu uz virszemes stenda, neņemot vērā ekonomiskus apsvērumus, ierobežo tikai cilvēka fiziskās iespējas.

*Šāda veida stendi tiek izmantoti:*

- Kā virszemes stendi (izpletņlēcēju apmācības programma) lēkšanai ar izpletni simulācijai (Accelerated Free Fall));
- Desantnieku un speciālās nozīmes vienību sagatavošanai;
- Iekārtu un aprīkojumu izmēģināšanai un eksperimentālai testēšanai;
- Jaunam sporta veidam "Bodyflyght";
- Izklaides un sporta pasākumos.

Pašlaik pasaulē jau eksistē liels daudzums aerodinamisko stendu, kas paredzēti cilvēka brīvajam lidojumam. Tie atšķiras pēc konstrukcijas, izmēriem, ātrumu diapazoniem un plūsmas ģenerēšanas veida.

Zināmajiem aerodinamiskajiem stendiem ir slēgta (t.i. ar sānu sienām ierobežota), vai atvērta darba zona, un tiem jāspēj radīt liela augstuma vertikālu strūklu (lidojuma augstums var sasniegt 20-25 metrus no caurules izejas šķēluma). Strūklas darba zonas šķērsgriezumos plūsmai jābūt pietiekami vienmērīgai un nesavērptai. Vidējais vertikālais ātrums darba zonā ir aptuveni 60-70 m/s pie standarta atmosfēras apstākļiem.

Zināmo vertikālas gaisa strūklas izveides sistēmu trūkumi atvērta tipa aerodinamiskajās iekārtās ir to elementu neracionāla konstrukcija un paaugstinātas ekspluatācijas izmaksas, kas saistītas ar lieliem plūsmas enerģijas zudumiem kā atsevišķos elementos, tā arī sistēmā kopumā pie elementu apvienošanas vienotā kompleksā, neņemot vērā to savstarpējo aerodinamisko ietekmi vienam uz otru.

Aerodinamisko cauruļu parasto inženieraprēķinu metožu pamatā ir to atsevišķu elementu parametru secīga izvēle, ņemot vērā hidrauliskos zudumus un, kā likums, neņemot vērā to mijiedarbību vienotā sistēmā. Rezultātā tiek iegūts aerodinamisko cauruļu atsevišķu elementu kopums, kas nav savstarpēji saskaņots vienotā aerodinamiskajā sistēmā. Dažādi pieņēmumi, kā

arī detalizētas informācijas trūkums attiecībā uz plūsmas raksturu un apskatāmo iekārtas elementu mijiedarbību padara neiespējamu aerodinamiskās caurules konstrukcijas optimizāciju tehniskās projektēšanas procesā, kā arī uzdotu raksturlielumu iegūšanu. Šādā veidā aprēķinātie caurules parametri ir samērā aptuveni un prasa precizēšanu veicot naturālus izmēģinājumus. Šie izmēģinājumi rada ievērojamas papildus materiālās izmaksas.

Tā rezultātā daudziem stendiem (īpaši atvērta tipa stendiem ar atvērtu darba zonu) strūklas darba zonā ir nevienmērīgs ātruma profils, ievērojama plūsmas savērpe, kā arī lielāka spēka iekārtas patērētā jauda.

Modernajām aerodinamisko stendu konstrukcijām piemīt lieli izmēri un sarežģīta forma, kas padara aprūtinātu un dārgu naturālā vai pusnaturālā eksperimenta realizāciju, it īpaši ja runa ir par aerodinamisko eksperimentu. Tādēļ konstrukciju izveide un to optimizācija nav iespējama bez projektēšanas, aprēķinu un eksperimentu procesu pilnveidošanas un automatizācijas. Līdz ar to minēto stendu moderno datormodelēšanas un konstruēšanas metožu pielietošana ir aktuāls jautājums.

## **2. PĒTIJUMA MĒRĶI UN UZDEVUMI**

### **Darba mērķis:**

Izstrādāt datormodelēšanas un skaitliskā eksperimenta metodikas, kas ļauj optimizēt aerodinamisko stendu atsevišķu elementu kā arī visas sistēmu: skrūve (ventilators) – izlīdzinošais aparāts - gāzdinamiskais kanāls un tā ģeometriskie un aerodinamiskie parametri. Skaitlisko aprēķinu rezultātiem, kas tiek veikti izmantojot izstrādātās metodikas, obligāti ir apmierinoši jāsakrīt ar naturālā eksperimenta rezultātiem.

### **Mērķa sasniegšanai veikta sekojošas informācijas analīze:**

- Trenažieru (stendu) sporta lidojumiem vertikālā gaisa strūklā vispārīgās attīstības tendences;
- Izskatāmo aerodinamisko stendu konstrukcijas elementu inženieraprēķinu metodes;
- Eksistējošās aprēķināšanai datorprogrammas gāzes plūsmas mijiedarbības ar kustīgiem ķermeņiem sarežģītos gāzdinamiskos kanālos.

### **Tāpat tika atrisināti sekojoši uzdevumi:**

- Izstrādāta atvērta aerodinamiskās caurules ar liela diametra vertikālu gaisa strūklu datormodelēšanas un parametru aprēķina metodika;
- Izstrādāta aerodinamisko stendu atsevišķu elementu, tostarp skrūvju, ieplūdes iekārtu, izlīdzinošo aparātu, gāzdinamisko kanālu ģeometrisko un aerodinamisko raksturlielumu datormodelēšanas metodika;
- Izstrādāta dažādu modifikāciju (vienskrūves, atvērta tipa daudzskrūvju) aerodinamisko stendu ģeometrisko un aerodinamisko parametru datormodelēšanas un optimizācijas metodika;
- Eksperimentāli pierādīta piedāvātās metodikas un tās atsevišķu daļu pielietošanas iespējamība minēto iekārtu aerodinamisko parametru aprēķinam un optimizācijai.

## **3. TEORĒTISKAIS PAMATOJUMS UN PĒTĪJUMU METODES**

Promocijas pētījumu **teorētiskais pamatojums** balstās sekojošiem šķidrums un gāzu mehānikas pamatlikumiem:

- Šķidrums un gāzu nestacionāras kustības teoriju;
- Žukovska virpuļu teoriju;
- Saspiežamas gāzes kustības matemātisko modeļi vispārīgajā gadījumā, kas aprakstīti ar nestacionāriem Navjē-Stoksa vienādojumiem un enerģijas vienādojumu (pirmais termodinamikas likums), turbulētām, pārejas un laminārām plūsmām;
- Šķidrums un gāzu mehānikas uzdevumu risināšanas skaitliskajām metodēm.

### **Pētījuma metodes:**

- Datormodelēšanas, konstruēšanas un aprēķinu metodes izmantojot CAD/CAE/CFD programmu paketi;
- Nestacionāru Navjē-Stoksa vienādojumu atrisinājums ar skaitlisko galīgo elementu metodi, izmantojot adaptīvu kustīgu tīklu;
- Aerodinamisko cauruļu inženierprojektēšanas un aprēķina metodes;
- Aerodinamiskā eksperimenta metodoloģija un īstenošana.

### **Darbā aizstāvamās tēzes**

- Ar modelējošo CAD/CAE kompleksu izstrādātā atvērtas aerodinamiskās caurules ar liela diametra vertikālu gaisa strūklu parametru aprēķina metodika;
- Skaitlisko aprēķinu rezultāti, kas ļauj optimizēt aerodinamiskā stenda, kas paredzēts cilvēka brīvajam lidojumam raksturlielumus;
- Ar izstrādāto metodiku palīdzību veikto apmierinošas precizitātes skaitlisko aprēķinu un naturālo eksperimentu pamatojumu;
- Izstrādātie aerodinamisko stendu (vienskrūves un daudzskrūvju) cilvēka brīvajam lidojumam datormodeļi ar optimizētiem parametriem;
- Darbojošās aerodinamisko stendu iekārtas, kas izstrādātas un izgatavotas saskaņā ar veikto skaitlisko aprēķinu rezultātiem.

## **4. ZINĀTNISKĀ NOVITĀTE**

Darba galvenā zinātniskā novitāte ir metodiku izstrāde, izmantojot trīsdimensiju parametriskās datormodelēšanas programmu SolidWorks un CFDDesign paketes. Šī programmu pakete ļauj izveidot dažādas aerodinamisko stendu un to sastāvdaļu trīsdimensiju ģeometrisko modeļu versijas, kā arī veikt to virtuālo appūšanu, tādējādi iegūstot izstrādājamo stendu konstrukciju optimālos ģeometriskos un aerodinamiskos parametrus.

Izstrādātā metodika nodrošina adekvātu modelējošu parametrisko datoraprēķinu veikšanas iespējamību. Tas ļauj noteikt interesējošos aerodinamiskos raksturlielumus, kuri apmierinoši sakrīt ar eksperimentālajiem datiem vai zināmiem teorētiskiem aprēķiniem, tādējādi apstiprinot izstrādātās metodes adekvātumu.

Promocijas darbā izstrādātās metodikas pamatīpatnība ir iespēja aprēķināt aerodinamiskās skrūves radītās iegremdētas strūklas, kas rotē ap nekustīgu vertikālo asi veidošanās procesu. Metodika ņem vērā tuvu novietotu cietu vai caurlaidīgu virsmu ietekmi, kā arī iegremdētas strūklas inducētu plūsmas zonu veidošanos. Vispārīgā gadījumā plūsma strūklā tiek uzskatīta kā nestacionāra un turbulenta, bet tai pieguļošajā inducēto plūsmu zonā tā var būt pārejas vai lamināra.

## 5. PRAKTISKĀ NOZĪME UN REALIZĀCIJA

Izstrādātas rekomendācijas mobilo un stacionāro stendu cilvēka brīvajam lidojumam konstruēšanai. Izstrādāto minēto stendu projektēšanas metodiku aprobācija tika veikta Latvijas uzņēmums, kas izstrādāja un izgatavoja stendus sadarbībā ar ārvalstu uzņēmumiem. Daļēji datormodelēšanas un skaitlisko aprēķinu metodika tika izmantota izstrādājot dažādu modifikāciju (vienskrūves un atvērtā tipa daudzskrūvju) aerodinamisko stendu ar iegremdētu brīvo vertikālu gaisa strūklu, ko izgatavoja un uzstādīja Latvijas uzņēmums Latvijā, kā arī virknē citu Eiropā un Āzijās valstu.

Izstrādātās metodikas tika izmantotas vairākos zinātniskos projektos: IZM projektā "Universālas datormodelēšanas sistēmas nestacionāru aerogāztermodinamisku uzdevumu risināšanai"; SIA "AERODIUM" projektā "Vertikālās gaisa strūklas aerodinamiskie aprēķini un "gaisa plūsmas taisnotāja" skiču projekta izstrāde»; RTU projektā "Attiecībā pret plūsmu kustīgu ķermeņu nestacionāras aerohidrodinamikas un siltumapmaiņas īpatnību izpēte».

Pētījumu galvenie rezultāti publicēti sešās publikācijās un prezentēti sešās starptautiskās konferencēs Latvijā, Polijā, Bulgārijā, Ukrainā, kurās autors ir uzstājies ar sešiem referātiem par promocijas tēmu. Publikāciju un konferenču referātu saraksts norādīts kopsavilkuma beigās.

## 5. DISERTĀCIJAS DARBA STRUKTŪRA

*Promocijas darba ievadā* apskatīti trenāžieru sporta lidojumiem vertikālā gaisa strūklā vispārīgie attīstības virzieni. Īpaša uzmanība tika pievērsta mūsdienu aerodinamisko stendu izstrādēm. Šie stendi apskatīti atšķirās pēc konstrukcijas, izmēriem, ātrumu diapazona un strūklas radīšanas veida. Ievadā apskatītas vienkāršas konstrukcijas darbības princips, kas paredzētas liela diametra vertikālas gaisa strūklas izveidei. Atzīmēti moderno konstrukciju galvenie trūkumi un priekšrocības. Veikta stendu konstruktīvo elementu inženieraprēķinu moderno metožu analīze. Tāpat noformulēti pētījumu problēmas aktualitāte, disertācijas darba mērķi un uzdevumi.

*Pirmajā nodaļā* ir noformulēta liela diametra vertikālas gaisa strūklas ģeneratoru parametru datormodelēšanas un aprēķinu bāzes metodika. Metodika ietver šai klasei kopīgus pamatposmus un satur dotajam uzdevumam piemītošos galvenos raksturīgos elementus.

Metodika nodrošina iespēju veikt parametriskos datoraprēķinus, kas pietiekami adekvāti modelē pētāmās fizikālās parādības un ļauj praktiski noteikt interesējošos raksturlielumus.

Izstrādājamo aerodinamisko stendu aprēķini jāveic izmantojot pazīstamas CAD/CAE inženierprogrammas, kas nodrošina nepieciešamo darba apjoma veikšanu pieņemamā laikā.

**Otrajā nodaļā** izstrādātas aerodinamisko stendu atsevišķu elementu ģeometrisko un aerodinamisko raksturojumu datormodelēšanas un optimizācijas metodikas.

Norādītās metodikas izmantojot trīsdimensiju parametriskās datormodelēšanas programmas SolidWorks un CFDdesign ļauj izveidot dažādas izstrādājamo stendu trīsdimensiju ģeometrisko modeļu modifikācijas un veikt to virtuālo appūšanu, tādējādi sasniedzot nepieciešamos ģeometriskos un aerodinamiskos parametrus. Metodika ļauj salīdzinoši ātri iegūt rezultātus, kas apmierinoši sakrīt ar naturālā eksperimenta datiem vai zināmiem teorētiskajiem aprēķiniem, kas apstiprina izstrādātās metodikas adekvātumu.

