VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS

PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

Juozas Bielskus

MAŽO AERODINAMINIO VAMZDŽIO SKAIČIAVIMAS IR ĮRENGIMAS

CALCULATION AND CONSTRUCTION OF SMALL SCALE AERODYNAMIC TUNNEL

Baigiamasis magistro darbas

Energijos inžinerijos ir planavimo studijų programa, valstybinis kodas ***621E30003***

Energijos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Juozas Bielskus

MAŽO AERODINAMINIO VAMZDŽIO SKAIČIAVIMAS IR ĮRENGIMAS

CALCULATION AND CONSTRUCTION OF SMALL SCALE AERODYNAMIC TUNNEL

Baigiamasis magistro darbas

Energijos inžinerijos ir planavimo studijų programa, valstybinis kodas ***621E30003***

Energijos inžinerijos specializacija

Energetikos ir termoinžinerijos mokslo kryptis

Vadovas dr. prof. Egidijus Saulius Juodis _____ 2012.05.24
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantas lek. Regina Žukienė _____ 2012-05-24
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
APLINKOS INŽINERIJOS FAKULTETAS
PASTATŲ ENERGETIKOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(parašas)

Vytautas Martinaitis
(vardas, pavardė)

2012 gegužės mėn. 07 d.

Energijos inžinerija studijų kryptis

Energijos inžinerija ir planavimas studijų programa, valstybinis kodas ***621E30003***

Energijos inžinerijos specializacija

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

.....Nr. .....
Vilnius

Studentui **Juozui Bielskui**

Baigiamojo darbo tema:

Mažo aerodinaminio vamzdžio skaičiavimas ir įrengimas

Patvirtinta *2010 m. lapkričio 03 d.* Dekano įsakymu Nr. 396 ap

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas *2012 m. gegužės mėn. 28 d.*

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Išnagrinėti esamų užsienio universitetinių aerodinaminių vamzdžių ypatumus (nei viena Lietuvos aukštoji mokykla neturi aerodinaminio vamzdžio). Sukonstruoti aerodinaminį vamzdį, tinkamą vidinės ir išorinės pastatų aerodinamikos, teršalų sklidimo iš pastatų, vėjo poveikio statinių stabilumo moksliniams tyrimams ir Pastatų energetikos katedros mokymo tikslams. Apskaičiuoti aerodinaminio vamzdžio parametrus, atlikti kompiuterinį pastato aptekėjimo aerodinaminiame vamzdyje modeliavimą, parinkti atitinkamą įrangą, atkreipti dėmesį į ventiliatoriaus keliamo triukšmo slopinimą, organizuoti aerodinaminio vamzdžio gamybą ir montavimą

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai: ..... *lekt. R. Žukienė* .....
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

Vadovas ..... Prof. dr. Egidijus Juodis

Užduotį gavau

.....
(parašas)

Juozas Bielskus
(vardas, pavardė)

2010.10.25

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Aplinkos inžinerijos fakultetas
Pastatų energetikos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. .....
Data .....-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Energijos inžinerijos ir planavimo** programos baigiamasis darbas

Pavadinimas **Mažo aerodinaminio vamzdžio skaičiavimas ir įrengimas**

Autorius **Juozas Bielskus**

Vadovas **prof. dr. Egidijus Saulius Juodis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Magistro darbe nagrinėjamas mokomasis aerodinaminis vamzdis, su kuriuo bus galima atlikti laboratorinius darbus ir nesudėtingus mokslinius tyrimus. Aptariama aerodinaminio vamzdžio reikšmė studentams, Lietuvos ūkiui ir aplinkosaugai. Taip pat pateikiama, kokius bandymus su aerodinaminiu vamzdžiu bus galima atlikti Pastatų energetikos katedroje. Apžvelgti laboratorijos įrangos gamintojų – Aerolab, G.u.n.t, Armfield, Stirolab, GDJ Inc mokomieji aerodinaminiai vamzdžiai, projektavimo rekomendacijos.

Pastatų energetikos katedrai suprojektuotas aerodinaminis vamzdis, papildomai pridėti triukšmo slopintuvai prieš ir už ventiliatoriaus. Taip pat atlikta kompiuterinių programų, kuriomis naudojantis galima atlikti oro srautų moduliaciją, analizė, ir pasirinkus tinkamiausią programą atlikta Pastatų energetikos katedros aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros moduliacija.

Šio baigiamojo darbo rezultatas – pagamintas ir surinktas mokomasis aerodinaminis vamzdis, kuris bus naudojamas laboratoriniams darbams ir tyrimams atlikti.

Darbą sudaro 11 dalys: įvadas, 11 skyrių dėstomoji dalis, išvados, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 65 p. teksto be priedų, 39 iliustr., 9 lent., 30 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo grafikai ir priedai.

Prasminiai žodžiai

aerodinaminis vamzdis, ventiliatorius, ekranai, turbulencija

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Environmental Engineering
Building Energetics

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

Master Degree Studies **Energy Engineering and Planning** study programme Master's Thesis

Title	**Calculation and Construction of Small Scale Aerodynamic**
Author	**Juozas Bielskus**
Academic supervisor	**Prof Dr Egidijus Saulius Juodis**

Thesis language:
Lithuanian

Annotation

Masters' thesis deals with an educational wind tunnel which is to be used to carry out laboratory works and simple research. It disscuses the importance of wind tunnel for students, Lithuanian economy and environment protection. It also presented tests those can be made with wind tunnel in the department of buildings' energetics. The educational wind tunnels, design recommendations of the laboratory equipment manufacturer – Aerolab, G.u.n.t, Armfield, Stirolab, GDJ Inc were overviewed.

Wind tunnel for department of buildings' energetics was designed, in addition silencers before and behind the fan were added. There are also made an analysis of computer programs, which enable air flow modulation, and selecting the best program the wind tunnel working chamber modulation of the department of buildings' energetics was performed.

The result of the thesis – produced and assembled educational wind tunnel, which will be used for laboratory work and research.

The work consists of eleven parts: introduction, describtion, conclusions, references.

Work size – 65 pages without appendixes, 39 figures, 9 tables, 30 references.

Appendixes.

Keywords

wind tunnel, fan, shades (screens), turbulence.

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

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Juozas Bielskus, 20062952
(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)
Aplinkos inžinerijos fakultetas
(Fakultetas)
Energijos inžinerija ir planavimas, ENmf-10
(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2012 m. gegužės 23 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Mažo aerodinaminio vamzdžio skaičiavimas ir įrengimas" patvirtintas 2010 m. lapkričio 3 d. dekano potvarkiu Nr. 396ap, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Regina Žukienė. Mano darbo vadovas prof. dr. Egidijus Saulius Juodis.

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

	Juozas Bielskus
(Parašas)	(Vardas ir pavardė)

Turinys

Lentelių sąrašas ... 3

Paveiklų sąrašas ... 3

Įvadas ... 5

1. Aerodinaminio vamzdžio pritaikymo sritis ... 7

2. Aerodinaminių vamzdžių klasifikacija ir sudedamosios dalys ... 10

2.1. Aerodinaminių vamzdžių klasifikacijos schema ... 10

2.2. Aerodinaminio vamzdžio konstrukcija ... 11

3. Mokomųjų aerodinaminių vamzdžių analizė ... 14

4. Pastato modelis ir aerodinaminio vamzdžio geometrija ... 20

4.1. Pastato modelis ir prielaidos ... 20

4.2. Aerodinaminio vamzdžio geometrija ... 21

4.2.1. Darbinės kameros dydžio parinkimas ... 22

4.2.2. Difuzorius ... 22

4.2.3. Prieškameris ... 25

4.2.4. Srautą tiesinančios grotelės ... 28

4.2.5. Turbulencijos mažinimo ekranai ... 28

4.2.6. Apsauginiai tinklai ... 28

5. PEK aerodinaminio vamzdžio aerodinaminių nuostolių skaičiavimas ... 29

5.1. Darbinė kamera ... 29

5.2. Difuzorius ... 30

5.3. Prieškamerio sekcija ... 32

5.4. PEK aerodinaminio vamzdžio slėgio nuostoliai ... 38

5.5. Ventiliatoriaus ... 39

6. Triukšmo slopinimas ... 40

7. Jautrumo analizė ... 43

8. Skaitmeninė analizė ... 45

8.1. Analizės metodai ... 45

8.2. Baigtinių skirtumų metodas ... 46

8.3. Baigtinių elementų metodas ... 46

8.4. Baigtinių tūrių metodas ... 47

8.5. Kompiuterinės skaičiavimo programos ... 47

9. Kompiuterinis modeliavimas ... 49

9.1. Pek aerodinaminio vamzdžio darbinės modeliavimas su Kompiuterne programa „Phoenics” 49
9.2. Kompiuternės programos „Phoenics” rezultatų analizė 52
10. Modeliavimas aerodinaminiame vamzdyje 57
11. Aerodinaminio vamzdžio gamyba ir medžiagos 59
11.1. Srautą tiesinančių grotelių gamyba 59
11.2. Difuzoriaus ir ventiliatoriaus sujungimas ir pritvirtinimas 60
11.3. Prieškamerio surinkimas ir sujungimas su laikančiąją konstrukcija 60
11.4. Darbinės kameros sujungimas su difuzoriumi ir prieškameriu 61
11.5. Dažnio keitiklis 62
11.6. Medžiagų žiniaraštis 63
IŠVADOS 65
Literatūros sąrašas: 66
Grafinė dalis
Priedas A

Lentelių sąrašas:

1. **lentelė.** Uždarojo ir atvirojo tipo aerodinaminio vamzdžio palyginimas 11
2. **lentelė.** Mokomųjų aerodinaminių vamzdžių duomenys 14
3. **lentelė.** Susiaurėjimo kanalo skaičiavimo rezultatai 27
4. **lentelė.** Aerodinaminio vamzdžio slėgio nuostoliai 38
5. **Lentelė.** Korekcijos koeficientai 41
6. **lentelė.** Ventiliatoriaus sukuriamas triukšmo lygis skirtingose oktavose. 42
7. **lentelė.** Triukšmo slopintuvo slopinamo triukšmo lygis skirtingose oktavose. 42
8. **lentelė.** Ventiliatoriaus sukuriamas triukšmo lygis skirtingose oktavose, kai naudojami triukšmo slopintuvai. 43
9. **lentelė.** Medžiagų žiniaraštis 63

Paveiklų sąrašas:

1 pav. Pastato aptekėjimo modelis ir slėgių schema 7
2 pav. Oro cirkuliacija gatvėje tarp aukštų pastatų 8
3 pav. Išmetamų teršalų sklidimas (nuotrauka po vaizdo apdorojimo) 8
4 pav. Miesto maketas 9
5 pav. Aerodinaminių vamzdžių klasifikacijos schema 10
6 pav. Atvirojo tipo aerodinaminio vamzdžio principinė schema 11
7 pav. Korio tipo srautą tiesinančios grotelės (F1 dictionaries. Wind tunnel) 12
8 pav. Aerodinaminis vamzdis „Aerolab“ 15
9 pav. „ G.u.n.t.“ aerodinaminis vamzdis „HM-170“ 15
10 pav. „Armfield“ aerodinaminis vamzdis „C2“ 16
11 pav. „Armfield“ aerodinaminis vamzdis „C15“ 17
12 pav. „Stirolab“ aerodinaminis vamzdis „WT.3000“ 18
13 pav. „GDJ Inc.“ aerodinaminis vamzdis „ Flotek 1440 “ 18
14 pav. Difuzoriaus geometrija ir žymėjimas 23
15 pav. Mažo greičio aerodinaminių vamzdžių difuzoriaus naudingumo priklausomybė nuo difuzoriaus išėjimo ir įėjimo skerspjūvių santykio ir plėtimosi kampo 24
16 pav. Prieškamerio konstrukcija 25
17 pav. siaurėjimo kanalo kraštinės lenkimo kreivė. 27
18 pav. Ventiliatorius 39
19 pav. Korekcijos grafikas 41
20 pav. Aerodinaminio vamzdžio konstrukcija: kairėje Pek konstrukcija, dešinėje lyginama konstrukcija 43

21 pav. Nagrinėjamos ribos pagal nutylėjimą..... 49
22 pav. Sudėtingos geometrijos objektas nubraižytas antruoju būdu 50
23 pav. Kairėje pusėje sudėti taškai, dešinėje taškai sujungti linijomis 50
24 pav. Aerodinaminio vamzdžio darbinė kamera išskaidyta į 16000 mažų tūrių. 51
25 pav. Aerodinaminio vamzdžio darbinė kamera su modeliu..... 52
26 pav. Grafinis slėgio pasiskirstymas aerodinaminio vamzdžio vaizdas iš šono ties kubo centru 53
27 pav. Grafinis slėgio pasiskirstymas, vaizdas iš šono ties kubo centru (Yakhot *et al*.: 2006. 994-1009 p.) 53
28 pav. Grafinis slėgio pasiskirstymas aerodinaminio vamzdžio vaizdas horizontalioje plokštumoje ties kubo centru..... 54
29 pav. Vektorinis pastato aptekėjimas aerodinaminio vamzdžio vaizdas iš šono ties kubo centru 55
30 pav. Apibendrintas pastato aptekėjimas aerodinaminio vamzdžio vaizdas iš šono ties kubo centru 55
31 pav. Vektorinis pastato aptekėjimas aerodinaminio vamzdžio vaizdas horizontalioje plokštumoje ties kubo centru..... 56
32 pav. Apibendrintas pastato aptekėjimas aerodinaminio vamzdžio vaizdas horizontalioje plokštumoje ties kubo centru..... 56
33 pav. Uždarojo tipo Peutz BV in Mook aerodinaminis vamzdis, Nyderlandai..... 57
34 pav. Kairėje srautą tiesinančios grotelės yra klijuomos, o dešinėje yra lyginamas jų paviršius..... 59
35 pav. Kairėje matomas ventiliatorius už apsauginio tinklo, žvelgiant iš darbinės kameros padėties, o dešinėje matomas vaizdas kai vykdomas difuzoriaus sujungimas su konstrukcija..... 60
36 pav. Prieškameris surinkimo stadijoje 61
37 pav. Aerodinaminio vamzdžio darbinė kamera 62
38 pav. Surinktas aerodinaminis vamzdis..... 62
39 pav. SKC3400220 dažnio keitiklis 63

Įvadas

Žmonės nuo senų laikų norėjo išmokti skraidyti kaip paukščiai. Jie atidžiai studijavo paukščių skrydžius ir pradėjo konstruoti įrenginius, kurie galėtų atkartoti paukščio skrydį. Deja jų įrenginiai nepateisindavo lūkesčių, jiems nepavykdavo pakilti. Taigi žmonės greitai suprato, kad neturi pakankamai žinių apie veikiančias jėgas judant kūnui, kai kūno paviršių apiplauna oro srautas. Norėdami skristi pirmiausiai jie turėjo suprasti oro srauto tekėjimą per paviršių, t.y. pūsti oro srautą į nejudamą paviršių. Taigi, buvo pradėtos statyti laboratorijos ir atlikti aerodinaminiai bandymai kontroliuojamomis sąlygomis. Pirmasis aerodinaminis tunelis sumontuotas 1871 m. (Francis Herbert Wenham), o po 33 m. pakilo pirmasis žmonijos sunkesnis už orą skraidymo įrenginys (Whirling Arms and the First Wind Tunnels. 2009. National aeronautics and space administration). Vystantis technologijoms aerodinaminių vamzdžių forma keitėsi, o pritaikymo sritis platėjo.

Aerodinaminio vamzdžio pritaikymo sritis pagal chronologinę seką yra:

- Aerodinaminis vamzdis buvo išrastas ir sumontuotas tam, kad padėtų žmogui pakilti į orą. Ir pritaikytas pirmiausiai lėktuvų gamybai;
- Žmonijai greitai vystantis pradėti statyti vis didesni pastatai. Atsirado būtinybė nustatyti vėjo įtaka aukštiems pastatams;
- Taip pat jį pritaikė higieniniams tyrimams – infiltracijos tyrimui, atsižvelgiant į slėgio pasiskirstymą pastato paviršiuje;
- Aerodinaminis vamzdis yra pritaikomas tirti teršalų sklidimui atmosferoje ir greta pastatų, taip pat ir oro apykaitos miesto gatvėse tarp didelių pastatų tyrimams;
- Aerodinaminį vamzdį pritaikė automobilių bandymams siekiant sumažinti naudojamą automobilių galią ir pagerinti jų aerodinamines savybes.

Taip pat aerodinaminis vamzdis pritaikytas ir kitose srityse, pvz.: sporto.

Aerodinaminis vamzdis yra svarbi priemonė atliekant inžinerinius ir mokslinius tyrimus bei patikrinant kompiuterinių programų skaičiavimų patikimumą. Lietuvos ūkis ir aplinkosauga daug laimėtų, jei ne vien skaičiavimais, bet ir bandymais galėtų patikrinti teršalų sklidimo atvejus. Be abejo, ir būsimiesiems inžinieriams būtų naudinga tiriant įvairius oro srauto reiškinius.

Šiandien labai brangu įrengti aerodinaminius vamzdžius ir atlikti juose bandymus, todėl juos pakeičia kompiuterinis modeliavimas. Modeliuoti kompiuteriu yra pigiau ir paprasčiau, jis nereikalauja didelių patalpų ir nekelia didelio triukšmo. Bet modeliavimas kompiuteriu ne visada pasitvirtina, kartais atsiranda tokių veiksnių, kurie neįvertinti programoje, įvertinti nepakankamai tiksliai arba tik siaurose ribose, pvz.: apskaičiuotų kūnų aptekėjimo srauto linijų nevisišką sutapimą su fizinio modeliavimo srautų linijomis. Jeigu kompiuterinis modeliavimas būtų visiškai patikimas,

tai nereikėtų aerodinaminių vamzdžių, bet itin dažnai modeliavimas perkeliamas į aerodinaminį vamzdį.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Magistrinio darbo tikslas: išanalizuoti aerodinaminių vamzdžių tipus, suprojektuoti tinkamiausią Pastatų energetikos katedrai aerodinaminį vamzdį, alikti oro srautus moduliuojančių kompiuterinių programų analizę, pasirinkti programą ir atlikti moduliavimą būsimojo vamzdžio darbinės kameros, taip pat padedant PEK įrengti aerodinaminį vamzdį.

Darbo uždaviniai:

Darbo tikslui pasiekti suformuluoti tokie uždaviniai:

- Išaanalizuoti aerodinaminių vamzdžių tipus;
- Apžvelgti, laboratorijos įrangos gamintojų mokomuosius aerodinaminius vamzdžius;
- Suprojektuoti tinkamiausią Pastatų energetikos katedrai aerodinaminį vamzdį (pasirinkti skaičiavimo metodika, naudojamas medžiagas ir t.t.);
- Atlikti oro srautus modialiuojančių kompiuterinių programų analizę;
- Atlikti pastato modeliavimą aerodinaminiame vamzdyje kompiuterine programa;
- Esant galimybei aerodinaminį vamzdį įrengti PEK studentų mokymams.

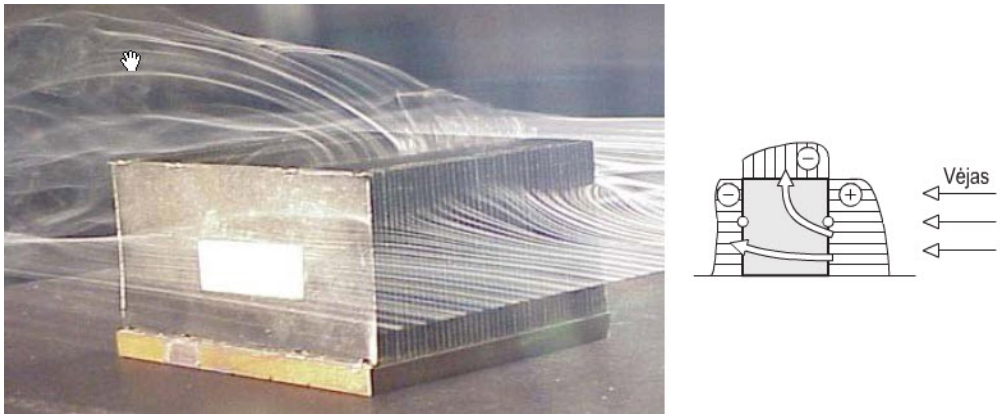
1. Aerodinaminio vamzdžio pritaikymo sritis

Aerodinaminis vamzdis yra svarbi priemonė atliekant inžinerinius ir mokslinius tyrimus bei patikrinant kompiuterinių programų skaičiavimų patikimumą. Lietuvos ūkis ir aplinkosauga daug laimėtų, jei ne vien skaičiavimais, bet ir bandymais galėtų patikrinti teršalų sklidimo atvejus. Be abejo, ir būsimiesiems inžinieriams būtų naudinga tiriant įvairius oro srauto reiškinius. Aerodinaminio vamzdžio privalumas yra tas, jog eksperimentiniai bandymai atliekami gerai valdomoje srauto aplinkoje ir suteikia galimybę pamatyti vaizdžius oro judėjimo trajektorijų pasikeitimus, kai kelyje sutinkama kliūtis. Tyrimai realioje aplinkoje yra komplikuoti ir brangūs, be to, ne visada įmanomi.

PEK būsimame aerodinaminiame vamzdyje atliekami bandymai priklausys nuo atliekamo tyrimo pobūdžio. Bet šiame laboratoriniame stende nenumatoma lėktuvų modelių aerodinaminių savybių, tiltų ar pastatų stiprumo savybių tyrimai. Visgi, šiame stende numatoma, kad studentai atliks laboratorinius darbus ir mokslinius tyrimus, kurie susiję su oro srauto tekėjimo reiškiniais, t. y. oro srauto elgsena, kai jo kelyje atsiranda kliūtis (pastatai, oro apykaita gatvėje tarp aukštų pastatų, teršalų sklidimu ar atviroje vietovėje ar gyvenvietėje).

Busimame aerodinaminiame vamzdyje bus galima atlikti šiuos bandymus:

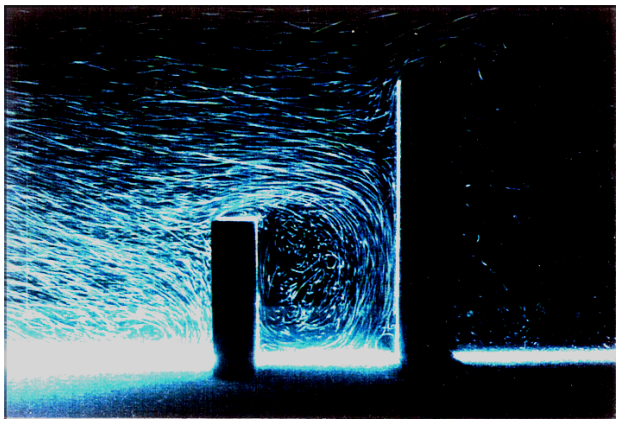
- Slėgių pasiskirstymą pastato priekyje, užuovėjoje ir ant stogo (1 pav.).



1 pav. Pastato aptekėjimo modelis ir slėgių schema

Iš šio bandymo bus matyti, kaip oras įsiskverbia per nesandarias vietas ir išeina per kitas nesandarias vietas, kur susidaro mažesnio slėgio zonos (Juodis, E 2009:190-191).

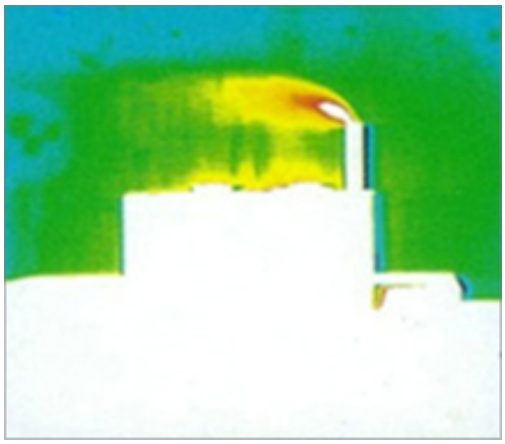
- Pastato formos įtaka oro judėjimui, pvz.: namas su plokščiu arba šlaitiniu stogu.
- Oro cirkuliaciją ilgoje gatvėje tarp aukštų pastatų (2 pav.) (Kato. Ooka. Institute of Industrial Science The University of Tokyo. Flowfield around building models placed in wind tunnel).



2 pav. Oro cirkuliacija gatvėje tarp aukštų pastatų

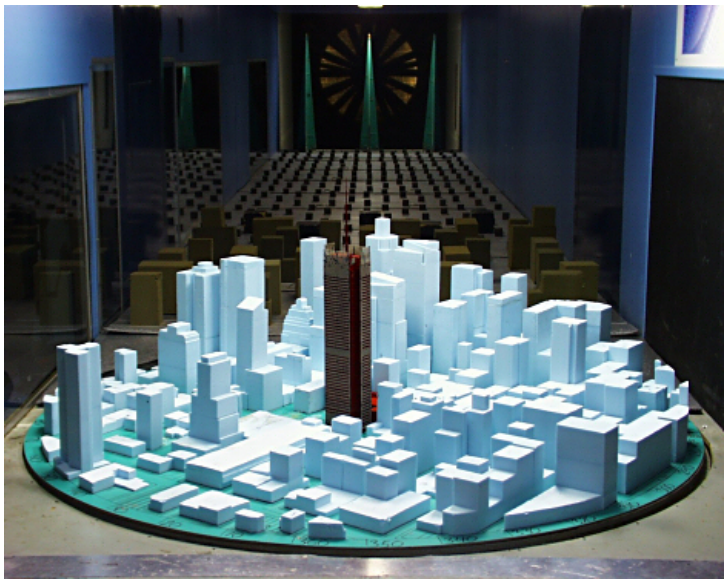
Aerodinaminis vamzdis suteiks galimybę vaizdžiai pamatyti oro srauto judėjimo trajektorijų pasikeitimus dėl pastatų pastatymo būdo.

- Pramonės, šilumos gamybos, namų išmetamų teršalų sklidimą aplinkoje (3 pav.) (Kato. Ooka. Institute of Industrial Science The University of Tokyo. Flowfield around building models placed in wind tunnel).



3 pav. Išmetamų teršalų sklidimas (nuotrauka po vaizdo apdorojimo)

- Taip pat galima bus atlikti kvartalo, rajono ar net viso miesto apatinių oro sluoksnių judrumo ar teršalų sklidimo rajonuose tyrimą (4 pav.) (Kato lab. Ooka lab. Institute of Industrial Science The University of Tokyo. Scale model of building complex placed in wind tunnel.)



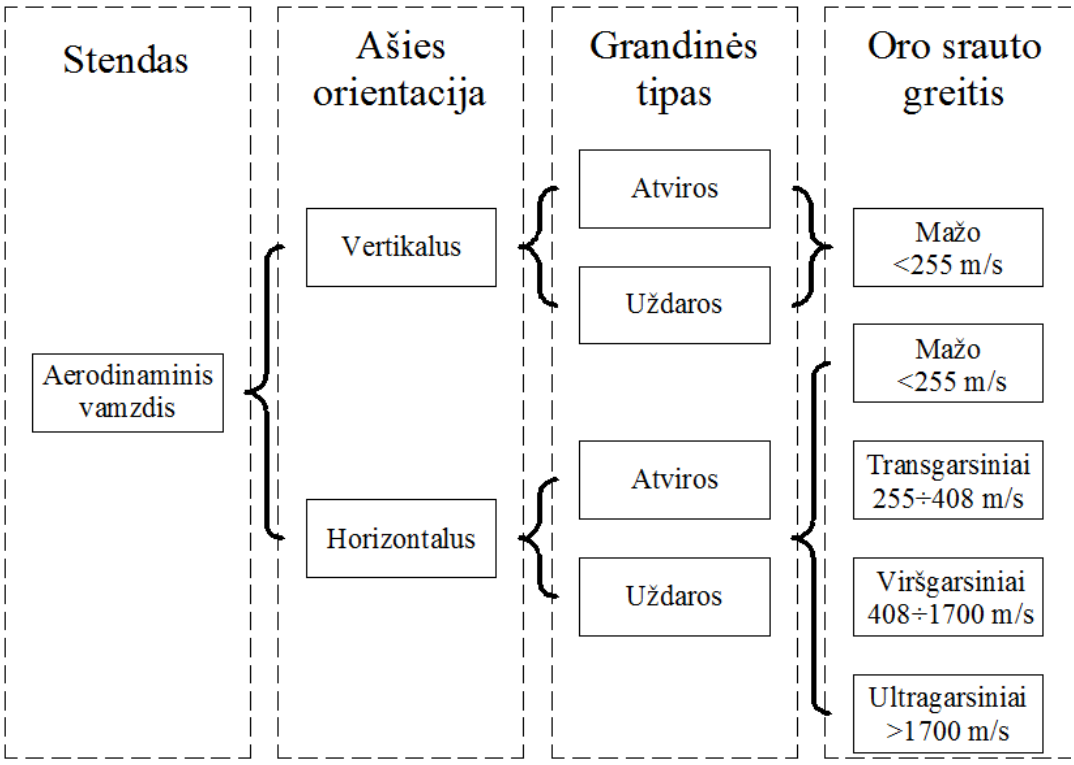
4 pav. Miesto maketas

Aerodinaminis vamzdis suteiks galimybę pamatyti vaizdžiai oro judėjimo trajektorijų pasikeitimus, kai sutinkama kelyje kliūtis. Studentai galės gilintis į fluidų dinamiką (kodėl atsiranda vieni ar kiti reiškiniai). Aerodinaminiu vamzdžiu gautus rezultatus galima bus palyginti su kompiuterinės programos gautais rezultatais.

2. Aerodinaminių vamzdžių klasifikacija ir sudedamosios dalys

Šiame skyriuje nagrinėsime aerodinaminių vamzdžių klasifikaciją, t.y. jų pranašumus ir trūkumus. Pasirinksime tinkamiausią aerodinaminio vamzdžio tipą, o po to išnagrinėsime sudedamuosius elementus ir jų funkcijas.

2.1. Aerodinaminių vamzdžių klasifikacijos schema



5 pav. Aerodinaminių vamzdžių klasifikacijos schema

Vertinant aerodinaminius vamzdžius pagal ašies padėtį, moksliniams tyrinėjimams labiausiai paplitę horizontalieji aerodinaminiai vamzdžiai, tuo tarpu vertikalieji naudojami norint sukurti žmonių laisvąjį kritimą.

Vertinant aerodinaminius vamzdžius pagal grandines, atvirojo tipo vamzdžiai dažniausiai būna nedidelių matmenų. Jie naudojami mažose laboratorijose, nedideliems moksliniams tyrimams, kurie nereikalauja itin tikslių rezultatų ir (ar) demonstraciniams bandymams. Uždarojo tipo aerodinaminių vamzdžių būna įvairių matmenų. Jie naudojami mažose ir didelėse laboratorijose. Uždarojo ir atvirojo tipo aerodinaminių vamzdžių skirtumai pateikiami 1 lentelėje.

1. lentelė. Uždarojo ir atvirojo tipo aerodinaminio vamzdžio palyginimas

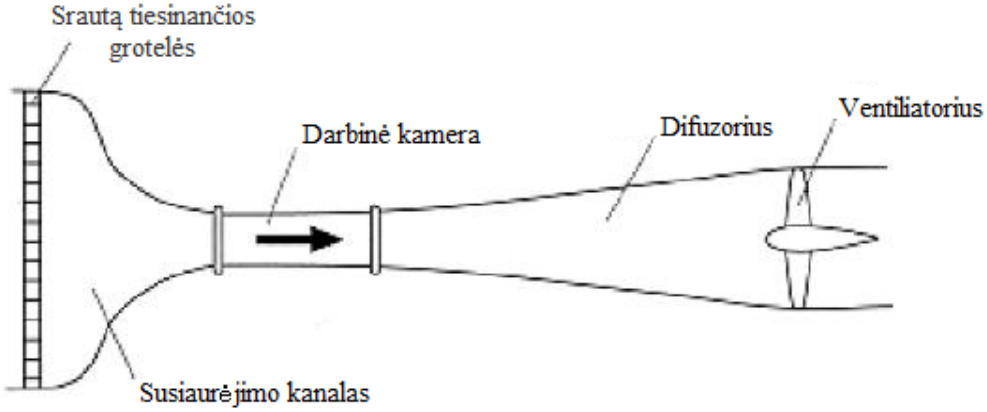
Tipas / Charakteristika	Atvirojo	Uždarojo
Dydis	Mažesnis	Didesnis
Konstrukcijos sudėtingumas	Paprastesnė	Sudėtingesnė
Triukšmo lygis	Didesnis	Mažesnis
Aerodinaminiai nuostoliai	Didesni	Mažesni
Energijos vartojimas	Didesnis	Mažesnis
Vėsinimas	Nereikalingas	Reikalingas
Rezultatų tikslumas	Mažesnis	Didesnis
Oro judrumas patalpoje	Didelis	Nėra
Investicijos	Mažesnė	Didesnė

Vertinant aerodinaminius vamzdžius pagal sukuriamo oro srauto greitį dažniausiai sutinkamas mažo greičio tipas.

Apžvelgus 1 lentelės palyginimus, galima teigti, kad uždarojo tipo aerodinaminis vamzdis yra pranašesnis už atvirojo, nes energijos suvartojimas, aerodinaminiai nuostoliai ir triukšmo lygis mažesni. Bet Pek projektuojamas aerodinaminis vamzdis bus mažo greičio ir atvirojo tipo. Šis sprendimas priimtas todėl, kad planuojamas oro srauto greitis yra 15 m/s, be to, atvirojo tipo vamzdžiai yra mažesni, pigesni, jų konstrukcija paprastesnė, o tikslūs rezultatai nėra būtini.

