



Kauno technologijos universitetas
Statybos ir architektūros fakultetas

Vėjo poveikio įtakos tyrimai plieniniams kaminams
Baigiamasis magistro projektas

Paulius Šukys
Projekto autorius

Lekt. Dr. Nerijus Adamukaitis
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Vėjo poveikio įtakos tyrimai plieniniams kaminams

Baigiamasis bakalauro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Paulius Šukys
Projekto autorius

Lekt. Dr. Nerijus Adamukaitis
Vadovas

Lekt. Dr. Nerijus Meslinas
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Paulius Šukys

Vėjo poveikio įtakos tyrimai plieniniams kaminams

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Pauliaus Šukio, baigiamasis projektas tema „Vėjo poveikio įtakos tyrimai plieniniams kaminams“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Šukys Paulius. Vėjo poveikio įtakos tyrimai plieniniams kaminams. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. Nerijus Adamukaitis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerija, statybos inžinerija (05).

Reikšminiai žodžiai: plieniniai kaminai, vėjas, sūkurinis srautas, poveikiai.

Kaunas, 2020. 86 p.

Santrauka

Didėjanti globalizacija ir miestų urbanizacija daro įtaką savilaikių plieninių kaminų projektavimui. Užtikrinti augančios pramonės ir visuomenės kaminų poreikį tampa sudėtingu uždaviniu projektuotojams dėl griežtėjančių energetinių ir aplinkosauginių reikalavimų. Plieniniai kaminai dažniausiai projektuojami kaip aukšti, liauni ir apvalaus skerspjūvio statiniai, kurie yra ypač jautrūs išoriniams vėjo poveikiams. Šiuo metu mūsų itin kompetentingame pasaulyje tapo svarbu sukurti efektyvią ir ekonomiškai naudingą plieninio kamino konstrukcinę schemą.

Šio baigiamojo magistro projekto tikslas – išanalizuoti vėjo poveikių įtaką savilaikiams plieniniams kaminams ir nustatyti sprendinius renkantis konstrukcinę schemą.

Atlikus mokslinės ir praktinės literatūros analizę buvo nustatyta, kad plieniniams kaminams vėjas daro žymiai didesnę žalą negu mūriniams arba gelžbetoniniams kaminams. Kaminų konstrukcijos yra nuolat veikiamos kintančių vėjo poveikių, kuriuos sudaro tariamai statiniai ir dinaminiai poveikiai. Dėl šių kintančių veiksnių kamino konstrukcijos patiria poslinkius ir virpesius. Vėjo inžinerijoje nustatyta, kad vėjo poveikiai priklauso nuo kelių veiksnių – vėjo greičio ir vėjo poveikių krypčių. Poveikių kryptys gali būti vėjo kryptimi (aerodinaminiai poveikiai) ir statmena vėjui kryptimi (sūkurinio srauto poveikiai).

Vėjo poveikių įtakos tyrimui buvo pasirinktos 4-ios konstrukcinės schemos – skirtingo aukščio, su skirtingu dūmtraukių skaičiumi ir su sraigtinėmis juostelėmis arba be jų. Pagal darniuosius Europos standartus konstrukcinėms schemoms skaičiuojamas vėjo greitis ir greičio slėgis bei aerodinaminiai ir sūkurinio srauto poveikiai. Analizuojami aerodinaminių poveikių skaičiavimų modeliai per radialines slėgio ir per vienietinio ilgio jėgas. Taip pat analizuojamos sūkurinio srauto poveikių skaičiavimo metodikos pagal harmoninę ir spektrinę metodus. Pagal gautus skaičiavimų rezultatus visoms konstrukcinėms schemoms braižomi poveikių pasiskirstymai skirtinguose skerspjūvių paviršiuose. Atliekama skerspjūvių paviršių analizė ir palyginami tarp konstrukcinių schemų gauti rezultatai.

Apskaičiuoti vėjo poveikiai įvertinami konstrukcijų analizės programine įranga „Scia Engineer 19.0“. Pagal konstrukcines schemas buvo sukurti 4 dvimačiai kevalo modeliai. Jiems priskiriamos dinaminės konstrukcijų charakteristikos, sukuriama nuolatiniai ir kintantys apkrovų atvejai bei pritaikyti apskaičiuoti aerodinaminiai ir sūkurinio srauto poveikiai. Atliekama dvimačių kevalo modelių geometriškai netiesinė tamprioji analizė. Pagal gautus rezultatus analizuojami 1–asis laisvųjų virpesių pagrindinis dažnis, tinkamumo ir saugos ribiniai būviai.

Atlikus analizę nustatyta, kad aerodinaminiai ir sūkurinio srauto poveikiai tarp konstrukcinių schemų stipriai skiriasi. Plieniniai kaminai, kai neatsižvelgiama į sūkurinio srauto poveikius, įprastai patiria didesnius poslinkius ir įtempius. Imdamiesi sūkurinio slopinimo priemonių, tai yra sraigtnių juostelių, galime iki 50 % padidinti įlinkius dėl aerodinaminių poveikių, tačiau iki 94 % sumažinti virpesių amplitudes dėl sūkurinio srauto poveikių. Tai pat iki 80 % sumažinti įtempius esant plastiškumo sąlygoms ir iki 73 % esant ciklinio plastiškumo sąlygoms.

Šukys Paulius. Investigation of the Influence of Wind on Steel Chimneys. Master's Final Degree Project / supervisor lecturer, Nerijus Adamukaitis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering, Civil Engineering.

Keywords: steel chimneys, wind, vortex shedding, effects.

Kaunas, 2020. 86.

Summary

Increasing globalization and urbanization of cities are affecting the design of self-supporting steel chimneys. Meeting the demand of a growing industrial and societal chimney is becoming a difficult task for designers due to increasing energy and environmental demands. Steel chimneys are usually designed as tall, slender and round sections that are particularly sensitive to external wind effects. Nowadays, in our highly competent world, it has become important to design an efficient and cost-effective structural design of a steel chimney.

The aim of this final master's project is to analyze the influence of wind effects on self-supporting steel chimneys and to identify solutions for structural design.

The analysis of scientific and practical literature has shown that the steel chimneys are much more damaged by the wind than the brick or reinforced concrete chimneys. Chimney structures are constantly exposed to changing wind effects, which consist of supposedly static and dynamic effects. Due to these changing factors, the chimney structures experience displacements and vibrations. Wind engineering has found that wind effects depend on several factors - wind speed and wind direction. The directions of action may be in the wind direction (aerodynamic effects) and perpendicular to the wind direction (eddy flow effects).

For the study of the influence of wind effects 4 structural schemes were chosen - different height, with different number of chimneys and with or without screws. Wind velocity and velocity pressure as well as aerodynamic and eddy influences are calculated according to European Harmonized Standards. Models of calculations of aerodynamic effects through radial pressure and unit length forces are analyzed. Methods of calculating eddy current effects by harmonic and spectral methods are also analyzed. Based on the results of calculations, the effect distributions on different cross-sectional surfaces are plotted for all structural schemes. Cross-sectional surface analysis is performed and results obtained between structural schemes are compared.

Estimated wind effects are estimated using structural analysis software Scia Engineer 19.0. According to the design schemes, 4 two-dimensional shell models were created. They include the dynamic characteristics of the structures, create continuous and variable load cases, and apply the calculated aerodynamic and eddy flow effects. Geometric nonlinear elastic analysis of two-dimensional shell models is performed. Based on the obtained results, the 1st basic frequency of the oscillation, the limit states of suitability and safety are analyzed.

The analysis showed that aerodynamic and eddy flow effects differ significantly between structural schemes. Steel chimneys typically experience higher displacements and stresses when ignoring the effects of vortex flow. By taking vortex damping measures, that is, helical bands, we can increase the deflections due to aerodynamic effects by up to 50%, but reduce the amplitudes of vibrations by up to 94% due to the effects of the vortex flow. Also reduce stress by up to 80% under plasticity conditions and up to 73% under cyclic plasticity conditions.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Vėjo poveikių plieniniams kaminams apžvalga.....	12
1.1. Vėjas ir jo greitis	15
1.2. Aerodinaminiai poveikiai	17
1.3. Sūkurinio srauto poveikiai.....	20
2. Vėjo poveikių įtakos kaminų konstrukcinėms schemoms vertinimas	25
2.1. Vėjo greitis ir greičio slėgio skaičiavimas pagal Eurokodą 1991-1-4.....	29
2.2. Aerodinaminių poveikių skaičiavimas pagal Eurokodą 1991-1-4	31
2.2.1. Išorinių slėgio koeficientų skaičiavimas	33
2.2.2. Konstrukcinių koeficientų skaičiavimas.....	36
2.2.3. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių skaičiavimas.....	40
2.3. Sūkurinio srauto poveikių skaičiavimas pagal Eurokodą 1991-1-4.....	48
2.3.1. Pagrindinių parametrų skaičiavimas.....	51
2.3.2. Statmenai vėjo krypties amplitudės skaičiavimas pagal harmoninį metodą.....	53
2.3.3. Statmenai vėjo krypties amplitudės skaičiavimas pagal spektrinį metodą	57
2.3.4. Ekvivalentinių sūkurinio srauto poveikių skaičiavimas	59
3. Kaminų konstrukcinių schemų analizė ir jų rezultatai	66
3.1. Dinaminių charakteristikų analizė	68
3.2. Tinkamumo ribinių būvių analizė	70
3.3. Saugos ribinių būvių analizė	73
3.3.1. Plastiškumo ribinis būvis.....	73
3.3.2. Ciklinio plastiškumo ribinis būvis.....	75
Išvados	77
Literatūros sąrašas	78
Priedai.....	80
1 priedas. Dinaminių charakteristikų skaičiavimas pagal Eurokodą 1991-1-4	80
2 priedas. Dvimačių kevalo modelių nustatytos įtempių komponentės	84

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Vėjo greičio pagrindinės atskaitinės reikšmės pagal apkrovus rajonus.....	16
2 lentelė. Plieninių kaminų 4 konstrukcinių schemų pagrindiniai duomenys	25
3 lentelė. Plieninių kaminų 2 konstrukcinių schemų sraigčių juostelių pagrindiniai duomenys	27
4 lentelė. Vidutinio vėjo greičio v_{mz} aukštyje z apskaičiuotos reikšmės	29
5 lentelė. Šiurkštumo koeficiento crz aukštyje z apskaičiuotos reikšmės	30
6 lentelė. Turbulencijos intensyvumo $lv(z)$ aukštyje z apskaičiuotos reikšmės	30
7 lentelė. Viršūninio greičio slėgio $qp(z)$ aukštyje z apskaičiuotos reikšmės.....	31
8 lentelė. Reinoldso skaičiaus Re aukštyje ze apskaičiuotos reikšmės.....	33
9 lentelė. Viršūninio vėjo greičio $v(ze)$ aukštyje ze apskaičiuotos reikšmės	33
10 lentelė. Išorinio slėgio koeficientų cpe , kai kampas a , apskaičiuotos reikšmės.....	34
11 lentelė. Išorinio slėgio koeficientų cp , 0 be galinių efektų, kai kampas a , nustatytos reikšmės..	35
12 lentelė. Galinio efekto koeficientų $\Psi\lambda a$ nustatytos reikšmės.....	35
13 lentelė. Galinio efekto koeficientų $\Psi\lambda$ nustatytos reikšmės.....	36
14 lentelė. Turbulencinio ilgio $L(z)$ aukštyje zs apskaičiuotos reikšmės.....	37
15 lentelė. Bedimensinės galios spektro tankio funkcijos $SL(z, n)$ nustatytos reikšmės.....	37
16 lentelė. Bedimensinio dažnio $fL(z, n)$ nustatytos reikšmės.....	37
17 lentelė. Kvazistatinės reakcijos koeficientų $B2$ apskaičiuotos reikšmės.....	38
18 lentelė. Viršūninių koeficientų kp nustatytos reikšmės	38
19 lentelė. Kylančios sankirtos dažnio v nustatytos reikšmės	38
20 lentelė. Rezonansinės reakcijos koeficientų $R2$ nustatytos reikšmės.....	39
21 lentelė. Aerodinaminio laidumo (perdavimo) funkcijų Rh ir Rb nustatytos reikšmės.....	39
22 lentelė. Kintamųjų ηh ir ηb apskaičiuotos reikšmės	39
23 lentelė. Konstrukcinių koeficientų $cscd$ apskaičiuotos reikšmės.....	40
24 lentelė. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių Fw, e apskaičiuotos reikšmės I konstrukcinei schemai	41
25 lentelė. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių Fw, e apskaičiuotos reikšmės II konstrukcinei schemai.....	42
26 lentelė. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių Fw, e apskaičiuotos reikšmės III konstrukcinei schemai	44
27 lentelė. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių Fw, e apskaičiuotos reikšmės IV konstrukcinei schemai	46
28 lentelė. Pramoninių kaminų išmatuotos ir nustatytos didžiausios virpesių amplitudžių reikšmės.....	49
29 lentelė. Kritinio vėjo greičio $vcrit, i$ apskaičiuotos reikšmės	51
30 lentelė. Kritinio vėjo greičio $vcrit, o$ apskaičiuotos reikšmės	51
31 lentelė. Lenkiamųjų ir ovalėjimų virpesių i režimo apskaičiuotos reikšmės, tenkinančios 2.34 sąlygą.....	52
32 lentelė. Skrutono skaičiaus Sc apskaičiuotos reikšmės	52
33 lentelė. Reinoldso skaičiaus Re apskaičiuotos reikšmės	53
34 lentelė. Didžiausių poslinkių yF, max apskaičiuotos reikšmės	53
35 lentelė. Aerodinaminio sužadavimo koeficiento $clat$ nustatytos reikšmės	54
36 lentelė. Koeficiento $clat$ perskaičiuotos reikšmės	54
37 lentelė. Aerodinaminio sužadavimo koeficiento $clat$ patikslintos reikšmės	55

38 lentelė. Koreliacijos ilgio L_j nustatytos ir patikslintos reikšmės.....	56
39 lentelė. Koreliacijos ilgio koeficientų K_w apskaičiuotos reikšmės.....	56
40 lentelė. Virpesių režimo koeficientų K apskaičiuotos reikšmės.....	57
41 lentelė. Didžiausių poslinkių $y_{F, max}$ apskaičiuotos reikšmės	57
42 lentelė. Standartinių poslinkių nuokrypių σ_y apskaičiuotos reikšmės	58
43 lentelė. Konstantų c_1 ir c_2 apskaičiuotos reikšmės.....	58
44 lentelė. Konstantų C_c , K_a ir aL_2 nustatytos reikšmės	58
45 lentelė. Viršūninio koeficiento k_p apskaičiuotos reikšmės	59
46 lentelė. Harmoninio ir spektrinio metodų didžiausių poslinkių $y_{F, max}$ apskaičiuotos reikšmės	59
47 lentelė. Ekvivalentinių sūkurinio srauto poveikių F_{ws} apskaičiuotos reikšmės I konstrukcinei schemai	60
48 lentelė. Ekvivalentinių sūkurinio srauto poveikių F_{ws} apskaičiuotos reikšmės II konstrukcinei schemai.....	61
49 lentelė. Ekvivalentinių sūkurinio srauto poveikių F_{ws} apskaičiuotos reikšmės III konstrukcinei schemai	62
50 lentelė. Ekvivalentiniai sūkurinio srauto poveikių F_{ws} apskaičiuotos reikšmės IV konstrukcinei schemai	63
51 lentelė. Konstrukcinių schemų dvimačių kevalo modelių pagrindiniai duomenys	66
52 lentelė. Masių ir apkrovų kombinacijos bei dalinių koeficientų γ nustatytos reikšmės.....	67
53 lentelė. Didžiausių įlinkių δ_{max} apskaičiuotos reikšmės.....	70
54 lentelė. Didžiausių virpesių amplitudžių ribų nustatytos reikšmės	70

Paveikslų sąrašas

1 pav. Plieninis kaminas šalia mūrinio kamino	12
2 pav. Plieninis kaminas šalia gelžbetoninio kamino	12
3 pav. Savilaikių kaminų žalų proporcija pagal kaminų medžiagą	13
4 pav. Reakcijos: vėjo kryptimi fD , statmena vėjui kryptimi fL ir sukimo momento m	14
5 pav. Vidutinis vėjo greitis ir atmosferos turbulencija.....	15
6 pav. Lietuvos apkrovų rajonai	16
7 pav. Vidutinio vėjo greičio profiliai pagal skirtingus žemės paviršius	17
8 pav. Konstrukcijos aerodinaminiai poveikiai oro sraute $P - P_0$	17
9 pav. Oro srauto ribiniai sluoksniai: a) laminarinis ir b) turbulentinis	17
10 pav. Oro srauto laminarinis pereinantis į turbulentinį ribinis sluoksnis	18
11 pav. Lygaus apvalaus skerspjūvio esančio oro sraute atvejai pagal Reinoldso skaičių Re	19
12 pav. Išorinio slėgio p_e pasiskirstymas kamino skerspjūvio paviršiuose.....	20
13 pav. Sūkurinio srauto reiškinys	20
14 pav. Kritinės padėtys, kuriose sukiamas sūkurinio srauto rezonansas	21
15 pav. Strouhalo taisyklė Skrutono skaičiams kai skaičiai a) dideli ir b) maži	22
16 pav. Statmena vėjui kryptimi reakciją į sūkurinį srautą	23
17 pav. Virpesių reakcijų režimai: a) priverstiniai, b) sužadunami ir c) mišrus	23
18 pav. Spektrinio ir harmoninio metodų rezultatų palyginimas.	24
19 pav. Plieninių kaminų konstrukcinės schemas	26
20 pav. Sraigtnių juostelių geometrija, $ns = 3$; $hs = 4,5b - 5b$; $t = 0,10b - 0,12b$	27
21 pav. Dūmų srauto vizualizacija skirtinguose matymo planuose palei a) apvalų ir b) su sraigtnėmis juostelėmis apvalų skerspjūvio cilindrą.	28
22 pav. Aerodinaminiai poveikių modeliai: a) per radialinius slėgio jėgas ir b) per vienetinio ilgio jėgas.....	31
23 pav. Vienmačio sijos ir dvimačio kevalo modelio meridianinių membraninių įtempčių pasiskirstymas pagal kampą φ° , kai kraštinių santykis $z = 0,00$	32
24 pav. Vienmačio sijos ir dvimačio kevalo modelio meridianinių membraninių įtempčių pasiskirstymas pagal aukštį z/h	32
25 pav. Apvaliųjų cilindrų be galinių efektų slėgio pasiskirstymai esant skirtingiems Reinoldso skaičiams	34
26 pav. I konstrukcinės schemas aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose.....	42
27 pav. II konstrukcinės schemas aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose.....	43
28 pav. III konstrukcinės schemas aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose.....	45
29 pav. IV konstrukcinės schemas aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose.....	47
30 pav. Sūkurinio srauto sukiamos kintančios jėgos	48
31 pav. Numatomos ir realybėje išmatuotos virpesių amplitudės esant skirtingiems Skrutono skaičiams	49
32 pav. Apvaliųjų cilindrų aerodinaminio sužadinimo koeficiento cl_{at} pagrindinių reikšmių priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus Re_{vcrit}, i	54
33 pav. Koreliacijos ilgio L_j padėties nustatymo pavyzdžiai.....	55