**Trešajā nodaļā** izstrādāta aerodinamisko stendu dažādu modifikāciju (vienskrūves; daudzskrūvju) ģeometrisko un aerodinamisko parametru datormodelēšanas un optimizācijas metodika. Uz izstrādātās metodikas bāzes tika izveidots universāls gaisa strūklas ģenerators, kas paredzēts piemērotu apstākļu nodrošināšanai cilvēka brīvājam lidojumam vertikālā gaisa strūklā. Universālais ģenerators var tikt izmantots kā mobilajos tā arī stacionārajos aerodinamiskajos stendos. Aerodinamiskās caurules sarežģītās telpiskās struktūras ar simetriski novietotiem ventilatoriem datormodelēšana ļāva atrisināt virkni problēmu, kā piemēram gaisa kanālu šķēlumu savienošana ievērojot sašaurinājuma un paplašinājuma leņķus, pāreju vienmērīgumu un kanālu pagriezienus, vairāku kanālu savienošanu, ievērojot pagrieziena leņķa un kanāla izliekuma ierobežojumus.

Izmantojot izstrādātās metodikas, tika izstrādāti datormodeļi, uz kā pamata tika uzprojektēti un izgatavoti, vienskrūves un daudzskrūvju aerodinamiskie stendi.

## 1. NODAĻA

### **ATVĒRTA TIPA AERODINAMISKĀS CAURULES AR LIELA DIAMETRA VERTIKĀLO GAISA STRŪKĻU PARAMETRU APRĒĶINA METODIKA IZMANTOJOT MODELĒJOŠO CAD/CAE PROGRAMMU KOMPLEKSU**

Jebkura konkrēta uzdevuma skaitliskais risinājums prasa obligātu iepriekšēju un pakāpenisku tā risinājuma metodikas izstrādi. Konkrētas uzdevumu klases analīzes gadījumā (šajā darbā tā ir uzdevumu klase, kas saistīta ar aerodinamisko raksturlielumu noteikšanu vertikālai gaisa strūklai, kas tiek radīta atvērta aerodinamisko cauruļu tipa virszemes stendos), iespējams izdalīt metodikas bāzes daļu, kurā ietverti šai klasei kopīgie metodikas pamatposmi. Konkrētā uzdevuma risināšanas metodika ietver tikai minētajam uzdevumam raksturīgās detaļas.

*Darbā izmantotās uzdevumu risināšanas bāzes metodikas, izmantojot CAD / CAE programmu kompleksu galvenie posmi ir sekojoši:*

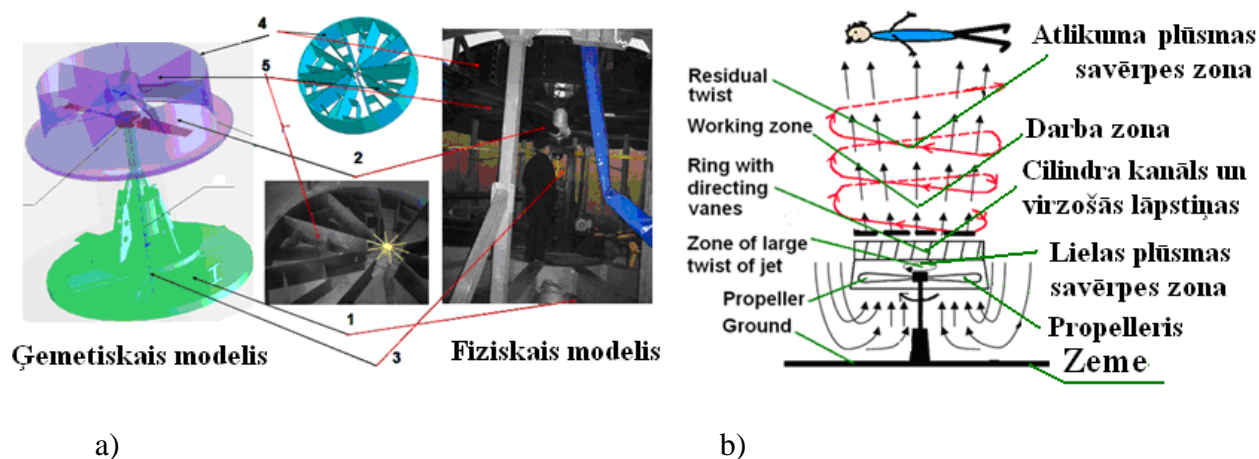
- Pētījumu uzdevuma fizikālais formulējums.
- Vienkāršota sākotnējā pētījumu objekta modeļa izstrāde .
- Objekta elektroniska ģeometriskā modeļa izstrāde .
- Uzdevuma matemātiskais formulējums, sākuma un robežnosacījumu formulējums.
- Nepieciešamo CAD/CAE programmu izvēle.
- Diskrētā aprēķinu modeļa izveide, aprēķinu tīkla optimizācija.
- Uzdevuma risināšanas stratēģijas izstrāde:
  - aprēķinu mērķu un nobeiguma kritēriju formulējums;
  - aprēķinu procesa kontroles un vadības metodika;
  - datu vizualizācijas un rezultātu skaitliskās apstrādes metodika.
- Pārbaudes uzdevuma risinājums, salīdzinājums ar zināmiem datiem, iegūtā risinājuma precizitātes novērtējums.
- Aprēķinu rezultātu interpretācija ar mērķi optimizēt pētāmā objekta īpašības.

Šajā nodaļā formulēti liela diametra vertikālās gaisa strūklas ģeneratoru datormodelēšanas un parametru aprēķina bāzes metodika. Metodikai jānodrošina parametrisko datoraprēķinu, kas

pietiekami adekvāti modelē pētāmās fizikālās parādības un ļauj praktiski noteikt interesējošos raksturlielumus. Turklāt veiktajiem aprēķiniem apmierinoši jāsakrīt ar eksperimentālajiem datiem vai zināmiem teorētiskajiem aprēķiniem, tādējādi apstiprinot izstrādātās metodikas adekvātumu. Izstrādājamo aerodinamisko stendu aprēķini jāveic izmantojot zināmas CAD/CAE inženierprogrammas, kas nodrošina nepieciešamā darbu apjoma paveikšanu pieņemamā laikā.

Nodaļā ietilpst 5 sadaļas, kurās atspoguļoti ar CAD/CAE modelēšanas programmu kompleksu risināmo uzdevumu aprēķina metodiku galvenie posmi, kas piemīt konkrētiem promocijas darbā apskatāmajiem uzdevumiem.

**Pirmajā sadaļā** apskatīts uzdevumu fiziskais formulējums. Aprēķina fiziskais modelis ietver aerodinamiskā stenda vienkāršotu ģeometrisko konstrukciju. Šajā fiziskajā modelī nav iekļautas atsevišķas maznozīmīgas detaļas, kas vāji ietekmē tā aerodinamiskās īpašības (piem. skat. 1.1.a att.).



1.1. att. a) Tiešas darbības vienkārša aerodinamiskā stenda shēma ar atvērtu darba zonu:  
 1 - Zeme; 2- Aviācijas skrūve (propelleris); 3- Elektrodzinēja ass; 4- Cilindra kanāls; 5- Virzošās lāpstiņas. b) Plūsmas shēma aerodinamiskajā stendā

Pētāmais fiziskais modelis var būt apveltīts tikai ar daļu no konstrukcijas reālajām īpašībām. Rezultātā tiek vienkāršots kā ģeometriskais modelis tā arī matemātiskais apraksts. No tā cik veiksmīgi izvēlēts konstrukcijas fiziskais modelis atkarīga aprēķina darbietilpība un to rezultātu precizitāte.

Stendam, kas ģenerē vertikālu gaisa strūklu, aprēķina uzdevuma galvenā īpatnība ir nepieciešamība aprēķināt aerodinamiskās skrūves radīto iegremdētās vertikālās gaisa strūklas, kas rotē ap nekustīgu savu vertikālo asi, formēšanās procesu. Pie tam jāņem vērā tuvu novietotu

cietu vai caurlaidīgu virsmu, kā arī zonu ar plūsmu veidošanos, ko inducē iegremdētā strūkļa un pazemināta spiediena apgabalu pirms skrūves, ietekme (skat. plūsmas shēmu 1.1.b att.).

Apskatāmo atvērta tipa aerodinamisko stendu ģeometriskie modeļi ietver sekojošus galvenos konstruktīvos elementus:

- Ar motoru savienota aerodinamiskā skrūve vai ventilators;
- Skrūvei vai ventilatoram gaisu pievadošais kanāls (dažos prototipos nav paredzēts);
- Aizvadošais kanāls, kura iekšpusē parasti tiek uzstādītas vadošās lāpstiņas un izlīdzinošais aparāts plūsmas savērpes novēršanai aiz skrūves (ventilatora), un vienmērīgas vertikālās gaisa plūsmas formēšanai izejā no apakšējā gaisu caurlaidīgā aizsargtīkla, no kura sākas brīvas vertikālas gaisa strūkļa darba zona.

**Otrajā sadaļā** ir noformulēti uzdevuma matemātiskais uzstādījums un robežnosacījumi. Apskatāmā uzdevuma matemātiskais modelis, kas vispārīgā gadījumā ļauj ņemt vērā temperatūras un gaisa blīvuma izmaiņas, tiek aprakstīti ar Navjē-Stoksa un enerģijas vienādojumiem. Pēc sākotnējās vienādojumu sistēmas vidējošanas ar Reinoldsa metodi turbulentu, pārejas un lamināras plūsmu aprakstīšanai tiek izmantota ( $k - \varepsilon$ ) vai Low Re ( $k - \varepsilon$ ) turbulences modeļi ( $k$ -turbulentā enerģija,  $\varepsilon$  - turbulentās enerģijas izkliedes ātrums  $Re$ -Reinoldsa skaitlis). Noformulētā Navjē-Stoksa diferenciālo vienādojumu sistēma ir nelineāra un šajā darbā tiek atrisināta skaitliski.

**Trešajā sadaļā** aprakstīts programmu komplekss gāzes plūsmas mijiedarbības ar kustīgiem ķermeņiem sarežģītos gāzdinamiskos kanālos aprēķinam. Ģeometrisko datormodeļu izveidei un uzdevumu skaitliskajam risinājumam tiek izmantots speciāli izvēlēts CAD/CAE programmu SolidWorks/CFdesign komplekss. Stenda un tā elementu aprēķina trīsdimensiju ģeometriskie modeļi tika izveidoti izmantojot CAD programmu SolidWorks. Tāpat apskatītas skaitliskā ģeometriskā modeļa metodikas izveidošanas īpatnības.

Kā bāzes piemēri šajā nodaļā apskatītas aerodinamisko skrūvju trīsdimensiju modeļu izveidošanas CAD programmā SolidWorks galvenās īpatnības diviem skrūvju fizisko konstrukciju gadījumiem: ar zināmiem un nezināmiem skrūvju šķēlumu ģeometriskajiem parametriem.

Skrūves lāpstiņas virsmas ģeometrisko modelēšanu pēc zināmiem parametriem var veikt dažādos veidos, piemēram izmantojot Excel un SolidWorks programmas vai Profile un

SolidWorks programmas. Šajā sadaļā tiek analizēti abu metožu priekšrocības un trūkumi, kā arī skrūves virsmas tiešās izveides process.

Esošas skrūves lāpstiņas nezināmo šķēluma ģeometriju (tā saukto atjaunojamo lāpstiņu) mūsdienās iespējams salīdzinoši viegli iegūt izmantojot skenēšanas ierīces. Gadījumam ar nezināmu skrūves šķēluma ģeometriju izanalizēti piecu lāpstiņu skrūves trīsdimensiju ģeometriskā datormodeļa izveides galvenie posmi. Skrūve paredzēta uzstādīšanai atvērtā aerodinamiskajā caurulē, kas ģenerē brīvu vertikālu gaisa strūklu.

Skrūves lāpstiņas ar garumu 0,9 m noskenētais cietķermeņa modelis tika sadalīts šķēlumos ar soli 0.1R (R - skrūves rādiuss). Visi šķēlumi novietoti vertikālajās plaknēs, kas ir perpendikulāras attiecībā pret skrūves rotācijas plakni. Pamatojoties uz skenēšanas rezultātiem tika noteikti dati par lāpstiņas atjaunoto ģeometrisko parametru (relatīvā horda, lāpstiņas biezums un savērpe) izmaiņām. Izmantojot iegūtos datus SolidWorks programmā pēc zināmās šķēluma ģeometrijas tika izveidots lāpstiņas cietķermeņa modelis un atjaunojamās piecu lāpstiņu skrūves ar rumbu datormodelis, kas vēlāk tika uzstādīta eksperimentālajā virszemes aerodinamiskās iekārtas modelī.

Sadaļas turpinājumā tiek pamatota izvēle CAE programmas plūsmas gāzdinamisko parametru aprēķināšanam. Izvēlēta programma CFDDesign tiek veiksmīgi pielietota, plašas uzdevumu klases aprēķinam: automašīnu applūsmai, plūsmai sprauslās un caurulēs, ventilācijas un gaisa kondicionēšanas sistēmu projektēšanai, konvektīvās siltumapmaiņas procesu aprēķinam, u.c. Tās galvenās priekšrocības: spēja strādāt ar plašu grafisko CAD programmu spektru, pietiekami augsta aprēķinu precizitāte, salīdzinoši ātrs risinātājs, iespēja risināt uzdevumus ar nekustīgu un kustīgu cietu robežu, iespēja analizēt nestacionāras gāzu plūsmu ar mainīgu blīvumu un siltuma pārnesi.