2.2. Aerodinaminio vamzdžio konstrukcija

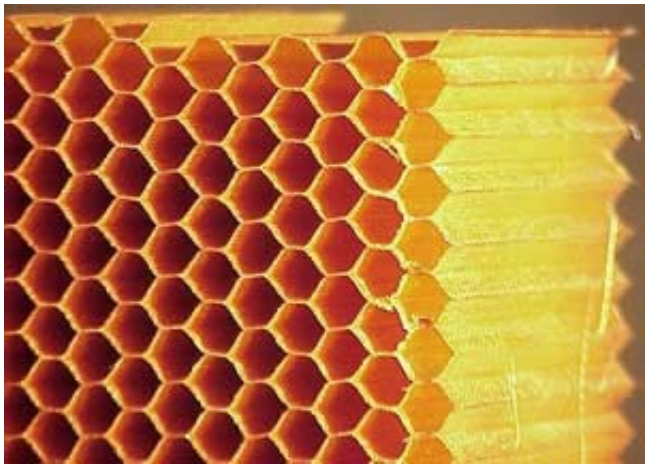
Atvirojo tipo aerodinaminio vamzdžio galima principinė konstrukcijos schema pateikta žemiau esančiame paveiksle (Kas Kasravi. Types of Wind tunnel.), taip pat žemiau apibūdinti ir pagrindiniai elementai.



6 pav. Atvirojo tipo aerodinaminio vamzdžio principinė schema

Srautą tiesinančios grotelės (7 pav.). Srautą tiesinančių grotelių paskirtis yra sumažinti oro srauto sūkurius t.y. išlyginti sutrikdytą oro srautą. Srautą tiesinančių grotelių būna įvairių formų: kvadratinių, trikampių, korio tipo. Bet dažniausiai pasitaikančios – korio formos. Atlikti tyrimai

parodė, kad korio tipo grotelės veiksmingiausiai mažina oro srauto sūkurius, kai narvelių ilgis mažiausiai 6 – 8 kartus didesnis už jų skersmenį (Bell 1989: 372 - 374).



7 pav. Korio tipo srautą tiesinančios grotelės (F1 dictionaries. Wind tunnel)

Prieškameris. Aerodinaminio vamzdžio dalis susidedanti iš kolektoriaus (būna prieš srautą tiesinančias groteles), srauto stabilizavimo srities ir susiaurėjimo kanalo. Susiaurėjimo kanalo forma yra tinkamiausia, kai yra varpo formos, taip ji padeda sukurti vienodą oro srautą. Susiaurėjimo kanalas padeda suspausti oro srautą, o tai sumažina oro srauto pulsacijas. Didindama oro srauto greitį ir mažindama įsiurbimo nuostolius. Prieškamerio skerspjūvio forma gali būti: stačiakampio, apskritimo, aštuonkampio ar mišri (Bell 1989: 372 - 374; Plėta 2010: 64).

Darbinė kamera. Ši kamera yra pagrindinė aerodinaminio vamzdžio dalis. Būtent šioje kameroje statomas bandomasis objektas, tada į jį pučiama dirbtinė oro srovė. Darbinės kameros būna dviejų tipų – uždarojo ir atvirojo. Dažniausiai pasitaikančios darbinės kameros yra uždarojo tipo, pagamintos iš skaidrių medžiagų. Jos būna įvairių skerspjūvių, bet populiariausios stačiakampio formos, o geriausiomis laikomos aštuonkampio formos. Ji turėtų būti pakankamai ilga, bet ne per daug, nes atsiras nepageidaujamas pasienio sluoksnio augimas. Darbinės kameros dydis paprastai būna startinis taškas projektuojant vamzdį. Dydžio parinkimas turi įtakos norimam Reinoldso skaičiui gauti ir apima investicijas, reikalingas būsimam vamzdžiui. Priklausomai nuo to, kas bus tiriama darbinės kameros turi atitikti keliamus reikalavimus, kurie bus aptarti ir plačiau nagrinėjami vėliau (Bell 1989: 372 - 374; Tatmant: 26p).

Difuzorius. Jis įrengtas iškart po darbinės kameros. Difuzoriaus pradžios skerspjūvis būna kaip ir darbinės kameros, o pabaigos dažniausiai apvalus. Geriausias srauto išėjimo stabilumas pasiekiamas, kai difuzoriaus platėjimo kampas yra 10 º, o ploto santykis išėjime ir įėjime – 2:5. Difuzoriuje srauto greitis krenta, o slėgis didėja, tai garantuoja mažesnį energijos suvartojimą (Bell 1989: 372-374; Plėta 2010: 64).

Ventiliatorius. Ventiliatoriaus tikslas – siurbti oro srautą iš aplinkos ir jį nukreipti į darbinę kamerą. Atvirojo tipo

aerodinaminiuose vamzdžiuose dažniausiai naudojamas ašinis ventiliatorius. Didelės galios ventiliatoriai turėtų būti montuojami su antivibracinėmis jungtimis, siekiant sumažinti vibracijas vėjo tunelyje (Plėta 2010: 64; Tatmant: 26p).

Kiti svarbūs elementai, bet nepažymėti 6 pav.

Apsauginis tinklas. Jis įrengtas prieš ir už ventiliatoriaus ventiliatorių. Jo paskirtis apsaugoti ventiliatorių nuo bandomo modelio atsiskyrusių dalių ir nuo žmogaus sužalojimo (Bell 1989: 372-374; Plėta 2010: 64).

Ventiliatoriaus srauto lygintuvai. Lygintuvai įrengiami iškart po ventiliatoriaus. Jų funkcija yra pašalinti sūkurius, kuriuos sukelia ventiliatorius ir sumažinti triukšmo lygį (Lindgren 2002: 47 p; Plėta 2010: 64).

Ekranai. Ekranai paprastai būna pagaminti iš metalinio tinklelio, kvadrato ar stačiakampio formos akių. Ekranai audžiami iš nailono ar polisterelio siūlų, o kai apkrovos būna labai didelės – iš plieno, bronzos. Ekranų paskirtis yra išlyginti oro srautą (sumažina turbulenciją) ir sumažinti pasienio sluoksnio storį. Visgi turbulencijos dydis priklauso nuo oro srauto greičio ir aukščio, todėl didėjant oro srauto greičiui ar aukščiui nuo žemės paviršiaus mažėja oro srauto turbulentiškumas. O turbulentiškumo dydis priklauso nuo to, kokius tyrimus norima atlikti, jie gali kisti nuo 2 % iki 30 % ir net platesnėse ribose (Van Hooff, Blocken, *et al*. 2011. 1797 – 1807).

Dažniausiai montuojami du ekranai – išlyginimo kameroj, be to jie turi būti vienas nuo kito mažiausiai 0,2 nusodinimo kameros skersmens. Šis atstumas reikalingas tam, kad sutrikdytas srautas po pirmojo ekrano nusistovėtų (Lindgren 2002: 47 p; Plėta 2010: 64; Tatmant: 26p).

3. Mokomųjų aerodinaminių vamzdžių analizė

Šiame skyriuje bus apžvelgiami, įvairių gamintojų siūlomi mažo greičio, atvirojo tipo mokomieji aerodinaminiai vamzdžiai. Pagrindiniai gamintojai – Aerolab, G.U.N.T., Armfield, Stirolab, GDJ Inc, o jų aerodinaminių vamzdžių charakteristikos pateiktos 2 lentelėje.

2. lentelė. Mokomųjų aerodinaminių vamzdžių duomenys

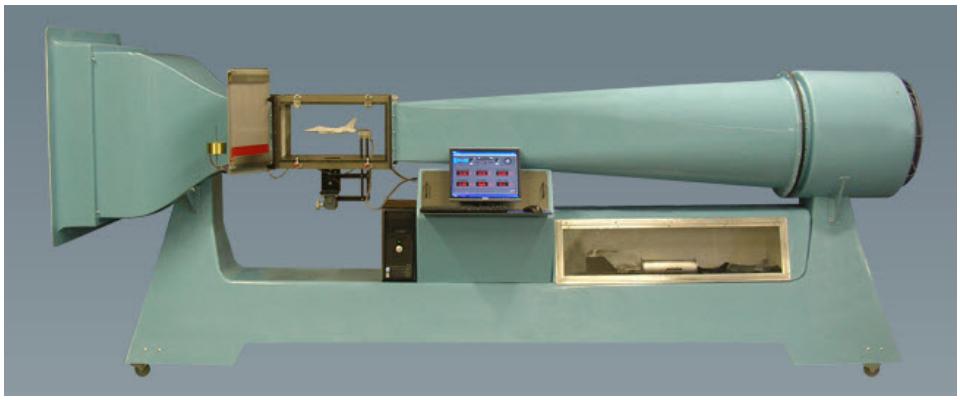
Modelis	**Bandymo kameros matmenys, mm**			**Srauto greitis, m/s**	**Aerodinaminio vamzdžio matmenys, mm**			**Variklio galia, kW**
	Aukštis	**Plotis**	**Ilgis**		Ilgis	Plotis	Aukštis	
Aerolab	305	305	610	4,5 ÷ 65	4600	1100	1800	7,5
HM-170	250	250	450	iki 28	2890	860	1670	2,25
C2	304	304	457	0 ÷ 26	2980	800	1830	1,5
C15	150	150	455	0 ÷ 35	2250	700	460	-
WT.3000	300	300	450	0 ÷ 30	3100	900	1700	2,2
Flotek 1440	300	300	900	iki 40 m/s	4202	1067	1600	-
AF100	305	305	600	0 ÷ 36	3700	1065	1900	-
EA103	300	300	1000	iki 40 m/s	4000	1100	2100	4

Pateiktoje lentelėje 6 paryškinti modeliai – tai gamintojai. Jie apie šiuos aerodinaminius vamzdžius pateikė išsamią informaciją, o likusiųjų gamintojai pateikė tik pagrindines specifikacijas.

Mokomieji aerodinaminiai vamzdžiai:

- **Aerolab** (8 pav.) (Aerolab. Educational wind tunnel). Gamintojas – kompanija „Aerolab“, įkurta 1947 metais. Šios kompanijos aerodinaminių vamzdžių srauto pulsacijos yra mažiau nei 0,2 %.

„Aerolab“ aerodinaminių vamzdžių oro paėmimo angos (prieškameris) yra varpo formos, o prieškamerio santykis 9,5:1. Srautą tiesinančios grotelės gaminamos korio tipo iš aukštos kokybės aliuminio. Turbulencijos mažinimo ekranai pagaminti iš nerūdijančio plieno. Aerodinaminiuose „Aerolab“ vamzdžiuose montuojami du ekranai vienas po kito. Statinio slėgio žiedai yra sumontuoti prieš darbinę kamerą. Darbinė kamera pagaminta iš organinio stiklo sumontuota į anoduoto aliuminio rėmą. Ji atsidaro iš abiejų šonų ir viršaus. Difuzorius švelniai sulėtina išeinančio oro srauto greitį ir taip mažina variklio naudojamas sąnaudas. Difuzoriaus platėjimo kampas yra 6º (išplatėjimo santykis 1:3). Ventiliatoriai pagaminti iš aukštos kokybės medžiagų ir lengvai balansuojami. Srauto greitis reguliuojamas kintamo dažnio keitikliu. Aerodinaminio vamzdžio dalis, kur sumontuotas ventiliatorius, turi akustinę izoliaciją, kuri mažina triukšmo lygį patalpoje. Ta dalis pagaminta iš dvigubo sluoksnio perforuoto plieno lakštų ir tarp jų įdėtos garsą sugeriančios stiklo izoliacijos.

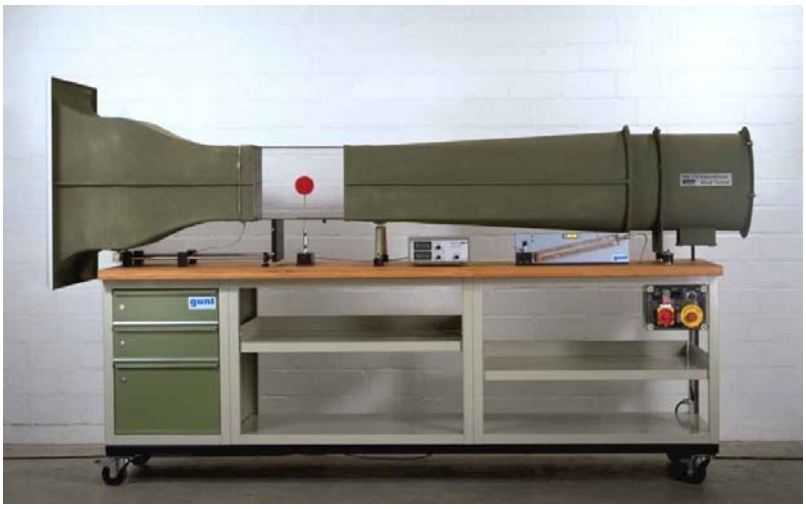


8 pav. Aerodinaminis vamzdis „Aerolab“

- **HM-170** (9 pav.) (G.u.n.t.. Hm-170 Educational wind tunnel: 2005). Gamintojas – kompanija „G.u.n.t.“, įkurta 1979 metais Vokietijoje.

Šis vamzdis dar vadinamas „Eifelio tipo“. Kruopščiai sukonstruota siaurėjančio kanalo (prieškamerio) (jis reikalingas tam, kad padidintų srauto greitį, jam judant į darbinę kamerą) forma garantuoja nekintantį (const) srauto greičio pasiskirstymą darbinėje kameroje, tėkmės greitį rodo vamzdinis manometras. Darbinė kamera yra uždarojo tipo.

Šiuo aerodinaminiu vamzdžiu galima pasiekti greitį iki 101 km/h. Srautą tiesinančios grotelės garantuoja mažą turbulenciją. Siaurėjantis kanalas, kolektorius ir darbinė kamera sumontuoti ant judančio „strypo“ ir gali keisti savo vietą. Ventiliatorius sumontuotas ant guminio paviršiaus, o tai leidžia sumažinti vibracijas darbo metu. Reguliuojamo greičio (speed controlled) variklis, kuris turi ir dažnio keitiklį, valdo ventiliatorių. Ventiliatorius sujungtas su difuzoriumi. Elektroninis galios keitiklis leidžia išmatuoti įvairių objektų pasipriešinimą, keliamąją galią. Išmatuoti dydžiai yra rodomi stiprintuve. Taip pat galima visus duomenis matyti kompiuteryje, tačiau tai komplektuoti galima kaip papildomą priedą.

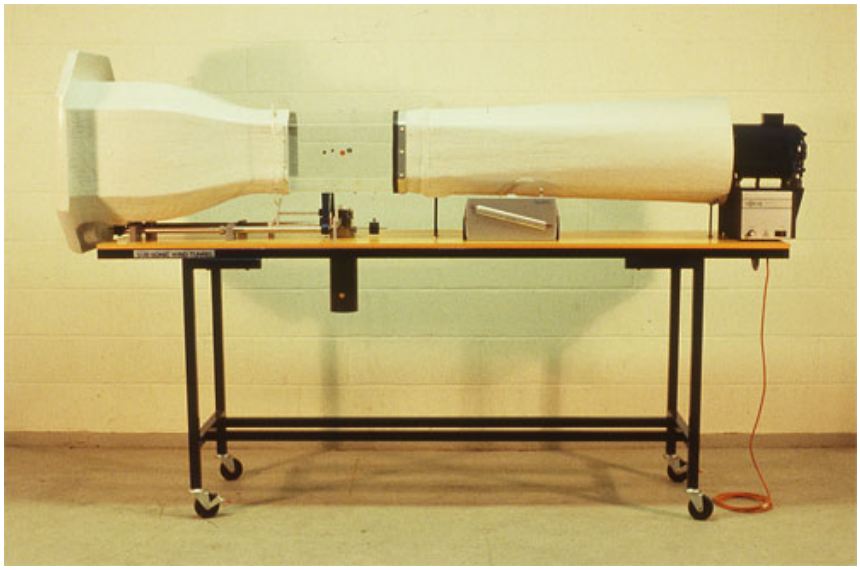


9 pav. „ G.u.n.t.“ aerodinaminis vamzdis „HM-170“

- **C2** (10 pav.) (Armfield. C2 Subsonic wind tunnel: 2006). Gamintojas – kompanija „Armfield“, kuri jau gamina savo produkcija 130 metų. Įkurta Didžiojoje Britanijoje.

„Armfield“ gamintojai teigia, kad jų aerodinaminis vamzdis tinkamas bakalauro darbams rengti ir nesudėtingiems moksliniams tyrimams. Prie aerodinaminio vamzdžio stendo pridedama naudojimo instrukcija. Studentai gali lengvai stebėti srauto vizualizaciją apie tiriamą paviršių, matuoti slėgio pasiskirstymą, skirtingų modelių formų pasipriešinimus, esant įvairiems greičiams. Srauto greičio matavimui komplektuojamas nuožulnusis manometras, kuris sugraduotas tiesiogiai m/s.

Oras patenka į bandymo sekciją per kruopščiai suprojektuotą oro paėmimo angą, pagamintą iš stiklo pluošto, kuri yra aštuoniakampio formos, o prieškamerio santykis 3:1. Srautą tiesinančios grotelės – korio formos, pagamintos iš aliuminio. Penkias mentes turintis ventiliatorius įrengtas difuzoriaus gale. Taisyklingo aštuonkampio formos darbinė kamera pagaminta iš skaidraus akrilo ir gali būti nuimama, o tai gerokai palengvina priėjimą prie modelių. Sumontuotas kintamos galios variklis, kuris gali keisti oro srauto greitį nuo 0 iki 26 m/s.



10 pav. „Armfield“ aerodinaminis vamzdis „C2“

- „Armfield“ gamintojai pateikia dar vieną aerodinaminį vamzdį C15 (11 pav.) valdomu mažu kompiuteriu. Šis aerodinaminis vamzdis, kaip ir C2, tinkamas bakalauro darbams ir nesudėtingiems projektams. Taip pat komplektuojama naudojimo instrukcija. Su šiuo aerodinaminiu vamzdžiu galimas visapusiškas ikigarsinis tyrimas.

Korio tipo srauto ištiesinimo grotelės esančios paėmimo angos pradžioje ir 9,4:1 paėmimo vamzdžio santykis užtikrina sklandų oro srauto tekėjimą darbo kameroje. Darbo kamera pagaminta iš skaidraus akrilo ir suteikia gerą matomumą. Darbo kameroje sumontuoti elektroniniai statinio slėgio davikliai, apskaičiuojamas srauto greitis ir rodomas kompiuterio ekrane. Taip pat galimas

rankinis slėgio matavimas su vandens manometrais ir gautus rezultatus galima užrašyti rankiniu būdu į kompiuterį. Modeliai į darbo kamerą dedami per sumontuota 120 mm apskritą stoglangį. Sumontuotas kintamos galios variklis, kuris gali keisti oro srauto greitį nuo 0 iki 34 m/s (Armfield. C15 Subsonic wind tunnel: 2006).



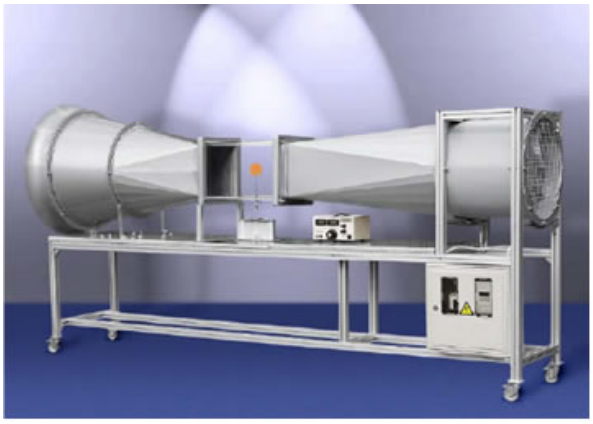
11 pav. „Armfield“ aerodinaminis vamzdis „C15“

- **WT.3000** (12 pav.) (Stirolab Material testing technology . WT.3000 Subsonic wind tunnel) Gamintojas – kompanija „Stirolab“, įsikūrusi – Slovėnijoje.

Tai atvirojo tipo aerodinaminis vamzdis, kuriuo galima atlikti daugelį įvairių tyrimų, ir prie kurio pridėta speciali programinė įranga. WT.3000 pagamintas iš anodizuoto aliuminio ir yra sumontuotas ant ratukų, kad būtų galimybė jį pastatyti į bet kurią vietą.

Iš akrilinio stiklo pagaminta darbinė kamera yra nuimama, kad būtų galima lengviau keisti tiriamuosius paviršius. Oro srautas sukuriamas 2,2 kW galingumo varikliu ir ašiniu ventiliatoriumi, kuris kelia mažo triukšmo lygį. 7 ventiliatoriaus mentės išlietos iš aliuminio, o tai garantuoja minimalią turbulenciją. Ventiliatoriaus greitis reguliuojamas kintamo dažnio keitikliu. Srauto greitis gali būti keičiamas nuo 0 iki 30 m/s. Iš polikarbonato pagamintos korio tipo srautą tiesinančios grotelės su ilgio/skersmens santykiu 1:10 įrengtos oro ėmiklyje. Susiaurėjimo kanalo santykis – 1:10.

Šiuo vamzdžiu galimi įvairūs eksperimentai: srauto vizualizavimo aplink stebimą paviršių tyrimas; slėgio pasiskirstymo apie profilį arba cilindrą tyrimai; pasipriešinimo jėgos koeficientų apskaičiavimai įvairiems kūnams: sferoms, pusrutuliams, diskams, aptakiems paviršiams ir kt.; profilių keliamosios ir pasipriešinimo jėgų koeficientų nustatymas; slėgio pasiskirstymo aplink įvairius profilius matavimai ir kt.



12 pav. „Stirolab“ aerodinaminis vamzdis „WT.3000“

- **Flotek 1440** (13 pav.) (GDJ Inc. Flotek 1440 Subsonic wind tunnel 2008). Šis vamzdis yra pagamintas amerikiečių „GDJ Inc.“ kompanijos. Tai populiariausias „GDJ Inc.“ pagamintas mokslinių tyrinėjimų aerodinaminis vamzdis, skirtas inžinerinių ir technologinių pakraipų universitetams. Šis aerodinaminis vamzdis turi ilgiausią darbinę kamerą iš anksčiau paminėtų modelių. Ilgesnė bandymo kamera suteikia galimybę nuskaityti daugiau duomenų taškų. Bandymo kamera pagaminta iš skaidraus akrilo, o tai pagerina stebėjimo kokybę ji yra lengvai nuimama, o likusi konstrukcijos dalis pagaminta iš plieno. Oras darbinei kamerai tiekiamas per kūgio formos kanalą ventiliatoriumi. Plastikinės „korėtos“ srautą tiesinančios grotelės (ilgio/skersmens santykis 10:1) garantuoja laminarinį srauto tekėjimą per darbinę kamerą. Prieškamerio santykis 12:1. Oro srauto greitis bandymo kameroje gali būti pasiektas iki 40 m/s.

„GDJ Inc“ kompanija itin didelį dėmesį kreipia į saugumą. Flotek aerodinaminiai vamzdžiai pagaminti tvirtos konstrukcijos ir visi komponentai kokybiški ir patikimi.



13 pav. „GDJ Inc.“ aerodinaminis vamzdis „ Flotek 1440 “

- „GDJ Inc“ kompanija dar pateikia du aerodinaminius vamzdžius „Flotek 250” ir „Flotek 360” šie modeliai nebus nagrinėti, nes turi mažesnes darbines kameras. Optimaliu iš šios kompanijos yra „Flotek 1440” aerodinaminis vamzdis.

Apžvalgos aptarimas

Apžvelgus mokomuosius aerodinaminius vamzdžius pastebima, kad labiausiai savo konstrukcija išsiskiria dviejų gamintojų vamzdžiai, t. y. „Armfield“ C2 prieškamerio skerspjūvio forma yra aštuoniakampė, „Stirolab“ WT.3000 – apskritimo, o visų kitų likusiųjų aerodinaminių vamzdžių prieškamerio skerspjūvio formos – kvadrato. Iš visų minėtųjų gamintojų didžiausias oro srauto greitis sukuriamas „Aerolab“ aerodinaminiame vamzdyje, kuris gali būti iki 65 *m/s,* bet reikalauja didžiausios galios, lyginant su kitais gamintojais. Visų aerodinaminių vamzdžių darbinės kameros yra stačiakampės, skiriasi tik jų dydis ir ilgis, bet visgi „Armfield“ C2 modelio darbinė kamera yra aštuoniakampio formos. Aštuoniakampio formos darbinė kamera nėra tinkamiausia PEK aerodinaminiam vamzdžiui, nes reikalingas didelis pastatymo plotas.

Pagrindiniai šių aerodinaminių vamzdžių trūkumai yra tai, kad jie labai brangūs ir labai triukšmingi. Visi šie stendai Pek yra netinkami dėl savo triukšmo ir kainos, todėl bus projektuojamas stendas, kuris tiks Pek.

4. Pastato modelis ir aerodinaminio vamzdžio geometrija

Šiame skyriuje nagrinėsime būsimo Pek aerodinaminio vamzdžio geometrines formas. Išsiaiškinta, kad visa aerodinaminio vamzdžio geometrija priklauso nuo darbinės kameros dydžio. Todėl pirmiausiai išnagrinėsime pastato modelį, kuris gali būti bandomas mokomajame stende, o nuo bandinio dydžio tiesiogiai priklausys ir darbinės kameros dydis.

4.1. Pastato modelis ir prielaidos

Norint tinkamai sumodeliuoti pasirinktą pastatą aerodinaminiame vamzdyje reikia pasirinkti tinkamus įvairių kriterijų parametrus, t. y. vėjo greitį, modelio dydį. Šiems dydžiams tinkamai įvertinti yra naudojami įvairūs panašumo kriterijai, bet aerodinaminio vamzdžio modeliavimui pasirenkamas ***Reinoldso panašumo kriterijus***. Reinoldso panašumo kriterijus pasirinktas todėl, kad jis nenagrinėja tekėjimo reiškinius. Reinoldso kriterijaus išraiška turi tenkinti tiek realius objektus, tiek modelius, o ją galime užrašyti taip:

$$\mathrm{Re} = \frac{v_m \cdot l_m}{\upsilon_m} = \frac{v_n \cdot l_n}{\upsilon_n}. \qquad (1)$$

čia: v_m, v_n – vėjo greitis modelyje ir natūroje, *m*;

l_m, l_n – pastato charakteringas matmuo modelyje ir natūroje, *m*;

υ_m, υ_n – kinematinis klampumas, *m*.

Visgi, norint tinkamai sumodeliuoti kompiuterine programa ar aerodinaminiu vamzdžiu reikia priimti šiuos kriterijus (Chavez *et al*. 2011:330 – 339 p.):

a) Geometrinis panašumas tarp realaus pastato ir modelio turi būti išlaikytas. Šiuo atveju naudosime 1:200 mastelį, šis mastelis yra dažniausiai taikomas. Pastatas natūroje yra 30 x 30 x 30 m (toks pats kaip ir Vilniaus generalinė prokuratūra). Kai pasirinktas mastelis yra 1:200, tada modelio matmenys bus išreikšti iš 2 formulės:

$$M_l = \frac{l_m}{l_n}. \qquad (2)$$

Iš 2 formulės išreiškiame modelio matmenis:

$$l_m = l_n \cdot M_l, m. \qquad (3)$$

Tada:

$$l_m = 30 \cdot \frac{1}{200} = 0{,}15\, m.$$

Modelio, kuris bus modeliuojamas aerodinaminiame vamzdyje ir kompiuterine programa (Phoenics) yra 15 x 15 x 15 cm. Šis modelio dydis yra tinkamas, nes tokio dydžio bandinį pagaminti nesudėtinga.

b) Jeigu pastato Reinoldso skaičius (*Re*) >11000, tada tekėjimo pobūdis nusistovi ir nepriklauso nuo *Re*, šis reiškinys vadinamas *automodeliškumu.* Taigi tekėjimo greitis modelyje gali būti bet koks, tačiau tenkinti šias sąlygas (Chavez *et al*. 2011: 330 – 339 p.):

- tekėjimas turi būti automodeliškas,
- greitis modelyje turi būti toks, kad jį būtų galima patikimai išmatuoti.

Skaičiuojant natūroje *Re* skaičių pagal 1 formulę, reikia įvertinti lauko oro temperatūrą, kuri yra lygi 18 *ºC*. Norint suskaičiuoti *Re* reikia papildomai įvertinti dinaminį klampumą ir tankį,. Dinaminis klampumas vertinamas pagal 20 formulę, o tankis pagal 19 formulę.

Dinaminis klampumas ir oro tankis priklauso nuo temperatūros, o oro temperatūra modelyje ir natūroje priimama tokia pati (18 *ºC*), tuomet dinaminis klampumas lygus $1{,}804 \cdot 10^{-5}$ *Pa·s*.

Priimame, kad vėjo greitis, kuris veikia pastato atitvaras yra 5 *m/s*, o pastato charakteringas matmuo – pastato aukštis yra 30 *m*. Tada *Re* yra lygus:

$$\mathrm{Re} = \frac{5 \cdot 30}{1{,}488 \cdot 10^{-5}} = 1{,}008 \cdot 10^{7} > 11000$$

Taigi, *Re* skaičius daug didesnis už 11000, todėl tekėjimas yra automodeliškas ir oro srauto greitį, kuris aptekės pastatą reikia priimti tokį, kad būtų patogu jį išmatuoti. Taigi oro srauto greitis aerodinaminiame vamzdyje ir kompiuterinėje programoje bus nustatytas **10 *m/s*** (tada *Re*=10081).

c) Taip pat reikia atsižvelgti į aplinkos paviršiaus šiurkštumą. Paviršiaus šiurkštumas nusako koks yra pasienio sluoksnio storis. Todėl modeliuojant aerodinaminiame vamzdyje reikia nustatyti paviršiaus šiurkštumą. Paviršiaus šiurkštumą nustatymo metodika yra aprašyta (Guoliang liu *et al*. 2002: 1155–1162), bet šiuo atveju, priimama, kad visoje skalėje šiurkštumo koeficientas yra lygus 0,66 m, tuomet pasinaudojus geometriniu panašumo koeficientu gauname, kad aerodinaminiame vamzdyje paviršiaus šiurkštumas yra 0,0033 m (Chavez *et al*. 2011:330–339).

Pastato modelio dydis yra pakankami svarbus, nes siekiama, kad jį pagaminti būtų nesudėtinga, o kuo jis yra mažesnis, tuo jį sunkiau pagaminti. Todėl kitame poskyryje nagrinėjama aerodinaminio vamzdžio geometrija, pradedant nuo darbinės kameros dydžio, kuris priklausys nuo pastato modelio.

4.2. Aerodinaminio vamzdžio geometrija

Aerodinaminio vamzdžio geometrinės formos bus vertinamos naudojantis vadovėliu *„Low-speed wind tunnel testing“* ir moksliniais straipsniais. Ankstesniame poskyryje yra išnagrinėtas

pastato modelis, nuo jo priklauso darbinės kameros dydis, taigi aerodinaminio vamzdžio geometrija pradedama formuoti nuo darbinės kameros.

4.2.1. Darbinės kameros dydžio parinkimas

Darbinės kameros dydis paprastai būna startinis taškas projektuojant vamzdį. Darbinės kameros dydis įtakoja Reinoldso skaičių, be to nuo jos priklauso ir insvesticijos reikalingos visam aerodinaminiam vamzdžiui įrengti (Jewel *et al*. 1999). Darbinės kameros forma priklauso nuo to, kas bus tiriama joje (lėktuvų, automobilių, laivų modeliai). Jos turi atitikti keliamus reikalavimus, Pek darbiniai kamerai keliami reikalavimai yra šie:

- Pakankamai erdvi, patogiai tirti objektų aptekėjimus;
- Patogus priėjimas norint pasukti ar pakeisti bandinį;
- Kuo didesnis pastatomas plotas;
- Aplinka neturėtų įtakos rezultatų patikimumui.

Parenkant aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros dydį, svarbu žinoti, koks būtų optimalus pastato modelio dydis. Anksčiau nagrinėto pastato modelį nėra sudėtinga pagaminti, todėl galime priimti, kad tai ir yra optimalus modelio dydis, nes mažesniame modelyje būtų sunku sumontuoti slėgio jutiklius.

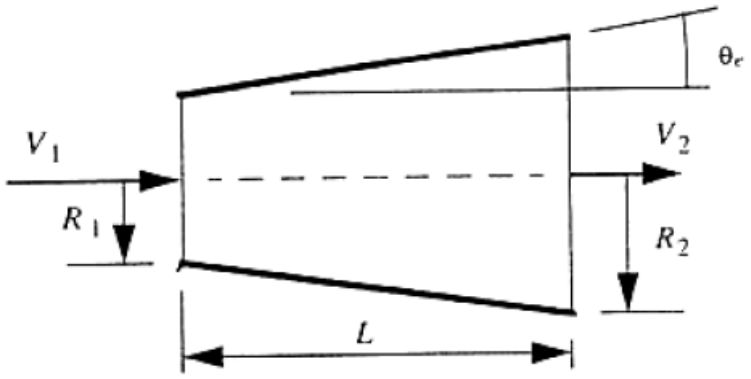
Šio mokomojo stendo darbinės kameros dydis turi būti toks, kad bandomojo modelio skerspjūvio plotas neužimtų daugiau kaip 10 % darbinės kameros skerspjūvio. Kadangi modelio skerspjūvis yra 0,0225 m^2, tada darbinės kameros skerspjūvio plotas turėtų būti 0,225 m^2, šį plotą atitinka stačiakampis, kurio kraštinės yra 0,47 x 0,47 m. Gauti darbinės kameros skerspjūvio matmenys koreguojami į didesniąją pusę, tada jos aukštis ir plotis yra po 0,5 m, o ilgis priimamas toks, kad būtų patogu tirti teršalų sklidimą aplinkoje, tai 1,0 m.

Pasirinkus tokius darbinės kameros matmenis, bus pasiektas didžiausias pastatymo plotas. Taip pat pasirenkama, kad darbinė kamera bus uždarojo tipo, tuomet aerodinaminiai nuostoliai ir aplinkos poveikis tyrimų rezultatams bus mažesni. Darbinė kamera bus pritaikyta taip, kad būtų galima prieiti prie bandinio iš šono, o tai palengvins darbą pastatant ar pasukant bandinį.