34 pav. I konstrukcinės schemos sūkurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose	60
35 pav. II konstrukcinės schemos sūkurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose	62
36 pav. III konstrukcinės schemos sūkurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose	63
37 pav. IV konstrukcinės schemos sūkurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose	64
38 pav. Konstrukcinių schemų dvimačiai kevalo modeliai ir jų suskaidymas į baigtinius elementus	67
39 pav. Konstrukcinių schemų 1-ieji laisvųjų virpesių (pagrindiniai) dažniai.....	68
40 pav. I ir II dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti 4 laisvųjų virpesių režimai ir jų dažniai MK1	69
41 pav. III ir IV dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti 4 laisvųjų virpesių režimai ir jų dažniai MK1	69
42 pav. Konstrukcinių schemų didžiausi įlinkiai dėl aerodinaminių poveikių	71
43 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti įlinkiai dėl aerodinaminių poveikių AK1	71
44 pav. Konstrukcinių schemų didžiausios amplitudės dėl sūkurinio srauto poveikių.....	72
45 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatytos amplitudės dėl sūkurinio srauto poveikių AK2	72
46 pav. Konstrukcinių schemų didžiausi ekvivalentiniai Von Miseso įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių.....	74
47 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti ekvivalentiniai Von Miseso įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6.....	74
48 pav. Konstrukcinių schemų didžiausi ekvivalentiniai Von Miseso įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių.....	76
49 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatytos didžiausios įtempių komponentų reikšmės dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6 vidiniuose $i = 1$ ir išoriniuose $i = 2$ paviršiuose..	76

Įvadas

Didėjanti globalizacija ir miestų urbanizacija daro įtaką savilaikių plieninių kaminų projektavimui. Užtikrinti augančios pramonės ir visuomenės poreikį tampa sudėtingu uždaviniu projektuotojams dėl griežtėjančių energetinių ir aplinkosauginių reikalavimų. Šiuo metu mūsų itin kompetentingame pasaulyje tapo svarbu sukurti efektyvią ir ekonomiškai naudingą plieninio kamino konstrukcinę sistemą [1]. Tinkamas analitinis ir optimalus projektavimo sprendimų priėmimas lemia plieninio kamino konstrukcinės shemos pasirinkimą.

Plieniniai kaminai yra labai svarbios konstrukcijos, leidžiančios kenksmingas dujas išmesti į didesnę aukštį, kad kuo mažiau terštų aplinkos orą. Juos dažnai naudoja energetikos, gamybinės ir žemės ūkio įmonės, jie idealiai tinka, kai reikalingas trumpas įkaitinimo laikotarpis ir maža šiluminė talpa [2]. Plieniniai kaminai paprastai pasirenkami atsižvelgiant į pagaminimui reikalingas laiko ir finansinių išteklių sąnaudas, konstrukcijos stiprumą ir eksploataciją. Jie dažnai yra veikiami įvairių apkrovų vertikalia ir horizontalia kryptimis. Tai yra veikiami vėjo, temperatūros ir žemės drebėjimo apkrovomis. Plieniniai kaminai dažniausiai projektuojami kaip aukšti, liauni ir apvalaus skerspjūvio statiniai, kurie yra ypač jautrūs išoriniams vėjo poveikiams [1].

Magistro baigiamojo projekto tikslas – išanalizuoti vėjo poveikių įtaką savilaikiams plieniniams kaminams ir nustatyti sprendinius renkantis konstrukcinę schemą.

Magistro baigiamojo projekto uždaviniai:

- atlikti mokslinės ir praktinės literatūros, susijusios su plieniniais kaminiais, analizę;
- nustatyti galimus vėjo poveikius plieniniams kaminams;
- pasirinkti kelias skirtingas plieninių kaminų konstrukcines schemas ir joms apskaičiuoti nustatytus vėjo poveikius;
- konstrukcijų analizės programine įranga pagal pasirinktas konstrukcines schemas sukurti dvimačius kevalo modelius bei pritaikyti jiems apskaičiuotus vėjo poveikius ir atlikti modelių analizę;
- analizuoti dvimačiuose kevalo modeliuose gautus rezultatus ir patikrinti pagal tinkamumo ir saugos ribinių būvių sąlygas.

1. Vėjo poveikių plieniniams kaminams apžvalga

Mūsų kompetentingame pasaulyje tapo itin svarbu sukurti efektyvią ir ekonomiškai naudingą kamino konstrukcinę schemą [1]. Visos pasirenkamos kaminų konstrukcinės schemos turi tiek privalumų, tiek ir minusų. Seni standartiniai mūriniai kaminai (žr. 1 pav.) tampa vis rečiau eksploatuojami dėl įvairių priežasčių. Mūriniams kaminams didelę įtaką daro agresyvūs aplinkos veiksniai, tokie kaip korozija, aplinkos oro temperatūra ir deginamo kuro išmetamos dujos [3]. Išlaikyti mūrinių kaminų eksploataciją yra finansiškai nenaudingas sprendimas, reikia iš pagrindų remontuoti tiek vidinę, tiek išorinę mūro konstrukciją.

Pačios populiariosios pasirenkamos kaminų konstrukcinės schemos yra plieninių ir gelžbetoninių kaminų (žr. 2 pav.). Plieniniai kaminai iki 45 m aukščio yra ekonomiškesni [2] lyginant su gelžbetoniniais kaminiais (žr. 2 pav.). Jų konstrukcijų kokybė visada griežtai kontroliuojama, nes juos gaminant laikomasi tinkamų dydžių ir proporcijų. Statinių skaičiavimuose klaidų skaičius yra labai mažas, nes plienas yra vienalytė ir izotropinė medžiaga. Betonas nėra toks vienalytis ir izotropinis kaip plienas, statiniai skaičiavimai priklauso nuo priimamų sprendimų ir klaidų skaičiaus statybų metu [4]. Plieninių kaminų skerspjūviai yra ganėtinai maži, nes kamino konstrukcijai naudojami valcuoti plieniniai lakštai. Gelžbetoninių kaminų skerspjūviai yra ganėtinai dideli, iš gelžbetoninių segmentų, nes reikia užtikrinti minimalias ribines projektavimo sąlygas. Plieniniai kaminai montuojami greitai ir bet kokiomis oro sąlygomis, o tai leidžia sumažinti darbo sąnaudas. Gelžbetoninių kaminų statyba užtrunka, nes atsižvelgiama į oro sąlygas, betono kokybę ir statybos procesą, o tai padidina išlaidas [4].



1 pav. Plieninis kaminas šalia mūrinio kamino

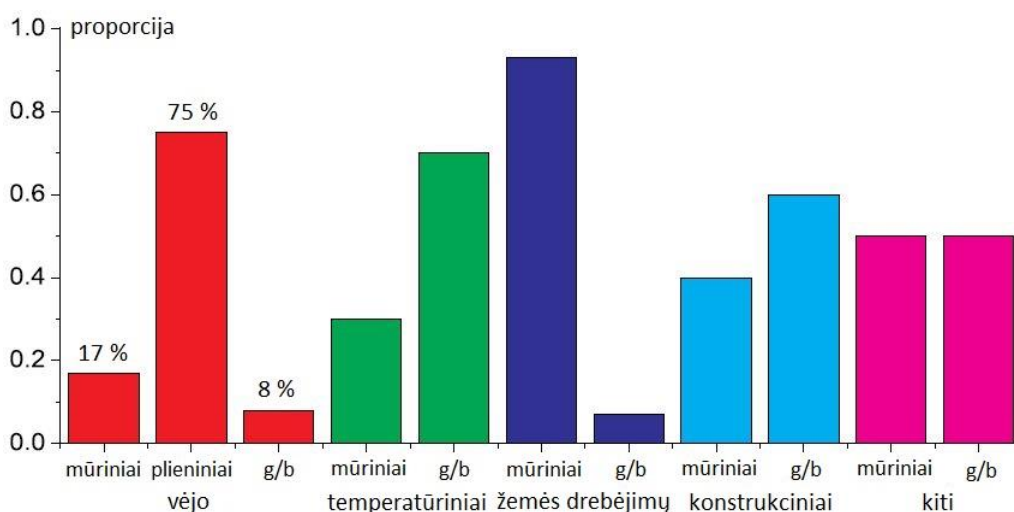


2 pav. Plieninis kaminas šalia gelžbetoninio kamino

Plieniniai kaminai paprastai pasirenkami atsižvelgiant į pagaminimui reikalingas laiko ir finansinių išteklių sąnaudas, konstrukcijos stiprumą ir eksploataciją. Juos dažnai naudoja energetikos,

gamybinės ir žemės ūkio įmonės, jie idealiai tinka, kai reikalingas trumpas įkaitinimo laikotarpis ir maža šiluminė talpa [2]. Plieniniai kaminai dažniausiai apibūdinami kaip aukštos ir liaunos konstrukcijos, sudarytos iš apvalių vientisų ištisinių ar atskirų skerspjuvių su flanšinėmis jungtimis, aerodinaminiais slopinimo įtaisais arba be jų.

Plieniniai kaminai dažnai yra veikiami įvairių apkrovų vertikalia ir horizontalia kryptimis. Tai vėjo, temperatūros ir žemės drebėjimo apkrovos. Projektuojami kaip aukšti ir liauni statiniai jie yra ypač jautrūs išoriniams vėjo poveikiams [1]. Mokslininkų Lei Vang ir kt. buvo atlikta aukštų kaminų žalų analizė [5], kurioje nagrinėjami 739 kaminai, iš kurių 531 yra mūriniai, 24 plieniniai ir 184 gelžbetoniniai. Pagal žalos situaciją ir realius atvejus yra išskiriamos penkios poveikių kaminams priežastys: vėjo; temperatūros; žemės drebėjimų; konstrukcinių defektų ir kiti poveikiai. 3 paveiksle pateikiama mūrinių, plieninių ir gelžbetoninių kaminų žalos priežasčių proporcija. Galime pastebėti, kad plieniniams kaminams didžiausią žalą daro vėjo poveikiai, kurie sudaro net 75 % visų vėjo poveikių, lyginant su mūriniais (~17 %) ir gelžbetoniniais (8 %) kaminais. Tokią reikšmingą vėjo sukeltą žalą lemia didelis plieninių kaminų konstrukcijos aukštis, mažas svoris bei silpnas pasipriešinimas vėjo sukeliams poveikiams [5]. Taip pat 3 paveiksle galime pastebėti, kad plieniniams kaminams nėra priskiriami kiti poveikiai, nes jie tesudaro mažiau nei 1 % galimų poveikių. Tai paaiškina, kad plieniniai kaminai yra ganėtinai atsparūs temperatūros poveikiams, žemės drebėjimams, konstrukciniams defektams ir kitiems poveikiams.



3 pav. Savilaikių kaminų žalų proporcija pagal kaminų medžiagą

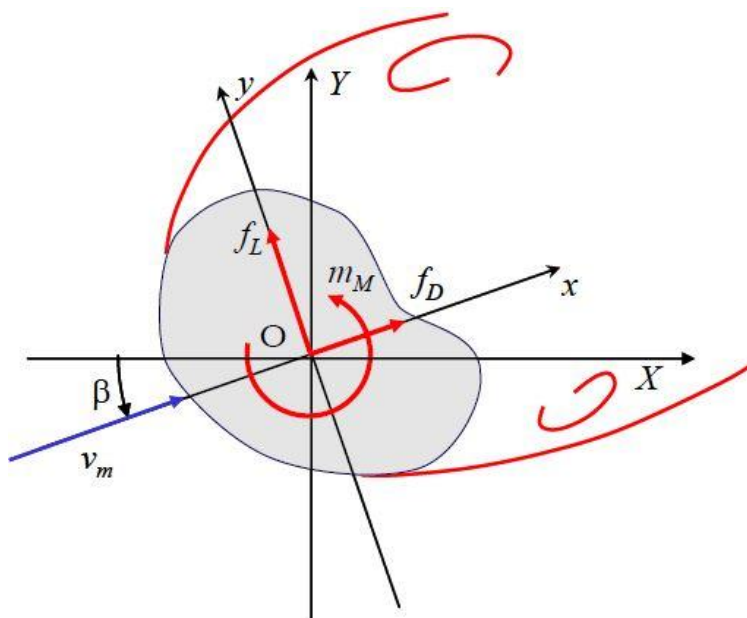
Plieninių kaminų konstrukcijos gali būti išreiškiamos kaip vertikali kevalinė sijos, su standžiai pritvirtintomis apatinėmis dalimis ir laisvomis viršutinėmis dalimis, kai apkrovos išskirstomos per visą aukštį. Kamino konstrukcijų elgesys apima klupimą, lenkimą, sukimą, ir dinaminę elgseną. Kamino konstrukcijos svoris sukelia gniuždomuosius įtempius ir tai gali sukelti konstrukcijos klupimą. Vėjo apkrovos išskirstytos per ilgį, sukelia lenkimo šlyties įtempius [6].

Plieninių kaminų konstrukcijos yra nuolat veikiamos kintančių vėjo poveikių, nes projektuojamos kaip aukštos ir liaunos konstrukcijos [6]. Dėl šių kintančių veiksnių kuriuos sudaro tariamai statiniai ir dinaminiai poveikiai, kamino konstrukcijos patiria poslinkius ir virpesius [2]. Kaminų konstrukcijas dėl tariamai statinių poveikių, lemia vidutinis vėjo greitis, pučiant pastoviu vidutiniu greičiu. O konstrukcijos dinaminis elgesys susidaro dėl tokių reiškinių, kaip vėjo gūšiai, sūkurinis srautas, turbulentinis pėdsakas dėl netoliese esančių statinių.

Siekiant sumažinti tariamai statinius ir dinامينius vėjo poveikius plieniniams kaminams, būtina tinkamai įvertinti vėją. Vėjo inžinerijoje vėjo poveikiai priklauso nuo šių veiksnių, tai [7]:

- vėjo greičio;
- vėjo poveikių krypčių, tai:
 - vėjo kryptimi (aerodinaminių poveikių);
 - statmena vėjui kryptimi (sūkurinio srauto poveikių).

Remiantis pateiktu 4 paveikslu ir darant prielaidą, kad vėjo sukeliami poslinkiai yra gana maži, jie gali būti nagrinėjami pagal konstrukcijai sukeliamus vėjo poveikius, kai konstrukcija yra fiksuota ir nedeformuota [8]. Aerodinaminis poveikis apibūdinamas vėjo kryptimi jėga f_D (D = tempimas x kryptimi), o sūkurinio srauto poveikis statmena vėjui kryptimi jėga f_L (L = kėlimas y kryptimi) ir sukimo momentas m (M = apie z ašį). Dėl to konstrukcija ar konstrukcinis elementas patiria trijų dimensijų reakciją: vėjo kryptimi (D), statmena vėjui kryptimi (L) ir sukimo momento (M). Vėjo kryptimi reakcija ir statmena vėjui kryptimi reakcija atsiranda atitinkamai $z - z$ ir $y - z$ plokštumose, atitinkamai sukimo momentas yra apie z ašį.