**Ceturtajā sadaļā** apskatītas aprēķinu tīkla izveides īpatnības un aprēķina nobeiguma kritēriji. Sākotnējās Navjē-Stoksa vienādojumu sistēmas skaitliskajam atrisinājumam CFDDesign programmā tiek izmantota galīgo elementu metode. Tā ļauj veiksmīgi modelēt kā iekšējās, tā arī ārējās plūsmas ar cietām brīvas formas virsmām izmantojot adaptīvu kustīgo aprēķinu tīklu ievērojot un vizualizējot skrūves rotācijas procesu un vides saspiežamību. Ievērojot rotējošo elementu, piemēram skrūves, klātbūtni, visi uzdevumi tiek aprēķināti kā nestacionāri. Galīgo elementu tīkls parasti tiek izvēlēts nevienmērīgs un tiek sasmalcināts apgabalos ar iespējamu lielu gradientu katram no atkarīgiem mainīgajiem, vai zonās ar ievērojamu cietu ķermeņu virsmas

izliekuma izmaiņu. Lai izveidotu aprēķinu tīklu, aerodinamiskā stenda elektoniskais ģeometriskais modelis tiek ievietots cilindriskā vai taisnstūrveida aprēķinu apgabalā (domēnā). Tiek analizētas domēna formas un izmēru, aprēķinu tīkla izmēru, robežnosacījumu uz cietiem ķermeņiem un domēnu robežām izvēles un uzdošanas īpatnības.

Tiek atzīmēts, ka plūsmu ar cietiem rotējošiem elementiem (piemēram, aerodinamiskās skrūves, sūkņi, gaisa pūtēji, turbīnas, maisītāji u.c) aprēķinu laika samazināšanai jāizveido ne tikai cietā ķermeņa (skrūves) ģeometriskais modelis, bet arī tā saucamais rotējošais reģions (Rotating Region). Rotējošais reģions ir noslēgts apgabals, kas aptver rotējošo ierīci un rotē kopā ar to attiecībā pret uzdotu asi ar tādu pašu ātrumu. Rotējošais reģions nevar būt tiešā kontaktā ar nekustīgo apgabalu (statoru). CFdesign programma nepieļauj cietu ķermeņu robežu izmaiņas, kā arī par kanāla sieniņu un rotējošā reģiona formas izmaiņas aprēķina procesā. Rotācijas reģiona pagrieziena leņķis vienā laika solī tiek aprēķināts pēc sekojošas formulas:  $\Delta\theta = \omega n_m \Delta t$ , kur  $\Delta\theta$  - ķermeņa pagrieziena leņķis (grad),  $n_m$  - apgriezību skaits minūtē (apgr/min),  $\Delta t$  - laika solis (s).

Pie uzdevumu skaitliskā risinājuma, bez visu sākotnejo parametrus uzdosanas tāpat jānosaka kritēriji, uz kā pamata uzdevumu aprēķins tiks pabeigts. Stacionāra uzdevuma risinājums tiek noteikts tā izlīdzināšanās laikā rezultātā.

Tāpēc stacionāriem uzdevumiem galvenais kritērijs ir maksimālais iterāciju skaits, kas jāveic aprēķinā. Tas tiek noteikts katram uzdevumam individuāli un ir atkarīgs no aprēķinu tīkla.

Nestacionāriem uzdevumiem galvenais kritērijs ir uzdevuma risinājuma aprēķina laiks (aprēķina ilgums fiziskajā laikā), kas atkarīgs no plūstošās vides īpašībām un laika perioda, kurā plūsma šķērso aprēķinu apgabalu. Ja, sākot ar kādu laika momentu nestacionāra uzdevuma risinājums izlīdzinās, t.i. izvēlētajam kritērijam kļūst stacionārs vai periodisks, tad pamatojoties uz šī kritērija izpildīšanos, var apgalvot, ka atrisinājums ir sasniegts. Kā kritērijs var tikt izvēlēts viens vai vairāki interesējošie fiziskie parametri, kas grafiku veidā parādās attiecīgajā programmas logā. Ja interesējošā fiziskā parametra vērtība pēdējos 20% no kopējā laika posmu skaita mainās par mazāk nekā 5%, tas tiek uzskatīts par labu konverģences pazīmi.

**Piektajā sadaļā** tiek apskatītas datu vizualizācijas, kā arī datoreksperimentu rezultātu apstrādes un verifikācijas metodikas.

Atšķirībā no fiziskā eksperimenta, kurā jāiegūst tikai fizikālo parametru vērtības, kas tiek izmērītas noteiktos punktiem ar speciāliem sensoriem, datoreksperimentam piemīt daudz lielākas iespējas. Datoreksperimentā vienlaicīgi var iegūt ne tikai pētāmo parametru skaitliskās vērtības,

bet arī tās vizualizēt divu un trīs dimensiju grafiku vai krāsu attēlu, kā arī plūsmas līniju, kustības trajektoriju u.c. veidā. Šos datus var iegūt jebkurā punktā, uz līnijām, virsmām vai izdalītos tilpumos, kas izvietoti aprēķinu domēnā. Plūsmas parametru vizualizācija virknē gadījumu ļauj noteikt plūsmas raksturīgās fizikālās īpatnības (atrašanās zonu formu, intensīvas virpuļu zonas u.c.), ko savukārt ir salīdzinoši sarežģīti noteikt fiziskajā eksperimentā.

Tādēļ datoreksperimentā veiksmīgai iegūto aprēķina rezultātu analīzei jāizveido aprēķinu datu vizualizācijas metodika, kas ņem vērā apskatāmās uzdevumu klases raksturīgās īpatnības. Nodaļā apskatītas un analizētas dažādas rezultātus pasniegšanas un interpretācijas metodes, kas tika izmantotas konkrētu uzdevumu risinājumā.

*Nodaļas pēdējā sadaļā* noformulēti uzdevuma risinājuma, kas iegūts ar aprēķinu metodikas palīdzību, ticamības un apstiprināšanas (verifikācijas) kritēriji, kas summējas no diviem novērtējumiem:

- fizikālās parādības matemātiskajam modelim atbilstošā matemātiskā uzdevuma risinājuma precizitātes novērtējuma;
- matemātiskā modeļa aprēķinu metodikā izmantotā fizikālā procesa modelēšanas precizitātes novērtējuma.

Matemātiskā uzdevuma risinājuma precizitāti nosaka izmantojot matemātiskās metodes, neatkarīgi no matemātiskā modeļa adekvātuma aprēķinātajai fiziskālajai parādībai. Šīs precizitātes novērtējums pamatā ir uzdevuma aprēķina tīkla konverģences analīze, pamatojoties uz risinājumiem, kas iegūti izmantojot dažādus tīklus.

Fizikālā procesa modelēšanas precizitātes novērtējums tiek veikts pielietojot aprēķinu metodikā izmantoto matemātisko modeli. Šim mērķim iegūtais risinājums tiek salīdzināts ar pieejamiem eksperimentālajiem datiem, (ņemot vērā to kļūdu, kas summējas no mērījumu kļūdas un eksperimenta tīrības kļūdas, t.i. parazītefektu neesamības). Līdz ar eksperimentālo datu ierobežoto apjomu, šādai pārbaudei tos ir ieteicams izvēlēties maksimāli tuvu risināmajam inženieruzdevumam. Virknē gadījumu papildus uzstādītajam uzdevumam ir nepieciešams atrisināt papildu testa uzdevumu, kuram eksistē tādi eksperimentālie dati, ar ko iespējams salīdzināt aprēķinos iegūtos datus. Tas palielina inženieruzdevuma skaitliskā risinājuma precizitātes novērtējuma ticamību.

## 2. NODALA

### **AERODINAMISKĀ STENDA CILVĒKA BRĪVAJAM LIDOJUMAM GALVENO ELEMENTU RAKSTURLIELUMU SKAITLISKAIS APRĒĶINS UN OPTIMIZĀCIJA**

Šī nodaļa veltīta pētāmo aerodinamisko stendu galveno elementu ģeometrisko un aerodinamisko parametru datormodelēšanas un optimizācijas metodiku izstrādei. Metodikas ar SolidWorks un CFDdesign programmu pakešu palīdzību ļauj izveidot dažādas trīsdimensiju ģeometrisko modeļu modifikācijas un veikt to virtuālo appūšanu, tādējādi iegūstot izstrādājamo stendu optimālus ģeometriskos un aerodinamiskos parametrus. Izmantojot izstrādātās metodikām viņam ir jāspēj salīdzinoši ātri iegūt rezultātus, kas apmierinoši sakrīt ar naturālā eksperimenta datiem.

Aerodinamiskā skrūve ir pētāmo liela diametra brīvās vertikālās strūklas ģeneratoru galvenais elements. Datormodelēšanas metodika, kas ietver skrūves skaitliskā ģeometriskā modeļa izveidi un tās aerodinamisko raksturlielumu aprēķināšanas procesu, ir lielā mērā atkarīga no stenda elementu ģeometriskajiem parametriem un tā komplektēšanas shēmas. Šajā nodaļā apskatīti vairāki atsevišķu galveno elementu aprēķinu metodiku varianti, kas izdalīti atsevišķās nodaļās. Balstoties uz šiem metodiku variantiem var tikt sakombinēti un izanalizēti dažādu tipu aerodinamisko stendu raksturlielumi. Šajā nodaļā ietvertas sekojošas sadaļas:

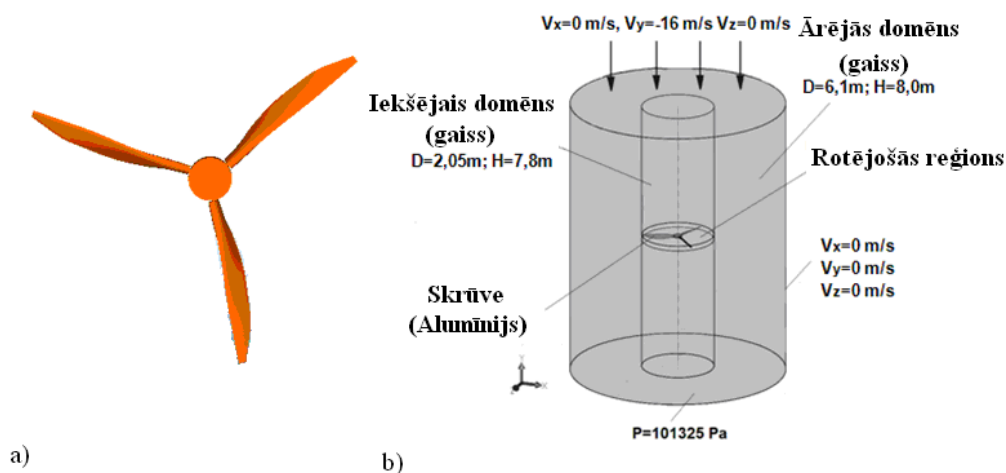
- Skrūves ar zināmu ģeometriju aerodinamisko raksturlielumu aprēķina metodika un skaitliskā verifikācija;
- Atjaunojamās skrūves aerodinamisko raksturlielumu vienkāršotas datormodelēšanas metodika;
- Sistēmas: ieplūdes ierīce – skrūve - gāzdinamiskais kanāls datormodelēšanas metodika un salīdzinājums ar eksperimentu;
- Izlīdzinošā aparāta aerodinamisko parametru datormodelēšana.

Iepriekšējā nodaļā piedāvātās skrūves ar zināmu virsmas ģeometriju izveides metodikas un tās aerodinamisko raksturlielumo aerodinamiskās aprēķinu ar SolidWorks un CFdesign programmu palīdzību iespējamības pamatošanai, tika izvēlēta trīs lāpstiņu Clark Y tipa skrūve ar zināmiem ģeometriskiem un eksperimentāliem aerodinamiskajiem raksturlielumiem.

Fiziskais eksperiments (aprakstīts darbos Barnes W. Mc Cormick, Aerodynamic, Aeronautics and Flight mechanics, John Wiley & Sons.inc., 1995, un Кравец А.С. „Характеристики воздушных винтов.” Государственное издательство оборонной промышленности) tika veikts aerodinamiskajā caurulē ar darba zonas diametru 6,1m pie plūsmas ātrumiem  $v=0-44,4\text{m/s}$ . Eksperimentālajā iekārtā skrūve uzstādīta uz motogondolas, kas nostiprināta uz spārna daļas. Motogondolas pie spārna daļas ģeometriskie parametri darbā nav norādīti.

Datoreksperimentā SolidWorks programmā pamatojoties uz zināmiem ģeometriskajiem data tika izveidots skrūves ar Clark Y tipa profilu trīsdimensiju ģeometriskais modelis (att. 2.1.a), ar skrūves diametru  $D = 2.0 \text{ m}$ , rumbas diametru -  $0.24 \text{ m}$ , skrūves uzstādīšanas leņķi  $\varphi = 30^\circ$  un relatīvo rādiusu  $r = 0.75$ . Datoreksperimentā skrūves relatīvā kāpe  $\lambda = \frac{V}{n_s \cdot D}$  ( $n_s$ - skrūves apgriezīnu skaits sekundē) tika izvēlēts diapazonā  $V = 0-22 \text{ m/s}$ ,  $n_s = 10-11 \text{ apgr/s}$ . Atšķirībā no fiziskās eksperimentālās iekārtas, skrūves aprēķina modelī nebja motogondolas.

Attēlā 2.1.b. skrūvei ar  $D = 2,0\text{m}$  aerodinamiskajā caurulē parādīts domēna piemērs, kas ir cilindrs ar diametru 6.1m un augstumu 8m. Lai uzlabotu aprēķinu precizitāti strūklā aiz skrūves, sākotnējā domēna iekšpusē novietots cilindrisks iekšējais domēns ar diametru 2.05m. Aprēķinu tīkla izmēru iekšējā domēnā izvēlas ievērojami mazāku kā ārējā, kas ļauj ievērojami samazināt kopējo aprēķina šūnu skaitu, aprēķina laiku un nepieciešamo datora operatīvo atmiņu.