4.2.2. Difuzorius

Difuzoriuje srauto greitis krenta, o slėgis didėja – taip pasiekiami mažesni slėgio nuostoliai difuzoriuje ir garantuojamas mažesnis energijos suvartojimas (Bell 1989: 372 - 374).

Difuzoriaus geometrija apibūdinama įėjimo į difuzorių spinduliu R_1, išėjimo iš difuzoriaus spinduliu R_2, difuzoriaus ilgiu L, kūginiu plėtimosi kampu θ ir išėjimo/įėjimo plotų santykiu A_2/A_1 (Jewel *et al*. 1999).



14 pav. Difuzoriaus geometrija ir žymėjimas

14 pav. yra pateiktas difuzorius, kuriame yra pateiktas žymėjimas, kur V_1 yra srauto greitis įtekantis į difuzorių, V_2 – ištekančio iš difuzoriaus oro srauto greitis. R_1 – difuzoriaus įėjimo spindulys, R_2 – difuzoriaus išėjimo spindulys.

Difuzoriaus efektyvumas išreiškiamas naudingumo koeficientu η_D (Pankhurst, Holder. 1952).

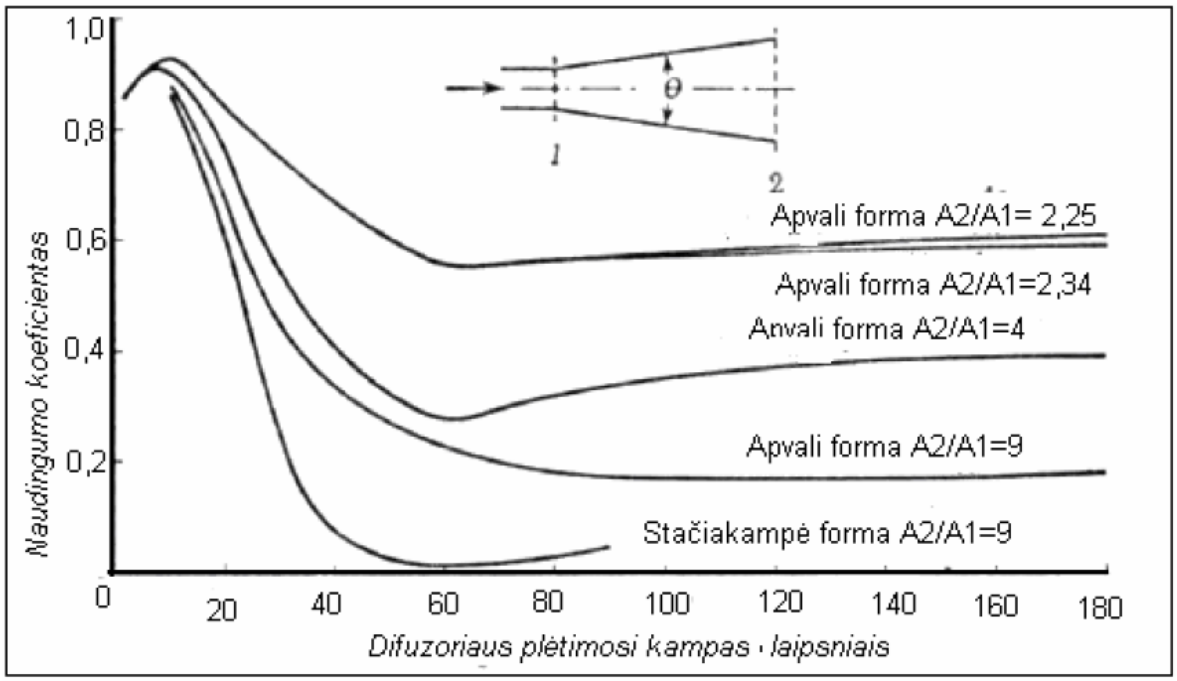
$$\eta_D = \frac{2}{1+\frac{A_2}{A_1}}; \tag{4}$$

čia: A_2 – Difuzoriaus išėjimo skerspjūvis;

A_1 – Difuzoriaus įėjimo skerspjūvis.

Taigi, iš formulės galima teigti, kad difuzoriaus koeficientą nulemia įėjimo ir išėjimo skerspjūvio plotai. Nors įėjimo skerspjūvis yra sujungiamas prie darbinės kameros skerspjūvio, tai labiausiai nulemia išėjimo skerspjūvis.

Praktinių bandymų metu nustatytos naudingumo reikšmės, esant skirtingiems santykiams tarp įėjimo ir išėjimo skerspjūvių. Rezultatai pateikti 15 paveiksle.



15 pav. Mažo greičio aerodinaminių vamzdžių difuzoriaus naudingumo priklausomybė nuo difuzoriaus išėjimo ir įėjimo skerspjūvių santykio ir plėtimosi kampo (Pankhurst, Holder. 1952).

Iš grafiko matome, kad didžiausias naudingumas pasiekiamas kai A_2/A_1 = 2,25 ir difuzoriaus išsiplėtimo kampas yra apie 10º/2=5º.

Taigi, Pek darbinės kameros skerspjūvis yra prilyginamas difuzoriaus įėjimo skerspjūviui, tada:

$$A_1 = a \cdot b = 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 0{,}25\,m^2. \tag{5}$$

čia: a – darbinės kameros vidinių matmenų plotis, m;

b – darbinės kameros vidinių matmenų aukštis, m.

Pasirenkama, kad difuzoriaus platėjimo kampas yra 5º, o išėjimo skerspjūvis parenkamas pagal pasirinktą ašinio ventiliatoriaus skersmenį, kuris yra 710 mm, nes didinant skersmenį labai išauga ir ventiliatoriaus kaina.

Difuzoriaus ilgis yra nustatomas remiantis šia (6) formule:

$$\theta = \arctan\left(\frac{R_2 - R_1}{L}\right); \tag{6}$$

Tada ilgis yra:

$$L = \left(\frac{R_2 - R_1}{tg\theta}\right); \tag{7}$$

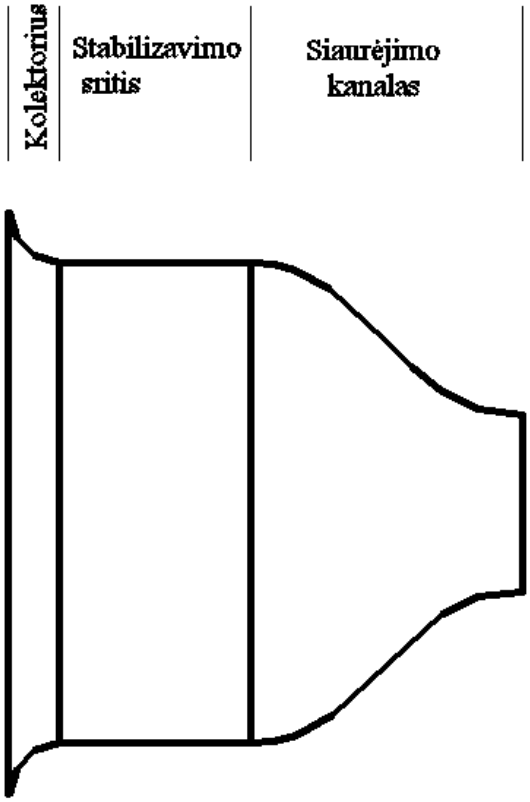
Taigi:

$$L = \left(\frac{0{,}3555 - 0{,}25}{tg5} \right) = 1{,}206\, m.$$

Parenkamas difuzoriaus išėjimo skerspjūvis – 710 mm ir ilgis – 1,206 m.

4.2.3. Prieškameris

Prieškameris yra sudarytas iš kolektoriaus, stabilizavimo srities ir siaurėjimo kanalo 16 pav.



16 pav. Prieškamerio konstrukcija

Mažiausiai svarbi dalis šiame prieškameryje yra kolektorius, jis reikalingas tam, kad sušvelninti oro srautą patenkantį į stabilizavimo sritį, bet šios dalies gali ir nebūti.

Siaurėjimo kanalas geriausias, kai yra varpo formos – taip padedama sukurti vienodą oro srautą. Susiaurėjimas padidina vidutinį oro srauto greitį, todėl srautą tiesinančios grotelės ir ekranai montuojami mažo greičio zonoje – srauto stabilizavimo srityje, taip sumažinami slėgio nuostoliai. Susiaurėjimo kanale įmanoma išvengti srauto atsiskyrimo, kai šis kanalas labai pailginamas, bet gamybos išlaidos ir pasienio sluoksnio storis padidėja. Didelis susiaurėjimo kameros susitraukimo santykis yra palankus, bet tai reiškia didesnes pagaminimo išlaidas. Susiaurėjimo santykis nedideliuose aerodinaminiuose vamzdžiuose yra taikytinas tarp 6 ir 9. Prieškamerio skerspjūvio forma gali būti kvadrato, apskritimo ar aštuonkampio (Bell 1989: 372 - 374).

Norint sumažinti slėgio nuostolius prieškameryje, reikia, kad įėjimo ir išėjimo plotų santykis būtų ne mažesnis negu 8, tačiau įvertinus, kad PEK aerodinaminis vamzdis neveiks pastoviai priimama, kad stabilizavimo srities plotų santykis lygus 7,5. Tada prieškamerio įėjimo plotas yra:

$$A_{IN} = A_{DK} \cdot 7{,}5 = 0{,}25 \cdot 7{,}5 = 1{,}875\, m^2. \quad (8)$$

čia: A_{IN} – stabilizavimo srities (susiaurėjimo kanalo įėjimo plotas) plotas, m^2;

A_{DK} – Darbinės kameros plotas, m^2.

Tada prieškamerio skersmuo yra:

$$D_{IN} = \sqrt{A_{IN}} = \sqrt{1{,}875} = 1{,}369\, m. \quad (9)$$

Stabilizavimo sritis:

Nors literatūroje rašoma, kad prieškamerio kameros ilgis yra 0,5 stabilizavimo srities skersmens, pasirenkama, kad PEK stabilizavimo srities ilgis yra 0,4 skersmens stabilizavimo srities.

Stabilizavimo srities ilgis:

$$L_{st} = 0{,}4 \cdot 1{,}875 = 0{,}55\,\text{m}. \quad (10)$$

Siaurėjimo kanalas (tūta):

Susiaurėjimo srities forma reikalauja kruopštaus geometrijos parinkimo. Atitinkami literatūros šaltiniai rašo, kad šia forma galima „suprojektuoti iš akies“, bet profilio geometriją galima taip pat nustatyti panaudojant šią formulę (Brassard 2003):

$$h = \left[-10 \cdot \left(\xi^3\right) + 15 \cdot \left(\xi^4\right) - 6 \cdot \left(\xi^5\right)\right] \cdot \left(H_i - H_0\right) + H_i; \quad (11)$$

čia: h – funkcija, kurios kreivė parodo įsislėgimo kanalo profilio formą;

H_0 – siaurėjimo kanalo aukštis išėjime, vertinant nuo simetrijos ašies;

ξ – ilgio koeficientas, kuris randamas:

$$\xi = \frac{x}{L}; \quad (12)$$

čia: L –siaurėjimo kanalo ilgis, m;

x – ilgis nuo susiaurėjimo kanalo įėjimo iki skaičiuotino taško, m ;

Siaurėjimo kanalo ilgis yra rekomenduotinas nuo 0,5 iki 1 oro ėmiklio skersmens, kai darbinės kameros ilgis nuo 0,5 iki 1,5 jos skersmens. Taigi PEK susiaurėjimo kanalo ilgis priimamas 0,58 oro ėmiklio skersmens.

Tada L_{sus}:

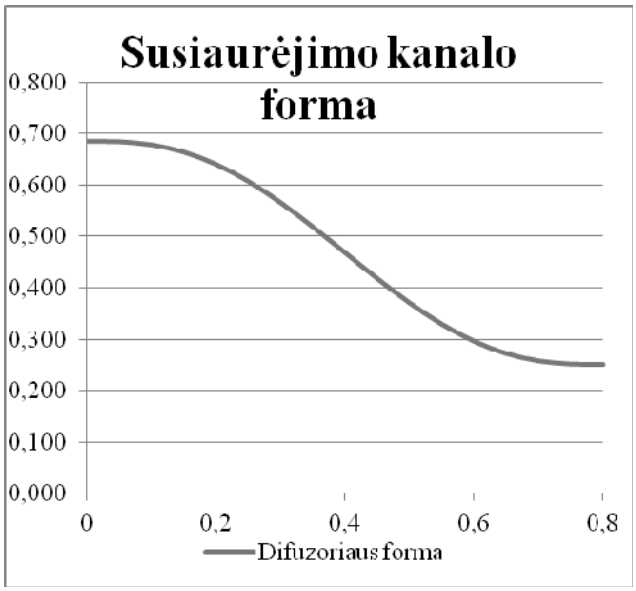
$$L_{sus} = 1{,}369 \cdot 0{,}58 = 0{,}8\, m. \quad (13)$$

Taigi, naudojantis 11 ir 12 formulėmis sudaroma susiaurėjimo kanalo geometrijos forma ir skaičiavimų rezultatai pateikiami 3 lentelėje, o forma pateikiama 17 pav.

3. lentelė. Susiaurėjimo kanalo skaičiavimo rezultatai

Kanalo skerspjūvio eilės numeris	Pozicija nuo įėjimo skersmens, m (x koordinatė)	Ilgio koeficientas	Aukštis nuo simetrijos linijos, m (y koordinatė)
1	2	3	4
0	0	0,000	0,685
1	0,05	0,063	0,684
2	0,1	0,125	0,678
3	0,15	0,188	0,663
4	0,2	0,250	0,640
5	0,25	0,313	0,606
6	0,3	0,375	0,565
7	0,35	0,438	0,518
8	0,4	0,500	0,467
9	0,45	0,563	0,417
10	0,5	0,625	0,370
11	0,55	0,688	0,328
12	0,6	0,750	0,295
13	0,65	0,813	0,271
14	0,7	0,875	0,257
15	0,75	0,938	0,251
16	0,8	1,000	0,250

Gautus rezultatus pateikiame grafiškai 17 pav.



17 pav. siaurėjimo kanalo kraštinės lenkimo kreivė.

Susisteminus duomenis grafike, matome, kaip turi atrodyti siaurėjimo kanalo forma, kai jos ilgis yra 0,8 m.

Tada, bendras ilgis prieškamerio susideda iš kolektoriaus (nėra būtinas), stabilizavimo srities ir siaurėjimo kanalo ir yra:

$$L_{pr} = L_{sus} + L_{st} + L_k = 0{,}8 + 0{,}55 + 0{,}13 = 1{,}48m. \quad (14)$$

čia: L_k –kolektoriaus ilgis, m.

4.2.4. Srautą tiesinančios grotelės

Anksčiau buvo minėta, kad srautą tiesinančių grotelių paskirtis – sumažinti oro srauto sūkurius. Grotelių būna įvairių formų, o jos gaminamos iš plastiko, aliuminio ir kt. Aliuminio grotelės yra tikslesnės ir naudojamos aukštos kokybės aerodinaminiams vamzdžiams, ir ten, kur tikimąsi didelių oro srauto apkrovų (Bell 1989: 372 - 374).

Kvadratinės ir trikampės tiesinančios grotelės parenkamos dėl gamybos paprastumo, bet dažniausiai pasitaikančios – korio formos. Atlikti tyrimai parodė, kad korio tipo grotelės veiksmingiausiai mažina oro srauto sūkurius, kai narvelių ilgis mažiausiai 6 – 8 kartus didesnis už jų skersmenį.

Pek katedros aerodinaminiame vamzdyje bus naudojamos plastikinės, kvadratinės grotelės. Šių grotelių vidiniai matmenys (akutės vidinis skersmuo) yra 8 mm, o žinant, kad geriausias ilgis yra 6 – 8 kartus didesnis už jų skersmenį, taigi parenkamas grotelių ilgis – apie 48 mm.

4.2.5. Turbulencijos mažinimo ekranai

Pagrindinė ekranų paskirtis yra išlyginti oro srautą ir sumažinti pasienio sluoksnio storį. Aerolab aerodinaminis vamzdis pasiekia net iki 0,2% oro srauto turbulizuotumą, bet Pek katedra tirs oro srautų reiškinius aplinkoje, todėl siektinas turbulizuotumo lygis yra apie 2%. Kaip buvo minėta anksčiau, jie gaminami iš įvairių medžiagų, priklausomai nuo to, kokia apkrovas jie turės atlaikyti. Taigi atsižvelgus į rekomendacijas, nuspręsta, kad geriausia naudoti du tinklus, kurie vienas nuo kito būtų nutolę 0,2 stabilizavimo srities skersmens. Šių tinklų akučių skersmuo 6 mm, o vielos storis 1 mm.

4.2.6. Apsauginiai tinklai

Norint apsaugoti Pek aerodinaminio vamzdžio ventiliatorių nuo atskilusių bandinio dalių ir apsaugoti studentus nuo susižeidimo, prieš ir po ventiliatoriaus bus montuojami plieniniai tinklai. Naudojamo tinklo akučių skersmuo 10 mm, o vielos storis 1 mm.

5. PEK aerodinaminio vamzdžio aerodinaminių nuostolių skaičiavimas

Pagrindinis elementas, kuris priverčia oro srautą judėti per darbinę kamerą yra ventiliatorius, norint tinkamai jį parinkti, reikia įvertinti slėgio nuostolius, kurie kyla dėl paviršių šiurkštumo ir vietinių kliūčių (srauto stabilizavimo grotelių, ekranų ir t.t.). Aerodinaminio vamzdžio nuostolių skaičiavimo metodiką aprašo „Jewel, B. Barlow, William H. Rae, Jr. Alan Pope.*„Low-speed wind tunnel testing“* literatūra. Šioje literatūroje yra aprašyta aerodinaminio vamzdžio skaičiavimo metodika. Taip pat aerodinaminius nuostolius skaičiuosime pagal E. Juodžio vadovėlį „Vėdinimas“. Šio vertinimo tikslas palyginti dvi aerodinaminių nuostolių skaičiavimo metodikas. Viena metodika pritaikyta aerodinaminiams vamzdžiams skaičiuoti, o kita skaičiavimo metodika yra bendroji ,vėdinimo slėgiams skaičiuoti, naudojama projektuojant vėdinimo sistemas ir pan.

5.1. Darbinė kamera

Darbinėje kameroje kylantys slėgio nuostoliai atsiranda dėl trinties į sieneles. Kylančius nuostolius darbinėje kameroje galima išreikšti nuostolių koeficientu (Jewel *et al*. 1999):

$$K_l = f \cdot \frac{L}{D_h}; \tag{15}$$

čia: L – darbinės kameros ilgis, m;

D_h – Darbinės kameros hidraulinis skersmuo, m;

f – trinties koeficientas.

Darbinės kameros hidraulinis skersmuo randamas:

$$D_h = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_{DK}}{\pi}}; \tag{16}$$

čia: A_{DK} – darbinės kameros skerspjūvio plotas, m^2;

Tada:

$$D_h = 2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}25}{3{,}14}} = 0{,}564\,m.$$

Trinties koeficientą galima rasti pasinaudojus Prandtl universaliu trinties dėsniu, siejantį trinties koeficientą ir Reinoldso skaičių (Jewel *et al*. 1999).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log_{10}(\mathrm{Re} \cdot \sqrt{f}) - 0{,}8 \tag{17}$$

čia: *Re* - Reinoldso skaičius, kuris apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot U \cdot D_h}{\mu}; \tag{18}$$

čia: U – oro srauto greitis darbinėje kameroje, m/s (15 m/s);

D_h – darbinės kameros hidraulinis skersmuo, m;

ρ – oro tankis, kg/m^3;

μ – oro dinaminis klampumas, $Pa{\cdot}s$.

Oro tankį apskaičiuojamas:

$$\rho = \frac{353}{t + 273{,}15} = \frac{353}{18 + 273{,}15} = 1{,}212\, kg/m^3. \tag{19}$$

čia: t – oro temperatūra patalpoje, ºC.

Dinaminis oro klampumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\mu = \frac{1{,}458 \cdot 10^{-6} \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T + 110{,}4} = \frac{1{,}458 \cdot 10^{-6} \cdot (273{,}15 + 18)^{\frac{3}{2}}}{(273{,}15 + 18) + 110{,}4} = 1{,}804 \cdot 10^{-5}\ Pa \cdot s. \tag{20}$$

Pagal 18 formulę skaičiuoju Reinoldso skaičių:

$$\mathrm{Re} = \frac{1{,}212 \cdot 15 \cdot 0{,}564}{1{,}804 \cdot 10^{-5}} = 569000$$

Toliau skaičiuoju trinties koeficientą *f*. Jo skaičiavimui naudoju supaprastintą 17 formulės išraišką (Jewel *et al*. 1999):

$$f = \frac{1}{\left[2 \cdot \log_{10} \cdot \left(\mathrm{Re}\sqrt{f}\right) - 0{,}8\right]^2} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log_{10} \cdot \left(569000\sqrt{1}\right) - 0{,}8\right]^2} = 0{,}0087 \tag{21}$$

Pradinę trinties koeficiento reikšmę rekomenduotina imti *f*=1 (Jewel *et al*. 1999).

Naudojant 15 formulę apskaičiuojame darbinės kameros nuostolių koeficientą:

$$K_l = 0{,}0087 \cdot \frac{1}{0{,}564} = 0{,}0155$$

Pasinaudojus darbinės kameros nuostolių koeficientu, skaičiuoju slėgio nuostolius darbinėje kameroje:

$$\Delta p = K_l \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2} = 0{,}0155 \cdot \frac{1{,}212 \cdot 15^2}{2} = 2{,}11\, Pa. \tag{22}$$

Taigi, darbinės kameros slėgio nuostoliai, kylantys dėl oro srauto trinties į sieneles yra 2,11 *Pa*.

5.2. Difuzorius

Oro srautui tekant difuzoriumi kinta srauto parametrai (greitis, slėgis). Difuzoriuje kylančius nuostolius galima išreikšti bendru difuzoriaus nuostolių koeficientu (Jewel *et al*. 1999).

$$K_d = K_f + K_{ex} \tag{23}$$

čia: K_f – nuostolių, kilusių dėl oro srauto trinties į sieneles koeficientas;

K_{ex} – nuostoliai, kurie kyla dėl difuzoriaus išplatėjimo.

Trinties nuostolių skaičiavimas:

Nuostoliai kylantys dėl difuzoriaus paviršiaus šiurkštumo apskaičiuojami pagal formulę (Jewel *et al*. 1999):

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{A_R^2}\right) \cdot \frac{f}{8 \cdot \sin\theta}; \tag{24}$$

čia: A_R– difuzoriaus išėjimo/įėjimo plotų santykis A_2/A_1;

f – trinties koeficientas. Priimamas toks pats kaip ir darbiniai kamerai;

θ – difuzoriaus išsiplėtimo kampas.

Trinties koeficientas apskaičiuojamas remiantis į difuzorių įtekančio srauto Reinoldso skaičiumi kai srautas teka per nekintantį skerspjūvį.

Tada nuostolių koeficientas K_f lygus:

$$K_f = \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{0{,}397}{0{,}25}\right)^2}\right) \cdot \frac{0{,}0087}{8 \cdot \sin 5} = 0{,}0075\,.$$

Nuostoliai kylantys dėl difuzoriaus išsiplėtimo:

Difuzoriaus nuostoliai, kurie kyla dėl išsiplėtimo, priklauso nuo difuzoriaus kūginio plėtimosi kampo funkcijos $K_e(\theta)$ ir difuzoriaus išėjimo ir įėjimo plotų santykio.

Išsiplėtimo nuostolių koeficientas apskaičiuojas pagal šią formulę (Jewel *et al*. 1999):

$$K_{ex} = K_e(\theta) \cdot \left(\frac{A_R - 1}{A_R}\right)^2; \tag{25}$$

čia: $K_e(\theta)$ – difuzoriaus kūginio plėtimosi kampo funkcija, kuri apskaičiuojama pagal algoritmą. Yra dvi išraiškos algoritmų tai apvaliam difuzoriui

$$K_{e(circle)} \begin{cases} 0{,}1033 - 0{,}02389 \cdot \theta \quad for \quad 0 < \theta < 1{,}5° \\ 0{,}1709 - 0{,}1170 \cdot \theta + 0{,}03260 \cdot \theta^2 + 0{,}001078 \cdot \theta^3 \\ -0{,}0009076 \cdot \theta^4 - 0{,}00001331 \cdot \theta^5 + 0{,}00001345 \cdot \theta^6 \\ for \quad 1{,}5° \le \theta \le 5° \\ -0{,}09661 + 0{,}04672 \cdot \theta \quad for \quad 5° < \theta \end{cases} \tag{26}$$

ir kvadratiniam difuzoriui.

$$K_{e(square)}\begin{cases} 0{,}09623 - 0{,}004152\cdot\theta \quad for \quad 0 < \theta < 1{,}5° \\ 0{,}1222 - 0{,}04590\cdot\theta + 0{,}02203\cdot\theta^2 + 0{,}003269\cdot\theta^3 \\ -0{,}0006145\cdot\theta^4 - 0{,}00002800\cdot\theta^5 + 0{,}00002337\cdot\theta^6 \\ for \quad 1{,}5° \le \theta \le 5° \\ -0{,}01322 + 0{,}05866\cdot\theta \quad for \quad 5° < \theta \end{cases} \tag{27}$$

PEK darbinės kameros skerspjūvis yra kvadratinis, todėl pasirenkama difuzoriaus kūginio plėtimosi kampo funkcija apskaičiuojama pagal kvadratinio difuzoriaus algoritmą.

Kadangi difuzoriaus išsiplėtimo koeficientas 5º, tai:

$$K_{e(square)} = 0{,}1222 - 0{,}04590\cdot\theta + 0{,}02203\cdot\theta^2 + 0{,}003269\cdot\theta^3 - 0{,}0006145\cdot\theta^4 - 0{,}00002800\cdot\theta^5 +$$
$$+ 0{,}00002337\cdot\theta^6 = 0{,}1222 - 0{,}04590\cdot 5 + 0{,}02203\cdot 5^2 + 0{,}003269\cdot 5^3 - 0{,}0006145\cdot 5^4 -$$
$$- 0{,}00002800\cdot 5^5 + 0{,}00002337\cdot 5^6 = 0{,}746.$$

Pagal 25 formulę, nuostolių koeficientas dėl difuzoriaus platėjimo yra:

$$K_{ex} = 0{,}746\cdot\left(\frac{\frac{0{,}397}{0{,}25} - 1}{\frac{0{,}397}{0{,}25}}\right)^2 = 0{,}101.$$

Tai pagal 20 formulę apskaičiuojame difuzoriuje kylančių nuostolių koeficientą:

$$K_d = 0{,}0075 + 0{,}101 = 0{,}11$$

Skaičiuoju slėgio nuostolius difuzoriuje kameroje:

$$\Delta p_d = K_d \cdot \frac{\rho\cdot U^2}{2} = 0{,}11\cdot\frac{1{,}212\cdot 15^2}{2} = 14{,}84\,Pa. \tag{28}$$

Taigi, difuzoriaus slėgio nuostoliai, kylantys dėl oro srauto trinties į sieneles ir difuzoriaus išsiplėtimo yra 14,84 *Pa*.

5.3. Prieškamerio sekcija

Prieškamerio sekcijoje slėgio nuostolius sudaro srauto stabilizavimo grotelės, turbulencijos mažinimo ekranai, siaurėjimo kanalas ir nuostoliai dėl paviršiaus šiurkštumo.

Slėgio nuostoliai stabilizavimo srityje:

Stabilizavimo srityje yra montuojamos srautą tiesinančios grotelės ir ekranai. Šioje dalyje jie montuojami todėl, kad čia oro srauto greitis yra mažiausias ir sukeliami mažiausi slėgio nuostoliai per išvardintas kliūtis.

Nuostoliai dėl paviršiaus šiurkštumo:

Nuostoliai, kurie sukeliami dėl paviršiaus šiurkštumo skaičiuojami taip pat kaip darbinei kamerai, tačiau reikia iš naujo skaičiuoti Reinoldso skaičių, nes greitis yra mažesnis.

Oro srauto masė pratekanti per darbinę kamera apskaičiuojama pagal formulę:

$$m = m_{DK} = A_{DK} \cdot U \cdot \rho = 0{,}25 \cdot 15 \cdot 1{,}212 = 4{,}547\, kg/s. \quad (29)$$

čia: visi dydžiai paminėti aukščiau esančiose formulėse.

Prieškamerio hidraulinis skersmuo:

$$D_h = 2 \cdot \sqrt{\frac{1{,}875}{3{,}14}} = 1{,}546\, m.$$

Oro srauto greitis stabilizavimo srityje apskaičiuojamas pagal formulę:

$$U_{in} = \frac{m}{\rho \cdot A_{in}} = \frac{4{,}547}{1{,}212 \cdot 1{,}875} = 2{,}00\, m/s. \quad (30)$$

Reinoldso skaičius apskaičiuojamas pagal 15 formulę:

$$\mathrm{Re} = \frac{1{,}212 \cdot 2{,}0 \cdot 1{,}545}{1{,}804 \cdot 10^{-5}} = 208000$$

Toliau skaičiuojamas trinties koeficientą *f*. Skaičiavimus atliekame pagal 21 formulę:

$$f = \frac{1}{\left[2 \cdot \log_{10} \cdot \left(208000\sqrt{1}\right) - 0{,}8\right]^2} = 0{,}0103 \quad (31)$$

Naudojant 15 formulę apskaičiuojame stabilizavimo srities nuostolių koeficientą:

$$K_{st} = 0{,}0103 \cdot \frac{0{,}55}{1{,}546} = 0{,}004$$

Skaičiuojame slėgio nuostolius stabilizavimo srityje dėl paviršiaus šiurkštumo:

$$\Delta p_{st} = K_{st} \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2} = 0{,}004 \cdot \frac{1{,}212 \cdot 2{,}0^2}{2} = 0{,}01\, Pa. \quad (32)$$

Taigi, srauto stabilizavimo srities slėgio nuostoliai, kylantys dėl oro srauto trinties į sieneles yra 0,01 *Pa*.

Slėgio nuostoliai kylantys dėl srauto stabilizavimo grotelių:

PEK aerodinaminiame vamzdyje bus įrengtos plastikinės, apvalios srautą tiesinančios grotelės. Srauto tiesinančių grotelių išorinis skersmuo 8,7 mm, vidinis 8 mm, o ilgis 48 mm.

Grotelėms skaičiuoti yra taikoma 33 formulė (Jewel *et al*. 1999):

$$K_h = \lambda_h \left(\frac{L_h}{D_h} + 3\right) \cdot \left(\frac{1}{\beta_h}\right)^2 + \left(\frac{1}{\beta_h} - 1\right)^2; \quad (33)$$

čia: L_h – grotelių narvelio ilgis, m;

D_h – grotelių narvelio hidraulinis skersmuo, m;

β_h – grotelių korėtumas;

λ_h – koeficientas priklausantis nuo grotelių Reinoldso skaičiaus.

Grotelių korėtumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\beta_h = \left(1 - \frac{d_h}{D_h}\right)^2; \tag{34}$$

čia: d_h – grotelių narvelio sienelės storis, m;

Taigi, grotelių korėtumas yra:

$$\beta_h = \left(1 - \frac{0{,}00070}{0{,}009}\right)^2 = 0{,}851.$$

λ_h koeficientas apskaičiuojamas priklausomai nuo to koks Reinoldso skaičius (Jewel *et al*. 1999):

$$\lambda_h = \begin{cases} 0{,}375 \cdot \left(\frac{d_h}{D_h}\right)^{0{,}4} \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}1} \Rightarrow \mathrm{Re} \le 275 \\ 0{,}214 \cdot \left(\frac{d_h}{D_h}\right)^{0{,}4} \Rightarrow \mathrm{Re} > 275 \end{cases} \tag{35}$$

Grotelių Reinoldso skaičius apskaičiuojamas:

$$\mathrm{Re}_h = \frac{\rho \cdot U_h \cdot d_h}{\mu}; \tag{36}$$

čia: U_h – Oro srauto greitis grotelėse, m/s. Priimamas greitis kaip ir stabilizavimo srityje.

Tada Reinoldso skaičius:

$$\mathrm{Re}_h = \frac{1{,}212 \cdot 2{,}0 \cdot 0{,}0007}{1{,}804 \cdot 10^{-5}} = 94{,}01.$$

Tada λ_h yra:

$$\lambda_h = 0{,}375 \cdot \left(\frac{d_h}{D_h}\right)^{0{,}4} \cdot \mathrm{Re}^{-0{,}1} = 0{,}375 \cdot \left(\frac{0{,}0007}{0{,}009}\right)^{0{,}4} \cdot 94{,}01^{-0{,}1} = 0{,}086. \tag{37}$$

Naudojant 12 formulę apskaičiuojame stabilizavimo srities nuostolių koeficientą:

$$K_h = 0{,}086 \cdot \left(\frac{0{,}048}{0{,}009} + 3\right) \cdot \left(\frac{1}{0{,}851}\right)^2 + \left(\frac{1}{0{,}851} - 1\right)^2 = 1{,}014$$

Skaičiuojame slėgio nuostolius per srautą tiesinančias groteles:

$$\Delta p_h = K_h \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2} = 1{,}014 \cdot \frac{1{,}212 \cdot 2{,}0^2}{2} = 2{,}45\,Pa.$$

Turbulencijos mažinimo ekranai:

Srautui tekant per tinklelį, kuris pagamintas iš vielos, pasipriešinimas apytiksliai proporcingas srauto greičio kvadratui, todėl, pasipriešinimas didesnis tose vietose, kuriose greitis didesnis ir

mažesnis ten, kur greitis mažesnis. Greitesnės srauto linijos, kirsdamos tinklą, išsiplečia, lėtesnės – susitraukia, todėl greičiai tampa panašūs, srauto linijoms kirtus tinklelį.