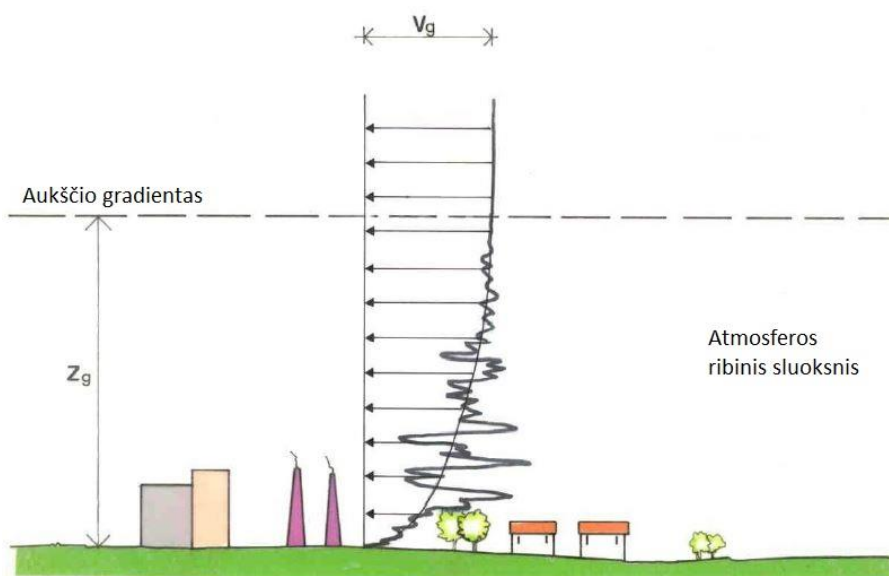
4 pav. Reakcijos: vėjo kryptimi f_D , statmena vėjui kryptimi f_L ir sukimo momento m

Plieninius kaminus veikiančius veiksnus vėjo kryptimi ar reakcija dėl turbulencijos pėdsako galime apibūdinti kaip vidutinio ir kintančio vėjo greičio dedamųjų sumą. Kintantis vėjas yra atsitiktinis įvairių dydžių gūsių ar sūkurių mišinys, kai stambesni sūkuriai atsiranda rečiau (mažesniu vidutiniu dažniu) nei mažesnių sūkurių atveju. Natūralus konstrukcijų virpesių dažnis yra didesnis nei kintančių apkrovų poveikių, kuri sukelia didesnieji sūkuriai. Tai yra vidutinis didelių gūsių susidarymo dažnis paprastai yra daug mažesnis nei konstrukcijos natūralus virpesių dažnis, todėl jie neverčia konstrukcijos reaguoti dinamiškai. Didesni gūsių apkrovos poveikiai gali būti apibrėžiami panašiai kaip ir dėl vidutinio vėjo greičio per konstrukcinę koeficientą $c_c c_d$ [9]. Mažesni sūkuriai, atsirandantys dėl sūkurinio srauto ir veikiantys kamino konstrukciją statmenai vėjo kryptimi, gali paskatinti konstrukciją vibruoti vienu ar daugiau natūralių konstrukcijos virpesių dažniu. Tai savo ruožtu sukelia padidintą dinaminių apkrovų poveikį konstrukcijai [10].

1.1. Vėjas ir jo greitis

Vėjas yra labai sudėtingas reiškinys dėl daugybės tėkmės situacijų, atsirandančių dėl vėjo sąveikos su konstrukcijomis. Vėją sudaro daugybė įvairaus dydžio verpetų ir sukimosi charakteristikų, nešamų bendroje oro srovėje, judančioje žemės paviršiaus atžvilgiu. Šie verpetai suteikia vėjui gūsingą ar audringą pobūdį [10].

5 paveiksle matome, kad vėjo greitį žemės paviršiuje lemia vėjo judėjimas iš aukšto atmosferos sluoksnio į žemą. Atmosferos ribinio sluoksnio aukštis apibrėžiamas kaip aukštis z_g , virš kurio vėjo nebeveikia žemės trinties jėga, o aukštis svyruoja nuo 1000 m iki 3000 m, priklausomai nuo vėjo greičio ir reljefo nelygumo ilgio [8].



5 pav. Vidutinis vėjo greitis ir atmosferos turbulencija

Vėjo greitis virš ribinio atmosferos sluoksnio yra pastovus ir žymimas simboliu v_g , o likusiame sluoksnyje oro srautą veikia žemės trinties jėga, priešinga vėjo greičiui V , todėl vėjo greitis artėdamas prie žemės paviršiaus, mažėja. Dėl reljefo nelygumo ir kitų kliuvinių vėjo greitis pastoviai kinta artėdamas prie žemės, o tai vadinama turbulencija. Žemės paviršiuje turbulencija yra didžiausia, o didėjant aukščiui ji linkusi mažėti [8].

Yra dvi ribinės situacijos, kurias gali nulemti atmosferos pusiausvyra [8]. Pirmąją sudaro šilto oro horizontalus judėjimas per šaltą reljefą. Toks oro judėjimas lemia temperatūros sumažėjimą šalia žemės ar net temperatūros gradiento pasikeitimą ir polinkį į stabilios pusiausvyros sąlygas, galinčias slopinti turbulenciją. Antroji ribinė situacija atsiranda dvejopomis sąlygomis, kai šaltas oras teka per šiltą reljefą, tokiu atveju kaitinant iš apačios padidėja temperatūros gradientas, dėl kurio atmosfera tampa nestabili ir padidėja turbulencija.

Atmosferos padėtis keičiasi atsižvelgiant į vėjo greitį – didėjant greičiui, didėja žemės paviršiaus trinties jėgos, o tai nulemia kintančią turbulenciją. Dėl kintančios turbulencijos atmosfera maišosi ir yra adiabinės būsenos. Adiabinė būseną apibūdinama kaip procesas, kai oras nebesimaišo dėl oro temperatūrų skirtumo. Kai temperatūros gradientas juda link adiabinės vertės, o atmosfera linkusi judėti link neutralios būsenos, tada vėjo greitis nebepriklauso nuo temperatūros [8].

Vėjo inžinerijoje vėjo greitis paprastai apibūdinamas kaip vidutinio vėjo greičio ir turbulencijos suma. Tai yra atsitiktinė laiko funkcija, nepriklausoma nuo laiko, bet tuo pačiu ir deterministinė vietovės funkcija, nepriklausoma nuo vietos, kuri kinta atsitiktinai.

Atsižvelgiant į vidutinį vėjo greitį kaip atsitiktinę laiko funkciją, vidutinis vėjo greitis apibrėžiamas Lietuvos Respublikos 2003-05-15 „Statybos techninio reglamento STR 2.05.04:2003 Poveikiai ir apkrovos“ nustatytais pagrindiniais atskaitiniais vėjo greičio reikšmėmis $v_{b,0}$ [11], pateiktomis 1 lentelėje ir nustatytais pagal Lietuvos vėjo apkrovos rajonus, pavaizduotus 6 paveiksle. Vėjo greičio pagrindinė atskaitinė reikšmė yra charakteristinis 10 min vidutinis vėjo greitis, nepriklausantis nuo vėjo krypties ir metų laiko, vėjui pučiant 10 m aukštyje virš žemės paviršiaus atviroje vietovėje su žema augalija. Jos metinė viršijimo tikimybė yra 0,02 %, o tai atitinka 50 metų periodą [11].

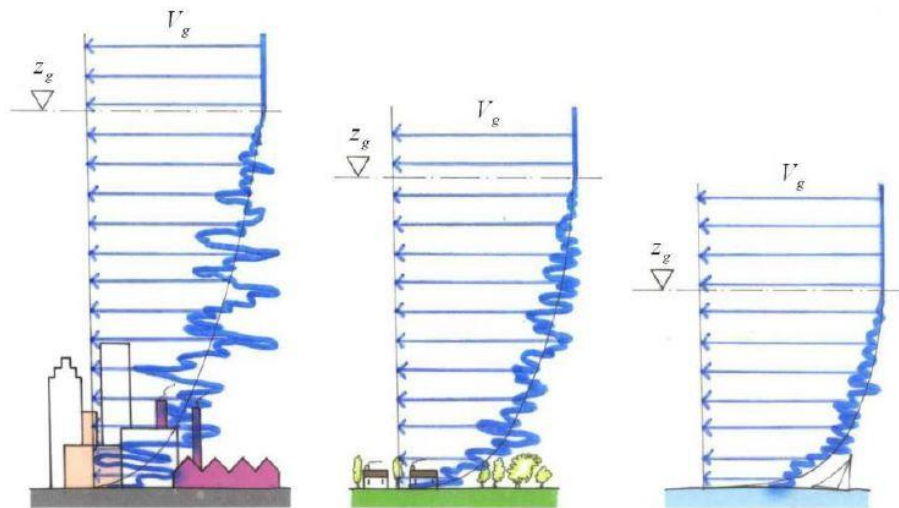
1 lentelė. Vėjo greičio pagrindinės atskaitinės reikšmės pagal apkrovos rajonus.

Vėjo greičio rajonas	$v_{b,0}$ m/s
I	24
II	28
III	32



6 pav. Lietuvos apkrovų rajonai

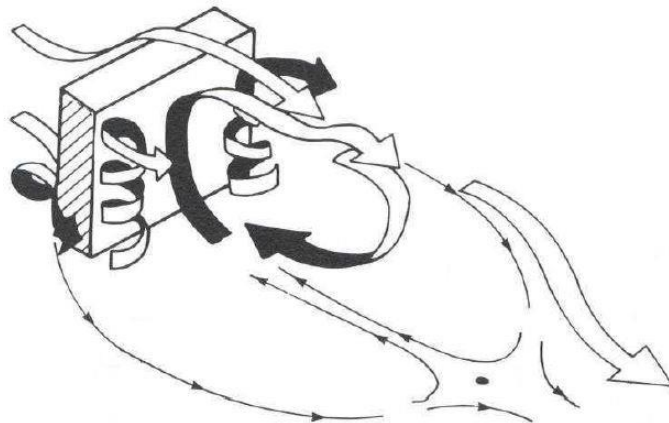
7 paveiksle matome atmosferos ribinių sluoksnių padalijimą į dvi sritis – vidinius ir išorinius sluoksnius [8]. Vidinis sluoksnis yra tarp žemės paviršiaus 1 m aukščio z_{min} ir iki 200 m aukščio z_{max} , vidutinis vėjo greitis turi logaritminį profilį, kuris yra šurkščiojo ruožo ilgio z_0 funkcija [9]. Išoriniame sluoksnyje, esančiame tarp z_{max} ir z_g aukščių, vidutinis vėjo greitis krypsta link geostrofinio vėjo greičio V_g , spiraliniu profiliu link atmosferos ribinio sluoksnio. Vėjo inžinerijoje visada naudojamos pagrindinės vėjo greičio atskaitinės reikšmės v_b , šurkštumo c_r ir orografijos c_0 koeficientais. Iš šių trijų verčių apskaičiuojamas geostrofinis vėjo greitis V_g . Manoma, kad ši vertė, nepaisant žemės nelygumo ilgio, gana didelėse teritorijose išlieka ta pati [8].



7 pav. Vidutinio vėjo greičio profiliai pagal skirtingus žemės paviršius

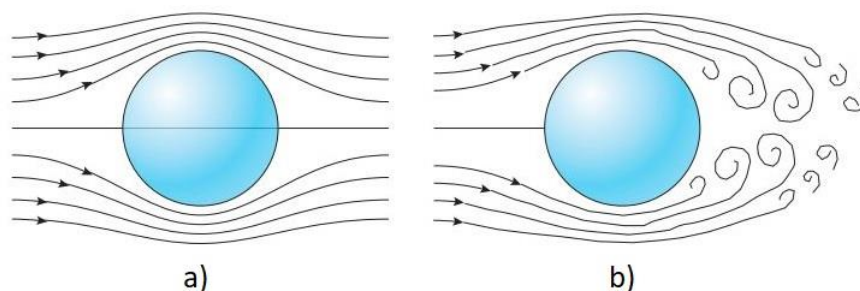
1.2. Aerodinaminiai poveikiai

Kai savilaikius plieninius kaminus veikia artėjantis oro srautas, galime nustatyti du su tuo susijusius reiškinius. Iš vienos pusės, kamino konstrukcija pakeis oro srautą, pakeisdamas vėjo greičio profilį, o kitoje pusėje kamino paviršiuje atsiras slėgis P , kuris skiriasi nuo laisvo oro srauto slėgio P_0 . Todėl kamino paviršių veikia aerodinaminis poveikis (žr. 8 pav.), susijęs su slėgio skirtumu $p = P - P_0$.



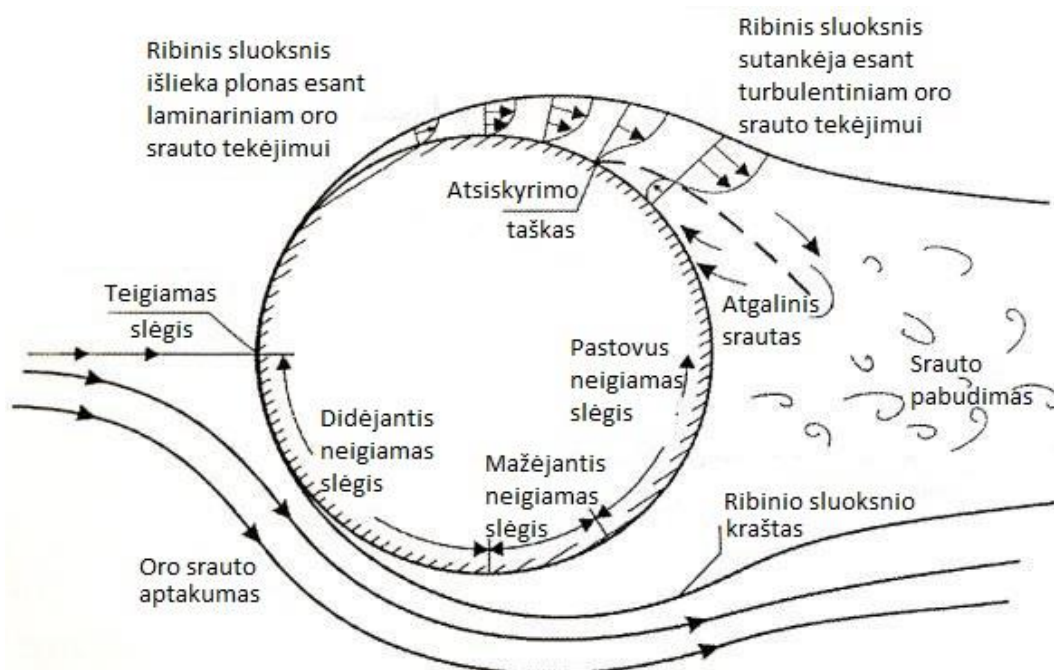
8 pav. Konstrukcijos aerodinaminiai poveikiai oro sraute $P - P_0$

Plieniniuose kaminuose artėjančio oro srauto tekėjimą per kamino kevalo paviršius lemia (žr. 9 pav.) susidarantys oro srauto ribiniai sluoksniai: a) laminarinis ir b) turbulentinis. Šie sluoksniai priklauso nuo Reynoldso skaičiaus R_e , kamino kevalo sienelės paviršiaus šiurkštumo ir kamino kevalo skerspjūvio dydžio.



9 pav. Oro srauto ribiniai sluoksniai: a) laminarinis ir b) turbulentinis

Ribinis sluoksnis yra veikiamas neigiamo slėgio gradiento išilgai srauto krypties, dar kitaip sklandaus oro srauto tekėjimo. Tuo metu oro srautas linkęs įsibėgėti dėl Bernulio dėsnio, ribinio sluoksnio storis mažėja, o jame besidarantys sukūriai yra pernešami į priekį link paviršiaus. Kitaip tariant, ribinis sluoksnis yra linkęs dar labiau susispausti prie kamino kevalo paviršiaus [8]. Priešingas reiškinys atsiranda tada, kai ribinis sluoksnis turi teigiamą slėgio gradientą oro srauto pradžioje, dar kitaip oro srauto viršslėgį, ir neigiamą slėgio gradientą išilgai srauto krypties, dar kitaip oro srauto siurbimą. Tokiu atveju ribinio sluoksnio storis padidėja ir sukūriai yra perduodami pasroviui toliau nuo kamino skerspjūvio paviršiaus, todėl atsiranda ribinio sluoksnio atsiskyrimo reiškinys (žr. 10 pav.) Pasroviui po atsiskyrimo srautas tolsta nuo kamino paviršiaus, todėl galima teigti, kad sukūriai nebėra ribojami kamino paviršiaus, o užima platų srauto plotą [12]. Šis srautas yra turbulentinis ir sukuria sąlygas atsirasti sukūriniam srautui.

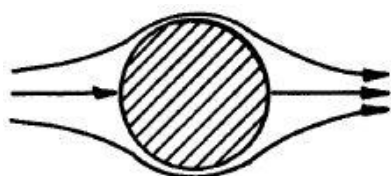


10 pav. Oro srauto laminarinis pereinantis į turbulentinį ribinis sluoksnis

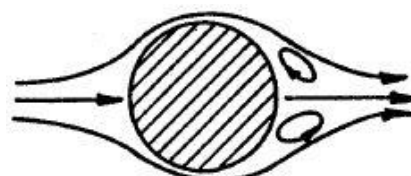
Oro srauto tekėjimas ir atsiskyrimas nuo kamino skerspjūvio paviršiaus priklauso ne tik nuo skerspjūvio dydžio, bet ir nuo Reinoldso skaičiaus R_e ir kamino kevalo sienelės paviršiaus šiurkštumo. Reinoldso skaičius R_e yra svarbus nedimensinis skaičius, nurodantis spėjamo oro srauto modelį, inercinių ir klampiųjų jėgų santykį [13]. 11 paveiksle pavaizduoti lygaus apvalaus skerspjūvio cilindro, esančio oro sraute, klasikiniai atvejai [14]:

- $R_e < 5$ atveju ribinis sluoksnis yra laminarinis ir lieka prisirišęs prie cilindro per visą perimetrą;
- 5 iki 15 $R_e \leq 40$ atveju laminarinis ribinis sluoksnis atsiskiria nuo cilindro ir sukuria du nejudančius sukūrius;
- ribinis sluoksnis vis dar yra laminarinis, bet atsiskirdamas oro srautas nuo cilindro sukuria Von Karmano sukūrius, dar kitaip sukūrinį srautą, esant $40 \leq R_e < 90$ sukūriai yra žadinimo būsenoje, o esant $90 \leq R_e < 150$ sukūriai sukuria periodišką srautą;
- ribinis sluoksnis yra laminarinis, bet atsiskirdami sukūriai $150 \leq R_e < 300$ yra turbulentiniai, o esant $300 \leq R_e < 3 \times 10^5$ yra pilnai turbulentiniai;

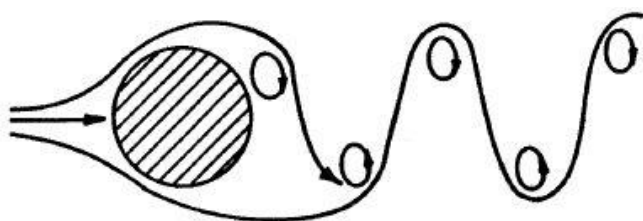
- e) $3 \times 10^5 \leq R_e < 3 \times 10^6$ ribinis sluoksnis iš pradžių yra laminarinis pereinantis į turbulentinį, bet atsiskirdamas nuo cilindro oro srautas yra siaurėjantis ir netvarkingas.
- f) $3 \times 10^6 \leq R_e < \infty$ ribinis sluoksnis yra pilnai turbulentinis, bet atsiskirdamas nuo cilindro oro srautas sukuria turbulentiškus sūkurius ir yra atkuriamas sūkurinis srautas. Šis reiškinys yra ganėtinai retas, nes Reinoldso skaičius R_e priklauso nuo vėjo greičio V_g . Sūkurinio srauto susidarymo sąlygos pasiekiamos esant pastoviam nuolatiniam vėjo greičiui tarp 5 m/s ir 15 m/s [15]. Todėl labiau tikėtina, kad sūkurinis srautas susidarys (žr. 10 pav. c dalį) esant Reinoldso skaičiui tarp $40 \leq R_e < 90$ ir $90 \leq R_e < 150$.