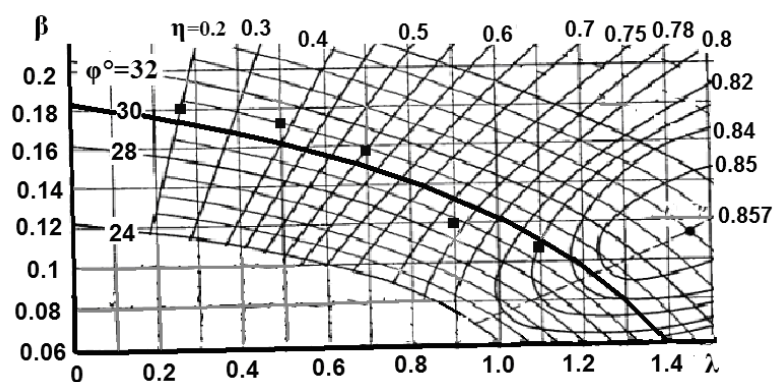
2.1. att. Trīs lāpstiņu skrūves modeļi: a)- skrūves ģeometriskais datormodelis; b)- skrūves aprēķinu datormodelis aerodinamiskajā caurulē.

Domēna ieejā un tā izejā tiek uzdoti atiecīgi ātruma un spiediena robežnosacījumi. Uz domēna (aerodinamiskās caurules) sānu virsmas tiek automātiski uzdots viskoza šķidruma pielipšanas nosacījums ( $V_x = V_y = V_z = 0$ ).

Skrūve un skrūves rumba tiek modelēti uzdotot cietu materiālu (siltumapmaiņas neesamības dēļ materiāla fizikālās īpašības nav būtiskas). Viss pārējais domēna iekšpusē ir vāji saspiežams gaiss. Skrūve ir ievietota rotējošā reģionā slēgta cilindriska apgabala veidā, kura ass sakrīt ar skrūves rotācijas asi.

CFdesign aprēķinu programma ļauj noteikt skrūves aerodinamiskās īpašības, detalizētu applūsmības attēlu, kā arī vilces spēku un griezes momentu uz skrūves vārpstas, uz kā pamata tiek aprēķināti relatīvie vilces  $\alpha$ , jaudas  $\beta$  un lietderības  $\eta$  koeficienti.

Kā aprakstīts pirmajā nodaļā, nestacionāro diferenciālo Navjē - Stoksa vienādojumu diskretizācijai un iegūtās algebrisko vienādojumu sistēmas risinājumam CFdesign programmā tiek izmantota galīgo elementu metode. Atkarībā no uzdevuma tipa, apmierinošai rezultātu precizitātei šajā darbā bija nepieciešams aptuveni 800 000 – 1 200 000 šķidro un cieto elementu.

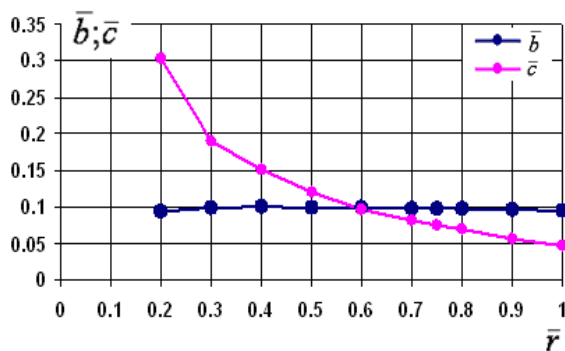


2.2. att. Atkarības  $\beta(\lambda)$  un  $\eta(\lambda)$  trīs lāpstiņu skrūvei pie uzstādīšanas leņķa  $\varphi = 30^\circ$  (punkti – aprēķins, līnijas – eksperiments)

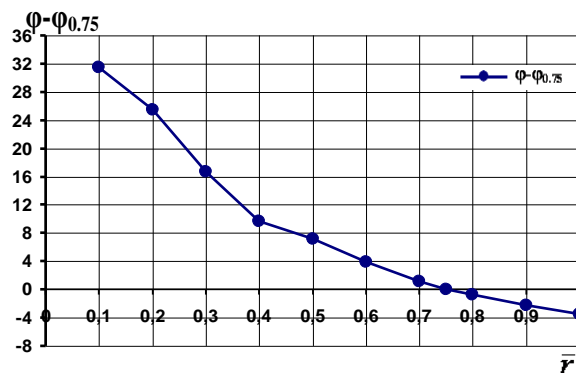
Attēlā 2.2. parādīti jaudas koeficienta  $\beta$  atkarībā no relatīvās kāpēs  $\lambda$  pie uzstādīšanas leņķa  $\varphi = 30^\circ$  skaitlisko aprēķinu rezultāti. Turpat norādīti arī naturālā eksperimenta dati attiecībā uz  $\beta$  un  $\eta$ . No šiem grafikiem var secināt, ka gadījumam kad aprēķinos netiek ņemtas vērā motogondolas un spārna daļas ietekme, aprēķinātie dati apmierinoši sakrīt ar eksperimenta datiem ar precizitāti 5-10%. Iegūtie rezultāti apstiprina SolidWorks un CFdesign programmu

izmantošanas iespējamību aviācijas skrūvju ar zināmu ģeometriju aerodinamisko raksturlielumu skaitliskajiem aprēķiniem.

Nākamā aprēķinu metodika tika izstrādāta gadījumam, kad esošajai aerodinamiskajai skrūvei nav pieejamu datu par tās aerodinamiskajām īpašībām, kā arī detalizētu lāpstiņas ģeometrisko raksturlielumu. Šāda situācija ir iespējama gadījumā, kad nepieciešams atjaunot bojātu skrūvi vai izveidot zināmas skrūves aptuvenu analogu. Attiecībā uz fiziski eksistējošu skrūves lāpstiņu, mūsdienu tehnoloģijas ļauj pietiekami ātri izmantojot 3D skenēšanas metodes, iegūt nepieciešamo lāpstiņas šķēlumu skaitu tādā formā, kas piemērota, lai izveidotu skrūves trīsdimensiju datormodeli. SolidWorks programmā izveidotā atjaunojamās skrūves konstruēšanas metodika pēc zināmas šķēluma ģeometrijas tika apskatīta pirmajā nodaļā. p.1.3. Atjaunojamās skrūves ģeometriskie raksturlielumi parādīti att. 2.3. Skrūve ( $D = 1,8$  m un skrūves rumbas  $D = 0,228$  m), ir paredzēta uzstādīšanai atvērta tipa naturālajā aerodinamiskajā caurulē, kas rada brīvu vertikālu gaisa strūklu. Izveidotais piecu lāpstiņu skrūves ar  $D = 1,8$  m un skrūves rumbas  $D = 0,228$  m datormodelis (2.4.a. att.) ļauj aprēķināt tās aerodinamiskos raksturlielumus.



a)



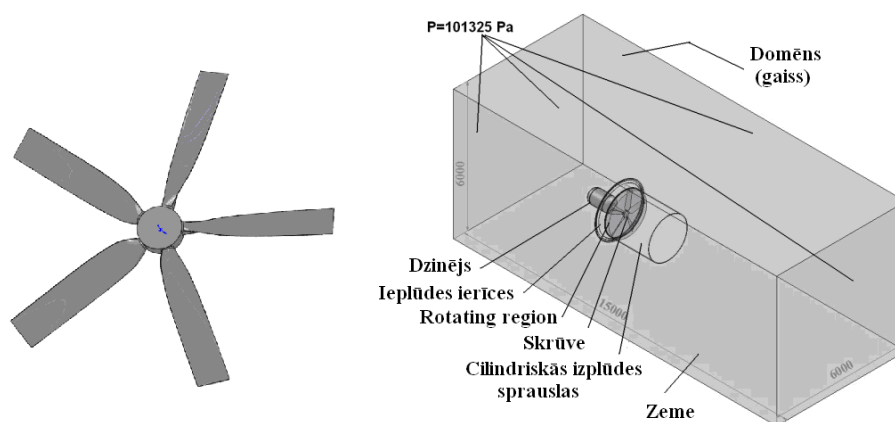
b)

2.3.att. Atjaunotās skrūves lāpstiņas ģeometriskie raksturlielumi a) Relatīvā horda un relatīvais biezums; b) Lāpstiņas savērpe

Šajā sadaļā ir apskatīts atjaunojamās skrūves aerodinamisko raksturlielumu modelēšanas process, izmantojot vienkāršotu aerodinamiskās skrūves vai ventilatora diskveida modeli.

Lai pamatotu iespēju aizvietot skrūvi ar diska modeli, vispirms tika pētītas strūklas veidošanās īpatnības aiz skrūves ar ieplūdes ierīci un īsu cilindrisku izplūdes sprauslu, kas novietotas nekustīgā gaisa vidē. Šī starpuzdevuma aprēķinu modelis parādīts att.2.4.b. Dzinēja,

skrūves, ieplūdes ierīces un cilindriskās izplūdes sprauslas modeļi, kas tiek modelēti kā cieti ķermeņi, novietoti taisnstūrveida domēnā (domēna izmēri 15x6x6 m). Domēna iekšpusē vispārējā gadījumā tiek uzdots vāji saspiežams gaiss, bet uz sānu sienām kā arī domēna ieplūdē un izplūdē - atmosfēras spiediens  $p = 101325\text{Pa}$ . Uz apakšējā domēna sienas (zeme) ir uzdots viskoza šķidruma pielipšanas nosacījums ( $V_x = V_y = V_z = 0$ ). Skrūve ievietota rotējošā reģionā, kas kopā ar skrūvi rotē ar ātrumu  $\omega = 2180\text{apgr/min}$ . Skrūves uzstādīšanas leņķis un leņķiskais rotācijas ātrums tika izvēlēti tā lai aptuveni sakristu ar naturālā eksperimentā iegūtajām atbilstošajām vērtībām.



2.4.att. a) Piecu lāpstiņu skrūves ģeometriskais modelis; b) Skrūve īsā kanālā ar ieplūdes ierīci un cilindrisku izplūdes sprauslu.

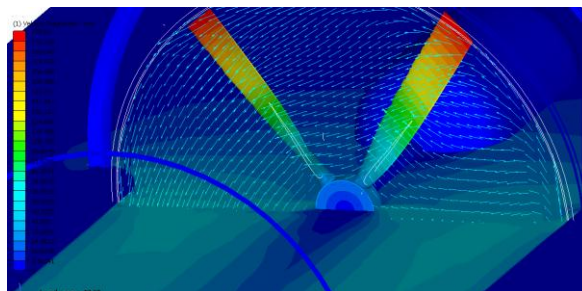
Dotā uzdevuma mērķis - noteikt gaisa caurplūdi, kas plūst caur atjaunotās skrūves plakni, kā arī novērtēt plūsmas savērpī aiz skrūves. Šie dati eksperimentālās iekārtas modelī skrūvi ļauj aptuveni aizstāt ar vienkāršotu iekšējā ventilatora modeli (ventilatora diskveida modeli).

Diskveida modelim ir gaisa caurlaidīga rotējoša diska forma, kas rada plūsmu ar noteikto caurplūdi un var rotēt ar konstantu ātrumu, kas vispārīgā gadījumā ir vienāds ar nulli vai nepārsniedz skrūves rotācijas ātrumu. Vienkāršotā iekšējā ventilatora modeļa parametri, savukārt ir atkarīgi no atjaunotās ģeometrijas precizitātes, lāpstiņas uzstādīšanas leņķa, skrūves rotācijas ātruma un skrūves aerodinamisko raksturlielumu aprēķināšanas precizitātes.

Aizvietojot skrūvi ar iekšējo ventilatoru plūsmas parametru aprēķina uzdevums saturs lēnus un tepā apjomīgus procesus, kas būtiski samazinās aprēķina laiku.

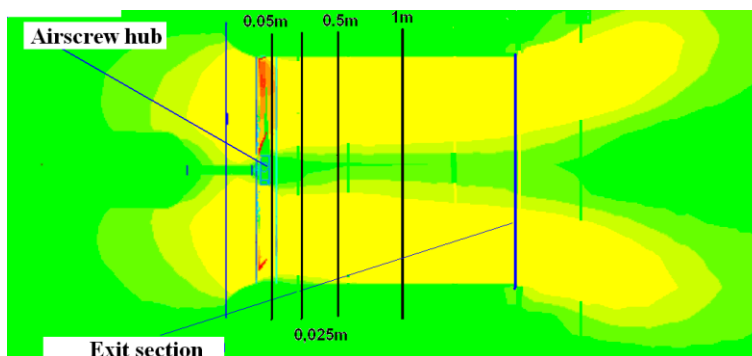
Zemāk parādīti aksiālās un lineārās aploces ātrumu komponentu aiz skrūves aprēķinu rezultāti, kas nepieciešami aptuvenai iekšējā ventilatora modeļa parametru noteikšanai: gaisa tilpuma caurplūdei  $Q \text{ m}^3/\text{s}$  un plūsmas rotācijas ātrumam aiz skrūves  $n_s \text{ apgr/min}$ . Kvalitatīvs

plūsmas attēls apgabalā aiz skrūves (šķēluma horizontālajā plaknē) un plūsmas savērpes rotācijas plaknes tuvumā (vertikālajā plaknē) parādīts 2.5. att.



2.5. att. Plūsmas attēls apgabalā aiz skrūves (šķēluma horizontālajā plaknē) un plūsmas savērpe rotācijas plaknes tuvumā (vertikālajā plaknē).

Redzams, ka aiz skrūves cilindriskās rumbas veidojas reversās plūsmas zona, kuras apjoms strauji samazinās lejup pa plūsmu. Jau attālumā  $x > 0.125D$  no rumbas uz garenvirziena ātruma  $V_x$  profila veidojas ātruma kritums skrūves ass tuvumā, kas liecina ka apskatāmajā šķēlumā nav reverso plūsmu zonas (2.6. att.).





a)

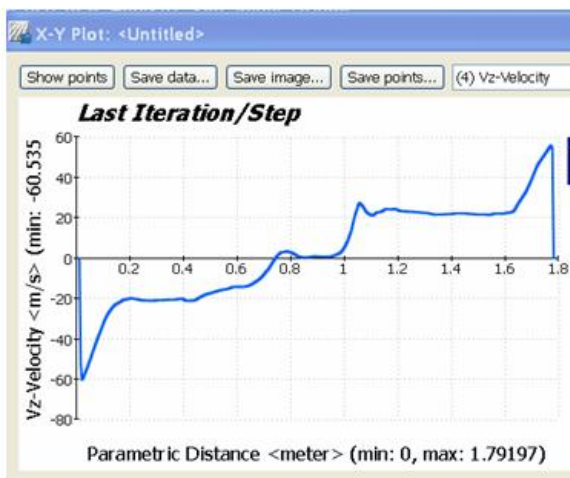


b)

2.6. att. Garenvirziena ātruma  $V_x$  (y) atkarība strūklas šķēlumā:

a)  $x = 0.05\text{m} \approx 0.025D$ , b)  $x = 1\text{m} \approx 0.5D$ .