Tačiau šis greičių susilyginimo išgavimas nulemia didelius slėgio kritimo nuostolius tinklelyje. Daug efektyviau yra naudoti kelis vienas už kito išdėstytus tinklelius, nei vieną su labai tankiais narveliais. Tokiu atveju, siekiant mažesnių energijos nuostolių, tinkleliai stabilizavimo kanale išdėstomi kaip įmanoma toliau – ten srautas yra mažesnio greičio.

Tinklelių, kurie yra naudojami turbulencijai mažinti, korėtumas turi būti didesnis nei 0,57 (Jewel *et al*. 1999). Priešingu atveju darbinėje kameroje gali susidaryti srauto nepastovumas. Viena didžiausių tinklelių problemų – jų gebėjimas kaupti dulkes. Dulkės visada lemia nepastovų srauto pasiskirstymą, todėl tinklelius reikia montuoti taip, kad juos būtų galima lengvai išvalyti.

Nuostolių koeficientas dėl tinklelių apskaičiuojamas pagal formulę (Mehta 1985: 1335 – 1342):

$$K_s = 6{,}5 \cdot \left[\frac{1-\beta_s}{\beta_s^2}\right] \cdot \left[\frac{U_s \cdot d_s}{\beta_s \cdot \upsilon}\right]^{-\frac{1}{3}}; \tag{38}$$

čia: β_s – tinklo akytumas;

U_s – oro srauto greitis, einantis per tinklą, o ne prieš tinklą, m/s;

d_s – tinklo vielos skersmuo, m (d_s =1 mm);

v – kinematinis klampumas, m^2/s.

Tinklo akytumas apskaičiuojamas pagal formulę (Mehta 1985: 1335 – 1342):

$$\beta_s = \left(1 - \frac{d_s}{D_s}\right)^2; \tag{39}$$

čia: D_s – tinklo akies skersmuo, m (D_s =6 mm).

$$\beta_s = \left(1 - \frac{1}{6}\right)^2 = 0{,}694 .$$

Oro greitis tinkle apskaičiuojamas pagal 30 formulę:

$$U_s = \frac{m}{\rho \cdot A_t} = \frac{4{,}547}{1{,}212 \cdot 1{,}341} = 2{,}80\, m/s.$$

čia: A_t – tinklo plotas be vielos užimamo ploto, m^2.

Kinematinis klampumas randamas pagal formule:

$$\upsilon_s = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1{,}8 \cdot 10^{-5}}{1{,}212} = 1{,}49 \cdot 10^{-5}\, m^2/s. \tag{40}$$

Pagal 38 formulę skaičiuojame tinklo nuostolių koeficientą:

$$K_s = 6{,}5 \cdot \left[\frac{1-0{,}694}{0{,}694^2}\right] \cdot \left[\frac{2{,}8 \cdot 0{,}001}{0{,}694 \cdot 1{,}49 \cdot 10^{-5}}\right]^{-\frac{1}{3}} = 0{,}637.$$

Skaičiuojame slėgio nuostolius per turbulencijos mažinimo ekranus:

$$\Delta p_s = n \cdot K_s \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2} = 2 \cdot 0{,}637 \cdot \frac{1{,}212 \cdot 2{,}8^2}{2} = 6{,}04\,Pa. \quad (41)$$

čia: n – tinklų skaičius.

Susiaurėjimo kanalas:

Siaurėjimo kanalo slėgio nuostolius galima išreikšti pagal formulę (Jewel *et al*. 1999).

$$\Delta p_f = \int_0^{L_n} f \frac{\rho}{2} \frac{V_n^2}{D_n} dx; \quad (42)$$

čia: L_n– siaurėjimo kanalo ilgis, m;

D_n – skersmuo pasirinktame siaurėjimo kanalo skerspjūvyje, m;

V_n – Srauto greitis skerspjūvyje, m/s;

Turime:

$$V_n^2 = V_{sc}^2 \left(\frac{D_{sc}}{D_n}\right); \quad (43)$$

Slėgio nuostolių koeficientas:

$$K_n = \frac{\Delta p_f}{q_{sc}}; \quad (44)$$

Tada 42 formulę galime perrašyti

$$K_n = f_{av} \left(\frac{L_n}{D_{sc}}\right) \int_0^1 \frac{D_{sc}^5}{D_n^5} d\left(\frac{x}{L_n}\right); \quad (45)$$

Kadangi $K_{nt}=(q_{sc}/q_{ts})$, tada turime galutinę nuostolių koeficiento skaičiavimo reikšmę, kuri išreiškiama pagal formulę (Jewel *et al*. 1999):

$$K_n = f_{av} \frac{L_n}{D_{ts}} \int_0^1 \frac{D_{ts}^5}{D_n^5} d\left(\frac{x}{L_n}\right); \quad (46)$$

čia: f_{av}– trinties koeficientas, m;

D_{sc} – stabilizavimo kanalo skersmuo, m;

x – siaurėjimo kanalo ilgis iki skaičiuojamojo skersmens, m.

Šis skaičiavimo būdas yra pernelyg sudėtingas, todėl siaurėjimo kanalo nuostolių koefcientą galime apskaičiuoti pagal formulę, kurią išvedė *Wantendortf:*

$$K_{nt} = 0{,}32 \cdot f_{av} \cdot \frac{L_n}{D_{ts}}; \tag{47}$$

čia: f_{av}– trinties koeficientas, m;

D_{ts} – darbinės kameros skersmuo, m;

L_n– siaurėjimo kanalo ilgis, m.

Trinties koeficientas apskaičiuojamas pagal 21 formulę:

$$f_{av} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{\mathrm{Re}_{in} + \mathrm{Re}_{out}}{2} \cdot \sqrt{f}\right) - 0{,}8\right]^2}; \tag{48}$$

čia: Re_{in} – Reinoldso skaičius susiaurėjimo kameros įėjime (priimama stabilizavimo srities Reinoldso skaičius);

Re_{out} – Reinoldso skaičius susiaurėjimo kameros išėjime (darbinės kameros srities Reinoldso skaičius).

Trinties koeficientas lygus:

$$f_{av} = \frac{1}{\left[2 \cdot \log_{10} \cdot \left(\frac{208000 + 569000}{2} \cdot \sqrt{1}\right) - 0{,}8\right]^2} = 0{,}0093.$$

Susiaurėjimo kanalo nuostolių koeficientas yra:

$$K_{nt} = 0{,}32 \cdot 0{,}0093 \cdot \frac{0{,}8}{0{,}5} = 0{,}005.$$

Tada slėgio nuostoliai dėl siaurėjimo kanalo yra:

$$\Delta p_{nt} = K_{nt} \cdot \frac{\rho \cdot U_{in}^2}{2} = 0{,}005 \cdot \frac{1{,}212 \cdot 2{,}00^2}{2} = 0{,}01 Pa.$$

Apsauginiai tinklai:

Apsauginiai tinklai montuojami iš abiejų pusių prie ventiliatoriaus, todėl jie sukuria slėgio nuostolius. Šie slėgio nuostoliai skaičiuojami analogiškai ekranams. Nuostolių koeficientas dėl tinklelių apskaičiuojamas pagal 38 formulę (Mehta 1985: 1335 – 1342).

Tinklo akytumas apskaičiuojamas pagal formulę (Mehta 1985: 1335 – 1342):

$$\beta_s = \left(1 - \frac{d_s}{D_s}\right)^2; \tag{49}$$

čia: D_s – tinklo akies skersmuo, m (D_s =10 mm);

d_s – tinklo vielos skersmuo, m (D_s =1 mm);

$$\beta_s = \left(1 - \frac{1}{10}\right)^2 = 0{,}810.$$

Oro greitis tinkle apskaičiuojamas pagal 30 formulę:

$$U_s = \frac{m}{\rho \cdot A_t} = \frac{4{,}547}{1{,}212 \cdot 0{,}324} = 11{,}58\, m/s.$$

čia: A_t – tinklo plotas be vielos užimamo ploto (A_t =0,324 m^2).

Pagal 38 formulę skaičiuojame tinklo nuostolių koeficientą:

$$K_s = 6{,}5 \cdot \left[\frac{1-0{,}81}{0{,}81^2}\right] \cdot \left[\frac{11{,}58 \cdot 0{,}001}{0{,}81 \cdot 1{,}49 \cdot 10^{-5}}\right]^{-\frac{1}{3}} = 0{,}191.$$

Skaičiuojame slėgio nuostolius per turbulencijos mažinimo ekranus:

$$\Delta p_s = n \cdot K_s \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2} = 2 \cdot 0{,}191 \cdot \frac{1{,}212 \cdot 11{,}58^2}{2} = 31{,}00\, Pa. \qquad (50)$$

čia: n – tinklų skaičius (du tinklai).

5.4. PEK aerodinaminio vamzdžio slėgio nuostoliai

Slėgio nuostolių skaičiavimo rezultatų, naudojantis „*Low-speed wind tunnel testing*“ vadovėliu ir E. Juodžio knyga (pateikiami tik rezultatai) „vėdinimas“, palyginimas pateikiamas 4 lentelėje.

4. lentelė. Aerodinaminio vamzdžio slėgio nuostoliai

Eil. Nr.	Pasipriešinimo pavadinimas	Slėgio nuostoliai *(Low-speed wind tunnel testing)*, Pa	Slėgio nuostoliai *(Vėdinimas)*, Pa
1	2	3	4
1	Srauto stabilizavimo grotelės	2,45	0,76
2	Turbulencijos mažinimo tinklai (2 vnt.)	6,04	5,50
3	Prieškamerio sekcijos stabilizavomo sritis	0,01	0,03
4	Prieškamerio sekcijos siaurėjimo kanalas	0,01	2,86
5	Darbinė kamera	2,11	4,69
6	Difuzorius	14,84	12,28
7	Apsauginis tinklas (2 vnt.)	31,00	34,81
	Viso:	56,46	60,92

Taigi, iš 4 lentelės matome, kad suminiai slėgio nuostoliai tiek pirmuoju, tiek antruoju atveju nedaug skiriasi, t.y. 7,3 %. Todėl, aerodinaminio vamzdžio nuostolių skaičiavimui pakaktų ir nuostolių skaičiavimo pagal knygą „Vėdinimas“. Taip išvengtume sudėtingo nuostolių skaičiavimo.

Atlikus aerodinaminių nuostolių skaičiavimą reiktų parinkti ventiliatorių, bet ventiliatorių Pastatų energetikos katedrai dovanoja UAB „Systemair“. Ventiliatorius aprašomas kitame poskyryje.

5.5. Ventiliatoriaus

Pastatų energetikos katedros aerodinaminiame vamzdyje bus naudojamas „Systemair“ gamintojų AXC 710-6/16º - 4 ašinis ventiliatorius, kurio skersmuo 711 mm.

AXC ventiliatorių asortimentas yra pakankamai didelis pradedant nuo 135 iki 2000 mm nominalaus skersmens. Šiuose ventiliatoriuose naudojamos reguliuojamo kampo mentės, kurios yra suderintos pagal individualius poreikius. Lėktuvo sparno formos ventiliatorių darbo rato mentės pagamintos iš aliuminio. Variklių apsaugai nuo perkaitimo ventiliatoriuose naudojami įmontuoti šiluminės apsaugos kontaktai su išoriniais išvadais, kurie yra jungiami prie variklio apsaugos įtaiso. Ventiliatoriaus variklis valdomas kintamo dažnio galios keitikliu.

Pek aerodinaminio vamzdžio ventiliatoriaus techniniai parametrai:

- Įtampa: 400 V;
- Dažnis: 50 Hz;
- Fazių skaičius: 3;
- Galia: 1500 W;
- Srovė: 3,7 A;
- Apsisukimai per minutę: 1400 aps./min;
- Garso slėgis1 m atstumu: 97,8 dB;
- Svoris: 97 kg.



18 pav. Ventiliatorius

Šis ventiliatorius gali sukurti 13500 m^3/h oro srautą, pasiekti 200 *Pa* slėgio skirtumą. Jis užtikrina reikiama slėgio sukūrimą aerodinaminiame vamzdyje, bet jis kelia didelį triukšmo lygį, kuris yra net 90,8 *dB*. Šis triukšmo lygis yra pakankamai didelis, nes papildomai dirbančiajam reikėtų klausos apsaugos priemonių, bet šį triukšmo lygį bus bandoma sumažinti montuojant papildomas priemones prie mokomojo stendo.

6. Triukšmo slopinimas

Visų aerodinaminių vamzdžių didžiausia problema, yra didelis keliamas triukšmas. Gamintojas „Aerolab“ triukšmo lygį mažino ventiliatoriaus korpusą padengiant triukšmą izoliuojančia medžiaga. Pek tikslas sumažinti aerodinaminiame vamzdyje triukšmo lygį tiek, kiek tik leidžia papildomos priemonės – triukšmo slopintuvai ir ventiliatoriaus korpuso izoliavimas. Triukšmo slopintuvai bus montuojami prieš ventiliatorių ir po ventiliatoriaus. Triukšmo lygio sumažėjimą vertinsime bendruoju triukšmo lygiu. Bendrasis triukšmo lygis yra vertinamas pagal (51) formulę:

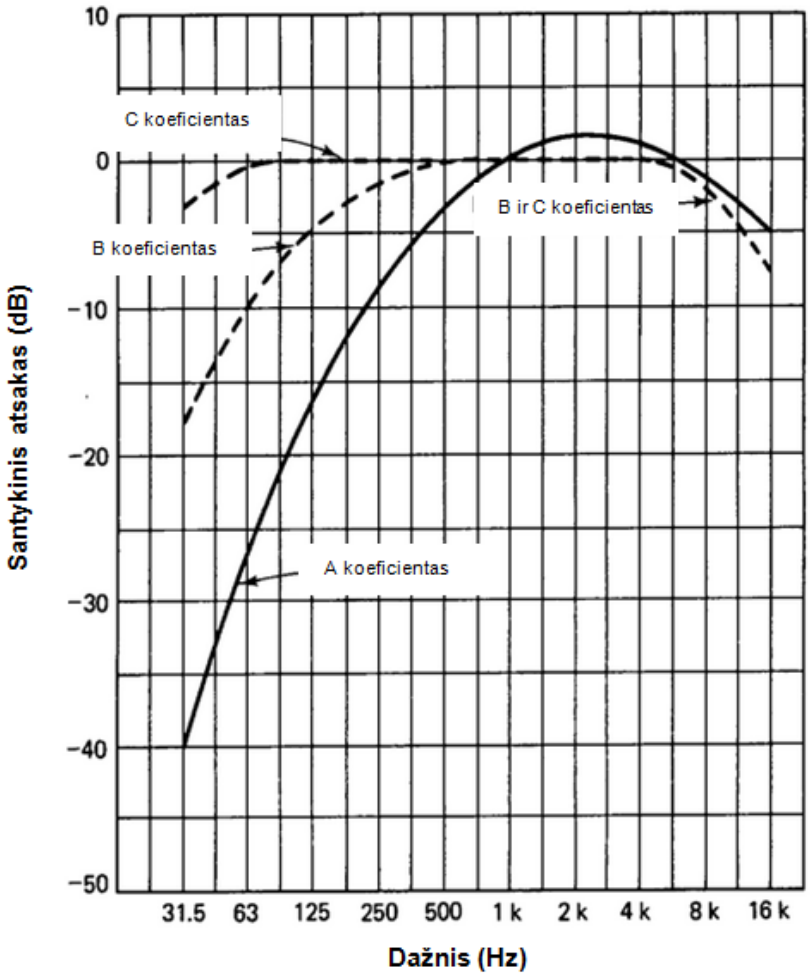
$$L_b = 10 \cdot \log \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} 10^{(L_{pi}+F)/10} \right), dB \tag{51}$$

čia: L_b – bendrasis triukšmo lygis, *dB*;

L_{pi} – triukšmo lygis skirtingoje oktavoje, *dB*

F – korekcijos faktorius, *dB*.

Korekcijos koeficientas parenkamas pagal tai, koks svertinis garsos slėgio lygis(A, B, C ar D) naudojamas. Svertiniai garso slėgio lygiai vertinami pagal triukšmo lygį, tai A – triukšmo lygis mažesnis negu 55 dB, B – nuo 55 iki 85 dB, C- dagiau kaip 85 dB, o D – dideliems triukšmo lygiams. A, B ir C svertinių garso slėgio lygių koreliacijos koeficientai pateikti žemiau esančiame paveiksle (Single Value Representation of Sound Spectrum).



19 pav. Korekcijos grafikas

19 paveiksle pateikiamos koeficientų kreivės, o skaičiavimuose naudojamos reikšmės pateikiamos 5 lentelėje.

5. Lentelė. Korekcijos koeficientai

Dažnių juosta, Hz	**A koeficientas (dB)**	**B koeficientas (dB)**	**C koeficientas (dB)**
1	**2**	**3**	**4**
10	-70,4	-38,2	-14,3
12,5	-63,4	-33,2	-11,2
16	-56,7	-28,5	-8,5
20	-50,5	-24,2	-6,2
25	-44,7	-20,4	-4,4
31,5	-39,4	-17,1	-3
40	-34,6	-14,2	-2
50	-30,2	-11,6	-1,3
63	-26,2	-9,3	-0,8
80	-22,5	-7,4	-0,5
100	-19,1	-5,6	-0,3
125	-16,1	-4,2	-0,2
160	-13,4	-3	-0,1
200	-10,9	-2	0

5 lentelės pabaiga

1	2	3	4
250	-8,6	-1,3	0
315	-6,6	-0,8	0
400	-4,8	-0,5	0
500	-3,2	-0,3	0
630	-1,9	-0,1	0
800	-0,8	0	0
1000	0	0	0
1250	0,6	0	0
1600	1	0	-0,1
2000	1,2	-0,1	-0,2
2500	1,3	-0,2	-0,3
3150	1,2	-0,4	-0,5
4000	1	-0,7	-0,8
5000	0,5	-1,2	-1,3
6300	-0,1	-1,9	-2
8000	-1,1	-2,9	-3
10000	-2,5	-4,3	-4,4
12500	-4,3	-6,1	-6,2
16000	-6,6	-8,4	-8,5
20000	-9,3	-11,1	-11,2

Naudojantis lentelės korekcijos koficientais vertinsime iki kokio triukšmo lygio bus sumažintas ventiliatoriaus skleidžiamas triukšmas, kai naudojami triukšmo slopintuvai. Pek ventiliatoriaus sukuriamas triukšmo lygis skirtingose oktavose pateikiamas žemiau esančiose lentelėse.

6. lentelė. Ventiliatoriaus sukuriamas triukšmo lygis skirtingose oktavose.

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Bendras
Lw - dB	66	76	84	89	89	86	75	94	94

Šioje lentelėje pateiktas triukšmo lygis, kai ventiliatorius yra įstatomas į kanalą, mūsų atveju į areodinaminį vamzdį.

Triukšmo lygis bus mažinamas su „FlaktWoods“ triukšmo slopintuvais. Šio gamintojo slopintuvai skirti jungimui su ventiliatoriumi per flančinę jungtį, jų yra dviejų tipų: su pertvara ir be jos. Parenkami slopintuvai kurių vidinis skersmuo 710 mm, o ilgis 710 mm su pertvara viduje, nes pasiekiamas didesnis triukšmo slopinimo efektyvumas. Šio triukšmo slopintuvų slopinamas triukšmo lygis skirtingose oktavose pateikiama žemiau esančioje lentelėje.

7. lentelė. Triukšmo slopintuvo slopinamo triukšmo lygis skirtingose oktavose.

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lw - dB	3	5	8	15	19	15	14	12

Šioje lentelėje pateiktos slopintuvų triukšmo slopinimo vertės prie skirtingų oktavų. Sumontavus slopintuvus prieš ventiliatorių ir po ventiliatoriaus šių parametrų vertės skiriasi, jos pateiktos 8 lentelėje.

8. lentelė. Ventiliatoriaus sukuriamas triukšmo lygis skirtingose oktavose, kai naudojami triukšmo slopintuvai.

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Lw - dB	63	71	76	74	70	71	61	82

Iš 8 lentelės matome, kad triukšmo lygį skirtingose oktavose, bet nėra pateiktas bendras triukšmo lygis. Bendrąjį triukšmo lygį skaičiuosime naudodamiesi 51 formule ir 5 lentele. Tada galime užrašyti formulę:

$$L_b = 10 \cdot \log \cdot (10^{(63-0,8)/10} + 10^{(71-0,2)/10} + 10^{(76-0)/10} + 10^{(74-0)/10} + 10^{(70-0)/10} + 10^{(71-0,2)/10} + 10^{(61-0,8)/10} + 10^{(82-3)/10}) = 82,6 \ dB.$$

Pastaba: Skaičiavimuose priimtas C koeficientas ,nes ventiliatoriaus bendrasis skleidžiamas triukšmo lygis yra daugiau negu 85 *dB*.

Taigi triukšmo slopintuvas ventiliatoriaus skleidžiamą triukšmą sumažins iki 82,6 *dBA*, tai yra, triukšmo lygis sumažinamas 11,4 *dB*.

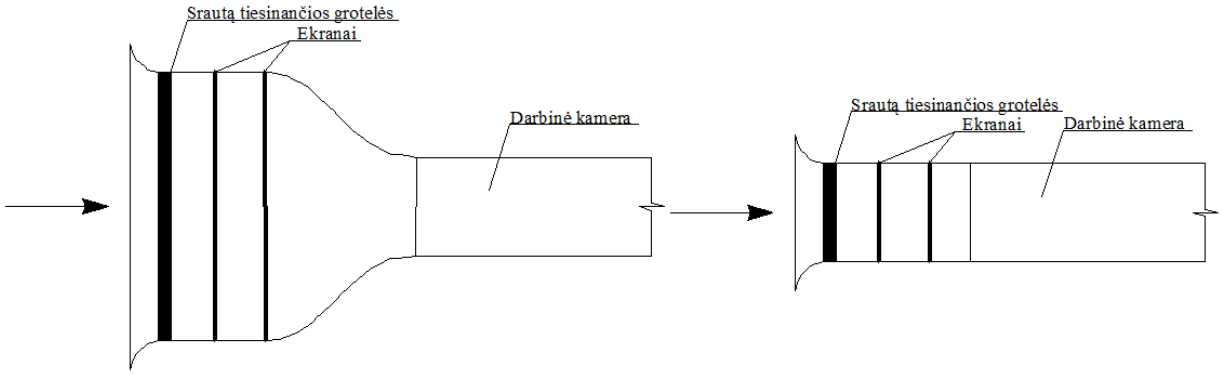
Triukšmo lygio sumažėjimo dėl ventiliatoriaus korpuso izoliavimo nevertinsime, nes pagrindinis triukšmas sklis iš triukšmo slopintuvų.

Sumontavus triukšmo slopintuvus pasikeičia aerodinaminio vamzdžio slėgio nuostoliai, nes papildomai atsiranda pasipriešinimas dėl triukšmo slopintuvų. Todėl reikia patikrinti ar ventiliatorius sugebės užtikrinti reikiamą slėgį ir oro našumą.

Triukšmo slopintuvo sukuriami slėgio nuostoliai – 28 *Pa*, kai oro srauto našumas 13500 m^3/h. Du triukšmo slopintuvai sukurs 56 *Pa* slėgio nuostolius, tai suminiai viso aerodinaminio vamzdžio slėgio nuostoliai bus 112,46 *Pa,* o ventiliatorius gali sukurti 200 *Pa* statinį slėgį. Taigi, ventiliatorius sugebės užtikrinti reikiama oro našumą ir slėgį.

7. Jautrumo analizė

Atlikime trumpą jautrumo analizę, kurioje pakeisime aerodinaminio vamzdžio konstrukciją ir įvertinsime kaip pasikeis jo aerodinaminės savybės bei ventiliatoriaus elektrinė galia.



20 pav. Aerodinaminio vamzdžio konstrukcija: kairėje Pek konstrukcija, dešinėje lyginama konstrukcija

Aerodinaminio vamzdžio konstrukcija yra pakeičiama kaip pateikta 20 paveiksle, tai yra prieškamerio išplatėjimas pakeičiamas tokiu pat skersmens kanalu, kaip ir darbinė kamera. Tuomet srautą tiesinančios grotelės ir ekranai perkeliami iš stabilizavimo srities į kanalą prieš darbinę kamerą. Tada, suminiai slėgio nuostoliai aerodinaminio vamzdžio bus 403,70 *Pa.* Slėgio nuostoliai padidėjo 3,6 karto. Pek aerodinaminio vamzdžio dabartinis ventiliatorius neužtikrins reikiamo slėgio palaikymo, todėl reikalingas didesnės galios ventiliatorius. Bet naudojant didesnės galios ventiliatorių padidėja elektros suvartojimas bei jo keliamas triukšmas. Šiame vertinime buvo įvertintas ir triukšmo slopintuvų sukuriamas pasipriešinimas.

Ankstesniuose skyriuose yra nagrinėtas tik aerodinaminis vamzdis, t. y. jo geometrija slėgio nuostoliai ir t.t., todėl kituose skyriuose bus aptartos kompiuterinės programos, su kuriomis galima nagrinėti oro srautų modeliavimą.

8. Skaitmeninė analizė

Šiandien bandymus su aerodinaminiu vamzdžiu gali pakeisti kompiuterinis srautų modeliavimas, todėl šiame skyriuje bus aptarti kompiuterinio modeliavimo metodai. Šio skyriaus tikslas yra susipažinti su kompiuterinėmis programomis ir, pasirinkus vieną jų, atlikti aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros su bandomuoju modeliu modeliacija. Taip pat, aprašyti modeliacijos rezultatus ir tolimesniuose tyrimuose palyginti su aerodinaminio vamzdžio pateiktais rezultatais.

8.1. Analizės metodai

Aktualiausi gamtos reiškinių tyrimo uždaviniai, formuluojami matematikos kalba, retai sprendžiami analiziniais metodais. Pagrindinis gamtos apsaugos, energetikos, ekonomikos ir kitų sričių uždavinių tyrimo ir sprendimo būdas yra skaitiniai metodai. Jų taikymas smarkiai praplėtė pažinimo ribas ir paspartino teorinių rezultatų diegimą praktikoje.

Matematinis pernašos procesų (koncentracijos, šilumos, masės) modeliavimas, arba skaičiuojamoji fluidų dinamika (SFD, angl. *Computational Fluid Dynamics* – CFD), gali būti aiškinama kaip lygčių, aprašančių fluidų judėjimą, analizinis ar skaitinis sprendimas kompiuteriu, norint gauti informacijos apie fluidų tekėjimo tam tikromis sąlygomis būdus. SFD apima technologijų įvairovę, įskaitant matematiką, kompiuteriją, taikomuosius mokslus ir fiziką. Šios disciplinos, paimtos kartu, apima sąvoką *fluidų srautų modeliavimas*. Toks modeliavimas yra taikomas daugelyje mokslo ir inžinerijos sričių, bet, kad būtų taikytinas, rezultatai, kuriuos jis duoda, turi realiai atspindėti fluidų judėjimą (Vaitiekūnas, Špakauskas. 2003: 102).

Vis labiau tobulėjančios kompiuterinės technologijos suteikia galimybę modeliuoti fizines problemas naudojantis skaitmeniniais metodais. Skaitmeniniai metodai dažnai skirstomi į elementariuosius, t. y. tokius kuriuos taikant randama lygties šaknis, integruojama funkcija, sprendžiama tiesinė lygčių sistema, bei intensyviuosius, t.y. tokius kaip baigtinių elementų metodas (Numerical-methods)

Skaitmeniniai kompiuteriai negali būti naudojami tiesiogiai diferencialinių lygčių su dalinėmis išvestinėmis sprendiniams gauti. Taip yra dėl to, kad kompiuteris gali atpažinti ir manipuliuoti duomenimis, pateiktais vienetų ir nulių forma, t. y. binariniais duomenimis. Tačiau jie gali būti užprogramuoti saugoti skaičius, atlikti paprastus aritmetinius veiksmus, tokius kaip sudėtį, atimtį, daugybą ir dalybą, ir pakartoti ištisas sekas šių veiksmų su saugomais skaičiais. Pagaliau diferencialinės lygtys su dalinėmis išvestinėmis turi būti transformuotos į lygtis, kurias sudaro tik skaičiai, šių skaičių kombinacijos, užrašytos paprastiems veiksmams.

Atliekama diferencialinių lygčių su dalinėmis išvestinėmis transformacija, kuri žinoma kaip skaitinis šių lygčių analogas, yra vadinama skaitine diskretizacija. Šiame diskretizacijos procese kiekvienas diferencialinės lygties su dalinėmis išvestinėmis narys turi būti paverstas skaitiniu analogu, kad užprogramuotas juo kompiuteris galėtų skaičiuoti. Daugybę priemonių galima naudoti skaitinei diskretizacijai atlikti ir, nors kiekviena priemonė ir remiasi skirtinga principų sistema, taikomi metodai turi daug bendrų bruožų (Vaitiekūnas, Špakauskas. 2003: 102).

Pagrindiniai metodai, kurie naudojami fluido tekėjimui diskretizuoti yra trys:

1. Baigtinių skirtumų metodas (BSM);
2. Baigtinių tūrių metodas (BTM);
3. Baigtinių elementų metodas (BEM).

8.2. Baigtinių skirtumų metodas

Šis metodas dar vadinamas skirtumų arba tinklų metodu, jis šiuo metu yra populiariausias ir universaliausias. Baigtinių skirtumų metodo pagrindinis tikslas yra aproksimuoti diferencialinį uždavinį netiesinių lygčių sistema. Šis metodas remiasi vadinamųjų Teiloro eilučių naudojimu, norint sudaryti biblioteką ar priemonių komplektą lygtims, kurios aprašo kintamųjų išvestines kaip skirtumus tarp kintamųjų reikšmių įvairiuose erdvės ir laiko taškuose. Išsami informacija apie baigtinių skirtumų metodą yra Smitho darbe.

8.3. Baigtinių elementų metodas

Baigtinių elementų metodas – skaitmeninis metodas, leidžiantis rasti apytikslius diferencialinių ar integralinių lygčių sprendinius. Metodo esmė – sritis, kurioje ieškomas sprendimas, suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomasis kinta nesudėtingu dėsniu ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas.

Baigtinių elementų metodas (BEM) – vienas iš plačiausiai taikomų metodų, skirtų mechaninių, šiluminių, hidraulinių, elektromagnetinių ir kitokių fizinių sistemų uždaviniams spręsti bei dinaminiams procesams modeliuoti.

Baigtiniai elementai sudaro vieningą tarpusavyje sujungtų baigtinių elementų rinkinį, kuris yra vadinamas standartine diskretine sistema. Elementai tarpusavyje jungiami tam tikruose taškuose, vadinamuose mazgais. Visi nagrinėjami dydžiai elemento viduje aprašomi nesudėtingomis funkcijomis, kurių sudėtingumas susiejamas su mazgų skaičiumi. Naudojant BEM nagrinėjamos tik standartinės diskretinės sistemos sudarymo ir modeliavimo procedūros, o konkrečių objektų ar reiškinių savybės išreiškiamos per konkrečius baigtinius elementus.

Sudarant ir kompiuteriu modeliuojant standartinę diskretinę sistemą išskiriami tokie pagrindiniai etapai (Kačianauskas. 2004):

Paruošiamasis etapas – surenkama visa sistemą aprašanti informacija: apibrėžiami diskretiniai elementai, mazgai, sudaromi visi reikalingi vektoriai ir nustatomos duomenų vektorių reikšmės.

Modeliavimas elemento lygyje – suformuluojamos elemento diskretinės priklausomybės.

Modeliavimas visos sistemos lygyje – visi elementai sujungiami į vieningą diskretinę sistemą ir sudaromas vieningas diskretinis modelis. Tiesinio modelio atveju:

$$[L]\cdot\{T\}=\{q\}, \tag{52}$$

čia: [L] – žinomų koeficientų matrica;

{T} – sujungtų elementų sistemos būvio parametro (temperatūros) vektorius;

{q} – laisvųjų narių vektorius.

Rezultatų apdorojimo etapas – skaičiuojami antriniai dydžiai, apdorojama ir skaičiuotojui pateikiama informacija.

8.4. Baigtinių tūrių metodas

Baigtinių tūrių metodas, šiek tiek panašus į baigtinių skirtumų metodą, bet kai kas paimta iš baigtinių elementų metodo. Baigtinių tūrių metodas buvo specialiai ištobulintas šilumos pernešimo ir fluidų tekėjimo lygtims spręsti.

Iš tikrųjų bendrosios dalinės diferencialinės lygtys yra pertvarkomos naudojant fiziškai pagrįstas transformacijas į skaitines lygčių formas.

Srities diskretizavimas. Vieta laike ir erdvėje, kurioje yra skaičiuojami slėgis ar kiti priklausomieji kintamieji, yra baigtinė; jie yra išsidėstę baigtinėje celių sistemoje, kurios kartu sudėtos sudaro visą nagrinėjamą erdvės ir laiko sritį. Ląstelės joje nebūtinai yra vienodos dydžiu ir stačiakampės formos (Vaitiekūnas, Špakauskas. 2003: 102).

8.5. Kompiuterinės skaičiavimo programos

Šiuo metu yra pakankamai daug kompiuterinių srautų modeliavimo programų, bet dažniausiai sutinkamos yra šios kompiuterinės programos:

Maple;

Ansys;

Phoenics,

Fluent ir kt.

Maple kompiuterinės programos gali spręsti matematinius ir fizikinius technikos uždavinius tiek analiziškai, tiek skaitiškai. *Ansys* turi atskirą modulį FLOTRAN, skirtą fluidų dinamikai skaičiuoti naudojant baigtinius elementus. PHOENICS pernešimo procesų lygtis diskretizuoja baigtinių tūrių metodu. FLUENT diskretizavimui taiko baigtinių elementų artinius (Vaitiekūnas, Špakauskas. 2003: 102).

Tiriamajame darbe bus modeliuojama su *Phoenics* kompiuterine programa. Ši programa pasirinkta nes ši programa paremta baigtinių tūrių metodu, o šis metodas ištobulintas fluidų tekėjimo srityje.