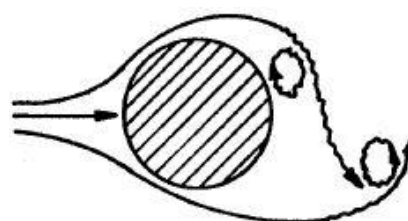
a) $R_e < 5$



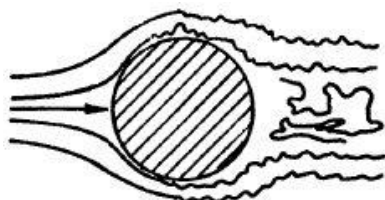
b) 5 iki 15 $R_e \leq 40$



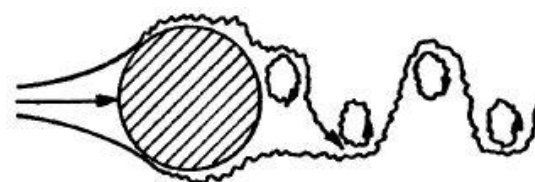
c) $40 \leq R_e < 90$ ir $90 \leq R_e < 150$



d) $150 \leq R_e < 300$ ir $300 \leq R_e < 3 \times 10^5$



e) $3 \times 10^5 \leq R_e < 3 \times 10^6$



f) $3 \times 10^6 \leq R_e < \infty$

11 pav. Lygaus apvalaus skerspjuvio esančio oro sraute atvejai pagal Reinoldso skaičių R_e

11 paveikslėlyje žiūrėdami į pateiktus apvalaus skerspjuvio cilindro, esančio oro sraute a) – f), klasikinius atvejus matome, kad aerodinaminiai poveikiai plieniniams kaminams priklauso ne tik nuo artėjančio oro srauto, bet ir nuo turbulentinio sužadavimo. Artėjančiam oro srautui būdingas vidutinis greitis ir jo kitimas. Turbulentinis sužadavimas sukelia veiksmus, susijusius su paliekamu turbulentišku oro srautu [8]. Vėjo inžinerijoje paprastai šie veiksmai apibūdinami bedimensiniais parametrais, dar kitaip vadinamais „aerodinaminiais koeficientais“, bei apima vidinio c_{pi} ir išorinio slėgio c_{pe} koeficientus [9].

Vidinis vėjo slėgis c_{pi} , veikiantis plieninį kaminą, o tiksliau laikančiojo kevalo vidinius paviršius, nevertinamas. Vidinį slėgį reikia vertinti, kai projektuojami atviri siloso bokštai, ventiliuojami rezervuarai ir didelio skerspjuvio dūmtraukiai [9].

Aerodinaminiai koeficientai apibrėžiami slėgio koeficientu pagal formulę:

$$q_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho V^2}; \quad (1.1)$$

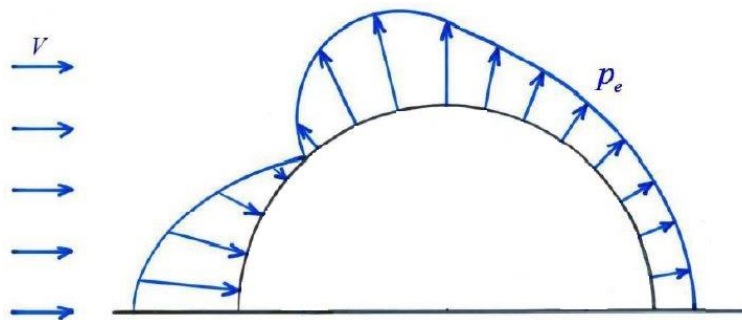
čia:

V – viršūninis vėjo greitis aukštyje z (m/s);

ρ – oro tankis (kg/m^2).

Kai slėgis $p > 0$ ($P > P_0$), o paviršiai yra veikiami viršslėgio, tai koeficientas c_p yra teigiamas. Ši sąlyga taikoma tais atvejais, kai kamino paviršiai yra tiesiogiai veikiami artėjančio oro srauto. Paprastai ribinis sluoksnis šiuose paviršiuose yra prisispaudęs prie kevalo paviršiaus. Kita vertus kai slėgis $p < 0$ ($P < P_0$), o paviršiai veikiami neigiamo slėgio, tai koeficientas c_p yra neigiamas. Ši sąlyga taikoma tais atvejais, kai šoniniai kamino paviršiai yra veikiami oro srauto siurbimo. Paprastai ribinis sluoksnis šiuose paviršiuose yra atskiriamas [8].

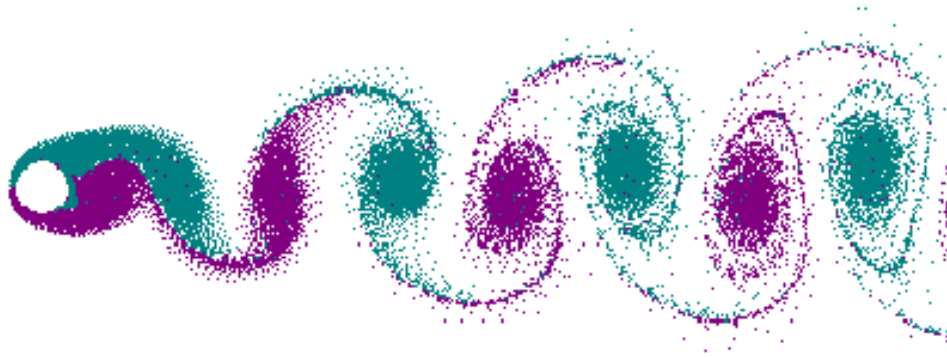
12 paveiksle pateikiamas slėgis p_e , kuris veikia išorinius kamino skerspjūvio paviršius, yra apibrėžiamas kaip išorinis slėgis. Šiuo atveju koeficientas c_p yra išorinio slėgio koeficientas ir žymimas simboliu c_{pe} .



12 pav. Išorinio slėgio p_e pasiskirstymas kamino skerspjūvio paviršiuose

1.3. Sūkurinio srauto poveikiai

Sūkurinio srauto susidarymą ir tekėjimą už savilaikių plieninių kaminų (žr. 13 pav.) lemia artėjantis oro srautas. Vėjo greitis nebūtinai turi būti labai didelis, o užtenka pastovaus nuolatinio vėjo greičio sąlygų tarp 5 ir 15 m/s . Vėjo greitis palaipsniui gali didėti ir mažėti, bet jeigu vėjo greitis pasikeičiau daugiau negu 20 %, sūkurinis srauto susidarymas nutraukiamas. Tos pačios sąlygos galioja esant ir didesniam vėjo greičiui nei 15 m/s , vėjas paprastai yra per daug turbulentinis, kad susidarytu sūkurinis srautas [15].



13 pav. Sūkurinio srauto reiškiny

Tai yra įprastas fizikinis reiškinys, dar geriau žinomas kaip Von Karman sūkurių gatvė [13], kurį sukelia oro srauto ribinio sluoksnio atsiskyrimas. Sūkurinio srauto sūkuriai dėl periodinio slėgio pasiskirstymo aplink kevalo paviršių, sukelia kintančias jėgas, kurios veikia visą kamino konstrukciją. Kintančio jėgos gali sukelti virpesius, kai kamino konstrukcija yra elastingai įtvirtinta ar deformuota [16]. Sūkurinio srauto reiškinys yra viena iš specifiškiausių vėjo inžinerijos ypatybių, pasireiškiančių ne tik liaunuose kaminuose, bet ir kitose konstrukcijose, tokiose kaip aukšti pastatai, tiltai, elektros energijos tiekimo linijos ar atviroje jūroje esančios konstrukcijos.

Sūkurinio srauto susidarymas apibūdinamas, kai sūkuriai yra paeiliui metami nuo priešingų kamino konstrukcijos šonų. Dėl to yra sukeliama statmenai vėjo kryptčiai kintamosios jėgos [9]. Kritiškiausios sąlygos atsiranda tada, kai sūkurinio srauto dažnis sutampa su konstrukcijos laisvųjų virpesių pagrindiniu dažniu $n_{i,y}$. Vidutinis vėjo greitis $v_m = v_{cr,i}$, kurio $n_s = n_{i,y}$, yra apibrėžimas kaip kritinis, kuriam esant sūkurinio srauto dažnis lygus konstrukcijos laisvųjų virpesių dažniui:

$$v_{cr,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St}; (m/s) \quad (1.2)$$

čia:

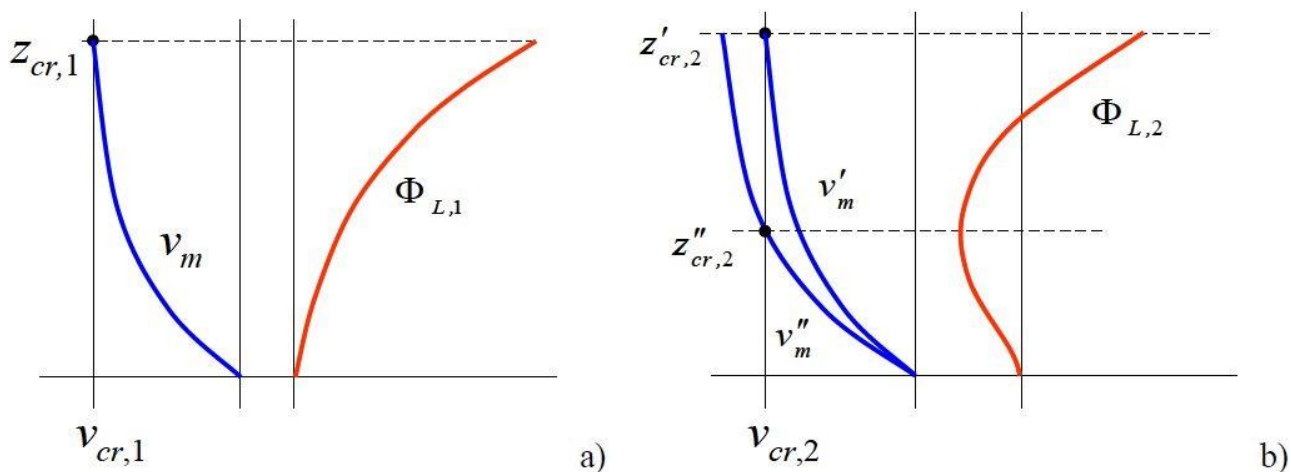
b – skerspjūvio skersmuo, ties kuriuo atsiranda sūkurinio srauto rezonansas (m);

$n_{i,y}$ – i režimo laisvųjų lenkiamųjų virpesių dažnis (Hz);

St – Strouhalo skaičius, priklausantis nuo skerspjūvio geometrijos ir Reinoldso skaičiaus.

Sūkurinio srauto statmenai vėjo kryptčiai sukeliamas harmoninis modelis yra pagrįstas tik esant sklaidžiam oro srautui. Didėjant turbulencijai harmoninės jėgos pasiskirsto platesniame dažnių diapazone, orientuojantis į dažnį n_s . Nors vėjo krypttimi reakcija yra linkusi didėti kartu su turbulencija, tačiau didėjanti turbulencija sušvelnina statmeną vėjo kryptčiai reakciją dėl sūkurinio srauto [8].

Aukštosios kaminų konstrukcijos gali turėti kritines vidutinio vėjo greičio vertes, kurios kinta išilgai konstrukcijos, nes kinta vidutinis vėjo greitis (žr. 14 pav.) Todėl reikia nustatyti statmenai vėjo kryptčiai kritinio vėjo greičio sukeltą maksimalią reakciją. Tai įvyksta, kai kritinis vėjo greitis atsiranda tokiaame aukštyje, kuriame yra maksimalus rezonansinis virpesių režimas [8].



14 pav. Kritinės padėtys, kuriose sukeliamas sūkurinio srauto rezonansas

Pirmasis virpesių režimas įvyksta, kai maksimaliai sužadinas sūkurinis srautas kamino konstrukcijos viršūnėje (žr. 14 pav. a) grafiką). Kita vertus, virpesiai aukštesniuose režimuose taip pat gali būti analizuojami keliose kritinio vėjo greičio padėtyse (žr. 14 pav. b) grafiką). Tačiau didinant rezonansinį režimą didėja ir kritinis vidutinis vėjo greitis. Konstrukcijų patikrinimai apsiriboja kritiniais vėjo greičiais, kurie iš tikrųjų gali atsirasti inžinerijos prasme ir neviršija projekcinio pagrindinio vėjo greičio v_b [17].

Sūkurinio srauto dažnis n_s yra vidutinio vėjo greičio v_m linijinė funkcija (žr. 15 pav. a) grafiką). Praktiškai ši taisyklė peržengiama pradėdant nuo vėjo greičio, artimo kritiniam greičiui $v_{cr,i}$, intervale $\Delta v_{cr,i}$, (žr. 15 pav. b) grafiką) [8]. Bandytais nustatyta, kad mechaninis dažnis nustato sūkurių atitrūkimo dažnį oro srauto greičio intervale. Šis reiškinys apibūdina virpesių imlumą, dar kitaip vadinamą sinchronizacija [18]. Virpesių imlumas priklauso nuo konstrukcijos slopumo ir santykio tarp konstrukcijos masės ir oro srauto masės, išreiškiamu Skrutono skaičiumi:

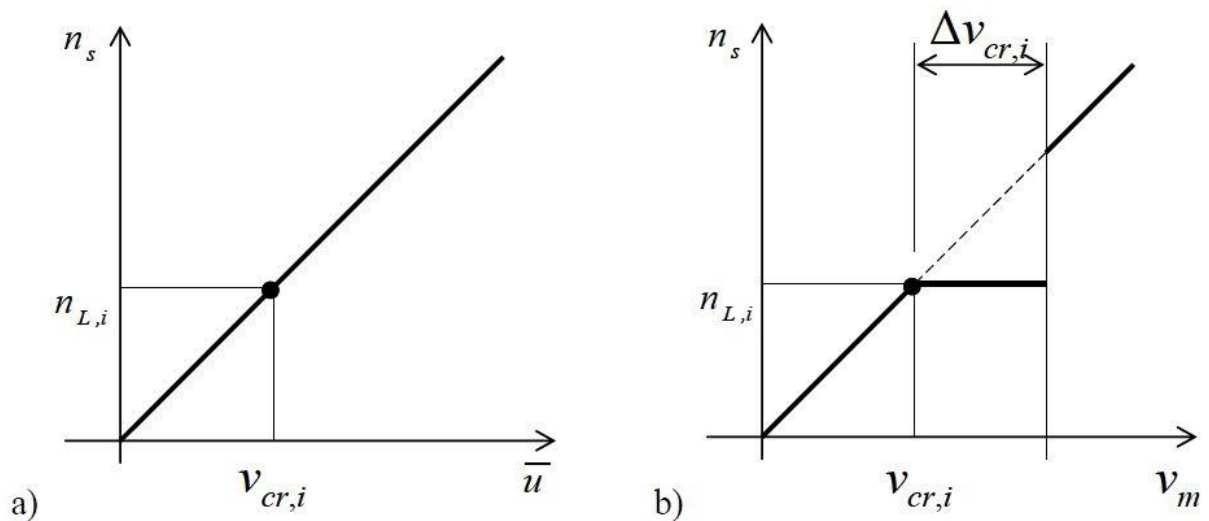
$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}; \quad (1.3)$$

čia:

δ_s – konstrukcijos slopumas, išreiškiamas logaritminiu dekrementu;

$m_{i,e}$ – i virpesių režimo vienetinio ilgio ekvivalentinė masė (kg/m);

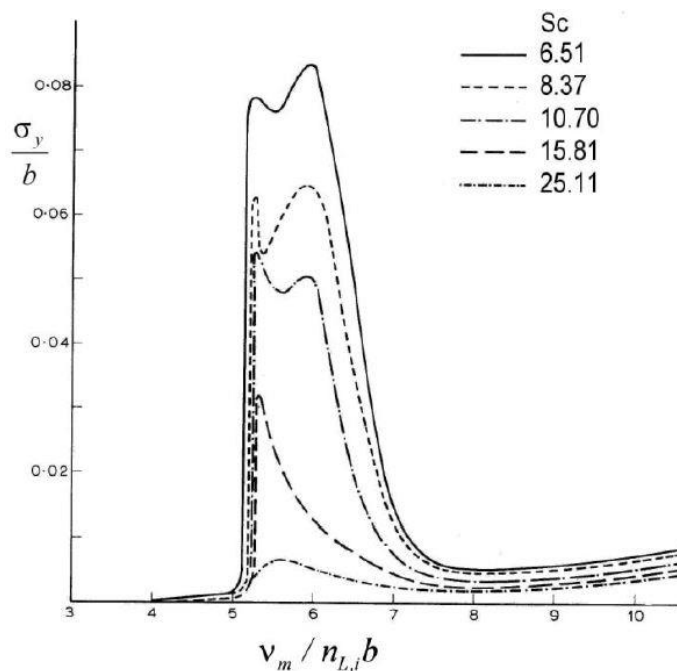
ρ – oro tankis sūkurinio srauto sąlygomis (kg/m^2).