Vispārīgā gadījumā plūsmai aiz skrūves ir mainīga savērpe. Tās izmaiņas raksturs gar lāpstiņas rādiusu parādīts att.2.7. Jāatzīmē, ka skrūves ass tuvumā attālumā  $0 < r < 0.2R$  plūsmas tangenciālais ātrums  $V_z$  pieaug gar lāpstiņas rādiusu aptuveni saskaņā ar cieta ķermeņa likumu, tad attālumā  $0.2R < r < 0.7R$  tas ir aptuveni pastāvīgs un pie  $r > 0.7R$  tuvojoties sprauslas cilindriskajai sieniņai pieaug gandrīz lineāri (att.2.7.a). Attālumā virs  $x > 0.5D$  no skrūves rotācijas plaknes plūsmas rotācijas raksturs ir tuvs cieta ķermeņa rotācijai (att. 2.7.b).



a)



b)

2.7. att. Plūsmas rotācijas lineārā ātruma izmaiņas raksturs gar lāpstiņas rādiusu

a) -  $x = 0.05\text{m} \approx 0.025D$ , b)-  $x = 1\text{m} \approx 0.5D$ .

Nemot vērā minētos datus un lai samazinātu eksperimentālās iekārtas ar ieplūdes šķēluma laukumu  $2.03\text{m}^2$  moduļa (2.8.b. att.) gāzdinamisko parametru skaitlisko aprēķinu laiku, uzdotā gaisa izplūdes vidējā ātruma  $V_Y \approx 60\text{ m/s}$  iegūšanai, piecu lāpstiņu skrūvi ar diametru  $D = 1,8\text{ m}$  var aizstāt ar iekšējā ventilatora ar  $D = 1,8$  un tilpuma caurplūdi  $Q = 120\text{ m}^3/\text{s}$  aptuveno modeli. Šis modelis ir disks, kura diametrs ir vienāds ar skrūves diametru un kas ģenerē plūsmu ar uzdoto tilpuma caurplūdi, kā arī plūsmas savērpi ventilatora modeļa plaknē.

Sistemātisku aprēķinu rezultātu analīze parādīja, ka plūsmas savērpei ir neliela ietekme uz vidējā ātruma vērtību iekārtas izplūdes šķēlumā, tāpēc lai salīdzinātu skaitlisko aprēķinu un eksperimentu rezultātus tika izvēlēts fiksēts ventilatora modeļa apgriezību skaits,  $n_b = 900$  apgr/min, kas atbilst skrūves slīdei  $s \approx 0,36 - 0,4$  pie eksperimentālās iekārtas skrūves apgriezību skaita diapazona  $n = 2180 - 2450$  apgr/min (slīde  $s$  - plūsmas rotācijas leņķiskā ātruma attiecība pret skrūves leņķisko ātrumu).

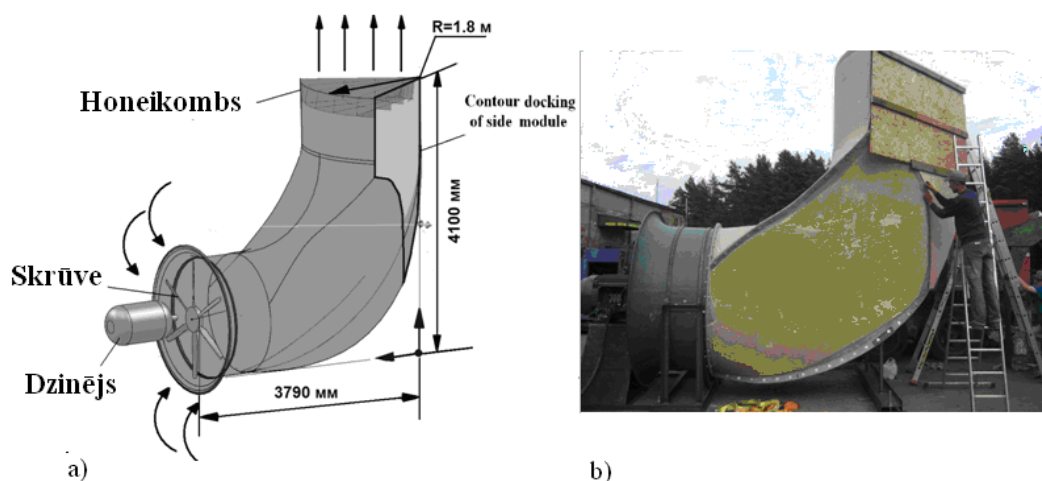
Paaugstināta slīdes  $s$  vērtība ir izvēlēta ar mērķi eksperimentāli apstiprināt tās vājo ietekmi uz pētāmās iekārtas vidējotiem galvenajiem parametriem. Jāatzīmē, ka šis nosacījums neizpildās gadījumā kad skrūves tuvumā savērpes novēršanai uzstādīta izlīdzinošā ierīce, uz kā lāpstiņām pie ārpus aprēķinu režīma iespējama plūsmas atrašanās, kā rezultātā samazinās izplūdes ātrums.

Nākamajā nodaļā aplūkota reāla aerodinamiskā stenda ar diskveida aerodinamiskās skrūves modeli simetriskā elementa datormodelēšanas metodika. Virszemes aerodinamiskā iekārta ir atvērta aerodinamiskā caurule, kas paredzēta liela diametra brīvās vertikālās gaisa strūkļas radīšanai. Caurule sastāv no pieciem vienādiem savstarpēji pieguļošiem moduļiem, katram no kuriem kā ventilators tiek izmantots iepriekš aprakstītā piecu lāpstiņu skrūve. Viena šāda moduļa kopskats ar gabarītizmēriem parādīts 2.8.a. att.

Pirms skrūves atrodas profilēta ieplūdes ierīce, bet aiz tās – sarežģītas formas gaisa kanāls, kas pagriež plūsmu pa  $90^\circ$ . Elektromotors, kas uzstādīts pirms ieplūdes ierīces, griež skrūvi ar ātrumu  $2180$  apgr/min. Vertikālais strūkļas izplūdes ātrums no iekārtas  $\sim 50-60\text{ m/sec}$ .

Uzdevuma, par apskatāmās iekārtas radītās gaisa strūkļas izveidi skaitliskā risinājuma īpatnība ir sekojoša. Ātri rotējošas piecu lāpstiņu skrūves tuvumā laika solim ir jābūt vienādam ar skrūves rotācijas perioda simtdaļām (t.i. sekundes tūkstošdaļām) un telpiskā galīgo elementu tīkla raksturīgajam izmēram - milimetriem. Plūsmas formēšanās process gaisa kanālā un brīvajā

strūklā ir daudz lēnāks laikā un apjomīgāks telpā, tāpēc nepieciešamais laika solis ir sekundes desmitdaļas vai vairāk, un galīgo starpību tīkla izmērs - decimetri un metri.



2.8. att. Aerodinamiskās caurules ar ventilatoru un dzinēju modulis,

a) Datormodelis; b) Naturālais objekts

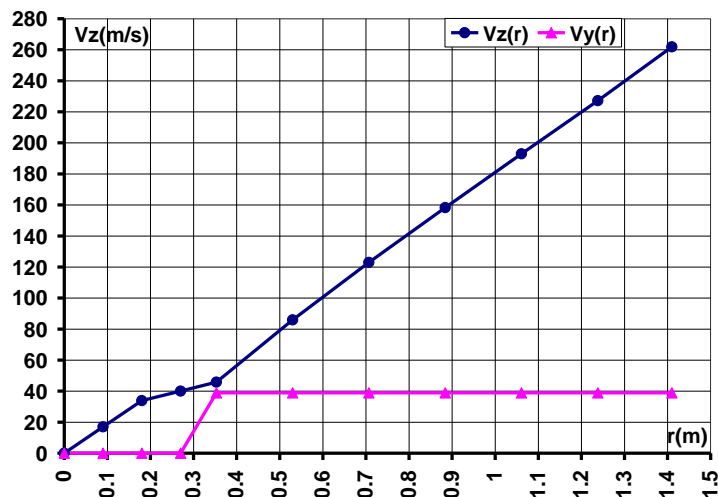
Tāpat jāatzīmē, ka plūsmas īpatnības skrūves tuvumā samērā vāji ietekmē izplūstošās brīvas strūklas parametrus salīdzinot ar skrūves integrālajiem raksturlielumiem - plūsmas caurplūdi un spiedienu aiz skrūves.

Nemot vērā minētās īpatnības, skaitliskā aprēķina laiks, kas nepieciešams plūsmas veidošanās aiz skrūves, plūsmas kustības kanālā un brīvās vertikālās gaisa strūklas izplūšanas uzdevumu atrisināšanai var būt ļoti liels un sasniegt vairākas diennaktis. (pie datora operatīvās atmiņas  $\geq 3,5$  GB).

Šajā darba posma mērķis ir salīdzināti eksperimentālās iekārtas moduļa ar diskveida skrūves modeli gāzdinamisko parametru skaitliskā aprēķina rezultātus ar vertikālā ātruma sadalījuma naturālo mērījumu rezultātiem iekārtas izplūdes šķēlumā. Modulis satur piecu lāpstiņu skrūvi ar atjaunotiem skrūves ģeometriskajiem un aerodinamiskajiem raksturlielumiem. Mērījumi tika veikti izmantojot 2m garu mērstieni, uz kura tika uzstādīti astoņi gaisa spiediena uztvērēji ar soli 0,2 m. Mērstienis tika uzstādīts pa rādiusu iekārtas izplūdes šķēluma simetrijas sektora plaknē.

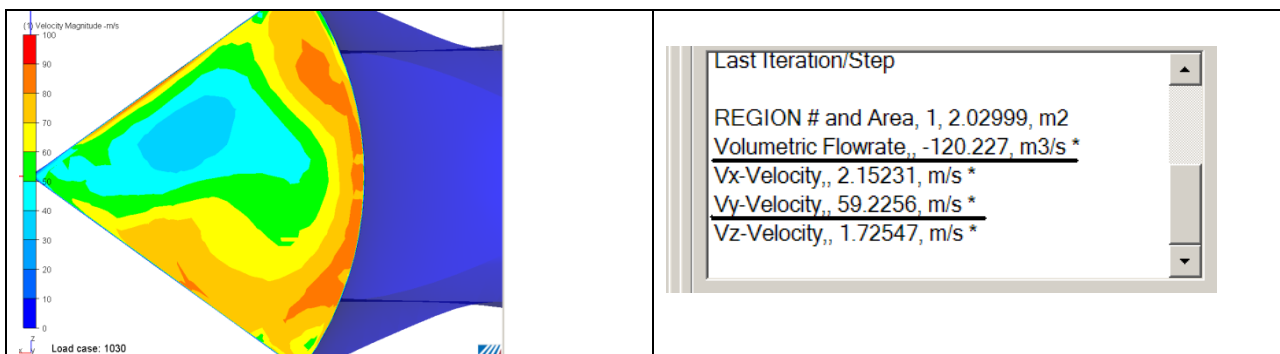
Skaitliskajā aprēķinā izmantots diskveida skrūves modelis. Skrūves un modeļa diametri ir vienādi. Diskveida modelis ģenerē plūsmu ar uzdoto tilpuma caurplūdi, kuru nosaka plūsmas ātrumu  $V_y$  sadalījums pa rādiusu pret normali disku plaknei, kā arī plūsmas savērpe modeļa

plaknē. Plūsmas ātruma  $V_Y$  un plūsmas lineārā rotācijas ātruma  $V_z$  izmaiņas gar diskveida modeļa rādiusu (plūsmas savērpe) apskatāmajam uzdevumam parādītas 2.9. att..



2.9. att. Plūsmas vertikālā ātruma  $V_y$  (-▲-) un plūsmas lineārā rotācijas ātruma gar diskveida modeļa rādiusu  $V_z$  (-●-) izmaiņu raksturs.

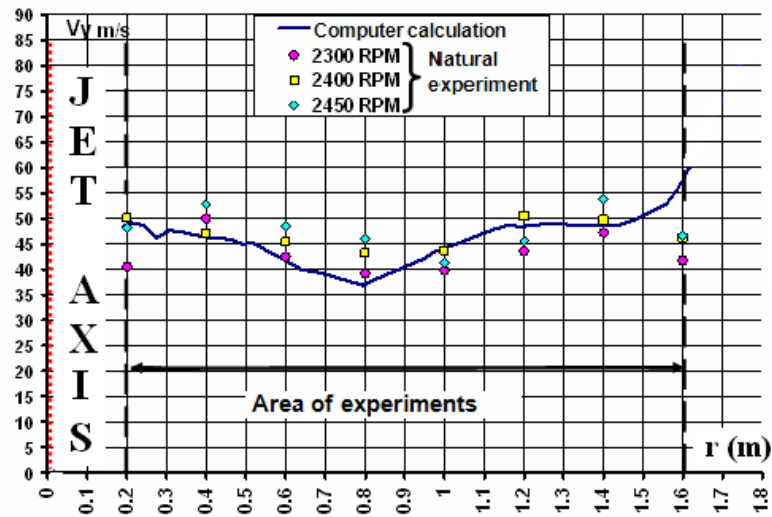
Jāatzīmē, ka plūsmas un ātruma  $V_y(r)$  sadalījuma attēls iekārtā kopumā, kā arī tās izejas šķēlumā nav simetrisks (skat. 2.10.a. att.), tāpēc vidējais vertikālais ātrums izejas šķēluma simetrijas plaknē 2.11. att.ir  $\approx 47$  m/s. Tajā pat laikā vidējais vertikālais ātrums visā izejas šķēlumā ir  $\approx 60$  m/s, ko apstiprina aprēķinu rezultāti CFdesign programmā, kas ņem vērā nevienmērīgo  $V_y(r)$  sadalījumu šķēlumā (skat. 2.10.b. att.).