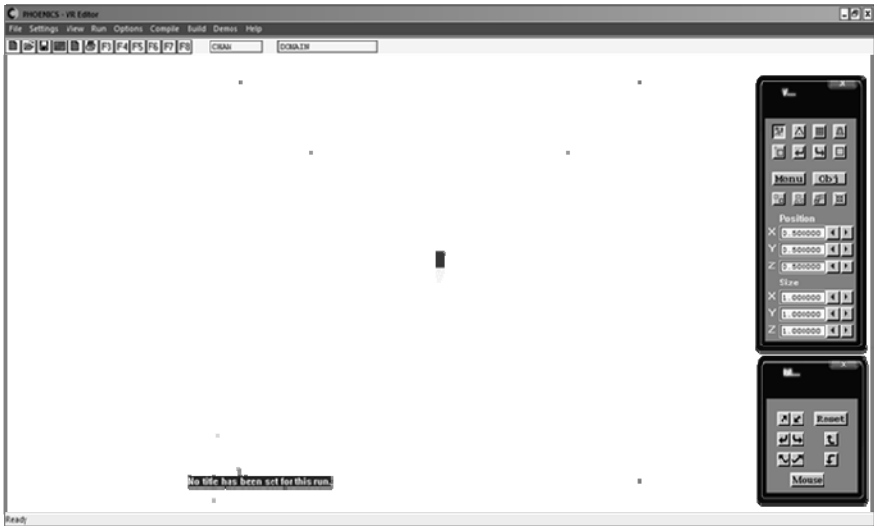
9. Kompiuterinis modeliavimas

Kompiuterinį modeliavimą atliksime su kompiuterine programa „Phoenics“, kuri yra paremta baigtinių tūrių metodu. Šio modeliavimo tikslas yra sumodeliuoti aerodinaminio vamzdžio darbinę kamerą ir į ją patalpinti pastato modelį. O tolimesniuose darbuose kompiuterinės programos rezultatus palyginti su aerodinaminio vamzdžio pateiktais rezultatais. Toliau šiame skyriuje pateikiama trumpa darbo eiga su „Phoenics“ programa ir jos rezultatų aptarimas.

9.1. Pek aerodinaminio vamzdžio darbinės modeliavimas su kompiuterine programa „Phoenics”

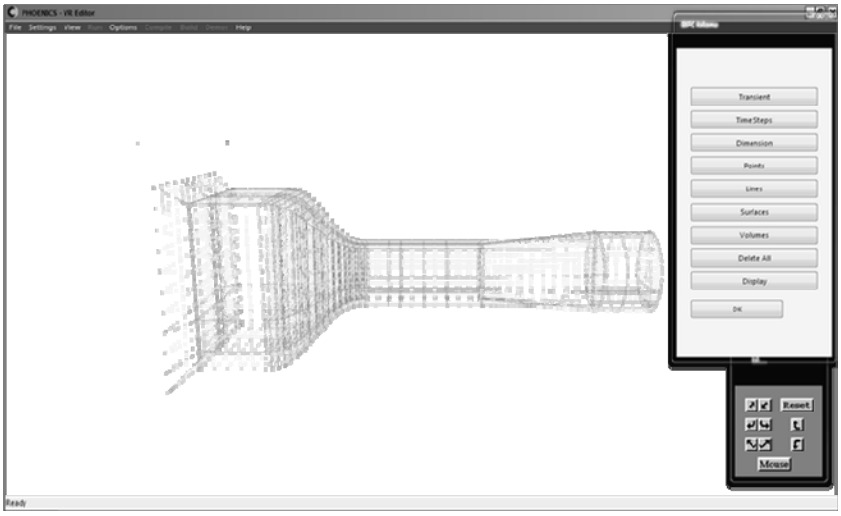
Įjungus „Phoenics“ programą pirmiausiai galima padaryti pradinius nustatymus, t. y. pakeisti darbalaukio darbo fono spalvą ir pan. Šia programa geometrijos braižymo būdai yra keli, tai:

1. Atidarius programą lange yra matomas erdvės ribos, šios ribos pagal nutylėjimą yra 1 x 1 x 1 (x, y, z koordinatėse) (21 pav.), šiuos išmatavimus pakeičiame pagal modeliuojamo aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros matmenis. Šis būdas yra tinamas tik labai paprastos geometrijos objektams nagrinėti, šiuo atveju pakaktų ir darbinės kameros modeliavimui.



21 pav. Nagrinėjamos ribos pagal nutylėjimą.

2. Antrasis variantas skirtas sudėtingos geometrijos nagrinėjimui. Šiuo būdu yra naudojamos pagalbinės braižymo priemonės, kurios padeda sukurti sudėtingos geometrinės formos objektus (22 pav.) . Šiuo atveju braižant x, y, z koordinates yra pakeičiamos I, J, K koordinatėmis. Šios koordinatės nėra vienodos x, y, z koordinatėms.

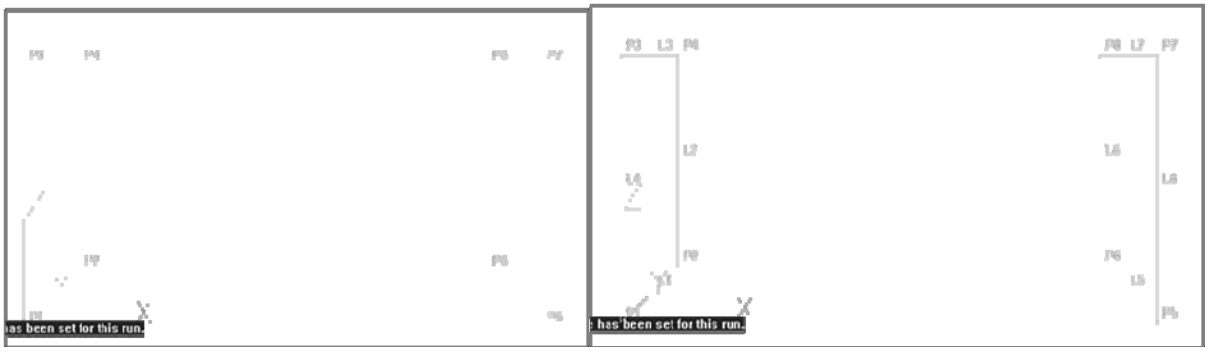


22 pav. Sudėtingos geometrijos objektas nubraižytas antruoju būdu

3. Trečias variantas skirtas nagrinėti cilindrinius ir sferinius objektus. Šis variantas nėra tinkamas aerodinaminio vamzdžio modeliavimui.

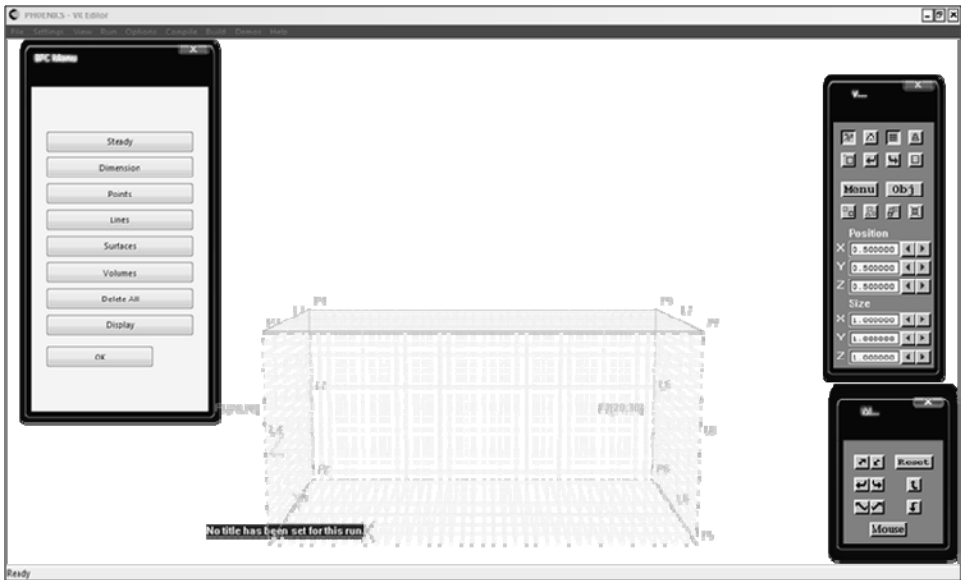
Ši programa nėra tinkama priemonė modeliuoti detaliai visą aerodinamini vamzdį, ji turi ribota baigtinių tūrių skaičių. O norint sumodeliuoti tinkamai, t. y. su srautą tiesinančiomis grotelėmis ir ekranais, reikia, kad baigtinių tūrių skaičius būtų žymiai didesnis negu gali programa. Nes braižant, dydžio žingsnis lygus baigtinio tūrio dydžiui.

Tolimesniame modeliavime pasirenkama, kad aerodinaminio vamzdžio geometrija bus braižoma antruoju variantu, šiuo variantu pradedama braižyti nuo taško. Braižant šiuo variantu reikia žinoti geometrijos viršūnių koordinates, tai sudėtingesnis būdas, bet braižymo galimybės didesnės. Norint pereiti braižyti šiuo būdu, pirmiausiai reikia pasirinkti braižymo koordinačių sistemą. Pasirinkus tinkamą sistemą, atsiranda pagalbinių priemonių rinkinys „*BFC Menu*“, su kurio pagalba bus nubraižyta geometrija. Pasinaudojus šia pagalbine priemone sudedamos darbinės kameros viršūnių koordinates (23 pav. kairėje), o vėliau taškus sujungiame linijomis (10pav. dešinėje).



23 pav. Kairėje pusėje sudėti taškai, dešinėje taškai sujungti linijomis

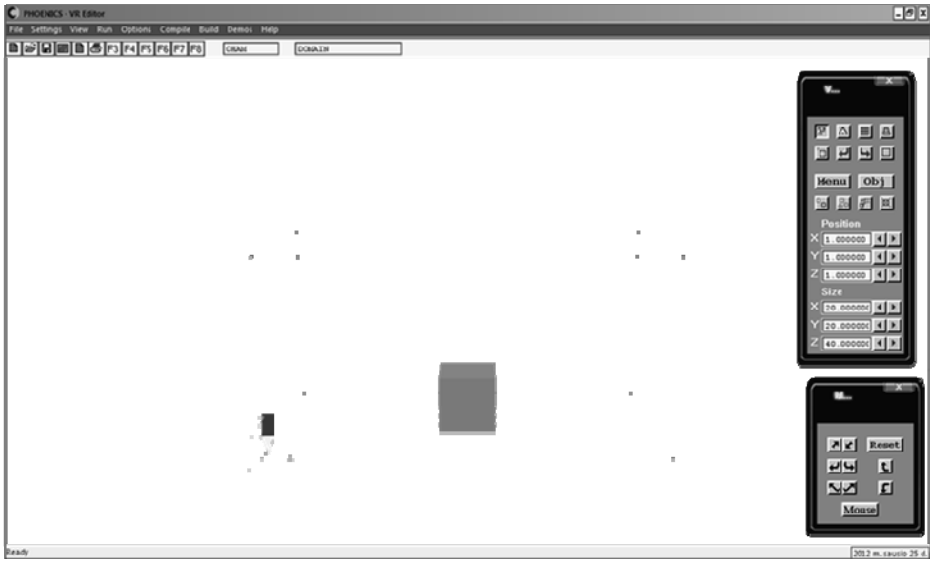
Sujungus taškus linijomis, reikia atlikti jų skaidymą smulkesnius elementus, šiuo žingsniu pasirenkame baigtinių tūrių dydį (*mesh*). Visgi kuo smulkesnis tinklas, tuo tikslesni modeliavimo rezultatai, bet pailgėja uždavinio sprendimo laikas ir reikalingas galingesnis kompiuterio procesorius. Darbinės kameros plotį ir aukštį skaidome į 20 elementų, o ilgį į 40 elementų, tuomrt gaunama, kad tūrio dydis yra 2,5 x 2,5 x 2,5 *cm*. Atlikus šiuos veiksmus, linijas sujungiame į paviršius, o paviršius sujungiame į vieną tūrį, kuris yra išskaidytas į 16000 mažų tūrių (24 pav.).



24 pav. Aerodinaminio vamzdžio darbinė kamera išskaidyta į 16000 mažų tūrių.

Nubraižius darbinę kamerą ir suskaidžius į mažus tūrius, reikia įjungti, kad programa spręstų slėgio ir greičio uždavinius. Taip pat reikia pasirinkti turbulencijos modelį, šiuo atveju pasirenkamas **„KEMODL“** modelis. Šis modelis yra pritaikytas spręsti uždavinius, kai yra didelis *Re* skaičius ir šis metodas yra populiarus sprendžiant turbulentius srautus. Šiuo atveju pasirinktame modelyje pakeičiame paviršiaus šiurkštumą pagal priimtą 4 skyriuje, t. y. 0,0033 m.

Atlikus anksčiau minėtus veiksmus, galime darbinei kamerai priskirti paviršius ir nubraižyti pastato modelį, kurį aptekės oro srautas. Modelio dydis yra 15 x 15 x 15 cm (12 pav.).



25 pav. Aerodinaminio vamzdžio darbinė kamera su modeliu.

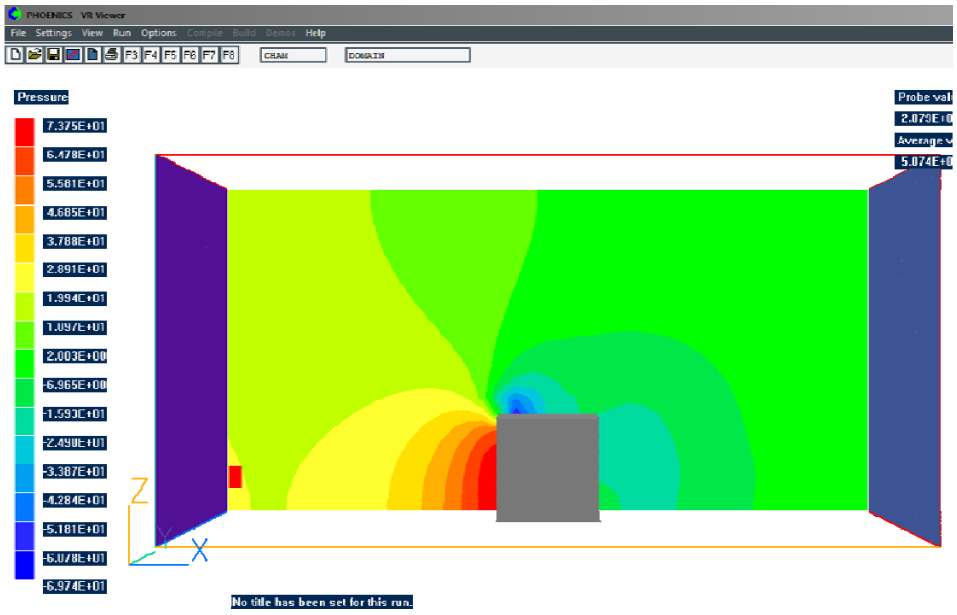
Toliau reikia nustatyti, iš kur srautas atitekės ir kur ištekės. Pasirenkant kur įteka srautas, reikia pasirinkti oro turbulentiškumo intensyvumą, įtekėjimo greitį ir oro tankį. Pagal programos „Phoenics“ „nutylėjimą“ oro srauto turbulentiškumas yra užduotas 5 *%*. Priimama, kad, kai oro srauto greitis 10 *m/s* oro turbulentiškumas aerodinaminiame vamzdyje yra 5 *%*, o oro tankis yra 1,212 kg/m^3.

Prieš atliekant sprendimą nustatome iteracijų skaičių, šiuo atveju pasirenkama 200 iteracijų. Kuo didesnis iteracijų skaičius, tuo ilgiau sprendžia uždavinį, bet gaunami patikimesni rezultatai.

Atlikus pirminį skaičiavimą reikia atsižvelgti ar rezultatai logiški, nes netinkamai pasirinkus skaičiavimo modelį rezultatai gali būti iškreipti, o neįgudęs skaičiuotojas gali nesuprasti, kad rezultatas netinkamas.

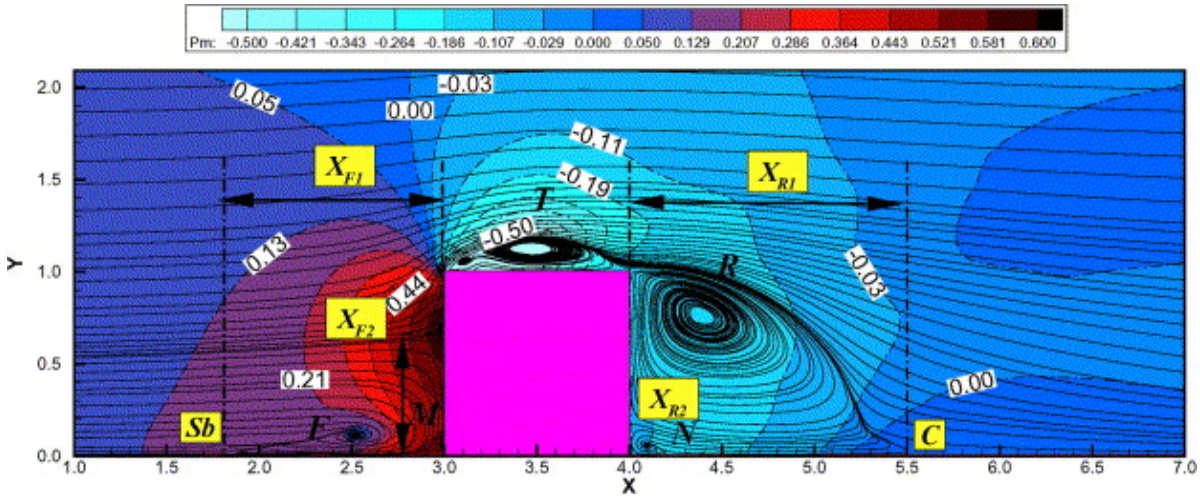
9.2. Kompiuternės programos „Phoenics” rezultatų analizė

Šiame skyriuje aptarsime kompiuterinės programos „Phoenics“ skaičiavimo rezultatus. Po to, kai atliktas geometrijos ir oro srauto parametrų įvedimas į programą, atliekamas skaičiavimas. Programa pateikia greičio ir slėgio vektorių dydžių grafinį pasiskirstymą darbinėje kameroje. 26 paveiksle pateikta modeliacijos grafinis slėgio pasiskirstymo rezultatas.



26 pav. Grafinis slėgio pasiskirstymas aerodinaminio vamzdžio vaizdas iš šono ties kubo centru

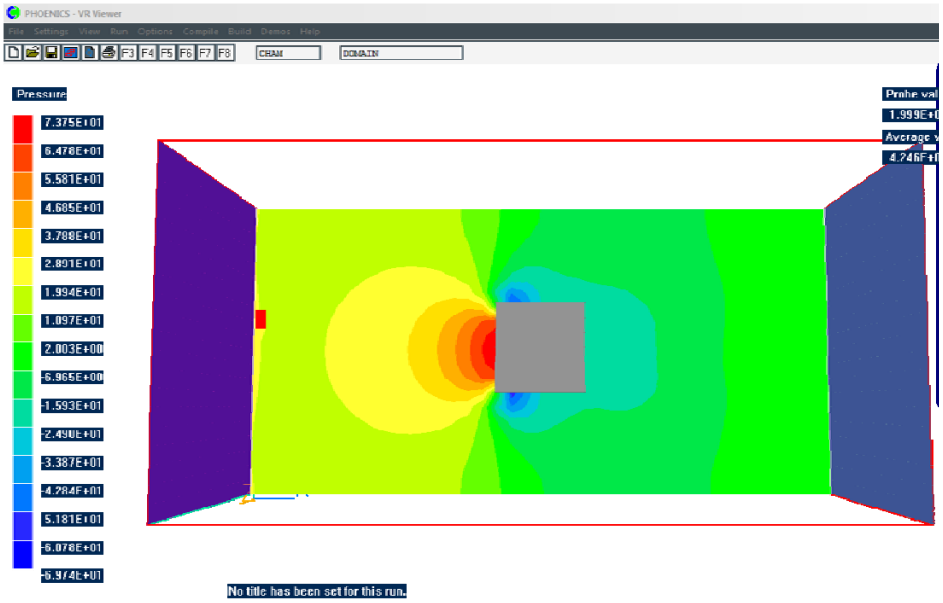
Lyginant 1 pav. ir 26 pav. matome, kad jie turi panašumų, t. y. teigiamo slėgio pasiskirstymo epiūros plačiausia vieta yra prie pat pastatymo vietos (žemės). Iš 26 paveikslo matome, kai vėjo greitis yra 10 *m/s*, tai pastato fasadą, kuris nukreiptas į vėjo pusę veikia didžiausias slėgis, lygus beveik 74 *Pa*. O minusinio slėgio zonos yra ant pastato stogo ir pastato užuovėjoje. Didžiausias neigiamas slėgis -7 *Pa* yra ant stogo. Tokiu atveju, per priekinės fasado dalies nesandarumus oras patektų į patalpas, o per stogą ir užuovėją oras iš pastato išeitų. Žemiau pateiktame paveiksle pateikiamas slėgio pasiskirstymas iš šono aplink ties kubo centru. 27 paveikslas yra paimtas iš mokslinio straipsnio, kuris nagrinėja turbulentinį srautą skaitmeninės analizės metodu (Yakhot *et al.*: 2006. 994-1009 p.).



27 pav. Grafinis slėgio pasiskirstymas, vaizdas iš šono ties kubo centru (Yakhot *et al.*: 2006. 994-1009 p.)

27 pav. modeliuojamas kubas, bet naudojant *Flunet* srautų modeliavimo kompiuterinę programą, ir šiame paveiksle oro srautai skiriasi nuo 26 pav. Norint nustatyti, kodėl moduliacija atlikta vienoda, o rezultatai skiriasi, reikia nuodugnesnės *Phoenics* programos analizės, arba pasirinkti labiau tinkama kompiuterinė programą, kaip *Fluent*.

Literatūroje rašoma, kad didžiausia eksfiltracija vyksta toje vietoje, kur vyksta aptekančio oro srauto atitrūkimas nuo pastato zonoje. Taigi, šio modeliavimo rezultatas yra tas pats, kaip ir aprašyta literatūroje, t. y. didžiausia neigiamo slėgio vieta yra ta dalis, kur oro srautas atitrūksta nuo modelio (26 pav. ryški mėlyna zona).

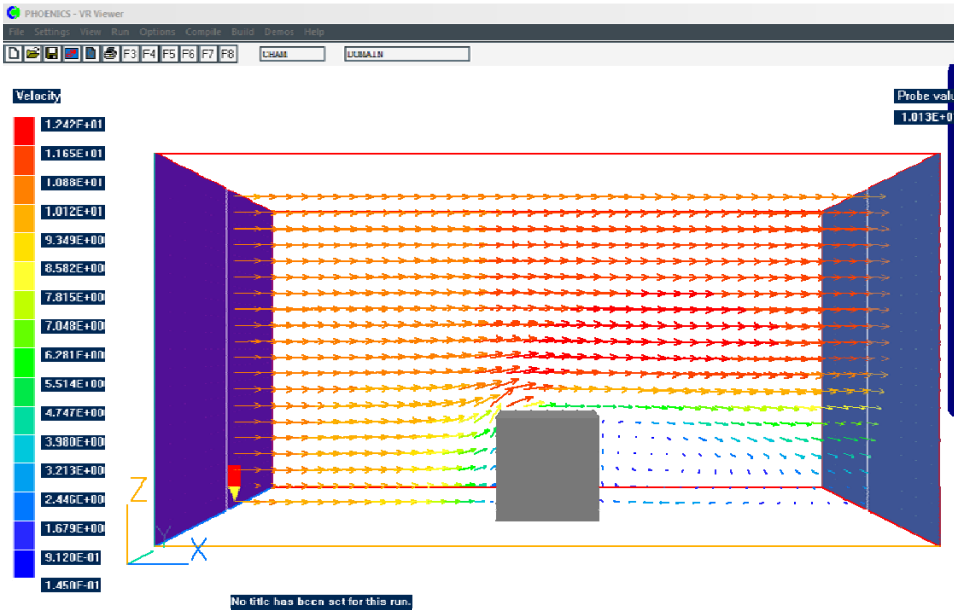


28 pav. Grafinis slėgio pasiskirstymas aerodinaminio vamzdžio vaizdas horizontalioje plokštumoje ties kubo centru

28 paveiksle pateiktas slėgio pasiskirstymas darbinėje kameroje tik žiūrima iš viršaus. Ir iš šios pusės vaizdas šiek tiek pasikeičia, nes pastato aptekėjimas vysta per pastato šonus. Minusinis slėgis yra stebimas pastato užuovėjoje ir fasaduose kurie lygiagretūs vėjo krypčiai. Taip pat šiam paveiksle matome, kur yra oro srauto atitrūkimo vieta nuo modelio. Toje vietoje yra didžiausia neigiamo slėgio zona.

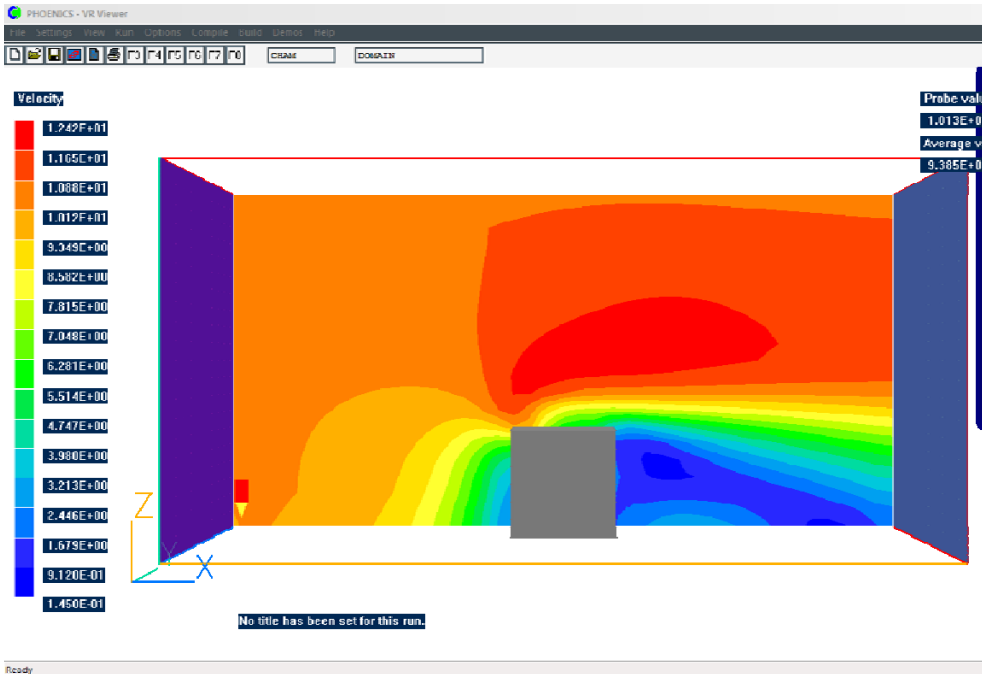
Dabar panagrinėsime, kaip keitėsi oro srauto greitis darbinėje kameroje kompiuterinės programos atžvilgiu. Visą srautų įvairovę galima suskirstyti į dvi klases. Šis skirstymas turi kinematinį ir fizikinį pagrindą. Šių dviejų klasių matematinis aprašymas taip pat skiriasi. Pirmoji klasė – tai judėjimas be sūkurių taip dar vadinami potenciniais srautais ir antroji lasė – sūkuringi judėjimai. Judėjimas be sūkurių būna neklampiuose srautuose, o sūkuringi judėjimai klampiuose srautuose (Visi srautai yra kažkiek klampūs).

29 paveiksle pateiktas oro srauto vektorinės judėjimo kryptys, 30 pav. pateiktas apibendrintas oro srauto greičio pasiskirstymas.



29 pav. Vektorinis pastato aptekėjimas aerodinaminio vamzdžio vaizdas iš šono ties kubo centru

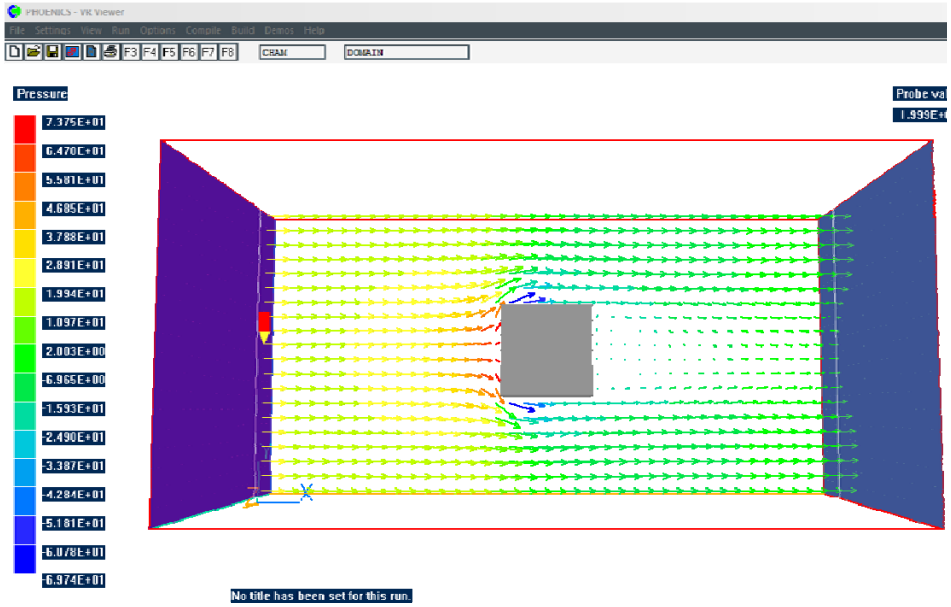
Iš 29 paveikslo galime matyti tai, kad pastato aptekėjimas yra turbulentinis. Šis tekėjimas matomas iš pastato užuovėjoje susikūrusių sūkurių zonos.



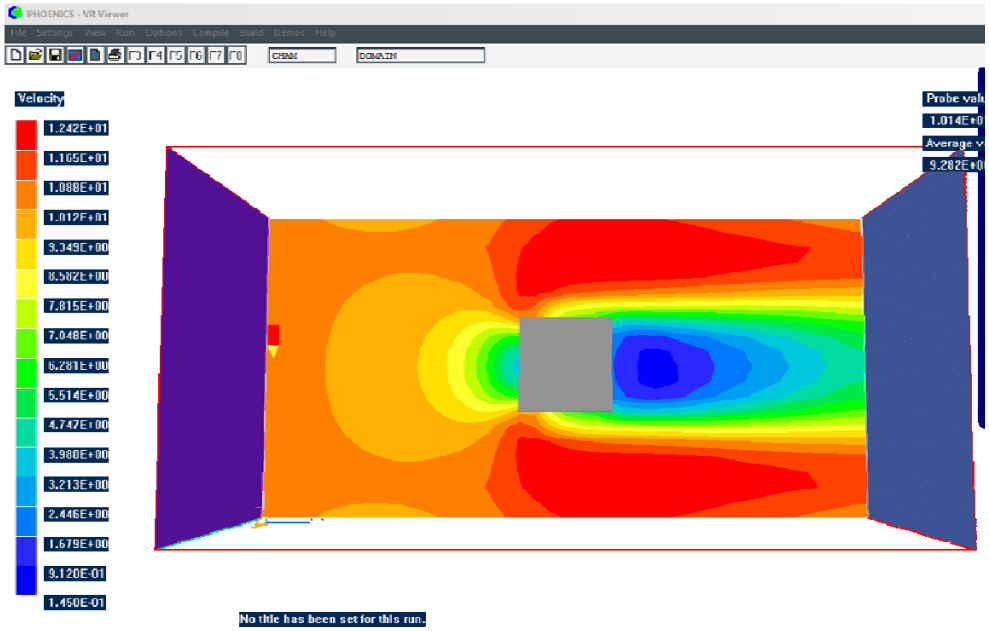
30 pav. Apibendrintas pastato aptekėjimas aerodinaminio vamzdžio vaizdas iš šono ties kubo centru

30 apibendrintame paveiksle galime stebėti, koks oro greitis yra pastato užuovėjoje ir virš pastato, taip pat matoma oro srauto atitrūkimo vieta nuo pastato. Pastato užuovėjoje fiksuojamas

mažiausias oro srauto greitis visoje darbinėje kameroje, kuris sumažėja net iki 0,15 *m/s*, nors pradinis darbinės kameros greitis yra 10 *m/s*. O didžiausias greitis pagal spalvų intensyvumą matomas virš pastato, kuris yra 12 *m/s*. Taip pat matyti, kad pastato fasadas, kuris statmenas sukuriamo oro srauto krypčiai yra veikiamas nuo 3 iki 9 *m/s*. Pastato apatinę dalį veikia 3 *m/s* greitis, viršutinę 9 *m/s*. Žemiau pateiktuose paveiksluose yra matomas vaizdas iš viršaus.