15 pav. Strouhalo taisyklė Skrutono skaičiams kai skaičiai a) dideli ir b) maži

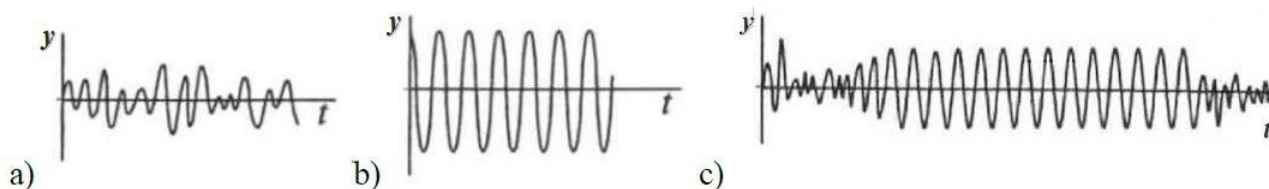
Kai Scrutono skaičiai yra dideli (žr. 15 pav. a) grafiką), paeiliui metami sūkuriai sukelia statmenai vėjo kryptčiai kintančias jėgas, o tai savo ruožtu sukelia rezonansinius virpesius. Priešingai, kai Scrutono skaičius yra mažas, sūkurinio srauto sužadimas sukelia tokius amplitudės virpesius, kad jie patys sukelia sūkurinį srautą. Esant tokioms aplinkybėms sūkurinis srautas susidaro, kai virpesių dažnis ir vidutinis vėjo greitis kinta intervale (žr. 15 pav. b) grafiką). Dėl šių priežasčių sūkurio srauto sukelti virpesiai konstrukcijoje gali reikšti perėjimą tarp dinaminės ir aeroelastinės reakcijos [8].

16 paveiksle pateikiama statmenai vėjui kryptiai reakcija į sukurinį srautą esant įvairiems Skrutono skaičiams. X ir Y ašys rodo atitinkamai sumažintą vidutinį vėjo greitį $v_m/n_{i,y}$ ir statmenai vėjo kryptiai normalizuotą standartinį poslinkio nuokrypį σ_y/b [8]. Kai Sc yra didelis, statmenai vėjo kryptiai reakcija padidėja tik vidutiniškai, esant mažam kritinio greičio intervalui. Esant mažoms Sc reikšmėms, statmenai vėjo kryptiai reakcija staigiai padidėja, o rezonansas apima gana platų vėjo greičio verčių intervalą. Reakcija statmenai vėjo kryptiai daugiausiai plinta į dešinę pusę (žr. 16 pav.) nuo kritinės vertės pagal Strouhala taisyklę, kaip 15 paveikslo b) grafike .



16 pav. Statmena vėjui kryptimi reakciją į sukurinį srautą

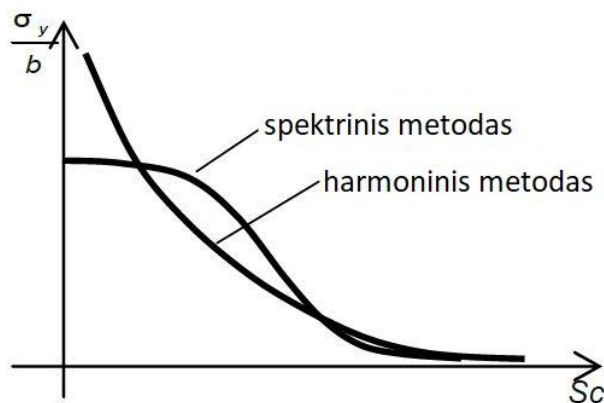
Pagal statmenai vėjo kryptiai reakciją ir Skrutono skaičių galima nustatyti tris atskirus virpesių režimus [8]. Esant didelėms Sc vertėms virpesiai yra priverstiniai dėl sukurinio srauto ir jie yra atsitiktinio pobūdžio (žr. 17 pav. a) grafiką). Esant mažoms Sc vertėms virpesiai yra sužadunami pagal konstrukcijos virpesius ir turi deterministines savybes (žr. 17 pav. b) grafiką). Esant tarpinėms Sc reikšmėms įvyksta perėjimas tarp dviejų aukščiau esančių elgesio tipų, o virpesiai yra mišrus pobūdžio (žr. 17 pav. c) grafiką).



17 pav. Virpesių reakcijų režimai: a) priverstiniai, b) sužadunami ir c) mišrus

Perėjimas nuo priverstinės prie aeroelastinės reakcijos įvyksta, kai Scrutono skaičiai yra maždaug tarp 5 – 20. Šiame režime staigiai padidėja virpesių amplitudė, ir paprastai tai yra projektavimo sąlygos, kad konstrukcija neturėtų patekti į aeroelastinį režimą, o turėtų likti priverstinių virpesių režime. Verta paminėti teigiamą turbulencijos reiškinį, kad padidėjusi turbulencija linkusi pereiti prie mažesnių Scrutono skaičių, taip atidėdama aeroelastinį elgesį [8].

Atsižvelgiant į šio reiškinio sudėtingumą ir nepaisant mokslinių tyrimų, kurie buvo atlikti per daugelį tyrinėjimų metų, vis dar trūksta išsamių, patikimų ir visiškai suderintų formuluočių, galinčių numatyti šiuos reiškinius kiekybiškai pagrįstai [8]. Paprastai analizės atliekamos naudojantis teorinėmis formuluotėmis, skaitiniais algoritmais, vėjo tunelio bandymais, viso masto eksperimentais ir projektavimo normų nuostatomis [15]. Remiantis Eurokodu yra numatyti tik du skaičiavimo metodai: tai spektrinis ir harmoninis, kurie pateikiami 18 paveikslėlyje. Šiuo metu jie dažniausiai naudojami vėjo inžinerijoje, kurie susiję su daugybe papildomų privalumų ir trūkumų, bei dažnai pateikia gana skirtingus rezultatus [9].



18 pav. Spektrinio ir harmoninio metodų rezultatų palyginimas.

Spektrinio metodo skaičiavimai gali lemti pernelyg atsargius rezultatus, o harmoninio metodo rezultatai nebūtinai yra saugūs. Be to, harmoninis metodas taikomas platesniam konstrukcijų intervalui nei spektrinis metodas. 18 paveiksle pateikiamas kokybinis dviejų metodų tipinių rezultatų palyginimas, pabrėžiant kad didžiausi neatitikimai atsiranda esant mažiems Skrutono skaičiams [8].

2. Vėjo poveikių įtakos kaminų konstrukcinėms schemoms vertinimas

Savilaikio plieninio kamino geometrija atlieka svarbų vaidmenį konstrukcijos elgesyje esant aerodinaminiam ir sūkurinio srauto poveikiams. Taip yra todėl, kad geometrija pirmiausia lemia kamino standumo parametrus [19]. Tačiau pagrindiniai minimalūs plieninių kaminų matmenys, tokie kaip aukštis, skersmuo, priklauso nuo technologinės projektavimo užduoties ir aplinkos sąlygų.

Technologinės srities inžinieriai plieniniams kaminams nustato pagrindinius vidinius nekintamus parametrus. Tai – dūmtraukių skaičių, skerspjūvių diametrą, aukštį ir medžiagą. Taip pat nustatomi ir technologinių kanalų įvadų parametrai: skirtingų diametrų, tipų ir jų išdėstymo skirtinguose kamino aukščiuose. Dūmtraukių parametrai: apšiltinimo, paslankumo nuo darbinių temperatūrinių poveikių ir ventiliacijos. Aptarnavimo parametrai: dūmų mėginių paėmimo ir eksploatacijos apžiūros zonos.

Konstrukcinės srities inžinieriai pagal technologinę projektavimo užduotį ir aplinkos sąlygas priima pagrindinius plieninio kamino konstrukcinius inžinierinius sprendimus. Tai laikančiojo kevalo skerspjūvio diametrą, aukštį, forma ir medžiagą. Pagal aplinkos sąlygas, tai yra pagal vietovės topografiją, įvertinami aerodinaminiai ir sūkurinio srauto sukelti poveikiai ir analizuojamas aerodinaminis slopinimo priemonių poreikis.

Šiame baigiamajame magistro projekte tiriama vėjo poveikių įtaka plieniniams kaminams. Pagal fiktyvią technologinę projektavimo užduotį pasirenkamos 2 vientiso skerspjūvio kaminų konstrukciniai atvejai, skirtingo aukščio ir su skirtingais dūmtraukių skaičiumi. Analizuojamos 4 konstrukcinės schemos su aerodinaminėmis slopinimo priemonėmis arba be jų. Visi 4 konstrukcinių schemų pagrindiniai duomenys pateikiami 2 lentelėje ir 19 paveiksle.

Plieniniai kaminai su vienu dūmtraukiu, h - 30 m aukščio ir b – 1,4 m diametro:

- I. Be aerodinaminio slopinimo priemonių, kai Skrutono skaičius $S_C = 11,86$;
- II. Su aerodinaminėmis slopinimo priemonėmis, kai Skrutono skaičius $S_C = 12,19$;

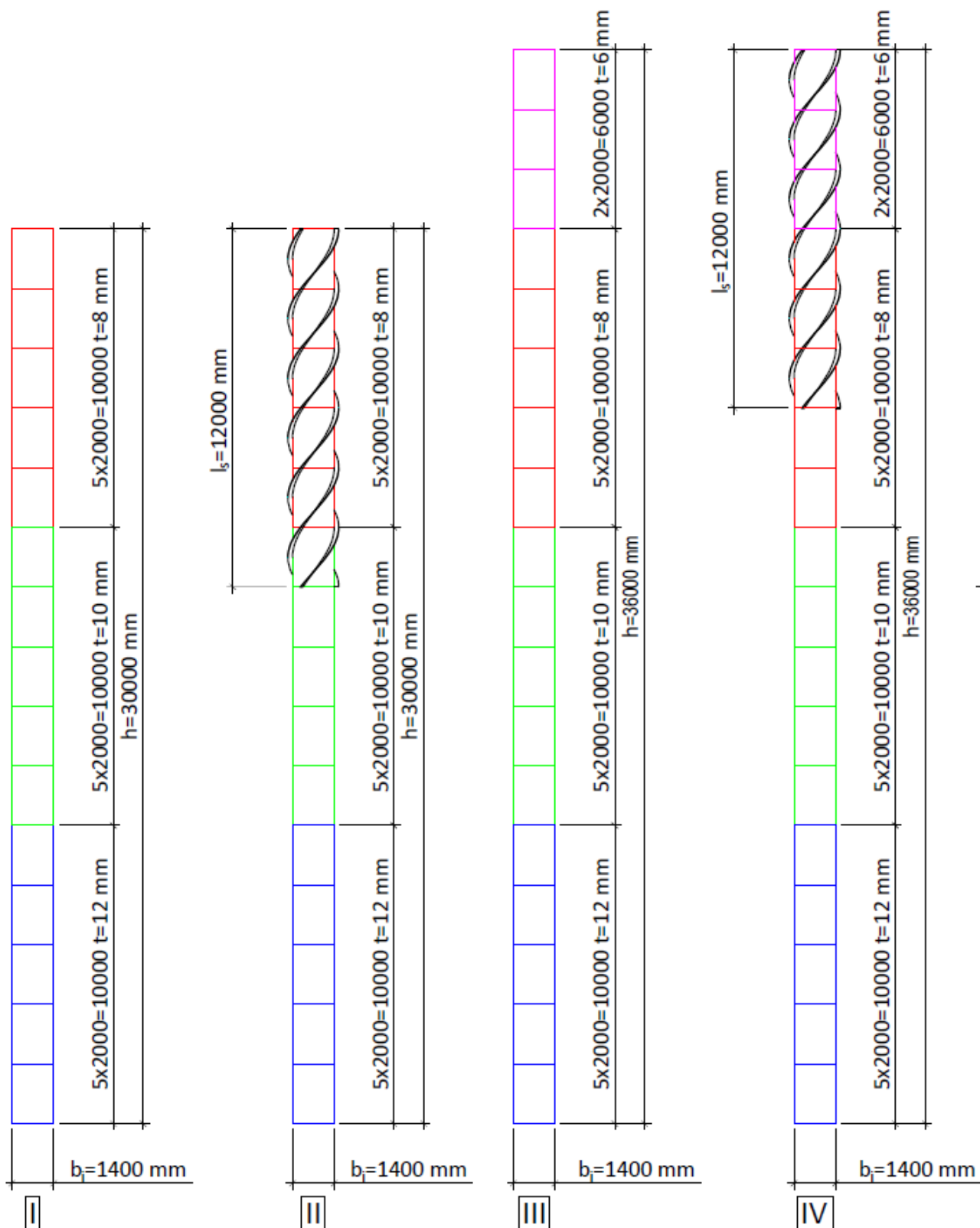
Plieniniai kaminai su keliais dūmtraukiais, h - 36 m aukščio ir b – 1,4 m diametro:

- III. Be aerodinaminio slopinimo priemonių, kai Skrutono skaičius $S_C = 7,85$;
- IV. Su aerodinaminėmis slopinimo priemonėmis, kai Skrutono skaičius $S_C = 8,02$;

Skrutono skaičius parodo kamino konstrukcijos virpesių imlumą (jautrumą ir polinkį vibruoti) vėjo sukeltiems virpesiams įvertinti [9]. Skrutono skaičius priklauso nuo kamino konstrukcijos slopumo ir santykio tarp konstrukcijos masės ir oro srauto masės.

2 lentelė. Plieninių kaminų 4 konstrukcinių schemų pagrindiniai duomenys

Kaminų konstrukcinė schema	Kamino aukštis h, m	Kamino išorinis diametras b_i, mm	Kamino vidinis diametras b_v, mm	Kamino kevalo sienelių storiai t, mm	Kamino plieno markė	Kamino svoris W_s, t	Kamino visuminis svoris W_v, t
I	30	1400	1376 - 1384	12; 10; 8	S355J2	10,56	10,56
II	30	1400	1376 - 1384	12; 10; 8	S355J2	10,56	11,00
III	36	1400	1376 - 1388	12; 10; 8; 6	S355J2	11,83	11,83
IV	36	1400	1376 - 1388	12; 10; 8; 6	S355J2	11,83	12,27



19 pav. Plieninių kaminų konstrukcinės schemas

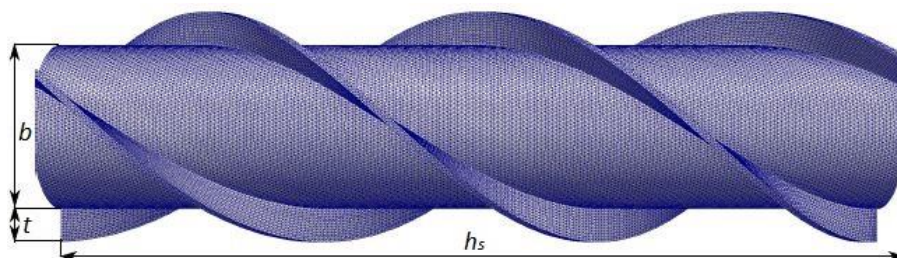
Plieniniams kaminams dažni virpesiai statmenai vėjo kryptčiai dėl sūkurinio srauto sužadavimo gali būti veiksmingai sumažinami panaudojant aerodinamines slopinimo priemones. Tai aerodinaminiai įtaisai (sraigtinės juostelės, aptakai ar gaubtai ir lynai), virpesių slopintuvai ar lynai su slopintuvais. Aptakai ir gaubtai nėra praktiški, nes sukelia eksploataavimo priežiūros problemų. Lynų veiksmingumas priklauso nuo jų storio, o tai sukelia tvirtinimo prie kamino problemų.

Sraigtinės juostelės iš aerodinaminių įtaisų pasirinkimo yra pats racionaliausias ir ekonomiškiausias sprendimas dėl savo įrengimo paprastumo ir mažų eksploataavimo sąnaudų [20]. Todėl šiame baigiamajame magistro projekte pasirenkama analizuoti tik sraigčių juostelių poveikis 2-iems konstrukcinėms schemoms. Sraigčių juostelių pagrindiniai duomenys pateikiami 3 lentelėje.