2.10.att. a) Ātruma  $V_y(r)$  sadalījuma eksperimentālās iekārtas datormodeļa izejas šķēlumā attēls;

b) Vidējo pa šķēlumu parametru aprēķina rezultāti CFdesign programmā

Aprēķinu un mērījumu rezultāti parādīti 2.11. att., no kā var secināt, ka aprēķinu dati apmierinoši sakrīt ar eksperimentu rezultātiem.



2.11. att. Plūsmas vertikālā ātruma  $V_y(r)$  eksperimentālās iekārtas moduļa izejas šķēlumā skaitlisko aprēķinu un eksperimentu rezultātu salīdzinājums

### 3. NODALA

## **AERODINAMISKO STENDU, KAS PAREDZĒTI CILVĒKA BRĪVAJAM LIDOJUMAM, PARAMETRU DATORMODELĒŠANA UN OPTIMIZĀCIJA**

Šajā nodaļā parādīti aerodinamisko iekārtu dažādu modifikāciju trīsdimensiju datormodeļu aerodinamisko parametru datormodelēšanas un skaitliskā aprēķina metodiku izstrādes rezultāti. Metodiku izstrādes mērķis bija veikt iekārtu modeļu optimizāciju (samazināt izmērus un jaudas patēriņu, vienlaikus saglabājot gaisa plūsmas kvalitātes prasības pie uzdotā apgriezīgu skaita strūklas darba zonā).

#### ***Nodaļas galvenie uzdevumi:***

- Izstrādāt iekārtu ar gaisa strūklas ģeneratoru trīsdimensiju datormodeļu aerodinamisko parametru datormodelēšanas un skaitliskā aprēķina metodikas ar mērķi veikt to optimizāciju.
- Optimizēt vienu no liela diametra vertikālās gaisa strūklas ģenerēšanas aerodinamiskā stenda projektiem.

➤ Izstrādāt sarežģītu aerodinamisko iekārtu liela diametra vertikālās gaisa strūkļas ar uzdotiem parametriem ģenerēšanai, kas vispārīgā gadījumā satur ventilatoru (vai aerodinamisko skrūvju) sistēmu, gāzdinamikos kanālus un izlīdzinošās ierīces, datormodelēšanas, kā arī ģeometrisko un aerodinamisko parametru analīzes metodikas.

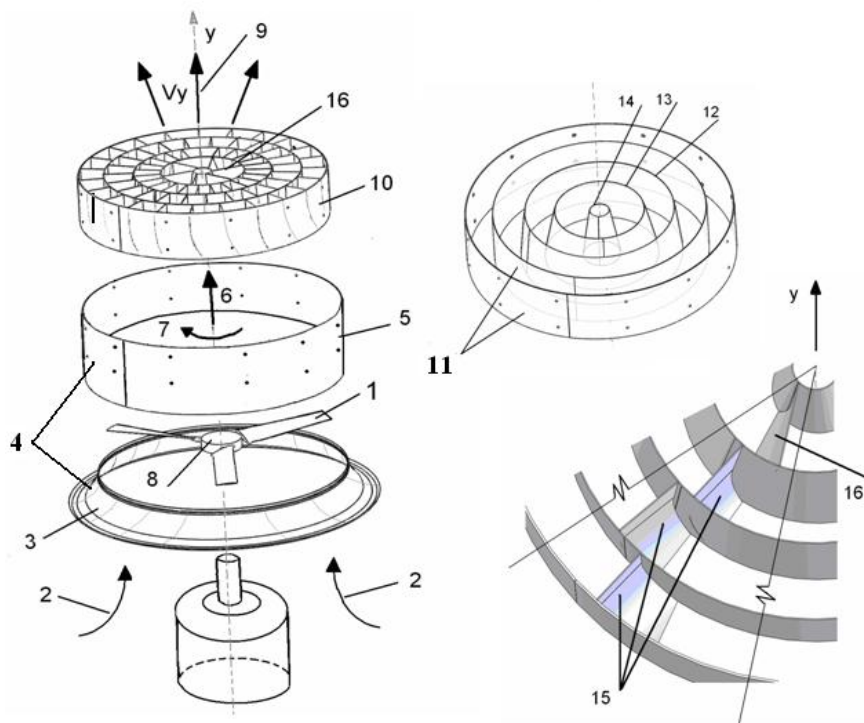
Šīs nodaļas pirmajā sadaļā aplūkots vertikālās gaisa strūkļas ģenerators - atvērta tipa iekārtas cilvēka lidojuma apstākļu nodrošināšanai vertikālajā gaisa plūsmā galvena elementa - datormodelēšanas un optimizācijas variants. Gaisa strūkļas ģeneratoram jābūt pietiekami universālam, lai tas var tikt izmantots kā atsevišķs modulis stacionārās, izjaucamās un mobilās atvērta tipa aerodinamiskajās iekārtās cilvēka lidojumam vertikālajā gaisa plūsmā.

Daudzu zināmo gaisa strūkļas ģenerēšanas sistēmu trūkumi atvērtās aerodinamiskajās iekārtās ir neracionāla iepriekšminēto elementu konstrukcija un paaugstinātas ekspluatācijas izmaksas lielo plūsmas enerģijas zudumu dēļ kā atsevišķos elementos, tā arī sistēmā kopumā apvienojot elementus vienotā kompleksā neņemot vērā to savstarpējo aerodinamisko mijiedarbību.

Atvērta tipa iekārtu datormodelēšana ar CAD/CAE programmu pakešu palīdzību ļauj izveidot dažādas trīsdimensiju ģeometrisko modeļu modifikācijas un veikt gaisa strūkļas ģeneratoru virtuālo appūšanu iegūstot izstrādājamo aerodinamisko cauruļu optimālus ģeometriskos un aerodinamiskos parametrus pie zemām materiālajām izmaksām.

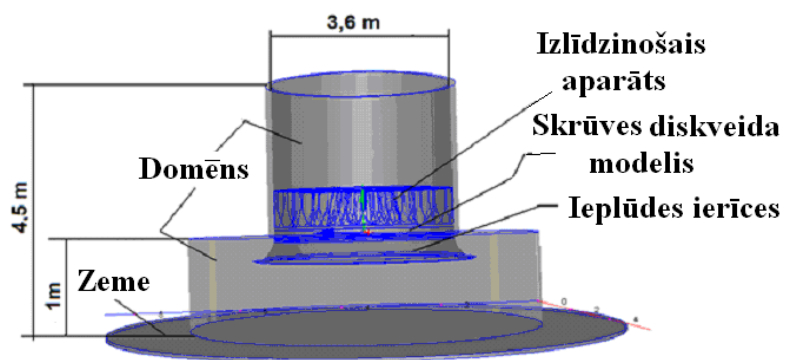
Vertikālās gaisa strūkļas ģenerators ietver visus augstāk minētos atvērta tipa iekārtas elementus un tas darbojas sekojošā veidā (3.1.att.). Rotējoša skrūve 1 rada pirms sevis pazemināta spiediena zonu un veido gaisa plūsmu 2, kas pārvietojas gāzdinamiskā kanāla 4 ieplūdes ierīcē 3, kā cilindriskā daļa piekļaujas ieplūdes ierīcei 3. Līkļlīnijas formas ieplūdes ierīce 3 formē plūdenu assimetrisku plūsmu bez vietēju plūsmas atrašanās zonu veidošanās un ar zemu enerģijas zudumu koeficientu pirms skrūves. Aerodinamiskā skrūve novietota aiz izplūdes ierīces gāzdinamiskais kanāla 4 cilindriskajā daļā 5. Šāda komplektācija parasti tiek saukta kā „skrūve gredzenā” un paredzēta skrūves efektivitātes paaugstināšanai un enerģijas zudumu samazināšanai ģeneratorā.

Aerodinamiskās skrūves rotācija tiek nodrošināta ar elektrodinēja vai iekšdedzes dzinēja palīdzību, kas savienoti ar skrūves vārpstu tieši vai caur reduktoru . Abos gadījumos dzinējs vai tā reduktors tiek koaksiāli uzstādīti pirms ieejas vai ieejā gāzdinamiskajā kanālā plūsmas zemu ātrumu zonā.



3.1. att. Vertikālās gaisa strūkļas ģeneratora konstrukcijas elementi

Skaitlisko aprēķinu domēna konfigurācija un galīgo elementu aprēķiniem tīkla izveide, ko nosaka atkarībā no pētāmā modeļa formas un gaisa strūkļas, apskatāmajam uzdevumam parādīti 3.2.attēlā.



3.2. att. Gaisa strūkļas ģeneratora ar domēnu aprēķina shēma

Ar mērķi samazināt aprēķina laiku, šajā nodaļā skrūves vietā tika apskatīts skrūves (ventilatora) diskveida modelis.

Zemāk sniegtās rekomendācijas attiecībā uz gaisa strūkļas ģeneratoru konstruēšanu ir dažādu atvērta tipa vertikālās gaisa strūkļas ģeneratoru modeļu skaitlisko aprēķinu rezultātu apkopojums. Aprēķinu galvenais mērķis bija izveidot ģeneratora modeli ar minimālu augstumu pie fiksēta strūkļas diametra izejā no ģeneratora un gaisa plūsmas kvalitātes prasību saglabāšanu ar uzdoto ātruma strūkļas darba zonā. Piedāvājamā gaisa strūkļas ģeneratora konstrukcija ir universāla un paredzēta izmantošanai kā atsevišķs modulis stacionārās, izjaucamās un mobilās atvērta tipa iekārtās cilvēka lidošanai vertikālā gaisa plūsmā.

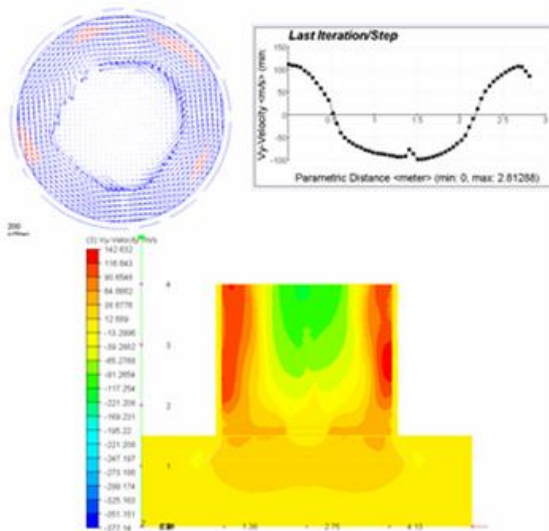
Pamatojoties uz veiktajiem aprēķiniem tika konstatēts, ka ar mērķi vienkāršot konstrukciju, uzlabot strūkļas aerodinamiskās ekspluatācijas īpašības un samazināt ekspluatācijas izmaksas, visi gaisa strūkļu veidojošie ģeneratora elementi ir kompakti jāizvieto viena īsa vertikāla assimetriska gāzdinamiskā kanāla 4 iekšpusē (kanāla vidējais minimālais gabarītaugstums aptuveni vienāds ar skrūves diametru). Ieplūdes ierīci 3 ieteicams izveidot kā plānsienu assimetrisku kanālu ar plūdenu līklīnijas veiduli Bernulli lemniskātas veidā. Aerodinamiskā skrūve jāuzstāda ieplūdes ierīcei pieguļošajā gāzdinamiskā kanāla cilindriskajā daļā uzreiz aiz ieplūdes ierīces cilindriskā kanāla sākuma šķēluma vai nelielā attālumā no tā (ne vairāk kā 0.5 no skrūves diametra). Lai palielinātu skrūves radītās plūsmas ātrumu, spraugai starp skrūves lapstiņu galiem un cilindriskās daļas iekšējo virsmu jābūt ne vairāk kā 2,0-2,5% no skrūves diametra (3.1.att).