31 pav. Vektorinis pastato aptekėjimas aerodinaminio vamzdžio vaizdas horizontalioje plokštumoje ties kubo centru



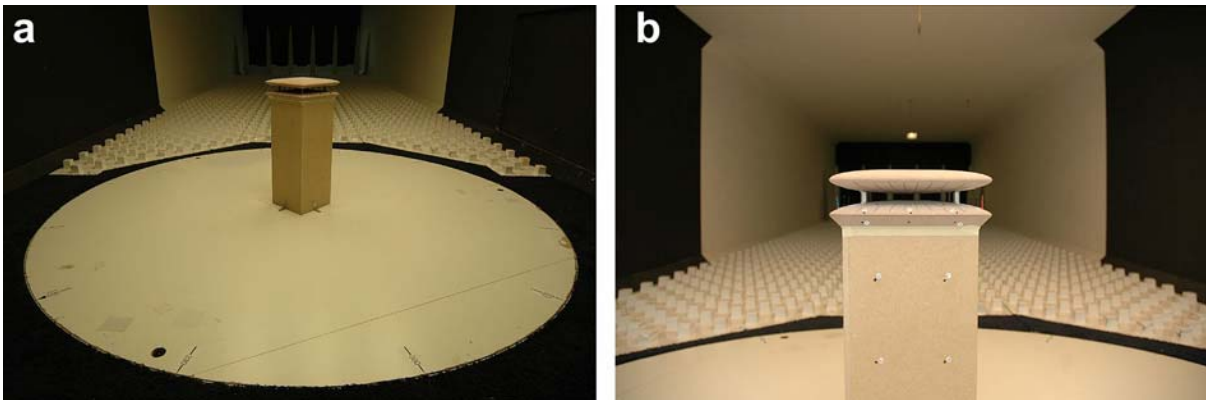
32 pav. Apibendrintas pastato aptekėjimas aerodinaminio vamzdžio vaizdas horizontalioje plokštumoje ties kubo centru

Šių paveikslų labai nenagrinėsime, nes jie nelabai kuo skiriasi nuo anksčiau matytų paveikslų, bet galime pastebėti, kad aerodinaminio vamzdžio sienos įtakoja oro srauto tekėjimą. Ši įtaka pastebima, kai didžiausias vėjo greitis pasiekia aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros sieneles, o realybėje ši didžiausia greičio zona tikriausiai būtų platesnė ir trumpesnė. Visgi stebint 30 paveikslą matome, kad didžiausia greičio zona yra trumpesnė negu 32 paveiksle. Taip pat galime pastebėti, kai fasadą, kuris statmenas vėjo krypčiai veikia taip pat nuo 3 – 9 *m/s*, tik čia mažiausias poveikis jaučiamas fasado viduryje.

Trumpai apžvelgus visus paveikslus, kuriuos pateikia „Phoenics“ programa, galime teigti, kad su šia programa modeliuoti nėra sudėtinga, bet visgi rezultatuose pastebima netikslumų. Be to, ši kompiuterinė programa nėra tinkama atlikti sūkurinių reiškinių nagrinėjimui. Dauguma mokslinių tyrinėjimų atliekami aerodinaminiame vamzdyje ir rezultatai lyginami su „Fluent“ kompiuterinės programos pateiktais rezultatais.

10. Modeliavimas aerodinaminiame vamzdyje

Tolimesniuose tyrimuose toks pats bandymas su pastato modeliu bus atliekamas aerodinaminiame vamzdyje. Tik aerodinaminiame vamzdyje yra sunkiau išpildyti oro srauto tekėjimo sąlygas. Šiurkštumo sąlyga bus bandoma pasiekti prieš pastato modelį imituojant mažus pastatus ar padidinus šiurkštumą kitomis priemonėmis. Žemiau esančiame paveiksle yra matoma, kaip padidėja paviršiaus šiurkštumas aerodinaminiame vamzdyje.



33 pav. Uždarojo tipo Peutz BV in Mook aerodinaminis vamzdis, Nyderlandai

Šiame paveiksle yra matomas prieš modelį įrengtas mažų kubelių paviršius. Šie kubeliai imituoja mažus namus, kurie sukelia paviršiaus šiurkštumą. Visgi padidinus paviršiaus šiurkštumą, kurį sukuria maži namai reikia nustatyti ar jis tinkamas ir atitinka natūroje. Šiam šiurkštumui nustatyti yra naudojamos tam tikros metodikos,be to, kai bus nagrinėjamos kitokio paviršiaus sąlygos kiekvieną kartą paviršiaus šiurkštumą reikės nustatyti jį iš naujo. Šiame darbe nebus nagrinėjama paviršiaus šiurkštumo nustatymo metodika.

Kitas aspektas, labai svarbus tinkamai išmatuoti slėgio pasiskirstymą ant modeliuojamo pastato. Sunkesnis atvejis, kai reikia išmatuoti oro srauto greitį. 33 pav. oro srauto greitį matuojantys jutikliai (termoanemometrai) yra sumontuoti ant modelio fasadų, kurie objekto paviršiuje matuoja oro srauto greitį.

11. Aerodinaminio vamzdžio gamyba ir medžiagos

Šio magistrinio darbo pavadinimas nusako, kad šis stendas turi būti ir įrengtas. Šis skyrius skirtas apžvelgtii jo gamybos eigą.

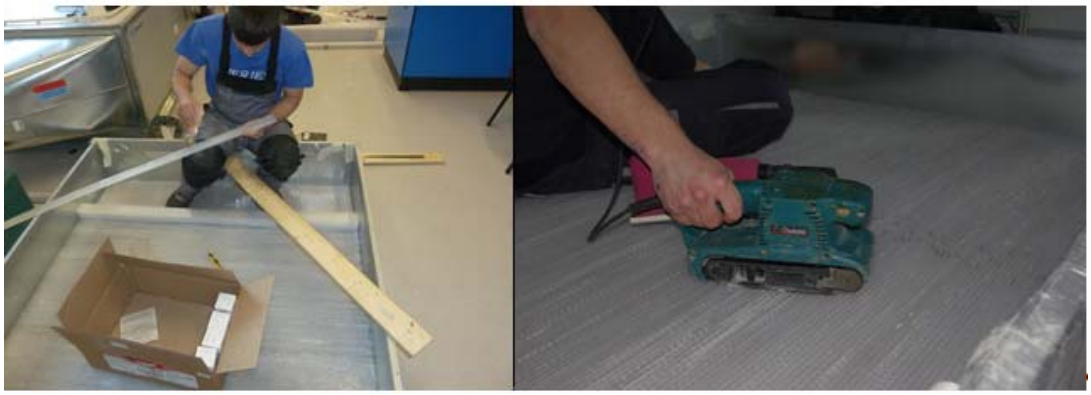
Anksčiau darbe buvo minėta, kad prieškamerį, difuzorių ir laikančiąją konstrukciją pagamins UAB „Amalva“, todėl šiuos elementus reikės tik sujungti tarpusavyje montavimo eigoje. O ventiliatorių dovanoja UAB „Systemair“, todėl parenkamas yra Ø 710 mm skersmens, kuris sukuria 13500 m^3/h ir 200 Pa slėgio oro srautą. Ventiliatorius yra parinktas šiek tiek galingesnis negu reikėtų pagal teorinius skaičiavimus, taip yra tam atvejui, jei teoriniai skaičiavimai būtų netikslūs ir pritrūktų galios norint sukurti tinkamą oro srautą. Šis ventiliatorius kelia didelį triukšmo lygį, o tai gali kelti didelį nuovargį, todėl dirbantysis prie šio stendo turėtų naudoti klausos apsaugos priemones (ausų kištukai ar nuo triukšmo apsaugančias ausines). Šios priemonės sumažins nuovargį ir apsaugos klausą nuo trumpalaikio kurtumo.

Aerodinaminio vamzdžio montavimo eigą galima suskirstyti į etapus:

1. Srautą tiesinančių grotelių gamyba;
2. Difuzoriaus su ventiliatoriumi sujungimas ir pritvirtinimas prie laikančiosios konstrukcijos;
3. Prieškamerio rinkimas ir tvirtinimas prie laikančiosios konstrukcijos;
4. Darbinės kameros sujungimas su difuzoriumi ir prieškameriu.

11.1. Srautą tiesinančių grotelių gamyba

Srautą tiesinančios groteles gaminamos iš polikarbonato plokštės kurio storis yra 8 mm. Jos supjaustomos į 56 mm storio lakštus. Visgi projektinis storis buvo 48 mm, o išpjauta 56 mm, todėl, kad paviršius bus šlifuojamas dėl nelygaus nupjovimo. Žemiau pateiktos kelios fotografijos, kai srautą tiesinančios groteles yra klijuojamos ir šveičiamos.



34 pav. Kairėje srautą tiesinančios grotelės yra klijuomos, o dešinėje yra lyginamas jų paviršius.

Srautą tiesinančių grotelių gamyba yra imlus laikui darbas. Klijavimas ir šveitimas pareikalavo apie 50 % viso darbo laiko.

11.2. Difuzoriaus ir ventiliatoriaus sujungimas ir pritvirtinimas

Ventiliatorius ir difuzorius negali būti taip paprastai sujungti. Tarp ventiliatoriaus ir difuzoriaus yra įdedamas apsauginis tinklas, taip pat tam, kad nesusižeistų dirbantieji sumontuojamas tinklas ir išmetimo pusėje.

Difuzoriaus konstrukcinių medžiagų parinkimas:

Difuzorius gaminamas iš nerūdijančio plieno skardos, jungiamosios dalys gaminamos iš plieninio kampuočio. Žemiau pateikiamos kelios difuzoriaus jungimo su ventiliatoriumi nuotraukos.



35 pav. Kairėje matomas ventiliatorius už apsauginio tinklo, žvelgiant iš darbinės kameros padėties, o dešinėje matomas vaizdas kai vykdomas difuzoriaus sujungimas su konstrukcija

11.3. Prieškamerio surinkimas ir sujungimas su laikančiąją konstrukcija

Prieškamerį surenkant iš atskirų dalių tarp tų dalių buvo įdėti srauto turbalizavimo ekranai. Sumontavus prieškamerį jis buvo sujungtas su laikančiąją konstrukcija, prie kurios jau buvo pritvirtintas difuzorius.

Prieškamerio konstrukcinės medžiagos parinkimas:

Prieškameris gaminamas iš nerūdijančio plieno skardos, jungiamosios dalys gaminamos iš plieninio kampuočio. Ekranai gaminami iš nerūdijančio plieno tinklo, kurių akutės skersmuo 6 mm, o vielos storis 1 mm. Žemiau pateikiamas paveikslas su prieškamerio rinkimo epizodu.



36 pav. Prieškameris surinkimo stadijoje

11.4. Darbinės kameros sujungimas su difuzoriumi ir prieškameriu

Prieškamerį ir difuzorių sujungti į viena visumą per darbinę kamerą yra svarbus momentas, nes tai paskutinis darbas baigiant montuoti aerodinaminį vamzdį. Darbinė kamera gaminama iš skaidraus plastiko, o jo išpjovimas buvo užsakomas pateikiant pjovėjams brėžinius.

Plačiau apie darbinės kameros konstrukcinę medžiagą:

Labai aukštos kokybės akrilo stiklas **PLEXIGLAS XT**, pagamintas ekstrudiniu būdu iš polimetilmetakrilato (PMMA). Kokybės sertifikatas DIN ISO 9001: 2000. Šio stiklo paviršius labai kokybiškas, puikios optinės savybės. Jį lengva ir paprasta apdirbti (pjauti, gręžti, frezuoti ir pan.), galima lankstyti ir termiškai formuoti. Sulaiko UV spindulius. Tinka naudoti patalpų viduje ir lauke, nes yra atsparus saulės UV spindulių ardomajam poveikiui.

Žemiau pateikiamos nuotraukos su darbine kamera ir kai visas aerodinaminis vamzdis yra surinktas į viena visumą.



37 pav. Aerodinaminio vamzdžio darbinė kamera



38 pav. Surinktas aerodinaminis vamzdis.

11.5. Dažnio keitiklis

Nors aerodinaminis yra surinktas, jam reikalingas dažnio keitiklis, kuris reguliuotų oro srauto greitį. Šiam stendui Parenkamas „EMERSON Industrial Automation“ *Commander SK* gamintojų dažnio keitiklis.



39 pav. SKC3400220 dažnio keitiklis

11.6. Medžiagų žiniaraštis

Šiuo metu aerodinaminis vamzdis yra jau surinktas, taigi šiame poskyryje pateikiamos medžiagos, kurias reikėjo įsigyti Pek. Pagrindinius elementus: difuzorių, prieškamerį ir atraminę konstrukciję dovanoja UAB „Amalva“, o ventiliatorių dovanoja UAB „Systemair“.

9. lentelė. Medžiagų žiniaraštis

Eil. Nr.	Pavadinimas	Matmenys: Storis x Ilgis (aukštis) x plotis, mm	Mato vienetai	Plotas, masė, vnt	Kiekis	Vnt. kaina, Lt	Kaina su PVM, Lt
1	2	3	4	5	6	7	8
Darbinė kamera							
1	Organinis stiklas "PLEXIGLAS XT" su išpjovimu	500 x 500 x 1000	vnt	-	1	990,99	990,99
2	Elementai reiklaingi darbinės kameros sujungimui su difuzoriumi ir prieškameriu	-	-	-	-	-	89
Srautą tiesinančios grotelės							
10	Polikarbonato plokštė	6000 x 2100	vnt	1	1	473,76	573,25
	Epoksidiniai klijai	-	vnt	-	15	10,52	157,8
11	Austas tinklas	Ø 1x 6	m^2	5	1	9,17	45,85
12	Austas tinklas	Ø 1 x 13	m^2	3,75	1	16,49	32,98
Laikančioji konstrukcija							
17	Jungiamieji varžtai						150
Valdymas							
19	Dažnio keitiklis "Commander SKC3400220"		vnt		1	841,43	841,43
20	Papildomos išlaidos reikalingos elektros srovei pajungti, matavimo prietaisams ir pan.		vnt		1	841,43	841,43
						Viso:	3881,30

Aerodinaminio vamzdžio įrengimui reikalingų medžiagų kaina sudaro apie 3881,30 Lt. Šiose išlaidose nėra įvertintos ventiliatoriaus, prieškamerio, difuzoriaus ir laikančiosios konstrukcijos kainos, o tai sudarytų didžiausią išlaidų dalį.

Autorius dėkoja: UAB „Systemair“ padovanojusiai ventiliatorių ir UAB „Amalva“ pagaminusiai prieškamerį, difuzorių ir laikančiąją konstrukciją.

IŠVADOS

- Atlikta literatūros analizė susijusi su aerodinaminių vamzdžių konstrukcijomis, nors jų veikimo principas yra tas pats, bet kiekviena konstrukcija yra unikali, nes kiekvienam tikslui yra skirtinga specifika, t. y. darbinės kameros forma ir oro srauto greičiai pritaikomi tik tam tikriems tyrimams.

- Pasirinkta tinkamiausia aerodinaminio vamzdžio konstrukcija, sukonstruotas ir pagamintas atvirojo tipo aerodinaminis vamzdis, kai darbinės kameros skerspjūvio forma yra kvadratas, kurios išmatavimiai 500 x 500 mm, o ilgis 1000 mm. Aerodinaminio vamzdžio bendras ilgis yra 4,27 m, o plačiausia dalis siekia 1,67 m. Aerodinaminio vamzdžio parametrai atitinka projektinius. Projektinis oro srauto greitis yra 15 m/s (ribinis pasiekiamas greitis19 m/s).

- Suprojektuotas ir pagamintas PEK aerodinaminis vamzdis, kurio keliamo triukšmo lygis didžiausio oro greičio režime yra mažesnis už analogiškos paskirties aerodinaminių vamzdžių triukšmo lygį, Panaudojus triukšmo slopintuvus prieš ir už ventiliatoriaus, PEK aerodinaminio vamzdžio keliamas triukšmas neviršija 82,6 dB(A).

- Jautrumo analizės metodas leido parinkti tinkamiausią aerodinaminį vamzdį ir elementų formą. Nustatyta, kad prieškamerio išplatėjimo supaprastinimas į tokio pat skerspjūvio ploto kanalą kaip ir darbinė kamera, leidžia sumažinti aerodinaminio vamzdžio matmenis, bei padidinti jo slėgio nuostolius 3,6 karto, t. y. nuo 112 iki 404 *Pa,* todėl šis variantas nepalankus mokslo ir mokomųjų darbų atlikimui dėl atitinkamai didesnių energijos sąnaudų ir akustinio diskomforto

- Atliktos kubo formos kūno aptekėjimo modeliavimo kompiuterine srautų modeliavimo programa ***Pfoenics*** ir nustatyta rezultatų nesutapimas su kito tyrėjo analogišku tyrimu. Visgi aerodinaminis vamzdis leidžia užfiksuoti srauto linijas, o tai suteikia prasmingumą ir suteikia galimybę patikrinti hidro is aerodinaminio modeliavimo įgūdžius.

- Šiame darbe suprojektuotas ir sumontuotas vienintelis aerodinaminis vamzdis Lietuvos universitetuose. Šį aerodinaminį vamzdį bus galima panaudoti studentų mokymui, moksliniams ir užsakomiesiems tyrimams.

Literatūros sąrašas:

Aerolab. Educational wind tunnel [interaktyvus]. Žiūrėta 2011 sausio 21 d. Prieiga per internetą: http://www.aerolab.com/

Armfield. C2 Subsonic wind tunnel [interaktyvus]. 2006. [Žiūrėta 2011 sausio 21 d.] Prieiga per internetą: http://www.discoverarmfield.co.uk/data/c2/#orderspec

Armfield. C15 Subsonic wind tunnel [interaktyvus]. 2006. [Žiūrėta 2011 sausio 21 d.] Prieiga per internetą: http://www.discoverarmfield.co.uk/data/c15/

Bell, J. H.; Mehta, R.D. 1989. Boundary – Layer Predictions for Small Low- speed Contractions. Washington: L'enfant promenade , 372-374 p.

Brassard, D. 2003. Transformation of a Polynomial for a Contraction Wall Profile. Canada

Chavez, M. Hajra, B. Stathopoulos, T. Bahloul, A 2011 „Near-field pollutant dispersion in the built environment by CFD and wind tunnel simulations" Canada. 330 – 339 p.

Educational wind tunnel [interaktyvus]. 2010. „Aerolab" [Žiūrėta 2011 sausio 21 d.] Prieiga per internetą: http://www.aerolab.com/

F1 dictionaries. Wind tunnel. [interaktyvus]. Žiūrėta 2011 sausio 23 d. Prieiga per internetą: http://f1-dictionary.110mb.com/wind_tunnel.html

GDJ Inc. Flotek 1440 Subsonic wind tunnel [interaktyvus]. 2008. [Žiūrėta 2011 sausio 21 d.] Prieiga per internetą: http://www.gdjinc.com/windtunnels/wind3.html

G.u.n.t.. Hm-170 Educational wind tunnel [interaktyvus]. 2005. [Žiūrėta 2011 sausio 21 d.] Prieiga per internetą: http://www.gunt.de/static/s3399_1.php?p1=&p2=&pN=;;#

Guoliang liu, Jie Xuan, Soon-ung Park. 2003. „A new method to calculate wind profile parameters of the wind tunnel boundary layer" Seoul 151-742, Seoul National University, South Korea. 1155-1162 p.

Jewel, B. Barlow, William H. Rae, Jr. Alan Pope. 1999.*„Low-speed wind tunnel testing"* third edition. USA: John Willey & Sons, INC.

Juodis, E. 2009. Vėdinimas. Vilnius: Technika. 397 p

Kačianauskas, R. BEM ir kompiuterinės technologijos. Vilniaus Gedimino technikos Universitetas, magistrantūros studijos. 2004.

Kas Kasravi. Types of Wind tunnel. [interaktyvus]. Žiūrėta 2011 sausio 20 d. Prieiga per internetą: http://www.kasravi.com/cmu/tec452/Aerodynamics/WindTunnel.htm

Kato lab.. Ooka lab.. Institute of Industrial Science The University of Tokyo. Flowfield around building models placed in wind tunnel. [interaktyvus]. Žiūrėta 2011 sausio 20 d. Prieiga per internetą: http://venus.iis.utokyo.ac.jp/english/photo_gallery/photo_gallery.htm

Kato lab. Ooka lab. Institute of Industrial Science The University of Tokyo. Scale model of building complex placed in wind tunnel. [interaktyvus]. Žiūrėta 2011 sausio 20 d. Prieiga per internetą: http://venus.iis.utokyo.ac.jp/english/photo_gallery/photo_gallery.htm

Lindgren, B.B., Johansson, A.V. 2002. Design and evaluation of a low-speed wind-tunnel with expanding corners. Stockholm. 47 p

Mehta, R.D. 1985. Turbulent boundary layer perturbed by a sreen. England. 1335 – 1342 p.

Numerical-methods. [interaktyvus]. Žiūrėta 2011 sausio 20 d. Prieiga per internetą: http://www.numerical-methods.com/

Pankhurst, R.C., Holder, D.W. 1952„*Wind – Tunnel Technique*“. London: Sir Isaac Pitman & Sons LTD

Plėta, V. 2010. Bakalauro darbas: Mokomojo aerodinaminio vamzdžio projektas. 64 p

Single Value Representation of Sound Spectrum. [interaktyvus]. Žiūrėta 2012 Gegužės 21 d. Prieiga per internetą: http://personal.cityu.edu.hk/~bsapplec/single.htm

Stirolab Material testing technology . WT.3000 Subsonic wind tunnel [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 sausio 21 d.] Prieiga per internetą: http://www.stirolab.com/en/subsonic-wind-tunnel.html

Tatmant, N. Wind Tunnel Design and Operation. 26p

Vaitiekūnas, P., Špakauskas, V. 2003. Šilumos ir masės pernašos procesų aplinkoje modeliavimo principai. Vilnius: Technika. 102 p

Van Hooff, Blocken, B. Aanen, L. Bronsema, B. 2011 „A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations“ Netherlands 1797 – 1807 p.

Yakhot, A. Liu, H. Nikitin, N. 2006 Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation. 994-1009 p.

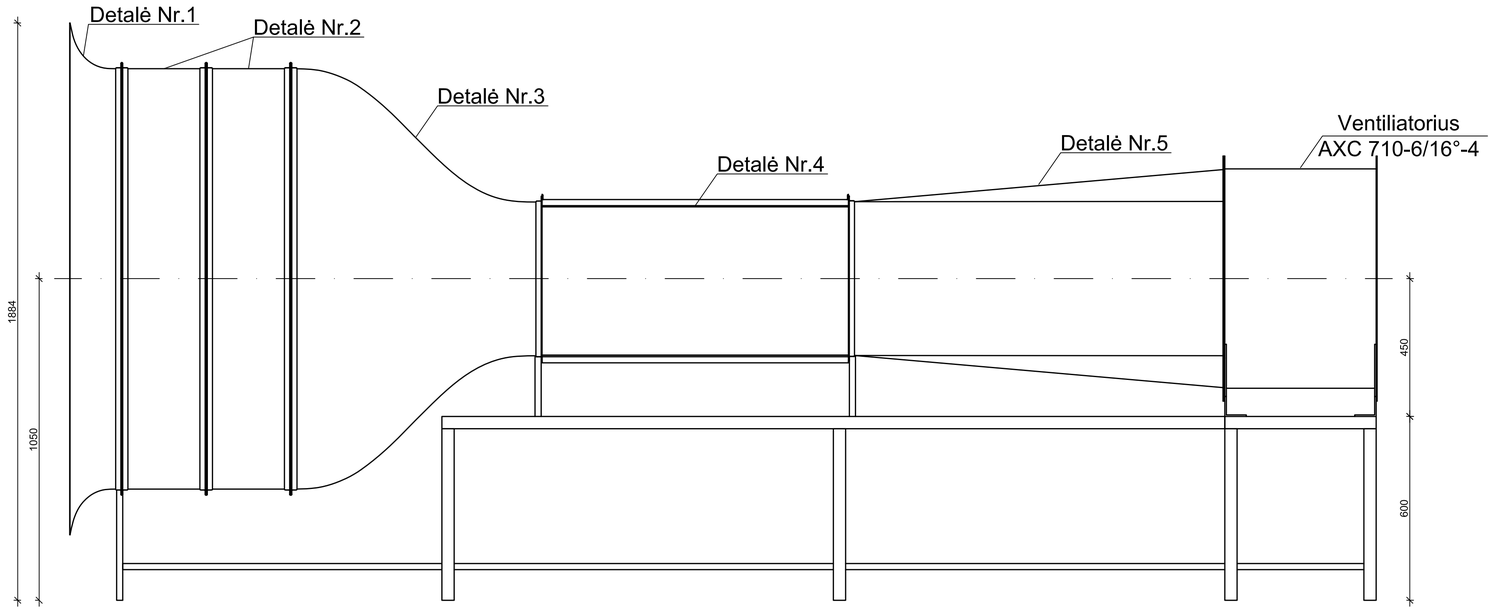
Whirling Arms and the First Wind Tunnels. [interaktyvus].2009. National aeronautics and space administration [Žiūrėta 2011 sausio 20 d.] Prieiga per internetą:

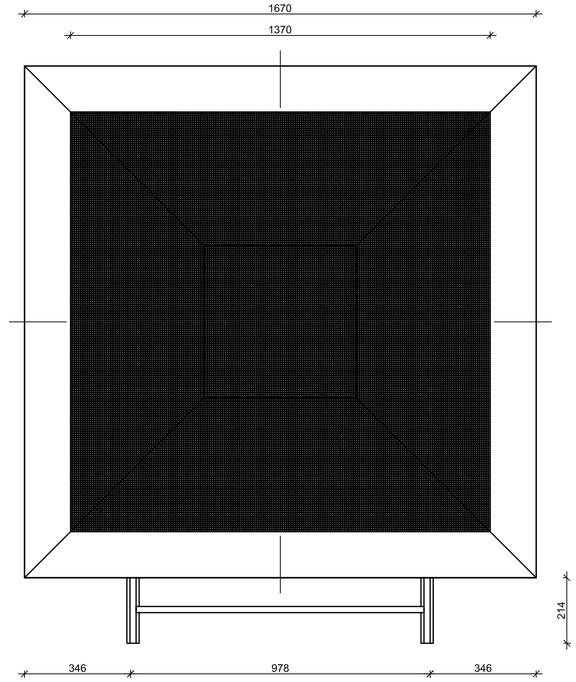
http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/WindTunnel/history.html

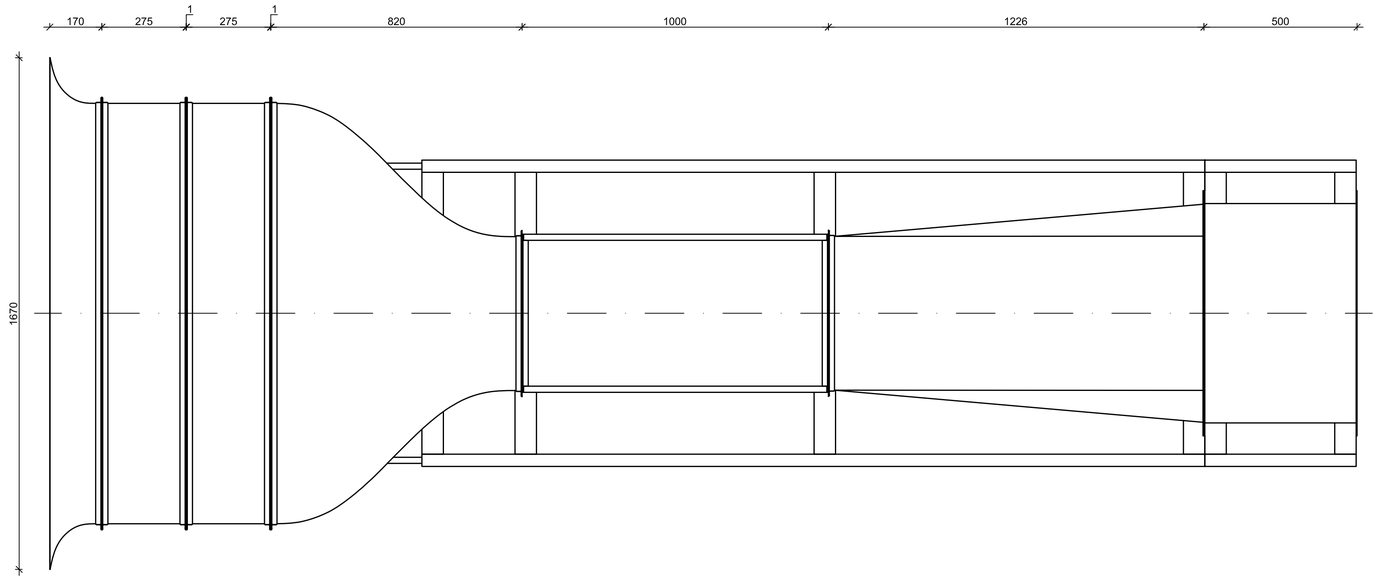
Wind tunnel. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011 sausio 20 d.] Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel

Grafinė dalis

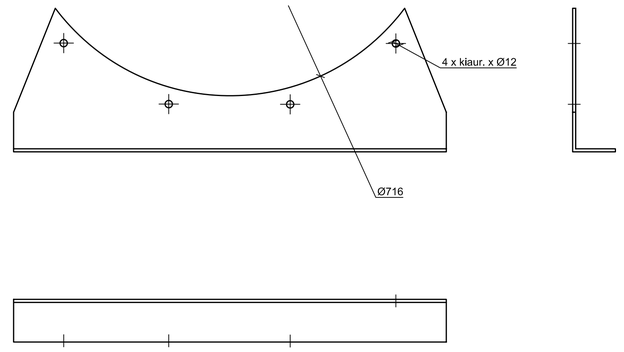
Aerodinaminis vamzdis
M 1:10





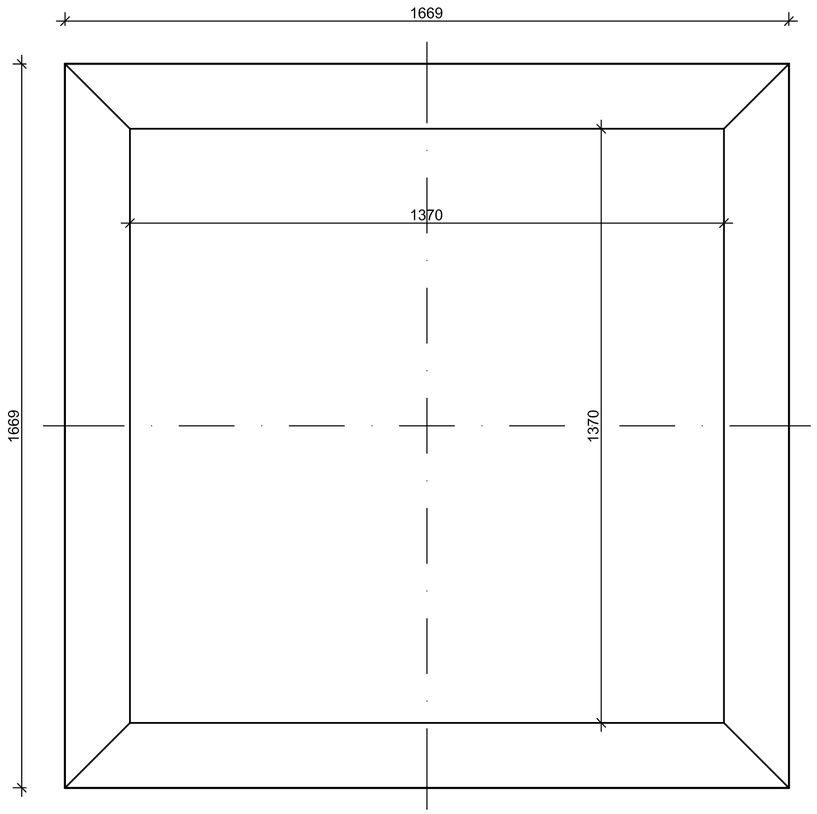


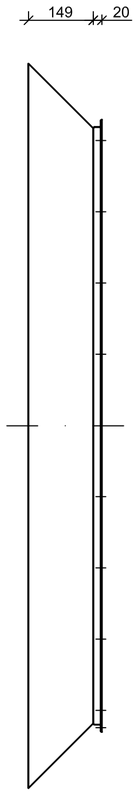
Ventiliatoriaus tvirtinimo elementas
M 1:5

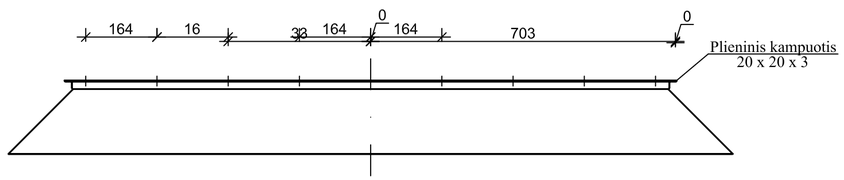


Pareigos	Pavardė	Parašas	Data	Aerodinaminis vamzdis M 1:10	
Studentas	Juozas Bielskus				
Vadovas	E. Juodis				
VGTU, AIF, Pastatų energetikos katedra				Gedimino technikos universitetas Vilnius, Saulėtekio al. 11	Lapas / Lapų