3 lentelė. Plieninų kaminų 2 konstrukcinių schemų sraigčių juostelių pagrindiniai duomenys

Kaminų konstrukcinė schema	Kamino aukštis h, m	Juostų ilgis l_s, m	Juostų skaičius n_s, vnt	Juostų žingsnis h_s, m	Juostų aukštis t, mm	Juostų storis t, mm	Juostų plieno markė	Visuminis juostų svoris W_t, t
II	30	12	3	6	150	8	S355J2	0,44
IV	36	12	3	6	150	8	S355J2	0,44

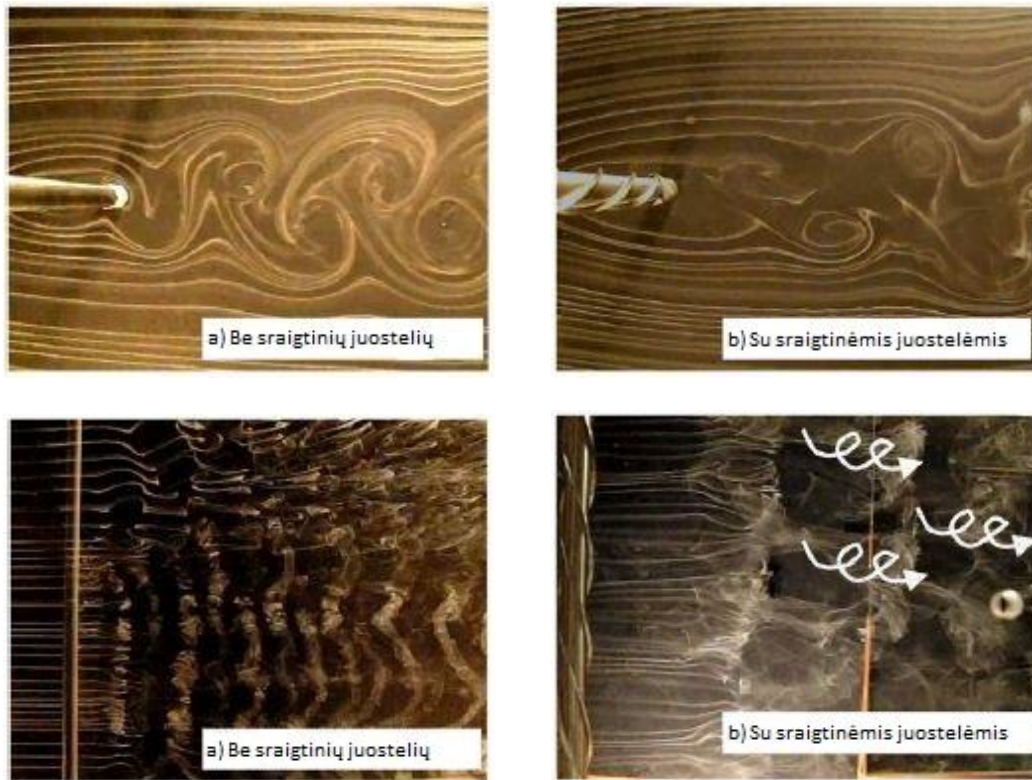
Sraigtinės juostelės yra labiausiai naudojamos priemonės, skirtos sušvelninti ar net sustabdyti susidarantį sūkurinį srautą už apvalių skerspjūvių [21]. Šios juostelės, tai yra paviršiniai išsikišimai, išdėstomi spirališkai įstriža kryptimi aplink cilindrinę konstrukcijų paviršių. Plieniniai kaminai su sraigtinėmis juostelėmis gali būti projektuojami su sąlyga, kad Skrutono skaičius Sc yra didesnis nei 8. Remiantis 20 paveikslu juostelių geometrija apibūdinama pagal juostelių skaičių $n_s = 3$; juostų žingsnį $h_s = 4,5b - 5b$; juostų aukštį $t = 0,10b - 0,12b$ ir skerspjūvio diametrą b [9]. Be to, sraigtinėmis juostelėmis nereikia dengti daugiau kaip 50 % konstrukcijos aukščio, kad būtų galima pakankamai sumažinti sūkurinio srauto sukeltus virpesius ir juos sustabdyti [22]. Užtenka, kad sraigtinės juostos tęstųsi l_s atkrapa, kuri yra ne trumpesnė kaip $0,3h - 0,5h$ konstrukcijos aukščio [9].



20 pav. Sraigčių juostelių geometrija, $n_s = 3$; $h_s = 4,5b - 5b$; $t = 0,10b - 0,12b$

Pirmasis pažangiausių įvairių aerodinaminių įtaisų apžvalgą pristatė Zdravkovičius [23], kuris analizavo jų panaudojimo galimybes švelninant sūkurinio srauto poveikius, įrodant trijų sraigčių juostelių efektyvumą. Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad sraigčių juostelių aukštis t turi didelę reikšmę sūkurinio srauto kontrolei. Dėl padidėjusių juostelių aukščio t sumažėja konstrukcijos nestabilumas, o viršijant tam tikrą aukštį sūkurinis srautas beveik sustabdomas. Tačiau parinktos aukštos juostelės taip pat ženkliai padidina aerodinaminio pasipriešinimo koeficientą. Taip pat buvo nustatyta, kad juostelės praranda efektyvumą, kai apvalaus skerspjūvio cilindras su juostelėmis pakliūva į gretimo skerspjūvio cilindro sūkurinį srautą [21].

T. Zhou ir kt. atliko vėjo tunelio eksperimentus [24], kurių metu fiksavo sūkurinio srauto reiškinis naudojant dūmų srauto vizualizacijos metodą apvaliam ir su sraigtinėmis juostelėmis apvaliam skerspjūvio cilindrams. 21 paveiksle galime aiškiai pamatyti, kad sūkurinis srautas smarkiai sumažėjo panaudojus sraigtes juosteles. T. Zhou ir kt. taip pat nustatė, kad panaudojus 3 sraigtes juosteles, kai juostų žingsnis $h_s = 10b$ ir juostų aukštis $t = 0,12b$, eliminuojamas sūkurinis srautas ir neleidžiama susidaryti sūkuriam paeiliui metamiems nuo konstrukcijos šonų. Tai apvaliam cilindriui gali sumažinti iki 98 % sūkurinio srauto sukeltų virpesių [24].



21 pav. Dūmų srauto vizualizacija skirtinguose matymo planuose palei
a) apvalų ir b) su sraigtinėmis juostelėmis apvalų skerspjuvio cilindą.

Šiame baigiamajame magistro projekte norėdami suprasti vėjo poveikių įtaką pieniniams kaminams. Ištirti ir palyginti vėjo sukeltus aerodinaminius ir sūkurinio srauto poveikius visam konstrukcijos aukščiui. Nustatyti aerodinaminių slopinimo priemonių, panaudojant sraigtes juosteles konstrukcijos reakciją. Pagal darniuosius Europos standartus [9] pasirinktoms 4 konstrukcinėms schemoms skaičiuojami:

1. Vėjo greitis ir greičio slėgis;
2. Aerodinaminiai poveikiai;
3. Sūkurinio srauto poveikiai.

Pirmiausia apskaičiuojamas vėjo greitis ir greičio slėgis pagal pasirinktą Lietuvos apkrovų rajoną ir vietovės kategoriją. Tarkime plieninis kaminas statomas Anykščiuose, pagal STR 2.05.04:2003 – II vėjo greičio rajonas ir pagrindinė vėjo greičio atskaitinė reikšmė yra $V_{b,0} = 24$ m/s [11]. Plieninį kaminą numatoma statyti miesto pakraštyje, o tai atitinka II vietovės kategoriją, kur yra žema augalija ir atskiros kliūtys (medžiai ir pastatai) nutolę viena nuo kitos per 20 kliūčių aukščių [9].

Vėliau apskaičiuojami aerodinaminiai poveikiai vėjo kryptimi, priklausantys nuo vėjo slėgio į paviršius w_e ir konstrukcinio koeficiento $c_s c_d$. Vėjo slėgis į paviršius w_e apima vidutinį ir trumpalaikius vėjo greičio svyravimus. O konstrukcinis koeficientas $c_s c_d$ apima atsitiktinį viršūninio vėjo slėgio į paviršius c_s ir kamino konstrukcijos dėl turbulencijos c_d virpesių reakciją.

Galiausiai apskaičiuojami sūkurinio srauto statmenai vėjo kryptčiai poveikiai, priklausantys nuo kritinio vėjo greičio $v_{crit,i}$ ir Skrutono Sc skaičiaus. Kritinis vėjo greitis $v_{crit,i}$ apibūdina vėjo greitį, kuriam esant sūkurinio srauto dažnis yra lygus kamino konstrukcijos laisvųjų lenkiamųjų ar

ovalėjimo virpesių dažniui. O Skrutono skaičius Sc apibūdina konstrukcijos virpesių imlumą, jautrumą, polinkį vibruoti.

2.1. Vėjo greitis ir greičio slėgio skaičiavimas pagal Eurokodą 1991-1-4

Vėjo greitis – tai vidutinio vėjo greičio ir turbulencijos suma. Jis yra nepriklausomas nuo laiko ir vietos, o kinta atsitiktinai. Vidutinio vėjo greičio ir turbulencijos intensyvumo projektinės vertės priklauso nuo paviršiaus reljefo, šiurkštumo, topografijos bei aukščio virš žemės lygio. Didžiausia vėjo greičio slėgio vertė apibrėžiama kaip viršūninio greičio slėgis, kuris apima vidutinius ir trumpalaikius greičio svyravimus [9].

Pagrindinis vėjo greitis

Pagrindinis vėjo greitis v_b , apibrėžtas kaip vėjo krypties ir metų laiko funkcija, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 24 \text{ m/s}; \quad (2.1)$$

čia:

$c_{dir} = 1$ – krypties koeficientas, taikoma įvairioms vėjo kryptims;

$c_{season} = 1$ – metų laiko koeficientas;

$v_{b,0} = 24 \text{ m/s}$ – pagrindinis vėjo greitis, kai kaminas statomas Anykščiuose – II apkrovų rajonas.

Vidutinis vėjo greitis

Vidutinis vėjo greitis $v_m(z)$ aukštyje z , priklausantis nuo vietovės šiurkštumo ir kalvotumo bei nuo pagrindinio vėjo greičio v_b , apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b; \quad (2.2)$$

4 lentelė. Vidutinio vėjo greičio $v_m(z)$ aukštyje z apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema						
Aukštyje $z = m$	6	12	18	24	30	36
$v_m(z) = \text{m/s}$	21,83	24,99	26,84	28,15	29,17	30,00

čia:

$c_r(z)$ – šiurkštumo koeficientas, taikomas įvairioms vėjo kryptims;

$c_0(z) = 1$ – kalvotumo koeficientas.

Vietovės šiurkštumas

Šiurkštumo koeficientu $c_r(z)$ aukštyje z įvertinamas vėjo kitimas vietovėje dėl aukščio virš žemės paviršiaus ir žemės paviršiaus šiurkštumo. Jis apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right); \text{ kai } z_{min} \leq z \leq z_{max}; \quad (2.3)$$

$$c_r(z) = c_r \cdot z_{min}; \text{ kai } z \leq z_{min}; \quad (2.4)$$

5 lentelė. Šiurkštumo koeficiento $c_r(z)$ aukštyje z apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema						
Aukštyje $z = m$	6	12	18	24	30	36
$c_r(z) =$	0,91	1,04	1,12	1,17	1,22	1,25

čia:

$z_0 = 0,05 m$ – šiurkščiojo ruožo ilgis, kai II vietovės kategorija;

k_r – vietovės koeficientas, priklausantis nuo šiurkščiojo ruožo ilgio z_0 , apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19; \quad (2.7)$$

čia:

$z_{0II} = 0,05 m$ – šiurkščiojo ruožo ilgis, kai II vietovės kategorija;

$z_{min} = 2 m$ – mažiausias aukštis, kai II vietovės kategorija;

$z_{max} = 200 m$.

Vėjo turbulencija

Vėjo turbulencijos intensyvumas $l_v(z)$ aukštyje z yra lygus standartiniam turbulencijos nuokrypiui, padalintam iš vidutinio vėjo greičio. Jis apskaičiuojamas pagal išraiškas:

$$l_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}; \text{ kai } z_{min} \leq z \leq z_{max}; \quad (2.6)$$

$$l_v(z) = l_v(z_{min}); \text{ kai } z \leq z_{min}; \quad (2.7)$$

6 lentelė. Turbulencijos intensyvumo $l_v(z)$ aukštyje z apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema						
Aukštyje $z = m$	6	12	18	24	30	36
$l_v(z) =$	0,209	0,182	0,170	0,162	0,156	0,152

čia:

$k_I = 1$ – turbulencijos koeficientas;

$c_0(z) = 1$ – kalvotumo koeficientas;

$z_0 = 0,05 m$ – šiurkščiojo ruožo ilgis, kai II vietovės kategorija.

Standartinis turbulencijos nuokrypis σ_v apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b \cdot k_I = 4,56 m/s; \quad (2.8)$$

Viršūninis greičio slėgis

Viršūninio greičio slėgis $q_p(z)$ aukštyje z , kuris apima vidutinius ir trumpalaikius greičio svyravimus, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z); \quad (2.9)$$

7 lentelė. Viršūninio greičio slėgio $q_p(z)$ aukštyje z apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema						
Aukštyje $z = m$	6	12	18	24	30	36
$q_p(z) = kN/m^2$	0,73	0,89	0,99	1,06	1,11	1,16

čia:

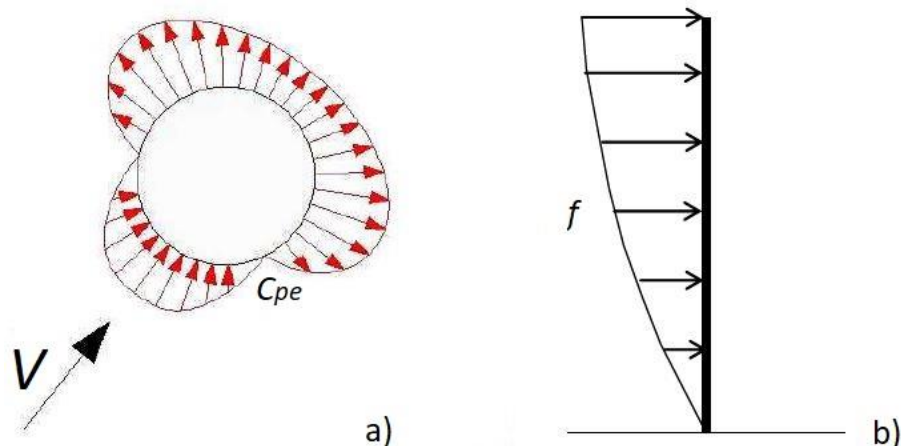
$$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3 \text{ – oro tankis.}$$

2.2. Aerodinaminių poveikių skaičiavimas pagal Eurokodą 1991-1-4

Vėjas aerodinamiškai veikia visą savilaikio kamino konstrukciją ir jos komponentus. Tokį poveikį lemia kamino skerspjūvio forma, aukštis ir orientacija vėjo krypties atžvilgiu. Taip pat aerodinaminis poveikis priklauso nuo vidutinio vėjo greičio ir turbulencijos, Reinoldso skaičiaus ir su juo susijusio kamino kevalo sienelės paviršiaus šiurkštumo [8].

Aerodinaminiai poveikiai plieniniams kaminams gali būti išreiškiami pagal skirtingus skaičiavimo modelius, remiantis atliktais vėjo greičio ir greičio slėgio skaičiavimais. 22 paveiksle pateikiami galimi aerodinaminiai poveikių modeliai, kurie išreiškiami:

- per netolygiai pasiskirsčiusius radialinius slėgio jėgas kiekviename konstrukcijos paviršiuje;
- per vienetinio ilgio jėgas ties konstrukcijos vidurio linija.

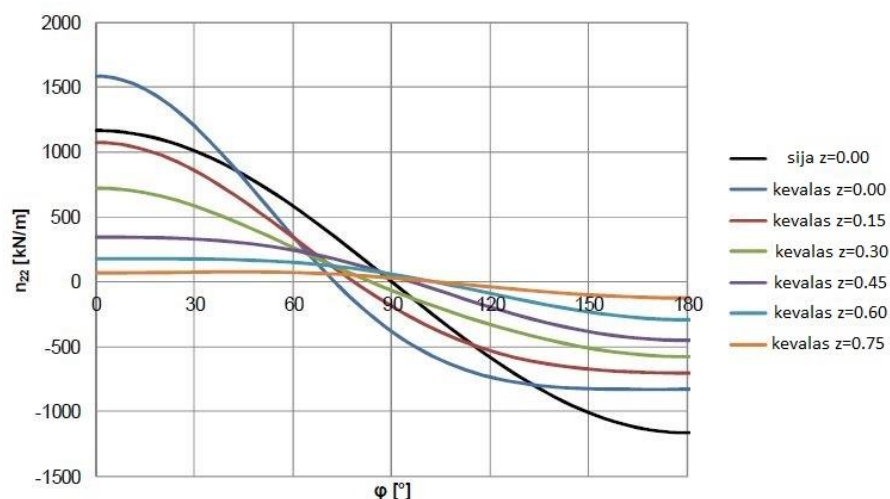


22 pav. Aerodinaminiai poveikių modeliai: a) per radialinius slėgio jėgas ir b) per vienetinio ilgio jėgas

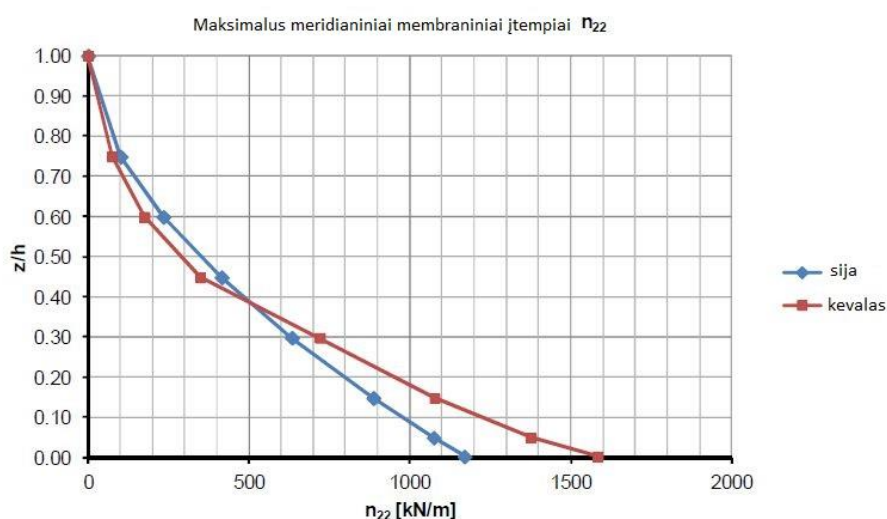
Renkantis, kuris skaičiavimo modelio būdas yra tinkamas, remiamasi Hans-Jurgen Nieman ir kitų [25] atlikta kaminų virpesių analize veikiant vėjo poveikiams. Analizėje nagrinėjamas kamino konstrukcijos elgesys naudojant vienmatį sijos modelį ir dvimatį kevalo modelį. Vienmačiame sijos modelyje skaičiuodami vėjo poveikius per išilgines jėgas, kai yra didelis konstrukcijos lieknumas ir didelis žiedo standumas, įtempiai pasiskirsto konusiniu perimetru. Dvimačiame kevalo modelyje

skaičiuodami vėjo poveikius per radialinius slėgio poveikius, slėgis pasiskirsto netolygiai per visą kamino paviršių. Esant plonomis kevalo sienelėms ir mažam kraštinių santykiui, konstrukcija elgiasi kaip kevalinė konstrukcija [25].