Nekustīgs izlīdzinošais aparāts 10 ar augstumu 0.1 – 0.4 no skrūves diametra jāuzstāda nelielā attālumā no tās (ne mazāk kā 30-50 mm un ne vairāk kā 0.5 no skrūves diametra). Izlīdzinošā aparāta augstums ir atkarīgs no skrūves rumbas diametra un gāzdinamiskā kanāla 4 augstuma ierobežojuma (galvenokārt mobilajās iekārtās). Pamatojoties uz dažādu konstrukciju efektivitātes analīzi tika izvēlēts izlīdzinošais aparāts 10, kas izveidots no lokšņu materiāla un kā parādīts 3.zīm. sastāv no vairākiem vienāda augstuma koaksiāli novietotiem gredzeniem 11, nošķeltiem konusiem 12-14 un radiālām liektām lāpstiņām 15, kas izgatavotas no lokšņu materiāla un koaksiāli nostiprinātas cilindriskā kanālā (3.1.att.). Lāpstiņām 15 ir pastāvīga vai rādiusu virzienā mainīga ģeometrisko savērpe, kas atkarīga no skrūves šķēluma savērpes. Lai samazinātu enerģijas zudumus plūsmas ieejā uz lāpstiņu, posmos kas pieguļ to priekšējām šķautnēm, profili veidoti ar līklīnijas formu atstājot lineārus pārējos profilu posmus. Lāpstiņu profilu izliekums priekšējo šķautņu tuvumā ir atkarīgs no skrūves atbilstošā šķēluma aizmugurējās šķautnes noplūstošās plūsmas ātruma vektora virziena un lieluma. Lāpstiņas 15

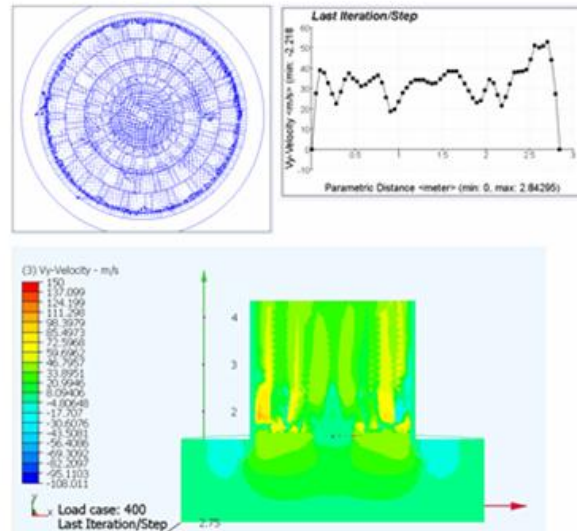
novērš gaisa plūsmas 6 savērpī 7 aiz skrūves 1 un daļēji izlīdzina vertikālā ātruma „krituma” zonu strūklas ass tuvumā. Lai samazinātu pāmērīgu brīvās telpas aizsprostošanu, izlīdzinošās ierīces centrālajā daļā lāpstiņu skaits ir mazāks kā perifērijā. Tās ir uzstādītas starp gredzeniem 11 un konusiem 12, 13 rādiusu nogriežņu virzienā, kas nobīdīti par noteiktu leņķi attiecībā viens pret otru tā, lai tie kopumā izlīdzinošajā ierīcē izvietotos šahveida secībā. Šāds lāpstiņu izvietojums atvieglo izlīdzinošās ierīces montāžu un veicina ģenerators 9 strūklas ātruma profila izlīdzināšanu, kurā neiekļūst aiz skrūves veidojošies makrovirpuļi, jo tie tiek sadalīti mazākos virpuļos kanālos, ko veido lāpstiņas un gredzeni vai konusi.

Ģenerators radītās plūsmas atrašanās zonu fiksācijai aiz skrūves 8 rumbas un ātruma „krituma” samazināšanai strūklas ass tuvumā iztaisnojošās un izlīdzinošās ierīces 10 centrā iepretim skrūves 8 rumbai koaksiāli uzstādīti divi plūsmas virzienā sašaurinošies nošķelti plānsienu konusi 13, 14. Starp konusu sienām nostiprinātas vairākas īsas lāpstiņas 16 ar ģeometrisko vērpi plūsmas savērpšanai starp konusiem pretēji skrūves rotācijas virzienam. Lielo galveno konusu 13 un 14 diametriem jābūt attiecīgi nedaudz lielākiem par skrūves 1 rumbas 8 diametru un lāpstiņu nedarba zonas diametru, kas pieguļ rumbai. Ierīces 10 maksimālais konusu izvērsuma leņķis tiek izvēlēts no plūsmas atrašanās neesamības nosacījumiem gredzenveida konisko kanālu iekšpusē.

Zemāk kā piemērs norādīti trīs lāpstiņu skrūves ar diametru 2,8 m ģenerators diskveida modeļa radītās vertikālās strūklas parametru aprēķinu rezultāti diviem gadījumiem: ar izlīdzinošo ierīci un bez tās. Izlīdzinošās ierīces galvenie parametri: 24 lāpstiņas, kas izvietotas šahveida secībā, ģeometriskā savērpe ir pastāvīga un vienāda ar  $17^\circ$ ; izlīdzinošās ierīces augstums 0.6m. Ierīcei ir trīs konusi ar lielā konusa izvērsuma leņķi  $12^\circ$ , vidējā -  $24^\circ$  un mazā centrālā konusa -  $18^\circ$ . Kopējais ģenerators augstums ir 1.4m. Kvalitatīvs plūsmas savērpes un vertikālā ātruma  $V_Y$  ģenerators šķēluma vertikālajā plaknē sadalījuma, kā arī ātruma profila  $V_Y$  strūklas šķērsgrīzumā 1 m attālumā no ģenerators izejas šķēluma attēlojums parādīts 3.3.a att.



a)

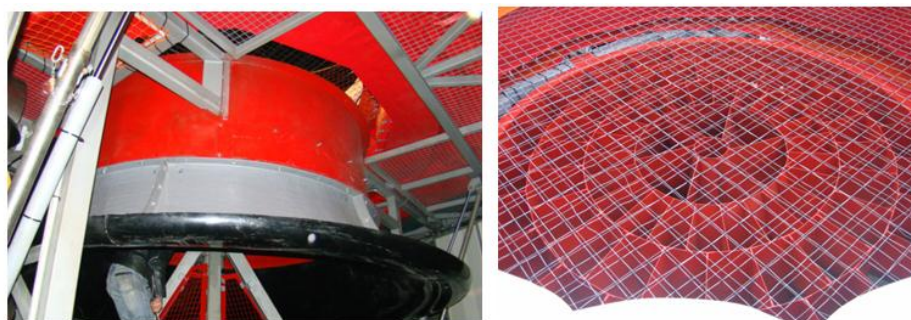


b)

3.3.. att. a) Plūsmas savērpes un gaisa plūsmas ātruma vertikālās komponentes  $V_Y$  attēlojums iekārtai bez izlīdzinošās ierīces; b) Plūsmas savērpes un gaisa plūsmas ātruma vertikālās komponentes  $V_Y$  attēlojums pēc izlīdzinošās ierīces uzstādīšanas

Analogs vertikālā ātruma komponentes ( $V_y$ ) sadalījums ģeneratoram ar izlīdzinošo ierīci parādīts 3.3.b. att. Redzams, ka variantam bez izlīdzinošās ierīces strūklas šķērsriezums lielā daļā novērojams "ātruma kritums", kas nav pieļaujams trenāžieriem, ka simulē ilgstošus lēcienus ar izpletņi, kā arī sporta un izklaides pasākumiem, kuros tiek izmantots cilvēka brīvais lidojums. Izstrādātās izlīdzinošās ierīces uzstādīšana būtiski uzlabo plūsmas vienmērīgumu strūklas šķērsriezumā jau nelielā attālumā no ģenerators izejas. Palielinot šķēlumu izvietojumu augstumu, vertikālā ātruma sadalījums kļūst vienmērīgāks, vienlaikus samazinoties maksimālajam vertikālajam ātrumam uz caurules ass.

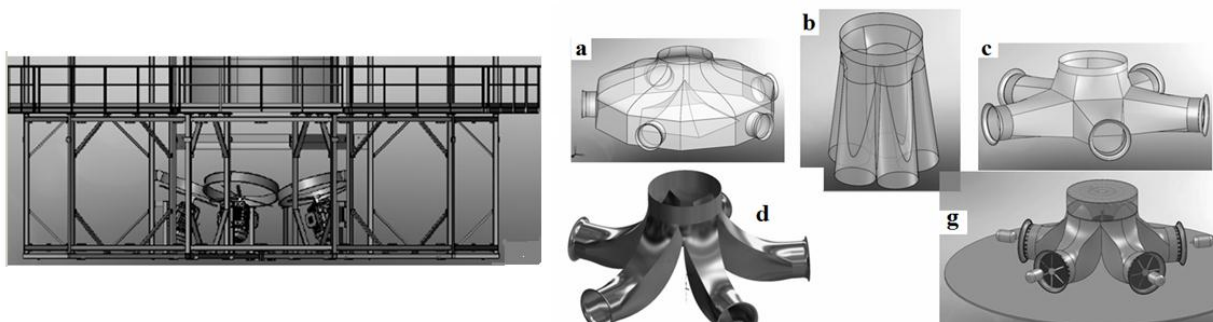
Piedāvātā konstrukcija ar optimizētiem vertikālā gaisa strūkļa ģenerators ģeometriskiem parametriem tika izmantots kā atsevišķs modulis atvērta tipa aerodinamiskajā mobilajā iekārtā cilvēka brīvajam lidojumam. Iekārta tika uzprojektēta un izgatavota Latvijā 3.4.att..



3.4. att. Konstrukcija ar optimizētiem vertikālā gaisa strūkļa ģeneratora ģeometriskiem parametriem

Šīs nodaļas otrajā sadaļā prezentēti reāla liela diametra vertikālās gaisa strūkļa aerodinamiskā stenda datoroptimizācijas rezultāti. Sākotnējais aerodinamiskais stends (3.5.a. att.) sastāvēja no piecām simetriski uzstādītām skrūvēm ar diametru 1.8m, kas novietotas īsu cilindrisku kanālu iekšpusē, kuru asis ir vērsta  $\sim 80^\circ$  leņķī attiecībā pret strūkļa vertikālo asi. Ventilatori rada piecas brīvi saplūstošas strūkļas, kam saskaņā ar projektētāju nodomiem bija jārada nepieciešamā liela diametra vertikālā strūkļa. Naturālie izmēģinājuma eksperimenti pierādīja, ka nepieciešamie vertikālās gaisa strūkļa parametri netika sasniegti.

Datoroptimizācijas procesa gaitā tika izvērtēti vairāki atvērta tipa aerodinamiskā stenda konstrukciju varianti (skat. 3.5.b. att. a–g). Viens no galvenajiem optimizētā projekta nosacījumiem bija esošo aerodinamisko skrūvju, elektromotoru un elektroiekārtu izmantošana. Ģeometrisko un sākotnejo aerodinamisko parametru skaitlisko aprēķinu rezultātu analīze parādīja, ka labākais no 3.5.b. att. a–g redzamajiem izstrādātajiem variantiem ir tas, kurš parādīts g.att.

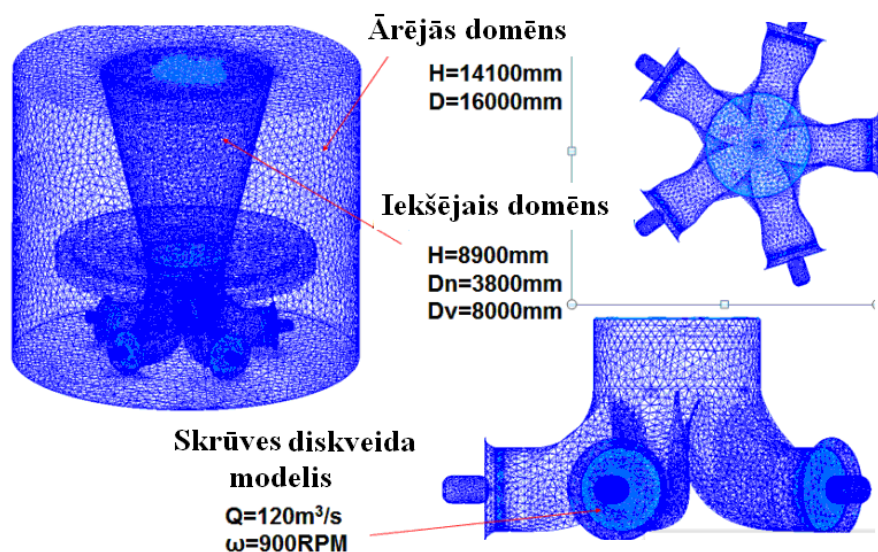


a)

b)

3.5.att. a) Sākotnējais aerodinamiskais stends; b) Aerodinamiskā stenda konstrukciju varianti

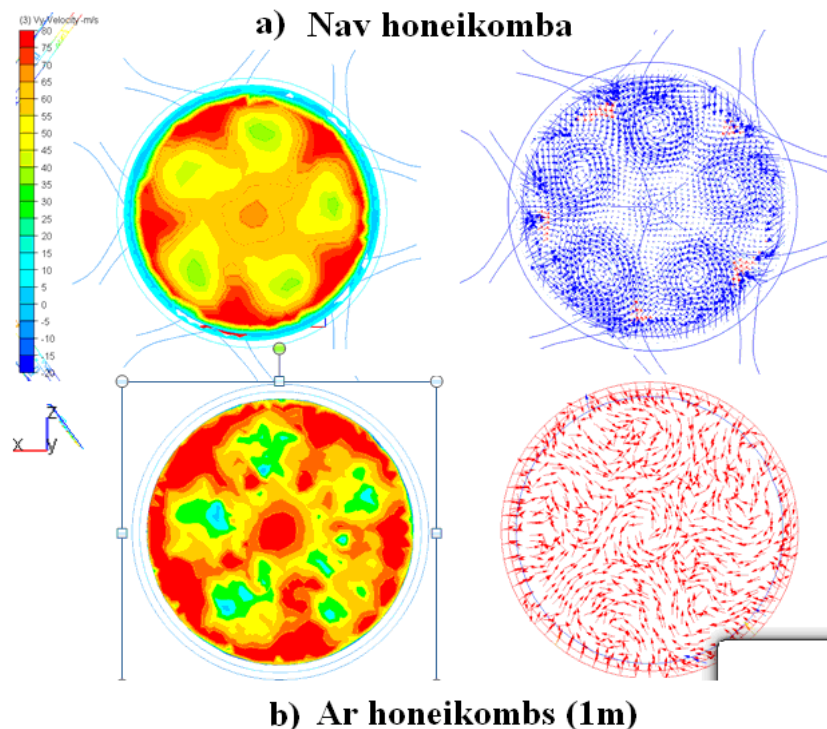
Uzprojektētā un izpētītā aerodinamiskā stenda datormodelī (3.5.g.att.), vertikālo gaisa strūklu rada piecas sērijveida piecu lāpstiņu skrūves ar diametru 1.8m, kuru horizontālās assis ir novietotas simetriski pa perimetru gar tās rādiusu. Katra skrūve ir uzstādīta profilētā gredzenā, kas aiz skrūves pāriet sarežģītā profilētā L-formas trīsdimensiju kanālā, laidenai un nesadalītas plūsmas pagriešanai pa 90° paralēli iekārtas vertikālajai asij. Pabeidzot pagriezienu, visi pieci kanāli tiek apvienoti vienā assimetriskā sprauslā ar diametru 3.6m, kas formē brīvo strūklu. Pilna mēroga optimizētās caurules ar vertikālo strūku galīgo elementu aprēķinu modelis parādīts 3.6.att. Šīs iekārtas simetriskas 1/5 daļas datoraprēķinu rezultāti, kā arī to salīdzinājums ar fiziskā eksperimenta rezultātiem tiek doti 2. nodaļas sadaļā



3.6. att. Pilna mēroga optimizētās caurules ar vertikālo strūku galīgo elementu aprēķinu modelis

Piedāvātā varianta galvenās priekšrocības: zemāki hidrauliskie zudumi gāzdinamiskajā traktā; profilētie kanāli un sajaukšanas kameras neesamība ļauj izvairīties no iespējamiem enerģijas zudumiem, kas saistīti ar skrūvju radīto strūklu sadursmēm, kā rezultātā uzlabojas iekārtas efektivitāte, sistēmas "skrūve profilētā gredzenā" izmantošana, palielina caurplūdi un plūsmas ātrumu un aiz skrūves; konstrukcija nodrošina maksimālo ātrumu ( $\sim 60\text{-}70\text{m/s}$ ) vertikālās strūklas sākuma daļā izejā no gāzdinamiskā kanāla pie uzdotās skrūves ģeometrijas un motora jaudas, kā arī maksimāli plūsmas vienmērīgumu strūklas darba zonā. Aerodinamiskā stenda piedāvātās konstrukcijas īpatnība ir speciālu izlīdzinošo aparātu neesamība aiz skrūvēm, jo tā kā skrūves rotē vienā virzienā, tad makrovirpuļi, kas veidojas aiz tām lielā mērā slāpē viens

otru. Aprēķini parādīja, ka paliekošās plūsmas savērpes izlīdzināšanai un noņemšanai piecu zonu veida pietiek ar gredzenveida honeikomba ar nelielu enerģijas zudumu koeficientu uzstādīšanu pie sprauslas izejas. 3.7. att. parādītie aprēķina rezultāti apstiprina šo secinājumu.