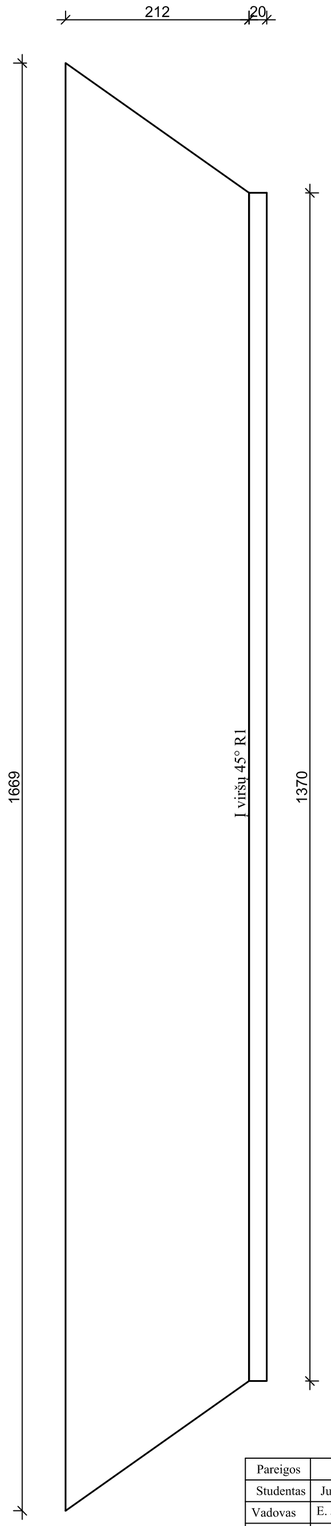
Detalė Nr. 1
M 1:10





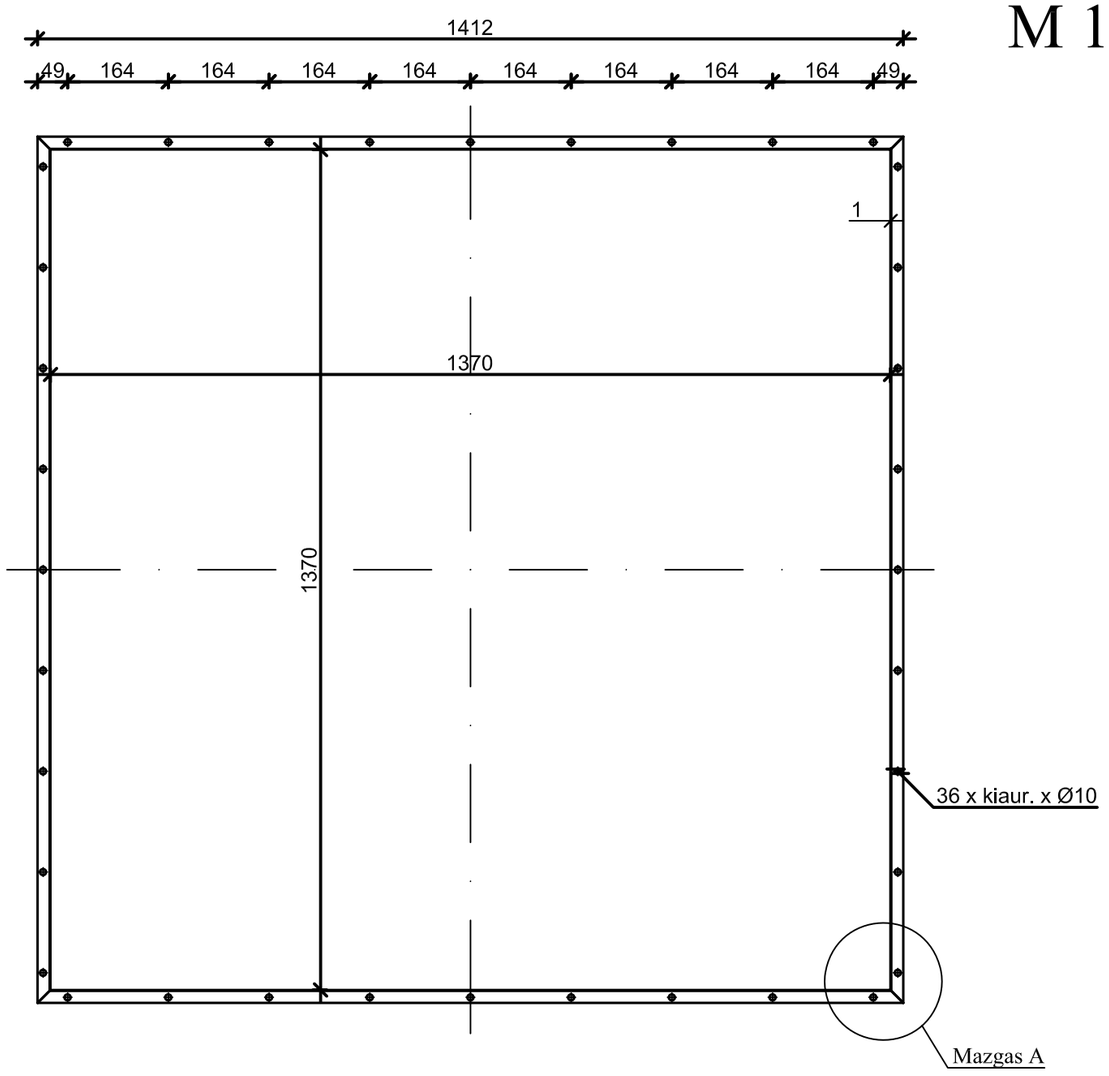


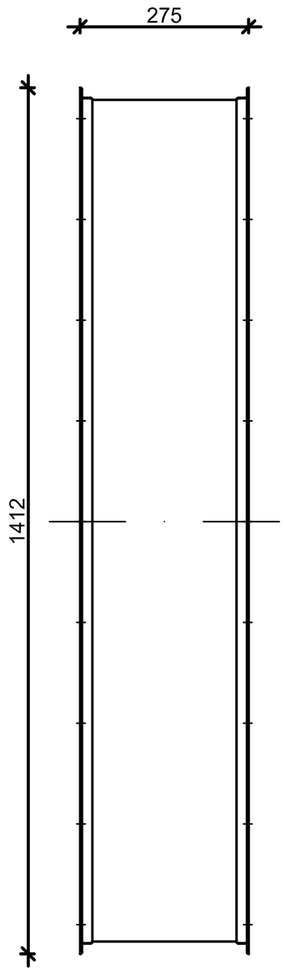
Detalės Nr. 1 išklotinė (vienos kraštinės)
M 1:5



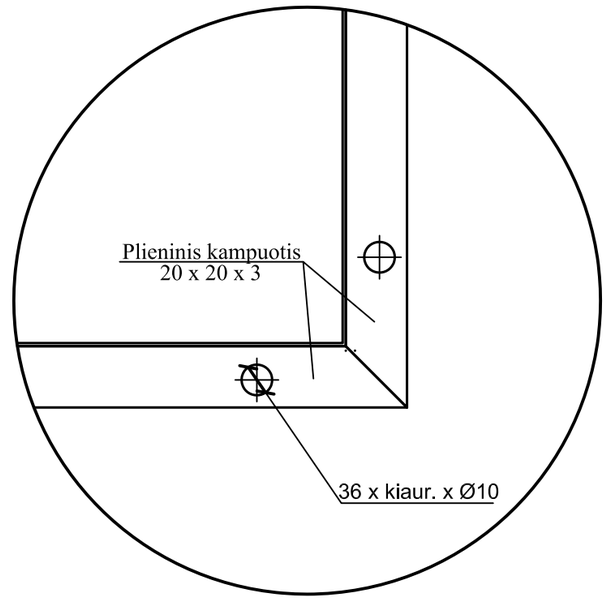
Pareigos	Pavardė	Parašas	Data	Detalė Nr. 1 (kolektorius) M 1:10	
Studentas	Juozas Bielskus				
Vadovas	E. Juodis				
VGTU, AIF, Pastatų energetikos katedra				Gedimino technikos universitetas Vilnius, Saulėtekio al. 11	Lapas / Lapų

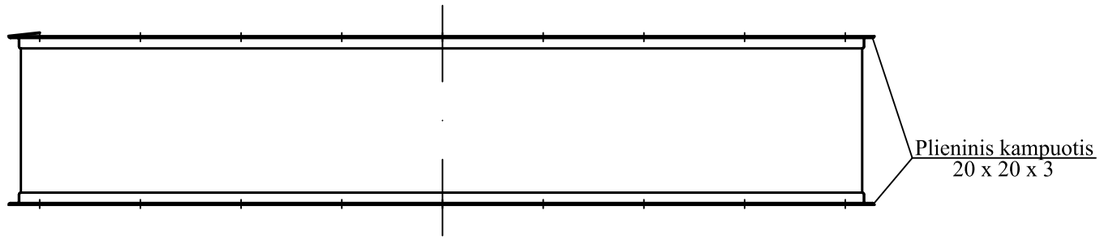
Detalė Nr. 2
M 1:10





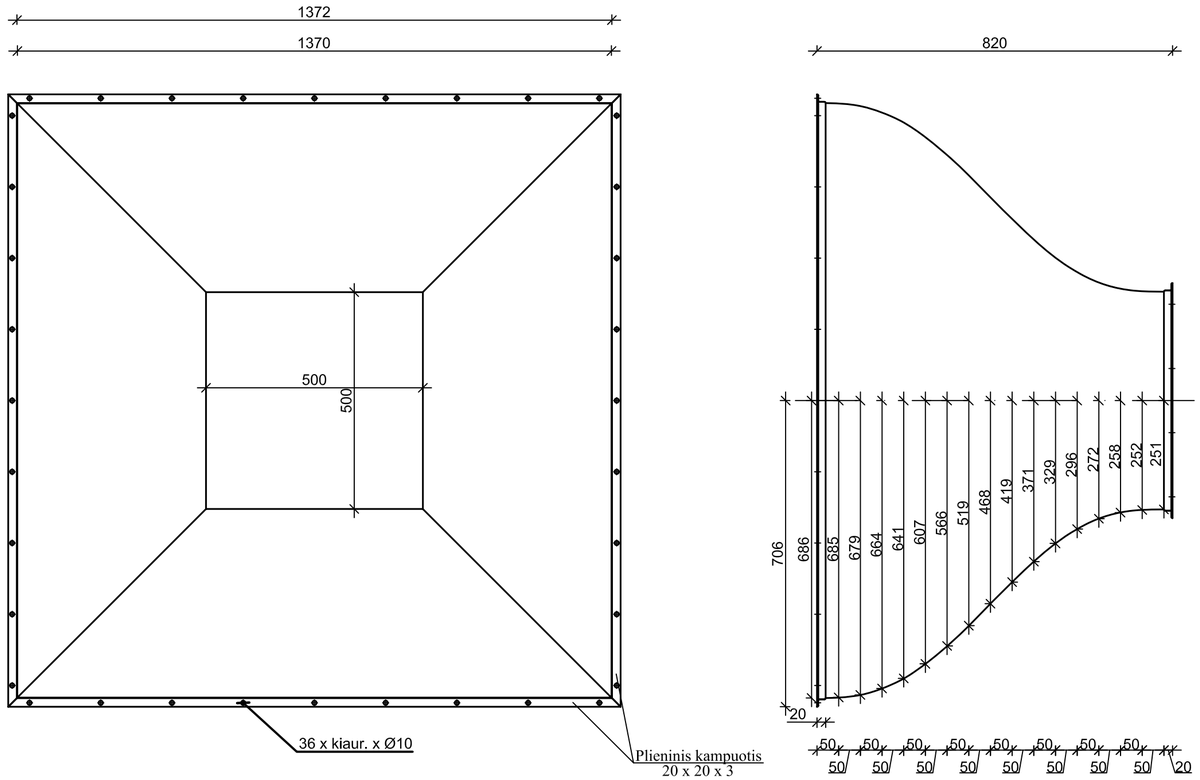
Mazgas A
M 1:2

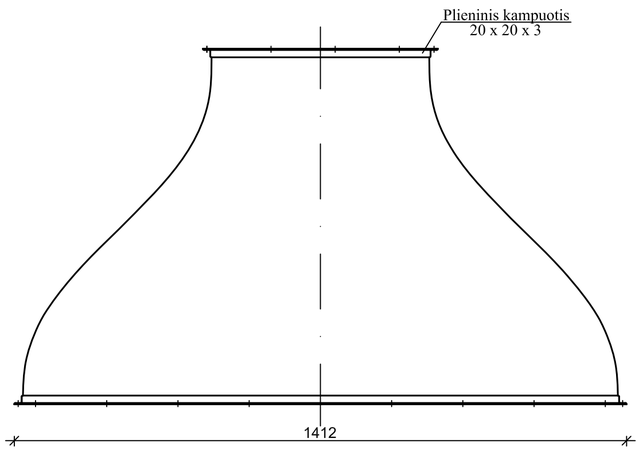




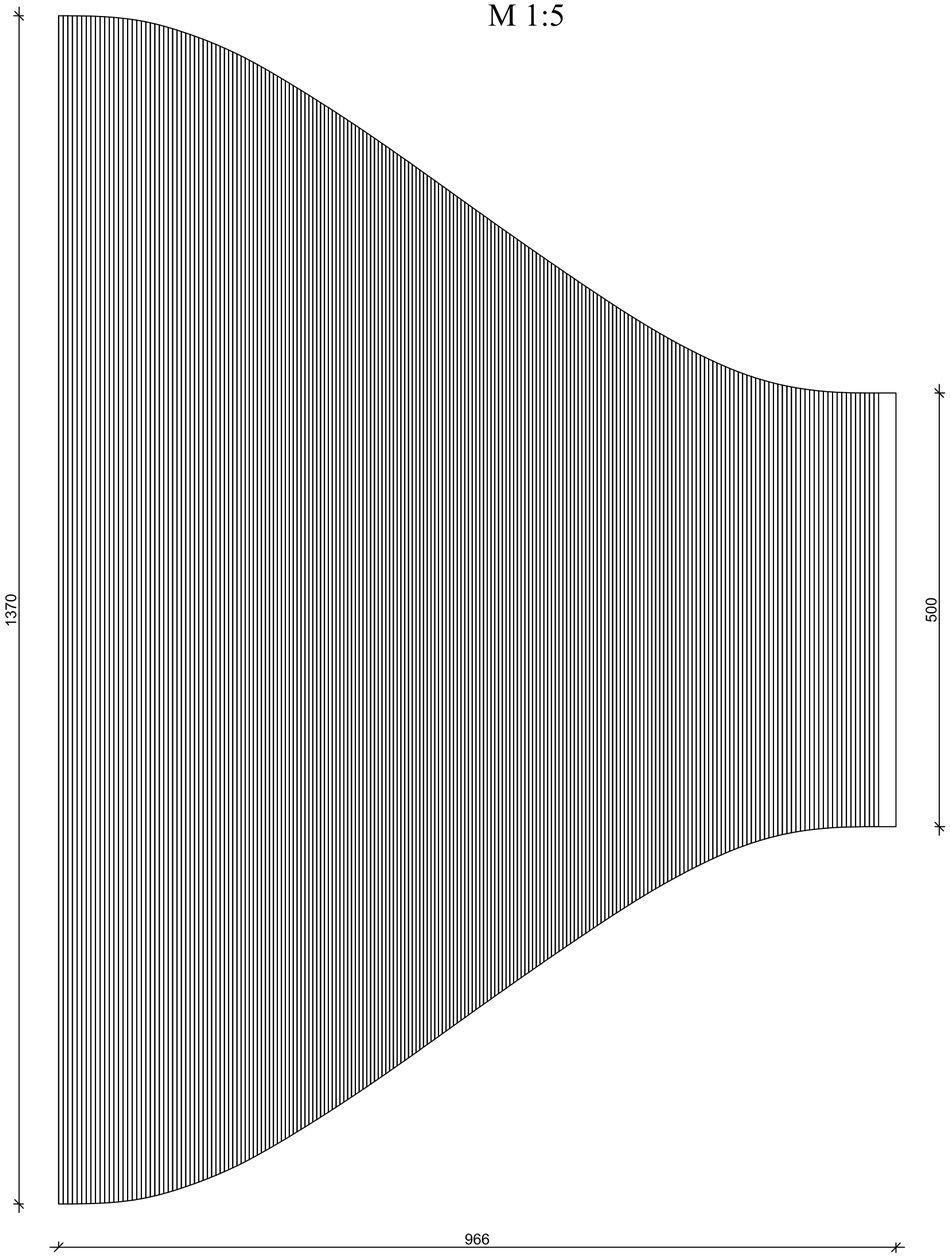
Pareigos	Pavardė	Parašas	Data	Detalė Nr. 2 (prieškameris) M 1:10	
Studentas	Juozas Bielskus				
Vadovas	E. Juodis				
VGTU, AIF, Pastatų energetikos katedra					Lapas / Lapų

Detalė Nr. 3
M 1:10





Detalės Nr. 3 išklotinė (vienos kraštinės)
M 1:5



Pareigos	Pavardė	Parašas	Data
Studentas	Juozas Bielskus		
Vadovas	E. Juodis		

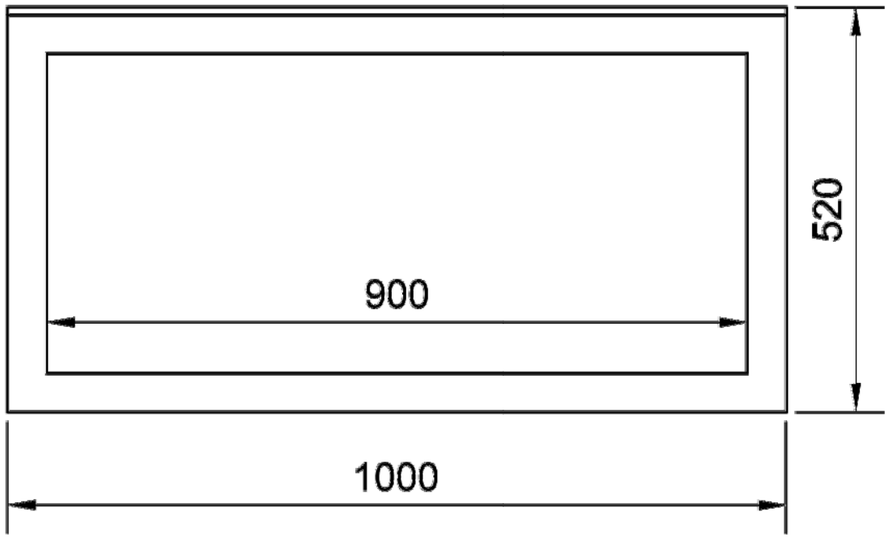
Detalė Nr. 3 (susiaurėjimo sritis)
M 1:10

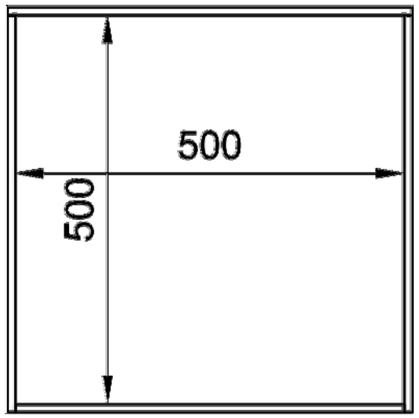
VGTU, AIF, Pastatų energetikos katedra

Gedimino technikos universitetas
Vilnius, Saulėtekio al. 11

Lapas	Lapų

Darbinė kamera (detalė Nr. 4)





Detalė A: neskaidrus plastikas, 1000x500x10 mm su apskritimo formos skyle centre, kurios Ø390 mm ir su 5 mm kantu (kantas: Ø400 mm);

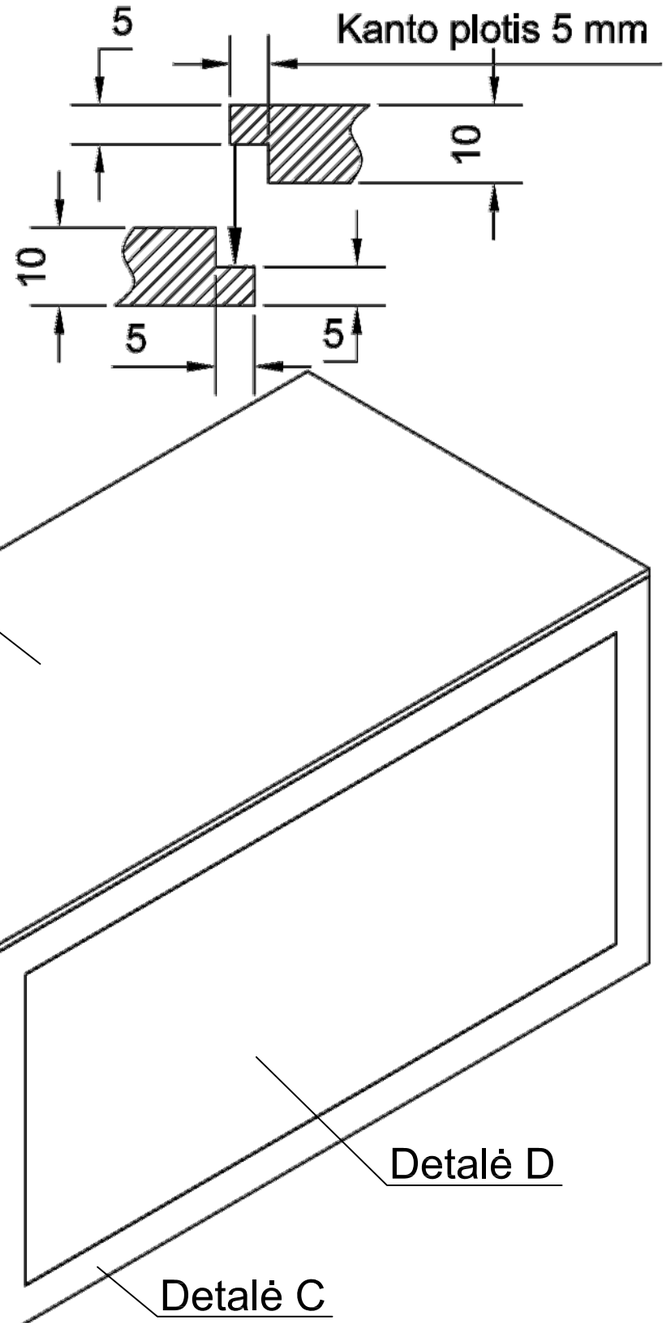
Detalė B: neskaidrus plastikas, Ø400 mm apskritimas su 5 mm kantu (kantas: Ø390 mm);

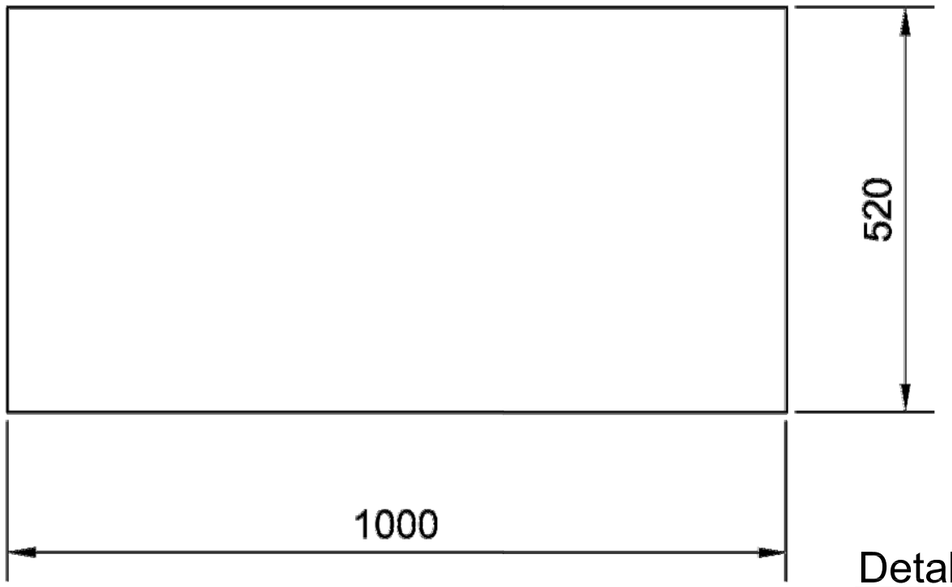
Detalė C: skaidrus plastikas, 1000x510x10 mm su kvadratine skyle, kurios dydis 400x890 mm ir su kantu 5 mm (skylė su kantu aplinkui);

Detalė D: skaidrus plastikas, 900x410x10 mm su kantu 5 mm;

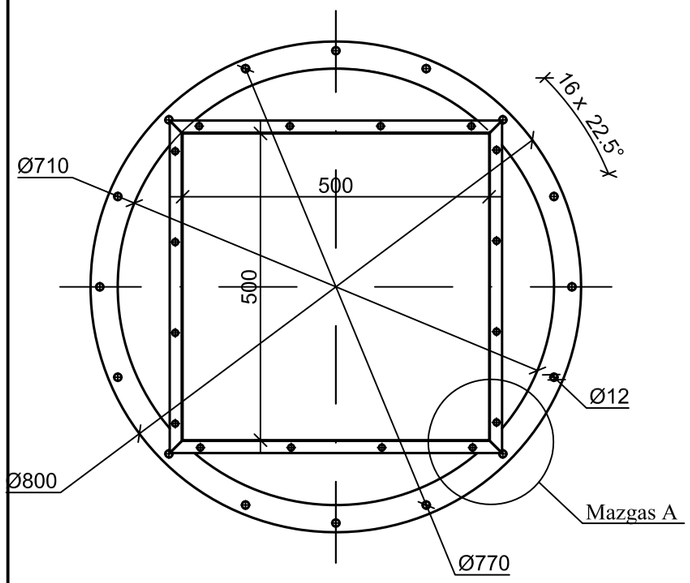
Detalė G: skaidrus plastikas, 1000x520x10 mm;

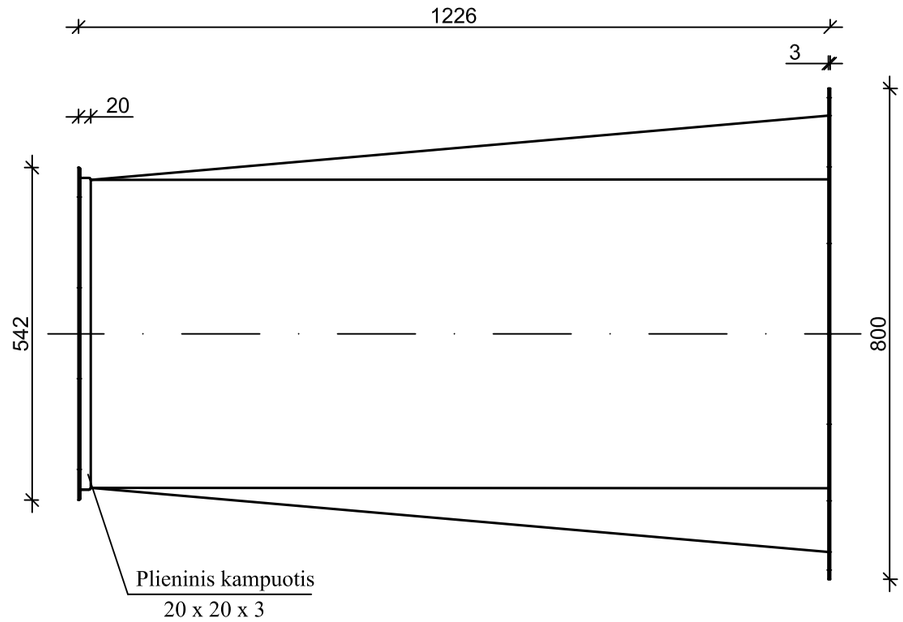
Detalė E: skaidrus plastikas, 1000x510x10 mm,

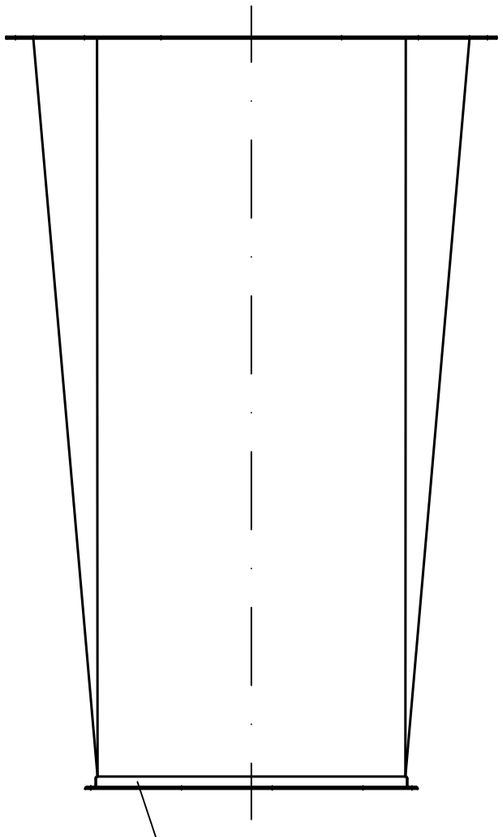




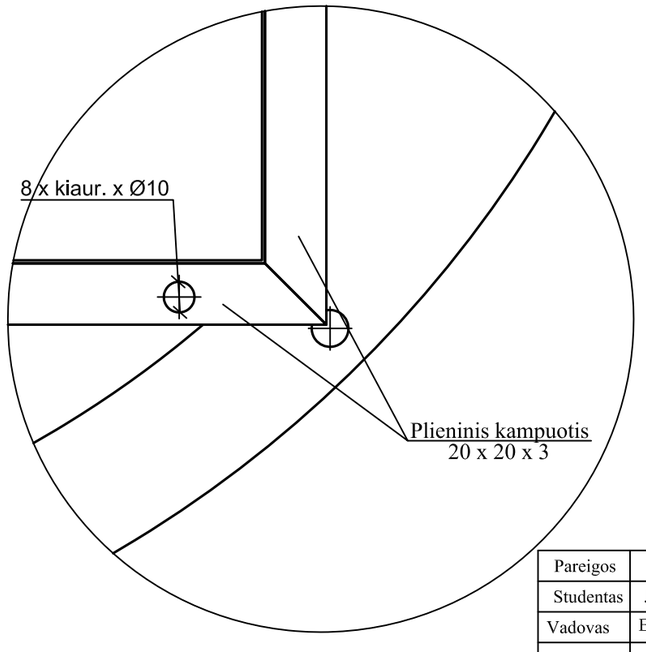
Detalė Nr. 5
M 1:10







Mazgas A
M 1:2



Pareigos	Pavardė	Parašas	Data	Detalė Nr. 5 (Difuzorius) M 1:10	
Studentas	Juozas Bielskus				
Vadovas	E. Juodis				
VGTU, AIF, Pastatų energetikos katedra					Lapas / Lapų

Priedas A

MOKOMASIS AERODINAMINIS VAMZDIS

Juozas Bielskus
magistrantas
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
el. : juozas.bielskus@vgtu.lt

Anotacija. Straipsnyje nagrinėjamas mokomasis aerodinaminis vamzdis, su kuriuo bus galima atlikti laboratorinius darbus ir nesudėtingus mokslinius tyrimus. Aptariama aerodinaminio vamzdžio reikšmė studentams, Lietuvos ūkiui ir aplinkosaugai. Taip pat pateikiama, kokius bandymus bus galima atlikti Pastatų energetikos katedroje (PEK) su aerodinaminiu vamzdžiu. Peržvelgta laboratorijos įrangos gamintojų – Aerolab, G.u.n.t, Armfield, Stirolab, GDJ Inc mokamieji aerodinaminiai vamzdžiai ir projektavimo rekomendacijos, kurios pateiktos literatūroje. Atsižvelgus į minėtas rekomendacijas, buvo parinkti PEK aerodinaminio vamzdžio pagrindiniai parametrai ir papildomai pridėti triukšmo slopintuvai prieš ir po ventiliatoriaus.

Reikšminiai žodžiai: aerodinaminis vamzdis, aptekėjimas, sklidimas, teršalai.

Įvadas

Aerodinaminis vamzdis yra svarbi priemonė atliekant inžinerinius ir mokslinius tyrimus bei tikrinant kompiuterinių programų skaičiavimų patikimumą. Lietuvos ūkis ir aplinkosauga daug laimėtų, jei ne vien skaičiavimais, bet ir bandymais galėtų patikrinti teršalų sklidimo atvejus. Be abejo, ir būsimiesiems inžinieriams būtų naudinga tiriant įvairius oro srauto reiškinius. Aerodinaminio vamzdžio privalumas yra tas, jog eksperimentiniai bandymai atliekami gerai valdomoje srauto aplinkoje ir suteikia galimybę pamatyti vaizdžius oro judėjimo trajektorijų pasikeitimus, kai kelyje aptinkama kliūtis. Tyrimai realioje aplinkoje yra komplikuoti ir brangūs, be to, ne visada įmanomi.

Aerodinaminį vamzdį yra brangu įrengti, todėl juos keičia modeliavimas kompiuterine programa. Modeliuoti kompiuterine programa yra pigiau, paprasčiau, tai nereikalauja didelių patalpų ir nekelia triukšmo. Bet kompiuterinis modeliavimas ne visada galimas, nes kartais atsiranda tokių veiksnių, kurių programa negali nuspėti. Tada modeliavimas perkeliamas į aerodinaminį vamzdį.

Pastatų energetikos katedra neturi praktinės mokymo priemonės nustatant aerodinamines pastatų aptekėjimo, teršalų sklidimo savybes, todėl būtų naudinga suprojektuoti ir įrengti mažą aerodinaminį vamzdį. Numatoma, kad PEK projektuojamu aerodinaminiu vamzdžiu studentai (ir ne tik jie) atliks laboratorinius darbus ir mokslinius tyrimus, kurie susiję su srauto tekėjimo reiškiniais, pastatų aerodinaminėmis savybėmis, oro apykaita gatvėje tarp aukštų pastatų, teršalų sklidimu aplinkoje, gyvenvietėje.

PEK būsimas aerodinaminis vamzdis turės galimybę nustatyti:

- Slėgių pasiskirstymą pastato priekyje, užuovėjoje ir ant stogo;
- Pastato formos įtaką oro judėjimui, pvz.: namas su plokščiu arba šlaitiniu stogu;
- Oro cirkuliaciją ilgoje gatvėje tarp aukštų pastatų;
- Pramonės, šilumos gamybos, namų išmetamų teršalų sklidimą aplinkoje;
- Taip pat galima bus atlikti kvartalo, rajono ar net viso miesto apatinių oro sluoksnių judrumo ar teršalų sklidimo rajonuose tyrimą.

Atlikę šiuos bandymus, gautus rezultatus galėsime palyginti su kompiuterinės programos pateiktais rezultatais, taip pat patikrinti analitinius skaičiavimo metodus.

Aerodinaminio vamzdžio konstrukcija

Aerodinaminis vamzdis – tai įrenginys, kuris sukuria dirbtinį nusistovėjusį oro srautą, apiplaunantį tiriamojo modelio paviršių. Pirmasis aerodinaminis vamzdis sumontuotas 1871 m. (Francis Herbert Wenham), o po 31 m. pakilo pirmasis žmonijos sunkesnis už orą skraidymo įrenginys (Whirling Arms and the First Wind Tunnels. 2009. National aeronautics and space administration). Taigi aerodinaminis vamzdis išrastas buvo tam, kad padėtų žmogui skraidyti, o vėliau pritaikytas ir kitose srityse

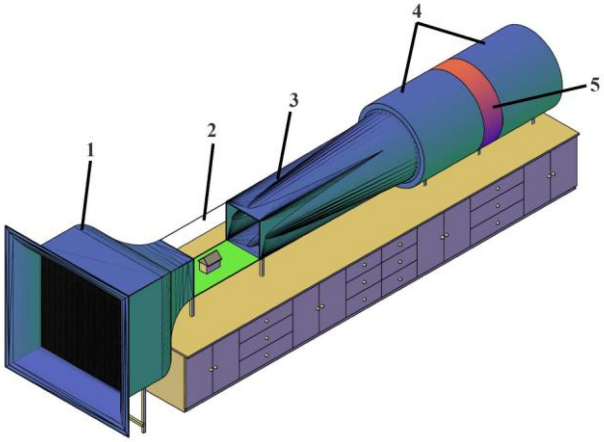
© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2011

(pastatų aerodinaminėms savybėms, teršalų sklidimui tirti ir t. t.). Aerodinaminiai vamzdžiai gali būti klasifikuojami pagal srauto greitį: mažo greičio, transgarsiniai, viršgarsiniai, ultragarsiniai ir pagal grandines: atvirojo ir uždarojo tipo grandines (Lindgren, B.B. 2002: 47).