23 ir 24 paveiksluose pateikiama Hans-Jürgen Nieman ir kitų [25] atlikta kamino konstrukcijos įtempių pasiskirstymo analizė, naudojant vienmatį sijos modelį ir dvimatį kevalo modelį. 23 paveiksle galime aiškiai matyti, kad esant kraštinių santykiui $z = 0,00$, membraninių įtempių pasiskirstymas skiriasi. 24 paveiksle maksimalus membraninių įtempių pasiskirstymas, lyginant su vienmačiu sijos modeliu, gali būti didesnis daugiau kaip 30 %. Įtempių pasiskirstymas yra ypač didelis apačioje ir tęsiasi per gana didelį kamino konstrukcijos aukštį [25].



23 pav. Vienmačio sijos ir dvimačio kevalo modelio meridianinių membraninių įtempių pasiskirstymas pagal kampą φ° , kai kraštinių santykis $z = 0,00$



24 pav. Vienmačio sijos ir dvimačio kevalo modelio meridianinių membraninių įtempių pasiskirstymas pagal aukštį z/h

Atsižvelgiant į bendrą kamino kraštinių santykį, kevalo sienelių storį ir spindulio santykį, skerspjūvių ovalėjimas gali tapti reikšmingas. Naudojant vienmatį sijos modelį, jis nėra toks realistiškas ir saugus, o tempimo įtempiai priekinėje pusėje tampa pagrindiniais įtempiais.

Priklausomai nuo kamino kraštinių santykio, jie skiriasi net 30% atitinkamų įtempių [25]. Šiame baigiamajame magistro projekte pasirenkama naudoti dvimatį kevalo modelį, o aerodinaminiai poveikiai skaičiuojami per radialinius slėgio poveikius.

2.2.1. Išorinių slėgio koeficientų skaičiavimas

Didžiausias aerodinaminis poveikis, kurį sukelia vėjo poveikiai konstrukcijos paviršiams, yra viršslėgis ir siurbimas. Vėjo slėgis, veikiantis plieninio kamino išorinius paviršius, yra apibrėžiamas išorinio slėgio koeficientais c_{pe} .

Išorinio slėgio koeficientai c_{pe} stipriai keičiasi ties skerspjūviu, kuriame yra sumontuotos sraigtinės juostelės. Jos ženkliai didina kamino konstrukcijos aerodinaminį pasipriešinimą, kai juostų aukštis yra iki 0,2 kamino skersmens. Šiuo atveju sraigčių juostelių aukštis lygus $t = 150$ mm, o tai tenkina šią sąlygą. Todėl išorinio slėgio koeficientai $c_{p,0}$ konstrukcinėms schemoms II ir IV skaičiuojami atskirai. Skaičiuojami ties aukščiu, kur sraigtinės juostelės yra sumontuotos, o tai atitinka kamino aukštį nuo 18 m iki 30 m ir nuo 24 m iki 36 m.

Reinoldso skaičius Re aukštyje z_e , apibūdinantis skerspjūvių išorinio slėgio koeficientus, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$Re = \frac{b \cdot v(z_e)}{v}; \quad (2.10)$$

8 lentelė. Reinoldso skaičiaus Re aukštyje z_e apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema						
Aukštyje $z_e = m$	6	12	18	24	30	36
$Re =$	3,20E+06	3,52E+06	3,71E+06	3,84E+06	3,94E+06	4,02E+06

čia:

b – kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m);

$v = 15 \cdot 10^{-6} m^2/s$ – oro kinematinis klampis;

$v(z_e)$ – viršūninio vėjo greitis (m/s) aukštyje z_e , apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q_p}{\rho}}; \quad (2.11)$$

9 lentelė. Viršūninio vėjo greičio $v(z_e)$ aukštyje z_e apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema						
Aukštyje $z = m$	6	12	18	24	30	36
$v(z_e) = m/s$	34,26	37,71	39,71	41,12	42,21	43,10

Apvaliųjų cilindrių išorinio slėgio koeficientai c_{pe} kai kampas α , apskaičiuojami pagal išraišką:

$$c_{pe} = c_{p,0} \cdot \Psi_{\lambda \alpha}; \quad (2.12)$$

10 lentelė. Išorinio slėgio koeficientų c_{pe} , kai kampas α , apskaičiuotos reikšmės

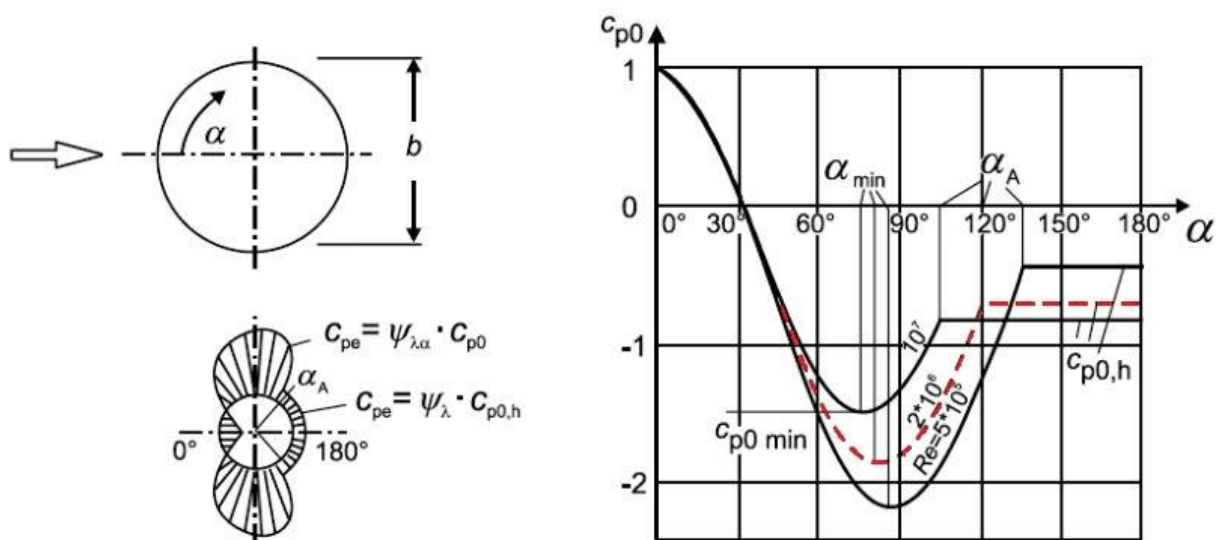
I ir III konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 0 – 30 ir nuo 0 – 36 m										
Kai kampas $\alpha^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{pe} =$	1	0,78	0,52	0,04	-0,44	-0,96	-1,36	-1,68	-1,80	-1,75
Kai kampas $\alpha^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{pe} =$		-1,49	-1,02	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58
II ir IV konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 0 – 18 ir nuo 0 – 24 m										
Kai kampas $\alpha^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{pe} =$	1	0,78	0,52	0,04	-0,44	-0,96	-1,36	-1,68	-1,80	-1,75
Kai kampas $\alpha^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{pe} =$		-1,49	-1,02	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58
II ir IV konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 18 – 30 ir nuo 24 – 36 m										
Kai kampas $\alpha^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{pe} =$	1,60	1,25	0,83	0,06	-0,70	-1,53	-2,17	-2,68	-2,87	-2,80
Kai kampas $\alpha^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{pe} =$		-2,37	-1,62	-0,93	-0,93	-0,93	-0,93	-0,93	-0,93	-0,93

čia:

$c_{p,0}$ – išorinio slėgio koeficientas be laisvojo galo tėkmės;

$\Psi_{\lambda\alpha}$ – galinio efekto koeficientas.

Išorinių slėgio koeficientai $c_{p,0}$ apibrėžiami kaip kampo α funkcija įvairiems Reinoldso skaičiams ir nustatomi pagal 25 paveikslą:



25 pav. Apvaliųjų cilindrų be galinių efektų slėgio pasiskirstymai esant skirtingiems Reinoldso skaičiams

Išorinio slėgio koeficientai $c_{p,0}$ ties sraigtinėmis juostelėmis proporcingai perskaičiuojami, nes didėja aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas visam skerspjūviui iki 1,2. Pagal 23 paveikslo nustatytą koeficientų vidurkį, kuris yra lygus $c_{p,0} = 0,75$, priimamas koeficientų vidurkis $c_{p,0} = 1,2$.

11 lentelė. Išorinio slėgio koeficientų $c_{p,0}$ bei galinių efektų, kai kampas a , nustatytos reikšmės

I ir III konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 6 – 30 ir nuo 6 – 36 m										
Kai kampas $a^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{p,0} =$	1	0,78	0,52	0,04	-0,44	-0,96	-1,36	-1,68	-1,80	-1,78
Kai kampas $a^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{p,0} =$		-1,58	-1,16	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73
II ir IV konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 6 – 18 ir nuo 6 – 24 m										
Kai kampas $a^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{p,0} =$	1	0,78	0,52	0,04	-0,44	-0,96	-1,36	-1,68	-1,80	-1,78
Kai kampas $a^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{p,0} =$		-1,58	-1,16	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73	-0,73
II ir IV konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 18 – 30 ir nuo 24 – 36 m										
Kai kampas $a^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{p,0} =$	1,60	1,00	0,83	0,06	-0,70	-1,53	-2,17	-2,68	-2,87	-2,84
Kai kampas $a^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{p,0} =$		-2,52	-1,85	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17	-1,17

čia:

$a_{min} \approx 80^\circ$ – mažiausiojo slėgio padėtis;

$c_{p0,min} \approx -1,80^\circ$ – mažiausiojo slėgio koeficiento reikšmė;

$a_A \approx 120^\circ$ – tėkmės skiriamoji padėtis;

$c_{p0,h} \approx -0,73$ – pagrindinis slėgio koeficientas.

Galinio efekto koeficientai $\Psi_{\lambda a}$ nustatomi pagal išraiškas:

$$\Psi_{\lambda a} = 1; \text{ kai } 0^\circ \leq a \leq a_{min} = 80^\circ; \quad (2.13)$$

$$\Psi_{\lambda a} = \Psi_\lambda + (1 - \Psi_\lambda) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{a - a_{min}}{a_A - a_{min}}\right)\right); \text{ kai } a_{min} = 80^\circ \leq a \leq a_A = 120^\circ; \quad (2.14)$$

$$\Psi_{\lambda a} = \Psi_\lambda = 0,8; \text{ kai } a_A = 120^\circ \leq a \leq 180^\circ; \quad (2.15)$$

12 lentelė. Galinio efekto koeficientų $\Psi_{\lambda a}$ nustatytos reikšmės

I ir III konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 6 – 30 ir nuo 6 – 36 m										
Kai kampas $a^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\Psi_{\lambda a} =$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
Kai kampas $a^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{p,0} =$		0,94	0,88	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

II ir IV konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 6 – 18 ir nuo 6 – 24 m										
Kai kampas $\alpha^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{p,0} =$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
Kai kampas $\alpha^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{p,0} =$		0,94	0,88	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
II ir IV konstrukcinė schema, kai aukštis nuo 18 – 30 ir nuo 24 – 36 m										
Kai kampas $\alpha^\circ =$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$c_{p,0} =$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98
Kai kampas $\alpha^\circ =$		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$c_{p,0} =$		0,94	0,88	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

čia:

Ψ_λ – galinio efekto koeficientai, priklausantys nuo efektyviojo konstrukcijos liaunumo λ , nustatomo pagal išraiškas taikant tiesinę interpoliaciją:

$$\text{kai } l \geq 50 \text{ m; tai } \lambda = 0,7 \cdot l/b; \quad (2.16)$$

$$\text{kai } l \leq 15 \text{ m; tai } \lambda = 0,7 \cdot l/b; \quad (2.17)$$

13 lentelė. Galinio efekto koeficientų Ψ_λ nustatytos reikšmės

I ir II konstrukcinė schema				
Kai aukštis $l = 30\text{m}$	$l \geq 50 \text{ m}$	$l \leq 15$	Tai liaunumas $\lambda =$	18,67
$\lambda =$	15,00	21,43	$\Psi_\lambda =$	0,8
III ir IV konstrukcinė schema				
Kai aukštis $l = 36\text{m}$	$l \geq 50 \text{ m}$	$l \leq 15$	Tai liaunumas $\lambda =$	21,09
$\lambda =$	18,00	25,71	$\Psi_\lambda =$	0,8

čia:

l – kamino konstrukcijos aukštis (m);

b – kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m).

2.2.2. Konstrukcinių koeficientų skaičiavimas

Aukštos ir liaunos konstrukcijos, tokios kaip kaminai, paprastai patiria didesnę dinaminę reakciją. Konstrukcinis koeficientas $c_c c_d$ dažniausiai yra didesnis nei 1. Jis apibūdina atsitiktinę viršūninio vėjo slėgio į paviršių c_c ir konstrukcijos dėl turbulencijos c_d virpesių reakciją.

Vėjo turbulencija

Turbulencinis ilgis $L(z)$ aukštyje z_s , apibūdinantis vidutinį natūralių vėjo gūsių dydį, apskaičiuojamas pagal išraiškas:

$$L(z_s) = L_t \cdot \left(\frac{z_s}{z_t}\right)^a; \text{ kai } z \geq z_{min}; \quad (2.18)$$

$$L(z_s) = L(z_{min}); \text{ kai } z < z_{min}; \quad (2.19)$$

14 lentelė. Turbulencinio ilgio $L(z)$ aukštyje z_s apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$L(z_s) = m$	85,72	85,72	95,16	95,16

čia:

$L_t = 300 \text{ m}$ – atskaitos ilgio reikšmė;

$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{min}$ – atskaitos aukštis (žr. 1 priedą) (m);

$z_t = 200 \text{ m}$ – atskaitos aukštis;

$a = 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$ (m).

Vėjo skirstinys dažnių atžvilgiu išreiškiamas bedimensinė galios spektro tankio funkcija $S_L(z, n)$, nustatomas pagal išraišką:

$$S_L(z, n) = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z, n))^{5/3}}; \quad (2.20)$$

15 lentelė. Bedimensinės galios spektro tankio funkcijos $S_L(z, n)$ nustatytos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$S_L(z, n) =$	0,047	0,048	0,057	0,057

čia:

$f_L(z, n)$ – bedimensinis dažnis, priklausantis nuo konstrukcijos laisvųjų virpesių dažnio, vidutinio vėjo greičio ir turbulencijos ilgio, nustatomas pagal išraišką:

$$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z_s)}{v_m(z_s)}; \quad (2.21)$$

16 lentelė. Bedimensinio dažnio $f_L(z, n)$ nustatytos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$f_L(z, n) =$	4,97	4,87	3,70	3,64

čia:

n – laisvųjų virpesių dažnis (žr. 1 priedą) (Hz);

$L(z_s)$ – turbulencijos ilgis atskaitos taške z_s (m);

$v_m(z)$ – vidutinis vėjo greitis atskaitos taške z_s (m/s) (žr. 1 priedą).

Konstruktinis koeficientas

Kvazistatinės reakcijos koeficientas B^2 , kuriuo atsižvelgiama į slėgio konstrukcijos paviršių visiškios koreliacijos trūkumą, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$B^2 = \frac{1}{1+0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0,63}}; \quad (2.22)$$

Kvazistatinės reakcijos koeficientą B^2 yra saugiau taikyti, kai yra lygus 1, tai $B^2 = 1$ priimu visoms konstrukcinėms schemoms.

17 lentelė. Kvazistatinės reakcijos koeficientų B^2 apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$B^2 =$	0,68=1	0,68=1	0,67=1	0,67=1

čia:

b – kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m);

h – kamino konstrukcijos aukštis (m);

$L(z_s)$ – turbulencijos ilgis atskaitos taške z_s (m).

Viršūninis koeficientas k_p , apibrėžiantis kintamosios dalies didžiausios reakcijos reikšmes ir standartinio nuokrypio santykį, nustatomas pagal išraišką:

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \geq 3; \quad (2.23)$$

18 lentelė. Viršūninių koeficientų k_p nustatytos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$k_p =$	3,67	3,67	3,61	3,61

čia:

v – kylančios sankirtos dažnis;

$T = 600 s$ – vidutinio vėjo greičio vidurkis.