3.7. att. a) Plūsmas savērpes un gaisa plūsmas ātruma vertikālās komponentes  $V_Y$  attēlojums iekārtai bez honeikomba; b) Plūsmas savērpes un gaisa plūsmas ātruma vertikālās komponentes  $V_Y$  attēlojums pēc honeikomba uzstādīšanas

Jāatzīmē, ka optimizētajā projektā datormodelēšana ļāva atrisināt sarežģītus ģeometriskus uzdevumus, kas saistīti ar gaisa kanālu šķēlumu savienojanu ievērojot ierobežojumus, kas saistīti ar leņķu sašaurināšanos un paplašināšanos, pāreju vienmērīgumu un kanālu pagriezieniem, vairāku kanālu savienojanu.

Lai noteiktu aerodinamiskā stenda skrūves lāpstiņu optimālo uzstādīšanas leņķi un novērtētu aerodinamiskā stenda enerģētiskos izdevumus, tika veikta naturālo eksperimentu sērija. Eksperimenti tika veikti iekārtas 1/5 daļai, kas apskatīts otrajā nodaļā, pie dažāda apgriezīgu skaita diapazonā no 2000-2450 apgr/min un skrūves lāpstiņu uzstādīšanas leņķi no  $11^\circ$  -  $16^\circ$ . Ar spiediena sensoru palīdzību tika noteikts pilnais un statiskais spiediens, un pēc tam aprēķināta plūsmas caurplūde. Šie dati tika izmantoti datoraprēķinos, kas apskatīti otrajā nodaļā.

Stends tika izgatavots, samontēts un eksperimentāli izmēģināts Jelgavā (Latvija) 3.8. att.



3.8. att. Atvērta tipa stacionāra iekārta Jelgavā (Latvija)

## **NOBEIGUMS**

### **GALVENIE SECINĀJUMI**

1. Balstoties uz modernajām CAD/CAE inženierprogrammām noformulēta virszemes aerodinamisko stendu (vai atvērta aerodinamisko cauruļu), kas ģenerē liela diametra vertikālu gaisa strūklu, datormodelēšanas un parametru aprēķinu metodika. Šie stendi ir paredzēti cilvēka brīvājam lidojumam vertikālā gaisa plūsmā.
2. Izstrādātas atjaunojamo aviācijas skrūvju aerodinamisko raksturlielumu datormodelēšanas un skaitliskā aprēķina metodikas, kas ļauj iegūt aprēķinu rezultātus, kas ar kļūdu 5 - 10% sakrīt ar zināmiem eksperimentālajiem datiem.
3. Piecu lāpstiņu skrūvei ar atjaunotu ģeometriju, kas tika uzstādīta izprojektētā un izgatavotā eksperimentālās aerodinamiskās iekārtas modulī, veikto naturālo eksperimentu rezultāti apstiprināja gaisa strūklas vertikālā ātruma moduļa izplūdes šķēlumā aprēķināto un eksperimentāli iegūto datu apmierinošu sakrītību.
4. Izstrādāta iegremdētas vertikālās gaisa strūklas, ko ģenerē sistēma "rotējoša aerodinamiskā skrūve gredzenā - izlīdzinošais aparāts ar profilētām lāpstiņām" aerodinamisko parametru datormodelēšanas metodika. Šī metodika paredz iespēju izmainīt skrūves rotācijas frekvenci, ņemt vērā skrūves ģeometrijas ietekmi uz izlīdzinošā aparāta lāpstiņu formu, kā arī citu iekārtas elementu un ierobežojošo sienu ģeometrijas, kā arī zemes ietekmi, uz gaisa plūsmu parametriem un nevienmērīguma pakāpi strūklas darbības zonā.
5. Pamatojoties uz virkni veikto vertikālas gaisa strūklas ģenerēšanas aerodinamisko stendu ģeometrijas optimizācijas aprēķinu, piedāvāta universālā gaisa strūklas generatora konstrukcija,

kas var tikt izmantota kā atsevišķs modulis stacionārās, izjaucamās un mobilās atvērta tipa aerodinamiskās iekārtās cilvēka brīvajam lidojumam vertikālā gaisa plūsmā.

6. Izstrādāta sarežģītu aerodinamisko sistēmu, kas vispārīgā gadījumā satur aerodinamisko skrūvju (ventilatoru), gāzdinamisko kanālu un izlīdzinošo iekārtu sistēmu liela diametra brīvas vertikālas strūklas ar uzdotiem parametriem formēšanai, ģeometrisko un aerodinamisko parametru datormodelēšanas un analīzes metodika.

7. Pamatojoties uz metodiku (5.punkts) tika izstrādāts, aprēķināts un optimizēts aerodinamiskais stands ar piecām simetriski novietotām piecu lāpstiņu skrūvēm, kas ģenerē liela diametra vertikālu iegremdētu gaisa strūklu. Stands tika izgatavots, samontēts un eksperimentāli izmēģināts Jelgavā (latvija). Fiziskie eksperimenti apmierinoši apstiprināja skaitlisko aprēķinu, kas veikti saskaņā ar izstrādāto metodiku, rezultātus.

## PUBLIKĀCIJU SARAKSTS

1. *V.Ušakovs, N.Sidenko.* Žāvējamās mašīnas nestacionāras skaitliskās analīzes metodika// Mašīnzinātne un transports, Intelektuālais Transporta sistēmas 18. sējums, 2004.g. 11-13. oktobri, Latvija, Rīga.- Rīga: Izd. "RTU" 2005.g.,- 102-112. lpp.

2. *V. Ushakov, N.Sidenko.* Aerodynamic characteristics of the vertical air jet behind the directing vanes of the aerodynamic propeller, installed on the ground// The Third World Congress "Aviation in the XXI-st Century"- Safety in Aviation and Space Technology 22-24 September 2008.g. Ukraine, Kiev – Kiev: Izd. "National Academy of Sciences of Ukraine National Aviation University" 2008.g.- 15.85-15.92p.

3. *V. Ushakov, N.Sidenko.* Численный анализ аэродинамических характеристик восстанавливаемого винта// 4 th International Conference on the Scientific Aspects of Unmanned Aerial Vehicles-2010, Poland, Kielce 5-7 May 2010, Izd. Kielce university of technology Faculty of Mechatronics and Machine Building Chair of Information Technology and Armament Al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314. Kielce, Poland, 590-601 p. ISBN 978-83-88592-70-6.

4. *V. Ushakov, N. Sidenko, G. Filipsons.* Computer simulation and optimization of parameters of device, which creates a large diameter vertical air jet by means of symmetric system of fans// 2-nd International Specialized Symposium "Space & Global Security of Humanity" (SGS 2010). 5-9 July 2010.g., Riga, Latvia.- Riga: Izd. "Transport and Telecommunication Institute, 2010.g.", 96p., ISBN 978-9984-818-29-0. viperson.ru, <http://spacesystems.tsi.lv>.

5. *V. Ushakov, N.Sidenko.* Оптимизация аэродинамического генератора вертикальной воздушной струи для свободного полета человека// IX International Scientific and Technical Conference «The Improvement of The Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes». Conference Dedicated 80 Years CIAM, december 12-19, 2010 Sharm El Sheikh (Egypt). 81-85 p. ISBN 978-966-330-106-8.
6. *Ushakov V., Sidenko N.* Development of computer simulation method and analysis of parameters of the vertical airstream generator for free flight of human// The 19TH International Scientific and Technical Conference on Transport, Road-Building, Agricultural, Hoisting & Hauling and Military Technics and Technologies. Jule 1-4, 2011 Bulgaria ISBN 1310-3946, <http://elibrary.ru>
7. *Ushakov V., Sidenko N., Filipsons G.* Computer Analysis of the Aerodynamics and Heat Exchange of a Cylinder in a Viscous Oscillating Flow // Automatic Control and Computer Sciences, Vol.45, Nr.6, pp. 346-360, Allerton press, inc a Division of Pleiades Publishing, Inc. ISSN 0132-4160, DOI: 10.3103/S0146411611060083. <http://elibrary.ru> - Springer, SpringerLink, Secaucus, New Jersey, USA, - Ulrich's International Periodicals Directory, New Providence, USA. - VINITI (Россия)
8. *Ushakov V., Sidenko N., Filipsons G.* Численный анализ особенностей аэродинамики и теплообмена цилиндра в вязком осциллирующем потоке // Научно-теоретический журнал Nr.6, 2011.g. „Автоматика и Вычислительная Техника”, Изд. - Институт электроники и вычислительной техники Латвийского университета, 58.-76. с.
9. *Sidenko N., Filipsons G.* Система компьютерного моделирования нестационарных задач аэрогазотермодинамики с неподвижными и движущимися границами// The 20TH International Scientific and Technical Conference on Transport, Road-Building, Agricultural, Hoisting & Hauling and Military Technics and Technologies. June 27-29, 2012 Bulgaria ISBN 1310-3946, 71-74 p.

## **PATENTU LĪDZAUTORS**

Nr. P-09-105 „Vertikālas gaisa strūklas ģenerators cilvēka brīvājam lidojumam”, Rīga, Latvija  
V.Ušakovs, N.Sidenko, G.Filipsons.

## KONFERENČU SARAKSTS

1. *V.Ušakovs, N.Sidenko.* Žāvējamās mašīnas nestacionāras skaitliskās analīzes metodika// Mašīnzinātne un transports, Intelektuālais Transporta sistēmas 2004.g. 11-13. oktobri, Latvija, Rīga.
2. *V. Ushakov, N.Sidenko.* Aerodynamic characteristics of the vertical air jet behind the directing vanes of the aerodynamic propeller, installed on the ground// The Third World Congress “Aviation in the XXI-st Century”- Safety in Aviation and Space Technology 22-24 September 2008.g. Ukraine, Kiev
3. *V. Ushakov, N.Sidenko.* Численный анализ аэродинамических характеристик восстанавливаемого винта// 4 th International Conference on the Scientific Aspects of Unmanned Aerial Vehicles-2010, Poland, Kielce 5-7 May 2010.
4. *V. Ushakov, N. Sidenko, G. Filipsons.* Computer simulation and optimization of parameters of device, which creates a large diameter vertical air jet by means of symmetric system of fans// 2-nd International Specialized Symposium "Space & Global Security of Humanity" (SGS 2010). 5-9 July 2010.g., Riga, Latvia.
5. *V. Ushakov, N.Sidenko.* Оптимизация аэродинамического генератора вертикальной воздушной струи для свободного полета человека// IX International Scientific and Technical Conference «The Improvement of The Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes». Conference Dedicated 80 Years CIAM, december 12-19, 2010 Sharm El Sheikh (Egypt).
6. *Ushakov V., Sidenko N.* Development of computer simulation method and analysis of parameters of the vertical airstream generator for free flight of human// The 19TH International Scientific and Technical Conference on Transport, Road-Building, Agricultural, Hoisting & Hauling and Military Technics and Technologies. Jule 1-4, 2011 Varna, Bulgaria.
7. *Sidenko N., Filipsons G.* Система компьютерного моделирования нестационарных задач аэрогазотермодинамики с неподвижными и движущимися границами// The 20TH International Scientific and Technical Conference on Transport, Road-Building, Agricultural, Hoisting & Hauling and Military Technics and Technologies. June 27-29, 2012 Varna, Bulgaria

## PROJEKTU DALĪBNIEKS

1. Vertikālās gaisa strūklas aerodinamiskie aprēķini un „gaisa plūsmas taisnotāja” skiču projekta izstrāde. SIA „AERODIUM” (Rīga, Latvija). 2007. g.

2. Nr. R7320 Universālas datormodelēšanas sistēmas nestacionāru aerogāztermodinamisku uzdevumu risināšanai. IZM projekts RTU TMF AI. 2007. g.
3. Nr. R7330 Attiecībā pret plūsmu kustīgu ķermeņu nestacionāras aerohidrodinamikas un siltumapmaiņas īpatnību izpēte. RTU projekts TMF AI. 2008. g.