Atvirojo tipo aerodinaminiai vamzdžiai dažniausiai būna nedidelių matmenų. Jie naudojami mažose laboratorijose, nedideliems moksliniams tyrimams, kurie nereikalauja itin tikslių rezultatų ir (ar) demonstraciniams bandymams. Uždarojo tipo būna įvairių matmenų. Jie naudojami mažose ir didelėse laboratorijose.

Visgi uždarojo tipo aerodinaminis vamzdis yra pranašesnis už atvirojo, nes energijos suvartojimas, hidrauliniai nuostoliai ir triukšmo lygis yra mažesni. Pagrindinis atvirojo tipo vamzdžio privalumas yra mažesnis patalpos erdvės ir išlaidų poreikis jį įrengiant. Taip pat mažesnė įtaka rezultatams dėl temperatūros pokyčių (patalpos tūris daug didesnis negu aerodinaminio vamzdžio) ir ventiliatoriaus įrengto vamzdžio gale, veikimui nedaro įtakos sutrikdytas srautas iš darbinės kameros (Bell 1989: 372–374). PEK atsižvelgiant į kainą ir kitus privalumus bus projektuojamas mažo greičio atvirojo tipo aerodinaminis vamzdis. 1 pav. pateikiama, kaip gali atrodyti aerodinaminis PEK katedros vamzdis.

Prieš apžvelgdami aerodinaminių vamzdžių projektavimo rekomendacijas trumpai apžvelgsime laboratorinės įrangos gamintojų mokamuosius aerodinaminius vamzdžius. Šie gamintojai yra „Aerolab“ (Aerolab) (Educational wind tunnel. 2010. Aerolab), „G.u.n.t.“ (HM-170) (Hm-170 educational wind tunnel. 2005. G.u.n.t.) , „Armfield“ (C2, C15) (C2, C15 Subsonic wind tunnel. 2006 Armfield), „Stirolab“ (WT.3000) (WT.3000 Subsonic wind tunnel. Stirolab Material testing technology), „GDJ Inc.“ (Flotek 1440) (Flotek 1440 Subsonic wind tunnel. 2008. GDJ Inc.). Beveik visų gamintojų aerodinaminių vamzdžių prieškamerio skerspjūvis yra kvadrato formos, išsiskiria tik „Armfield“ (C2) (aštuoniakampio) ir „Stirolab“ (apskritimo), o susiaurėjimo kanalo santykis 9:1 ir daugiau, išskyrus HM-170 (3:1) ir C2 (4:1). Srautą tiesinančios grotelės visų šių vamzdžių yra korio tipo ir pagamintos iš aliuminio arba plastiko. Darbinės kameros yra pagamintos iš skaidraus stiklo ir pritaikytos lengvai įdėti ir (ar) pasukti bandomąjį modelį, dydžiai panašūs, bet „GDJ Inc.“ gamintojų darbinė kamera išsiskiria savo ilgiu. Paminėtų aerodinaminių vamzdžių konstrukcijos yra pagamintos iš plieno, išskyrus C2 (iš stiklo pluošto), o ventiliatoriai pagaminti iš aukštos kokybės medžiagų. Visi vamzdžiai turi reguliuojamo greičio variklius, kurie turi dažnio keitiklius ir valdo ventiliatorių srautą. Iš visų gamintojų tik „Aerolab“ gamintojas pateikė aerodinaminį vamzdį su sumažintu triukšmo lygiu ir didžiausiu oro srauto greičiu (iki 65 m/s).



1 pav. PEK aerodinaminio vamzdžio sudedamosios dalys: 1 – prieškameris, 2 – darbinė kamera, 3 – platėjimo difuzorius, 4 – triukšmo slopintuvai, 5 – ventiliatorius

Darbinė kamera. Šioje kameroje statomas bandomasis objektas, tada į jį pučiama dirbtinė oro srovė ir atliekami tyrimai. Atvirojo tipo darbinės kameros retai naudojamos, nes jos yra priklausomos nuo aplinkoje vykstančių veiksnių, o uždara darbinė kamera – apsaugota nuo aplinkos veiksnių. Darbinės kameros forma priklauso nuo individualių reikalavimų, bet dažniausiai pasitaikančios darbinės kameros yra uždarojo tipo, pagamintos iš skaidrių medžiagų ir stačiakampio skerspjūvio formos. Ji turėtų būti pakankamai ilga, bet ne per daug, nes atsiras nepageidaujamas pasienio sluoksnio augimas, tai pat ją turi būti lengva pakeisti ar pasukti bandinį. Aerodinaminis vamzdis pradedamas projektuoti nuo darbinės kameros. Darbinės kameros dydis turi įtakos Reinoldso skaičiui ir dažniausiai nusako reikalingas investicijas būsimam vamzdžiui (Bell 1989: 372–374; Plėta 2010: 64).

PEK aerodiminio vamzdžio darbinė kamera bus kvadrato skerspjūvio kurio matmenys yra 500 x 500 x 1000 (aukštis x plotis x ilgis). Kvadrato skerspjūvis pasirenkamas dėl patogumo pastatant modelius, didesnio pastatymo ploto ir aukščio. Darbinės kameros matmenys parinkti taip, kad būtų patogu atlikti bandymus su didesniais modeliais, o ilgis pasirenkamas, kad būtų patogu stebėti teršalų sklidimą ilgą gatve ir pan.

Prieškameris. Aerodinaminio vamzdžio dalis, susidedanti iš kolektoriaus (būna prieš srautą tiesinančias groteles), srauto stabilizavimo srities ir susiaurėjimo kanalo. Siaurėjimo kanalas geriausias, kai yra varpo formos – taip padedama sukurti vienodą oro srautą. Susiaurėji-

mas padidina vidutinį oro srauto greitį, todėl srautą tiesinančios grotelės ir ekranai montuojami mažo greičio zonoje – srauto stabilizavimo srityje, taip sumažinami slėgio nuostoliai. Susiaurėjimo kanale įmanoma išvengti srauto atsiskyrimo, kai šis kanalas labai pailginamas, bet gamybos kaina ir pasienio sluoksnio storis padidėja. Susiaurėjimo kameros didelis susitraukimo santykis yra palankus, bet tai reiškia didesnes pagaminimo išlaidas. Naudojamas nedideliuose aerodinaminiuose vamzdžiuose susiaurėjimo santykis yra tarp 6 ir 9. Prieškamerio skerspjūvio forma gali būti kvadrato, apskritimo ar aštuonkampio (Bell 1989: 372–374; Plėta 2010: 64).

PEK projektuojamo aerodinaminio vamzdžio prieškamerio skerspjūvio forma bus kvadratinė, nes paprasčiau pagaminti. Prieškamerio susitraukimo santykis 7,5:1 (t. y. skerspjūvio plotas srauto stabilizavimo srityje – 1,875 m^2). Šis santykis pasirenkamas, nes įrengimo išlaidos mažesnės ir pasiekiami mažesni slėgio nuostoliai, kai oro srautas teka per tiesinančias groteles ir ekranus. Susiaurėjimo kanalas nebus labai pailgintas, norint išvengti nepageidautino pasienio sluoksnio padidėjimo.

Srautą tiesinančios grotelės. Šių grotelių paskirtis – sumažinti oro srauto sūkurius t. y. iš turbulentinio tekėjimo pereiti į laminarinį. Grotelių būna įvairių formų: kvadratinių, trikampių, korio tipo. Kvadratinės ir trikampės tiesinančios grotelės parenkamos dėl gamybos paprastumo, bet dažniausiai pasitaikančios – korio formos. Atlikti tyrimai parodė, kad korio tipo grotelės veiksmingiausiai mažina oro srauto sūkurius, kai narvelių ilgis mažiausiai 6–8 kartus didesnis už jų skersmenį. Srautą tiesinančios grotelės gali būti gaminamos iš plastiko, aliuminio ir kt. Aliuminio grotelės yra tikslesnės ir naudojamos aukštos kokybės aerodinaminiams vamzdžiams ir ten kur tikimasi didelių oro srauto apkrovų (Bell 1989: 372–374).

Būsimame PEK vamzdyje srautą tiesinančios grotelės bus kvadratinio tipo, o narvelių ilgis bus 8 kartus didesnis už jų skersmenį (8,5 mm narvelio kraštinės ilgis, o narvelio ilgis 70 mm) . Šio tipo grotelės buvo pasirinktos todėl, kad jas pagaminti paprasčiau ir pigiau negu korio tipo.

Ekranai. Ekranai paprastai būna pagaminti iš metalinio tinklelio, kvadrato ar stačiakampio formos akių. Ekranai gali būti audžiami iš nailono, polisterolio siūlų ir kt. medžiagų, o kai apkrovos būna labai didelės gaminami iš plieno ar žalvario. Ekranų paskirtis yra išlyginti oro srautą (sumažinti turbulenciją) ir sumažinti pasienio sluoksnio storį. Ekranai dažniausiai montuojami išlyginimo kameroje. Montuojami du ekranai, vienas nuo kito nutolę mažiausiai 0,2 nusodinimo kameros skersmens. Šis atstumas reikalingas tam, kad nusistovėtų po pirmojo ekrano sutrikdytas srautas (Lindgren 2002: 47; Bell 1989: 372–374).

PEK vamzdyje numatomi du plieniniai kvadratinių akių ekranai, kurio akies matmenys yra 6 x 6 mm.

Difuzorius. Jis įrengtas iškart po darbinės kameros. Difuzoriaus pradžios skerspjūvis būna kaip ir darbinės kameros, o pabaigos – dažniausiai apvalus. Difuzoriaus platėjimo kampas dažniausiai neviršija 5º (pasiekiamas geriausias srauto išėjimo stabilumas, o geriausias slėgio panaudojimas pasiekiamas, kai difuzoriaus platėjimo kampas yra apie 10º), o ploto santykis išėjime ir įėjime – 2:5. Difuzoriuje srauto greitis krenta, o slėgis didėja – taip pasiekiami mažesni slėgio nuostoliai difuzoriuje ir garantuojamas mažesnis energijos suvartojimas (Bell 1989: 372–374).

Būsimojo PEK vamzdžio difuzoriaus įėjimo skerspjūvis bus kaip darbinės kameros, o išėjimo skerspjūvis pritaikomas prie ventiliatoriaus skerspjūvio apskritimo, kurio skersmuo – 0,9 m. Difuzoriaus platėjimo kampas 5º, šie difuzoriaus parametrai pasirinkti, nes pasiekiamas geriausias oro srauto stabilumas ir mažesnis energijos suvartojimas.

Apsauginis tinklas. Jis įrengtas prieš ventiliatorių. Jo paskirtis – apsaugoti ventiliatorių nuo bandomo modelio atsiskyrusių dalių nuo (Bell 1989: 372–374; Plėta 2010: 64).

Projektuojamame aerodinaminiame vamzdyje apsauginis tinklas pasirinktas plieninis, kad patikimai apsaugotų ventiliatorių nuo atsiskyrusių tiriamojo modelio dalių.

Ventiliatorius. Ventiliatoriaus tikslas – sukelti oro srautą darbinėje kameroje. Aerodinaminiuose vamzdžiuose naudojami ašiniai ir išcentriniai ventiliatoriai, bet atvirojo tipo aerodinaminiuose vamzdžiuose dažniausiai naudojamas ašinis ventiliatorius. Didelės galios ventiliatoriai turėtų būti montuojami su antivibracinėmis jungtimis, siekiant sumažinti vibracijas vėjo tunelyje (Bell 1989: 372–374; Tatman 26).

PEK aerodinaminiame vamzdyje srautą sukurs ašinis ventiliatorius.

Ventiliatoriaus srauto lygintuvai. Lygintuvai įrengiami iškart po ventiliatoriaus. Jų funkcija yra pašalinti sūkurius ir sumažinti triukšmo lygį, kuriuos sukelia ventiliatorius (Lindgren 2002: 47; Plėta 2010: 64).

Taigi iš rekomendacijų ir laboratorijos įrangos gamintojų pateikiamos produkcijos galime spręsti, kad gamintojai ne visų rekomendacijų laikosi, o yra tyrimais nustatę, kas yra jų gaminamo tipo aerodinaminiam vamzdžiui tinkamiausia. Visgi atvirojo tipo aerodinaminio vamzdžio didelis trūkumas yra jų keliamas triukšmas. Norint sumažinti PEK aerodinaminio vamzdžio triukšmą

tiek, kad patalpoje esantiems tyrėjams ir gretimose patalpose esantiems žmonėms netrukdytų keliamas triukšmas, prieš ir po ventiliatoriaus montuojami cilindriniai triukšmo slopintuvai, o ventiliatoriaus korpusas yra izoliuojamas triukšmą slopinančia medžiaga (1 pav).

Išvados

Rasta, kad gali būti įrengtas priimtinų matmenų, energijos poreikio, keliamo triukšmo lygio ir pakankamų aerodinaminių charakteristikų mokymo tikslams ir pradiniams moksliniams-praktiniams aerodinaminiams tyrimams aerodinaminis vamzdis.

Konstruojant aerodinaminį vamzdį, palyginti su žinomomis konstrukcijomis, atlikti patobulinimai, lengvinantys tyrėjų darbo sąlygas.

Padėkos

Dėkoju prof. dr. Egidijui Juodžiui už pagalbą rengiant straipsnį.

Literatūra

Educational wind tunnel [interaktyvus]. 2010. Aerolab [Žiūrėta 2011 m. sausio 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.aerolab.com/>.

C2 Subsonic wind tunnel [interaktyvus]. 2006. Armfield [Žiūrėta 2011 m. sausio 21 d.] Prieiga per internetą: <http://www.discoverarmfield.co.uk/data/c2/#orderspec>.

C15 Subsonic wind tunnel [interaktyvus]. 2006. Armfield [Žiūrėta 2011 sausio 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.discoverarmfield.co.uk/data/c15/>.

Bell, J. H.; Mehta, R. D. 1989. Boundary – Layer Predictions for Small Low – speed Contractions. Washington: L'enfant promenade. 372–374.

Flotek 1440 Subsonic wind tunnel [interaktyvus]. 2008. GDJ Inc [Žiūrėta 2011 m. sausio 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gdjinc.com/windtunnels/wind3.html>.

Hm-170 educational wind tunnel [interaktyvus]. 2005. G.u.n.t. [Žiūrėta 2011 m. sausio 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.gunt.de/static/s3399_1.php?p1=&p2=&pN=;;#>.

Lindgren, B. B.; Johansson, A. V. 2002. Design and evaluation of a low-speed wind-tunnel with expanding corners. Stockholm. 47 p.

Plėta, V. 2010. Bakalauro darbas: Mokomojo aerodinaminio vamzdžio projektas. 64 p.

WT.3000 Subsonic wind tunnel [interaktyvus]. Stirolab Material testing technology [Žiūrėta 2011 m. sausio 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.stirolab.com/en/subsonic-wind-tunnel.html>.

Tatmant, N. Wind Tunnel Design and Operation. 26 p.

Whirling Arms and the First Wind Tunnels. [interaktyvus].2009. National aeronautics and space administration [Žiūrėta 2011 m. sausio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/WindTunnel/history.html>.

Wind tunnel. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2011m. sausio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_tunnel>.

EDUCATIONAL WIND TUNNEL

J. Bielskus

Summary

In this article the educational wind-tube is analyzed. With its help laboratory works or simple scientific researches can be carried out. Importance of such wind-tube for students, Lithuania's economics and environment is discussed. Also, kinds of experiments, which can be done with educational wind-tube in Department of Building Energetics (PEK), are pointed out. A review of various laboratory equipment manufacturers – Aerolab, G.u.n.t, Armfield, Stirolab, GDJ Inc – educational laboratory wind-tubes and designing recommendations are made. According mentioned recommendations, the main parameters of PEK educational wind-tube were chosen. Additionally, noise silencers were designed before and after the fan.

EKONOMINIS VĖDINIMO SISTEMOS SU TRIŠAKIAIS SMAILIU IR STAČIU KAMPU PALYGINIMAS

Juozas Bielskus[1], Egidijus Saulius Juodis[2]
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
el. p. juozas.bielskus@vgtu.lt[1]; egidijus.juodis@vgtu.lt[2]

Anotacija. Straipsnyje palyginami energijos poreikiai ir išlaidos administracinio pastato vėdinimo tiekiamajam ir ištraukiamajam ortakynui, kai oro srautas atsišakoja/susilieja 90° ir 30° kampu. Įvertintas sistemos su trišakiais smailiu kampu atsiperkamumas per 30 metų, atsižvelgus į oro srauto tiekimui/šalinimui reikalingą ventiliatoriaus galią, elektros energijos ir trišakių kainas. Energetiškai efektyvesnė sistema yra su atsišakojimais 30° kampu. Lyginant ortakių tinklą pagal išlaidas jam įrengti ir eksploatuoti nustatyta, kad ekonomiškai efektyvesnė yra sistema su 90° atsišakojimais.

Reikšminiai žodžiai: vėdinimo sistema, ortakiai, trišakiai.

Įvadas

Vėdinimo sistema leidžia patalpose palaikyti higienines oro sąlygas, t. y. aplinką, kurioje žmogus gerai jaustųsi ir būtų darbingesnis. Tačiau vis didėjančios elektros energijos kainos verčia ieškoti energetiškai efektyvesnių vėdinimo sistemos konstrukcijų. Vienas iš galimų konstrukcinių sprendimų yra pakeisti oro srauto atsišakojimus trišakiuose stačiu kampu į sklandų atsišakojimą 30° kampu – tai sumažintų elektros energijos suvartojimą. Kai atsišakojimas yra sklandus, tada slėgio nuostoliai mažėja, o nuo jų priklauso ventiliatoriaus galia ir elektros energijos suvartojimas.

Šiame straipsnyje energetiškai ir ekonomiškai lyginama vėdinimo sistema (tiekiamoji ir ištraukiamoji), kai oro srautas atsiskiria/susilieja 90° ir 30° kampu. Taip pat bandoma lyginti, kai tiekiamosios sistemos oro srautas atsiskiria 90°, o ištraukiamosios sistemos oro srautas susilieja 30° kampu ir atvirkščiai.

Vertinimo metodika ir prielaidos

Metodika

Aerodinaminiams nuostoliams skaičiuoti pasirinktas pilnutinio slėgio metodas Ši metodika yra universali, be to, galima gauti įvairius efektyvumo rezultatus, priklausomai nuo to, kokius greičius pasirinko konstruktorius. Pilnutinio slėgio nuostoliai išreiškiami (1) formule:

$$p = \sum_{1}^{n} \left(R \cdot l + Z \right), Pa \qquad (1)$$

čia: R – trinties slėgio nuostoliai, Pa/m;

l – ortakio ilgis, m;

Z – slėgio nuostoliai vietinėse kliūtyse, Pa.

Slėgio nuostoliai vietinėse kliūtyse apskaičiuojami pagal (2) formulę:

$$Z = \sum \xi \cdot p_{din}, Pa \qquad (2)$$

čia: $\sum \xi$ – skaičiuojamojo ruožo vietinių kliūčių pasipriešinimo koeficientų suma;

p_{din} – dinaminis slėgis nagrinėjamame ruože, Pa.

Naudojantis Juodžio (2009) vadovėliu nustatomi slėgio nuostolių koeficientai vietinėse kliūtyse (alkūnėse, susiaurėjimuose, išplatėjimuose) o trinties nuostoliai spiraliniuose ortakiuose trišakių su atsišakojimais 90º ir 30º kampu pasipriešinimo koeficientai imami iš vadovo „*CIBSE Guide C*“) (The Chartered Institution of Building Services Engineers).

Vėdinimo sistemai reikalinga ventiliatoriaus galia vertinama pagal tolimiausios atšakos su didžiausiais slėgio nuostoliais ir tiekiamo/šalinimo oro kiekį. Reikiamo oro kiekio tiekimui/ištraukimui reikalinga ventiliatoriaus galia skaičiuojama pagal (3) formulę:

$$P = \frac{p \cdot L}{\eta_{vent} \cdot \eta_{pavaros} \cdot \eta_{\text{var}}} \cdot 10^{-3}, kW \qquad (3)$$

čia: p – tiekiamosios/ištraukiamosios vėdinimo sistemos aerodinaminis pasipriešinimas, kPa;

L – tiekiamo/šalinamo oro srauto debitas, m^3/h;

η_{vent}, $\eta_{pavaros}$, η_{var} – ventiliatoriaus, pavaros ir variklio naudingumo koeficientai.

Prielaidos

Atliekant vertinimą yra priimamos šios prielaidos:

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2012

– Nagrinėjamas tik vėdinimo sistemos ortakynas iki vėdinimo agregato, nes visais nagrinėjamais atvejais tiekimo oro kiekis išlieka toks pats;
– vertinami slėgio nuostoliai dėl trinties ir vietinių kliūčių (alkūnėse, balniniuose trišakiuose, difuzoriuose, susiaurėjimuose ir išplatėjimuose).

Analizės objektas

Vertinimui pasirinkta tiekiamoji ir ištraukiamoji koridorinio išplanavimo administracinio pastato pastovaus srauto vėdinimo sistema su 90° ir 30° atsišakojimais. Vėdinimo sistema tiekia 3144 m^3/h ir šalina 3144 m^3/h oro kiekį. Tiekiamąją vėdinimo sistemą sudaro viena magistralė su dvidešimčia atšakų, o ištraukiamoji yra analogiška tiekiamajai.

Vertinama trišakių konstrukcija, kai atšaka yra jungiama per balnelį. Balnelio konstrukcija 90° ir 30° kampu pateikta toliau esančiame paveiksle (Komfovent 2011).



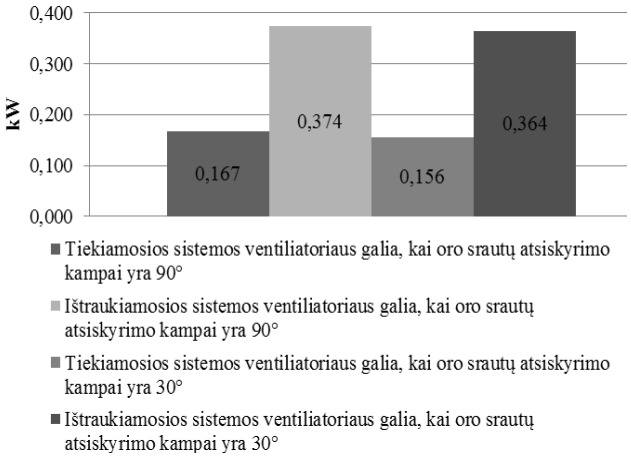
1 pav. Balnelio konstrukcija: kairėje 90°, dešinėje 30°.

Priimamos prielaidos:

– vėdinimo sistemos tarnavimo laikas priimamas 30 metų (EN 15459:2006);
– ekonominiame vertinime priimta diskonto norma yra lygi 8 %;
– ekonominiam vertinimui numatoma, kad vėdinimo sistema veiks 261 dieną per metus, 12 valandų per parą;
– ventiliatoriaus naudingumo koeficientas – 0,7, pavaros naudingumo koeficientas – 0,98 ,o variklio naudingumo koeficientas – 0,9;
– elektros energijos kaina – 37 ct/kWh be PVM, o jos metinis pabrangimas priimamas 1 %.

Rezultatai

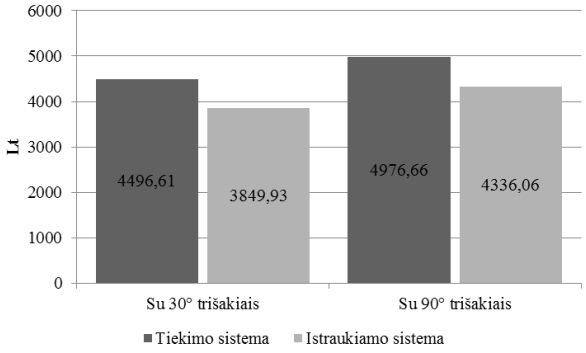
Toliau esančiame paveiksle (2 pav.) pateiktas grafikas, kuriame nurodomos tiekiamosios ir ištraukiamosios sistemų ventiliatorių galios orui transportuoti ortakiais, kai atsišakojimo kampai skirtingi.



2 pav. Tiekiamosios ir ištraukiamosios sistemų ventiliatorių galios

Iš 2 paveikslo matyti, kad tiekiamosios ir ištraukiamosios sistemos ventiliatorių galios yra mažesnės, kai atsišakojimai yra 30°. Tiekiamosios sistemos galia yra 7 % mažesnė, kai atsišakojimas yra 30° kampu palyginti su 90° kampo atsišakojimais, o ištraukiamosios sistemos galia yra 2,5 % mažesnė, kai atsišakojimas yra 30° palyginti su 90° kampu. Tokį nedidelį skirtumą lemia30° ir 90° kampu pasipriešinimo panašumas.

Vertinant ekonomiškai reikia rasti, kiek sistema su 30° atšakomis yra brangesnė už sistemą su 90°. Toliau pateiktame paveiksle yra pateiktos sistemų kainos nagrinėjamuoju atveju.

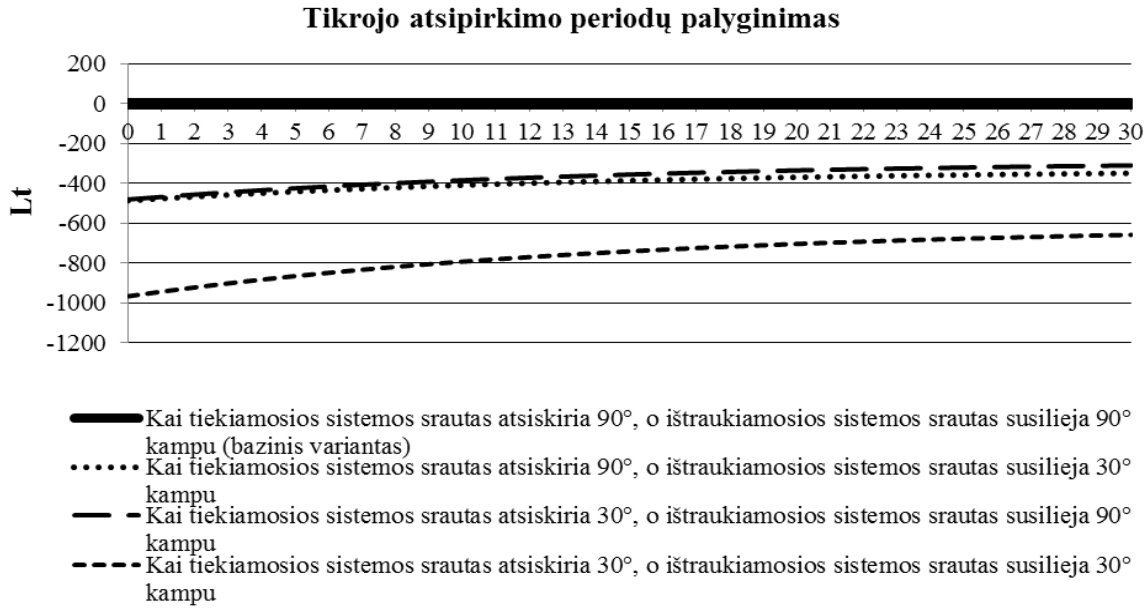


3 pav. Tiekiamosios ir ištraukiamosios sistemų ortakių kainos

3 paveiksle matyti, kad sistemos su 30° atsišakojimais yra brangesnės 11 %, negu įprastos sistemos su 90° atsišakojimais (elementų kainos vertinamos be pridėtinės vertės mokesčio (PVM)). Šiose kainose yra įvertinti visi elementai, kurie reikalingi patikimam sistemos veikimui, išskyrus sistemos montavimo darbų išlaidas.

Iš antrojo paveikslo matyti, kad sistema su sklandžiu (30° kampu) atsišakojimu yra brangesnė, todėl vertinama, ar šios brangesnės sistemos energijos sutaupymai gali padengti papildomas išlaidas įrengiant šią sistemą. Šis vertinimas atliekamas įvertinus, kad sistemos atsipirkimo laikas – 30 metų (EN 15459:2006). 3 paveiksle lyginama ištraukiamoji ir tiekiamoji vėdinimo sistema su 90° atsišakojimais (bazinis variantas) su tiekiamąja ir ištraukiamąją sistema, kurios atsišakojimai yra 30°.

Bazinis variantas taip pat lyginamas su mišria vėdinimo sistema, kai oro srautas atsiskiria 90° kampu, o susilieja 30° kampu ir atvirkščiai.



4 pav. Vėdinimo sistemos tikrojo atsipirkimo vertinimas

4 paveiksle ant abscisių ašies yra pateiktas vertinimo laikotarpis, o ant ordinačių ašies – sistemų kainų skirtumas. Iš šių kreivių matyti, kad nė vienas vertintas variantas nėra ekonomiškai atsiperkantis palyginanti su standartine vėdinimo sistema, kai srautas atsišakoja/susilieja 90° kampu. Neatsiperka todėl, kad investicijos yra didesnės už sutaupymus, įdiegus vėdinimo sistemą su 30° atšakomis. Mišrios sistemos (kai tiekiamosios sistemos srautas atsiskiria 90°, ištraukiamosios sistemos srautas susilieja 30° kampu ir atvirkščiai) investicijos taip pat yra didesnės už sutaupymus.

Rezultatų aptarimas

Slėgio nuostoliai trišakių atšakose stačiu kampu neabejotinai didesni už nuostolius oro srautams susiliejant ar išsiskiriant smailiu kampu. Todėl yra siūlymų vietoje konstrukciškai patogių ir pigesnių T pavidalo trišakių naudoti brangesnius trišakius smailiu kampu. Tikimasi, kad per sistemos gyvavimo ciklą išlaidų energijai sutaupymas kompensuos ir viršys padidintas išlaidas ortakiams, deja, atlikta analizė to nepatvirtina.

Analizuojant abu trišakių variantus priimtas palankus išlaidų energijai atsipirkimo variantas, kai vėdinimo sistema veikia kiekvieną darbo dieną po 12 valandų per parą. Energijos poreikis sumažėja nežymiai. Realiai tikėtina, kad darbo trukmė bus dar trumpesnė, pavyzdžiui, šiltuoju metų laiku, kai lauko oro temperatūra palanki, galima panaudoti natūralų vėdinimą.

Pagrindinė priežastis, kodėl trišakių smailiu kampu atsiperkamumas nagrinėjamuoju atveju nepasitvirtino yra ta, kad slėgio nuostolius ortakyne lemia ne nuostoliai atšakose, o paskirstomajame ortakyje, t. y. nuostoliai paskirstomajame ortakyje nuo vėdinimo įrenginio iki tolimiausio oro sklaidymo ar ištraukimo antgalio.

Išvados

1. Suprojektavus tiekiamąją ir ištraukiamąją administracinio pastato vėdinimo sistemą pastebėta, kad ventiliatoriui reikalinga 7 % mažesnė galia srautui atsiskiriant ir 2,5 % mažesnė srautui susiliejant, kai atsišakojimo kampai yra 30°, palyginti su T pavidalo trišakiais.

2. Atlikus ekonominį vertinimą iš gautų rezultatų matyti, kad sistema su atsišakojimais 30° kampu ekono-

miškai nėra efektyvi. Investicijos į šią sistemą yra didesnės negu elektros energijos sutaupymai.

Literatūra

EN 15459:2006 „Energy Efficiency for Buildings – Standard economic evaluation procedure for energy systems in buildings“

The Chartered Institution of Building Services Engineers. 2007. Guide C. Great Britain: Page Bros. 228 p. ISBN 978-1-903287-80-4

Juodis, E. 2009. *Vėdinimas*. Vilnius: Technika. 397 p. ISBN 978-9955-28-370-6.

Komfovent. 2011. Kainynas [žiūrėta 2012 m. vasario 12 d.]. Prieiga per internetą:
<http://www.komfovent.com/files/resources/kainynas/Kainynas_2011.pdf>

Lesto. Elektros energijos kaina [žiūrėta 2012 m. vasario 12 d.]. Prieiga per internetą: < http://www.lrprezidentas.lt/node/320>.

Lietuvos bankų asociacija. Dėl diskonto normos [žiūrėta 2012 m. vasario 12 d.]. Prieiga per internetą:
<http://www.regula.lt/lt/naujienos/2012/2012-01-24/Lietuvos_banku_asociacijos_atsakymas_del_diskonto_normos.pdf>.

Systemair. 2011. Kainynas [žiūrėta 2012 m. vasario 12 d.]. Prieiga per internetą:
< http://www.systemair.com/lt/informacija/cc5ce14f-4c0d-4367-b2d6-a2bd699e78b0>

ECONOMICAL COMPARISON OF VENTILIATION SYSTEMS WITH SHARP AND RIGHT ANGLE BRANCH TEES

Juozas Bielskus, Egidijus Saulius Juodis

Summary

The energy demand and costs for air supply and exhaust ductwork of administration building ventilation system, when the air flow branches off/ combines in 90° and 30° angle are compared in this article. The payback time of the system with an acute angle tees in 30 years, taking into account the power of fans for supplying and exhausting air flow, also market prices of tees and electricity is evaluated. It was found that the system with 30° angled branch is more energy efficient than 90° angled branch. Comparing the costs of duct networks for its installation and operation was found that the system with 90° branch is more cost effective.