Kylančios sankirtos dažnis v nustatomas pagal išraišką:

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} \geq 0,08 \text{ Hz}; \quad (2.24)$$

19 lentelė. Kylančios sankirtos dažnio v nustatytos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$v = \text{Hz}$	0,76 > 0,08	0,76 > 0,08	0,61 > 0,08	0,60 > 0,08

čia:

$n_{1,x}$ – laisvųjų virpesių dažnis (žr. 1 priedą) (Hz).

Rezonansinės reakcijos koeficientas R^2 , kuriuo atsižvelgiama į konstrukcijos virpesių režimo rezonanso turbulentiškumą, nustatomas pagal išraišką:

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b); \quad (2,25)$$

20 lentelė. Rezonansinės reakcijos koeficientų R^2 nustatytos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$R^2 =$	0,31	0,33	0,46	0,48

čia:

δ – visuminis logaritminis slopinimo dekrementas (žr. 1 priedą);

S_L – bedimensinė galios spektro tankio funkcija;

$R_h R_b$ – aerodinaminio laidumo (perdavimo) funkcijos.

Aerodinaminio laidumo (perdavimo) funkcijos R_h ir R_b , taikomos pagrindiniam virpesių režimui, nustatomos pagal išraiškas:

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_h}); R_h = 1; \text{ kai } \eta_h = 0; \quad (2,26)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2 \cdot \eta_b}); R_b = 1; \text{ kai } \eta_b = 0; \quad (2,27)$$

21 lentelė. Aerodinaminio laidumo (perdavimo) funkcijų R_h ir R_b nustatytos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$R_h =$	0,12	0,12	0,14	0,15
$R_b =$	0,79	0,79	0,85	0,85

čia:

$\eta_h \eta_b$ – kintamieji apskaičiuojami pagal išraiškas:

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}); \quad (2,28)$$

$$\eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}); \quad (2,29)$$

22 lentelė. Kintamųjų η_h ir η_b apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$\eta_h =$	8,00	7,84	6,45	6,33

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$\eta_b =$	0,37	0,37	0,25	0,25

Konstrukcinis koeficientas $c_c c_d$, apibūdinantis atsitiktinį viršūninio vėjo slėgio į paviršių c_c ir konstrukcijos dėl turbulencijos c_d virpesių reakciją, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$c_s c_d = \frac{1+2 \cdot k_p \cdot l_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2+R^2}}{1+7 \cdot l_v(z_s)}; \quad (2,30)$$

23 lentelė. Konstrukcinių koeficientų $c_s c_d$ apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$c_s c_d =$	1,11	1,11	1,13	1,14

čia:

$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{min}$ – atskaitos aukštis (žr. 1 priedą) (m);

k_p – viršūninis koeficientas;

l_v – turbulencijos intensyvumas;

B^2 – kvazistatinės reakcijos koeficientas;

R^2 – rezonancinės reakcijos koeficientas.

2.2.3. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių skaičiavimas

Ekvivalentiniai aerodinaminiai poveikiai apibrėžiami kaip statiniai poveikiai, kuriuos statiškai pritaikius kamino konstrukcijai sukeliama poslinkiai ir įtempiai, lygūs maksimalioms vertėms, kurias sukelia tikrieji vėjo poveikiai.

Kamino konstrukciją veikiantys ekvivalentiniai aerodinaminiai poveikiai $F_{w,e}$ apskaičiuojami pagal išraišką:

$$F_{w,e} = c_s c_d \cdot (w_e = (q_p(z_e) \cdot c_{pe})); \quad (2,31)$$

čia:

$c_s c_d$ – konstrukcinis koeficientas;

w_e – vėjo slėgis į paviršius (kN/m^2);

$q_p(z_e)$ – viršūninis greičio slėgis (kN/m^2);

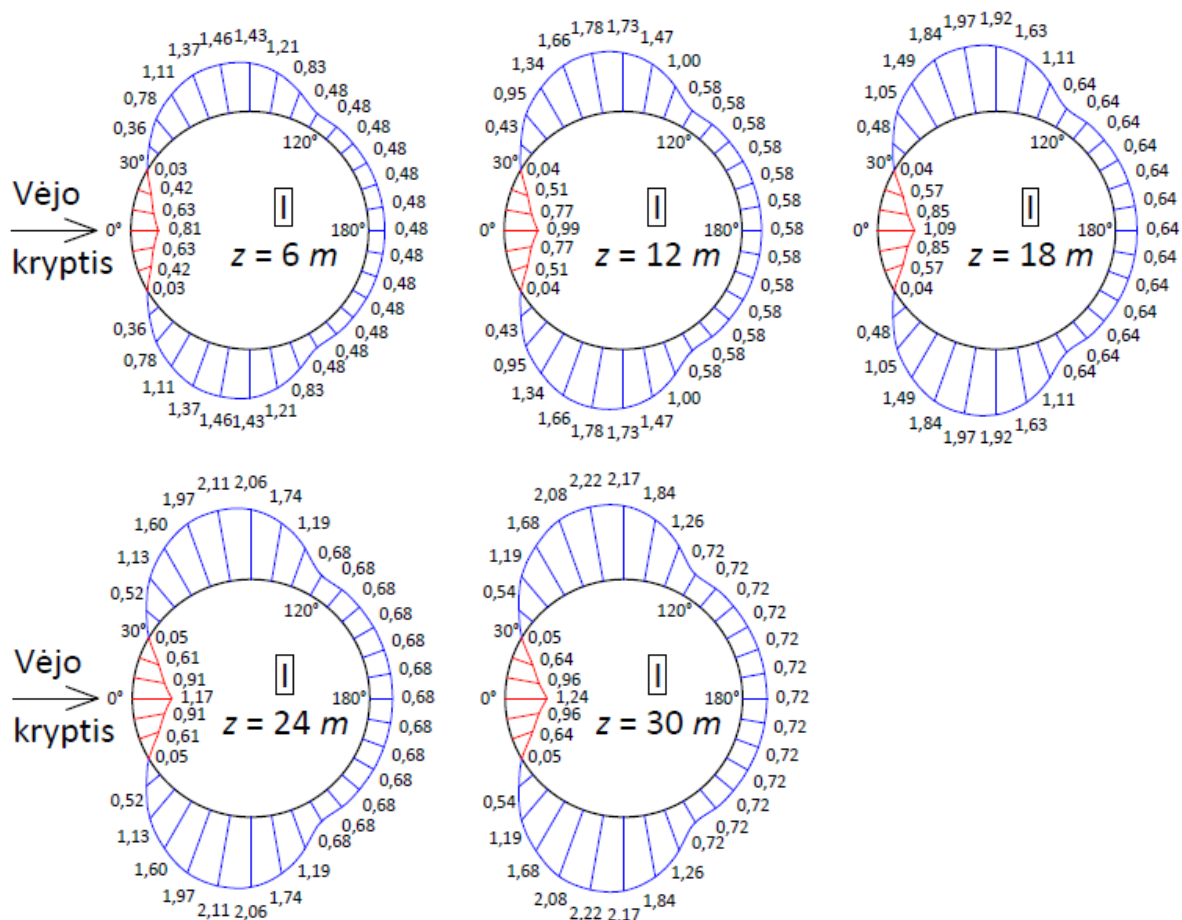
c_{pe} – išorinio slėgio koeficientai.

24 lentelė. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių $F_{w,e}$ apskaičiuotos reikšmės I konstrukcinei schemai

I konstrukcinė schema, kai aukštis 6 m										
Aukštyje $z = 6\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	0,81	0,63	0,42	0,03	-0,36	-0,78	-1,11	-1,37	-1,46	-1,43
Aukštyje $z = 6\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	180
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$		-1,21	-0,83	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48
I konstrukcinė schema, kai aukštis 12 m										
Aukštyje $z = 12\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	0,99	0,77	0,51	0,04	-0,43	-0,95	-1,34	-1,66	-1,78	-1,73
Aukštyje $z = 12\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	180
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$		-1,47	-1,00	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58
I konstrukcinė schema, kai aukštis 18 m										
Aukštyje $z = 18\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	1,09	0,85	0,57	0,04	-0,48	-1,05	-1,49	-1,84	-1,97	-1,92
Aukštyje $z = 18\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	180
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$		-1,63	-1,11	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64
I konstrukcinė schema, kai aukštis 24 m										
Aukštyje $z = 24\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	1,17	0,91	0,61	0,05	-0,52	-1,13	-1,60	-1,97	-2,11	-2,06
Aukštyje $z = 24\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	180
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$		-1,74	-1,19	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68
I konstrukcinė schema, kai aukštis 30 m										
Aukštyje $z = 30\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	1,24	0,96	0,64	0,05	-0,54	-1,19	-1,68	-2,08	-2,22	-2,17
Aukštyje $z = 30\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	180
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$		-1,84	-1,26	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72	-0,72

Norėdami pamatyti aerodinaminių poveikių įtaką I-ajai konstrukcinei schemai, pagal 24 lentelės apskaičiuotus duomenis braižomi poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose ir pateikiami 26 paveiksle. Žiūrėdami į skerspjūvius skirtinguose aukščiuose akivaizdžiai matome, kad kamino paviršiai tiesiogiai veikiami artėjančio oro srauto, nuo 0° iki 30° susidaro viršslėgis $F_{w,e} = 0,81 - 1,24 \text{ kN/m}^2$ (išryškintas raudona spalva). O kamino šoniniai paviršiai veikiami oro srauto siurbimo, susidaro neigiamas slėgis (išryškintas mėlyna spalva). Matome, kad ypač didelis neigiamas slėgis $F_{w,e} = 1,46 - 2,22 \text{ kN/m}^2$ susidaro šoniniuose paviršiuose nuo 30° iki 120° , o ties 120° , kur oro srautas yra atskiriamas nuo kamino paviršiaus, slėgis stipriai sumažėja iki $F_{w,e} = 0,48 - 0,72 \text{ kN/m}^2$ ir išlieka pastovus iki 180° .

Taip pat matome, kad kas 6 metrus nuo žemės paviršiaus iki 30 m, aerodinaminiai poveikiai skerspjūviuose procentaliai didėja, pradedant nuo 20,83 % ir baigiant 5,88 %. O tai patvirtina teoriją, kad didėjant aukščiui vėjas vis mažiau veikiamas žemės trinties jėgos.



26 pav. I konstrukcinės schemos aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

25 lentelė. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių $F_{w,e}$ apskaičiuotos reikšmės II konstrukcinei schemai

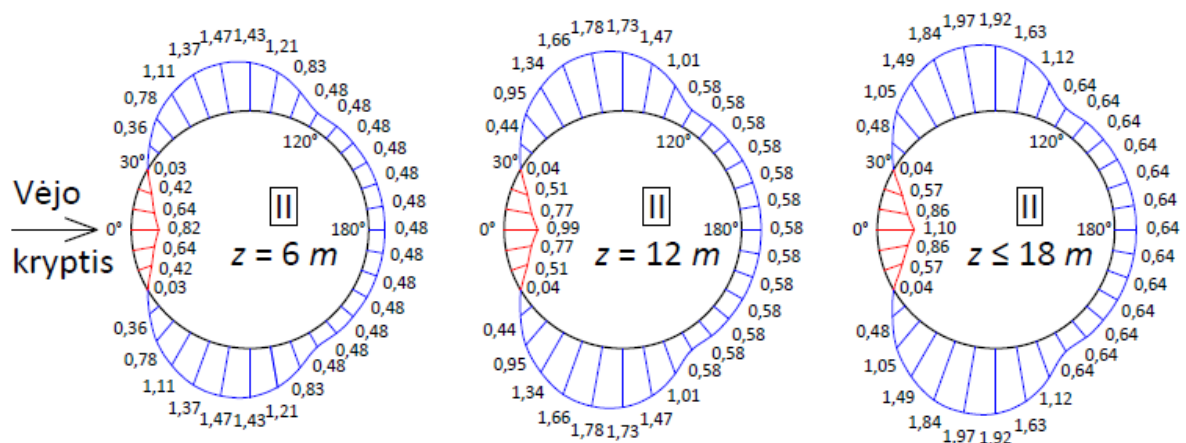
II konstrukcinė schema, kai aukštis 6 m										
Aukštyje $z = 6 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	0,82	0,64	0,42	0,03	-0,36	-0,78	-1,11	-1,37	-1,47	-1,43
Aukštyje $z = 6 m$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,21	-0,83	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48	-0,48
II konstrukcinė schema, kai aukštis 12 m										
Aukštyje $z = 12 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	0,99	0,77	0,51	0,04	-0,44	-0,95	-1,34	-1,66	-1,78	-1,73
Aukštyje $z = 12 m$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,47	-1,01	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58	-0,58
II konstrukcinė schema, kai aukštis $\leq 18 m$										
Aukštyje $z \leq 18 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,10	0,86	0,57	0,04	-0,48	-1,05	-1,49	-1,84	-1,97	-1,92
Aukštyje $z \leq 18 m$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,63	-1,12	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64	-0,64
II konstrukcinė schema, kai aukštis $\geq 18 m$										
Aukštyje $z \geq 18 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,75	1,37	0,91	0,07	-0,77	-1,68	-2,38	-2,94	-3,15	-3,07

II konstrukcinė schema, kai aukštis ≥ 18 m										
Aukštyje $z \geq 18$ m		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$F_{w,e} = kN/m^2$		-2,60	-1,78	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02	-1,02
II konstrukcinė schema, kai aukštis 24 m										
Aukštyje $z = 24$ m	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,88	1,46	0,98	0,08	-0,83	-1,80	-2,55	-3,15	-3,38	-3,29
Aukštyje $z = 24$ m		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$F_{w,e} = kN/m^2$		-2,79	-1,91	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10	-1,10
II konstrukcinė schema, kai aukštis 30 m										
Aukštyje $z = 30$ m	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,98	1,54	1,03	0,08	-0,87	-1,90	-2,69	-3,32	-3,56	-3,47
Aukštyje $z = 30$ m		100	110	120	130	140	150	160	170	180
$F_{w,e} = kN/m^2$		-2,94	-2,01	-1,16	-1,16	-1,16	-1,16	-1,16	-1,16	-1,16

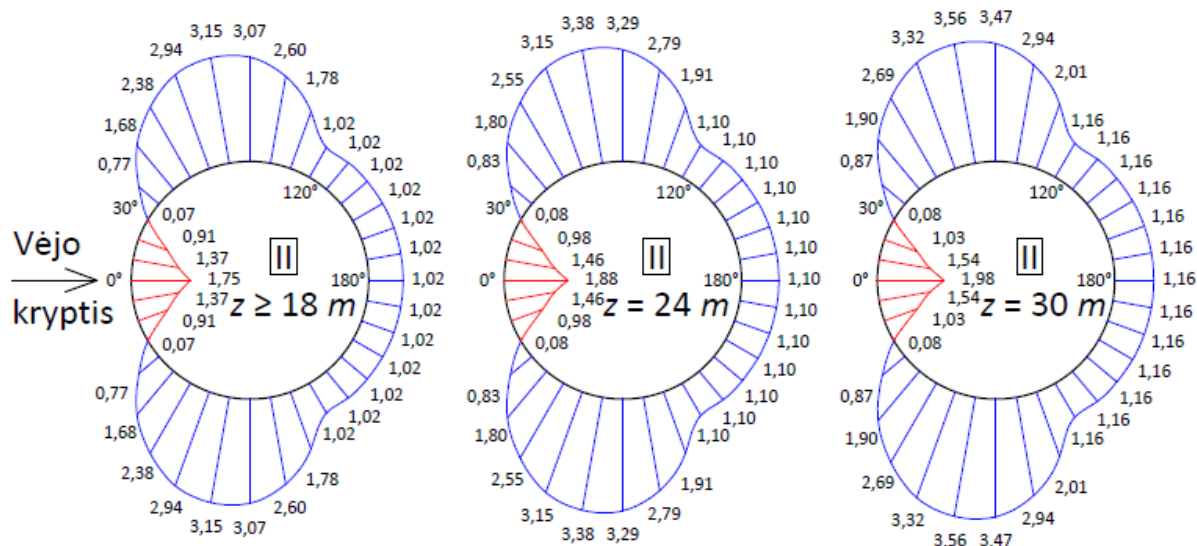
Norėdami pamatyti aerodinaminių poveikių įtaką II-ajai konstrukcinei schemai, pagal 25 lentelės apskaičiuotus duomenis braižomi poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose ir pateikiami 27 paveiksle. Žiūrėdami į skerspjūvius skirtinguose aukščiuose akivaizdžiai matome, kad kamino paviršiai tiesiogiai veikiami artėjančio oro srauto, nuo 0° iki 30° susidaro viršslėgis $F_{w,e} = 0,82 - 1,98$ kN/m² (išryškintas raudona spalva). O kamino šoniniai paviršiai veikiami oro srauto siurbimo, susidaro neigiamas slėgis (išryškintas mėlyna spalva). Matome, kad ypač didelis neigiamas slėgis $F_{w,e} = 1,47 - 3,56$ kN/m² susidaro šoniniuose paviršiuose nuo 30° iki 120° , o ties 120° , kur oro srautas yra atskiriamas nuo kamino paviršiaus, slėgis stipriai sumažėja iki $F_{w,e} = 0,48 - 1,16$ kN/m² ir išlieka pastovus iki 180° .

Pastebime, kad esant aukščiui nuo 18 m aerodinaminiai poveikiai skerspjūviuose staigiai išauga net iki 59,38 %. Tai lemia sraigtnių juostelių aukštis $t = 150$ cm, ilgis $l_s = 12$ m bei skerspjūvių padidėjęs aerodinaminis pasipriešinimas vėjui.

Taip pat matome, kad kas 6 metrus nuo žemės paviršiaus iki 18 m, ir nuo 18 m iki 30 m, aerodinaminiai poveikiai skerspjūviuose procentaliai didėja, pradedant nuo 20,83 % ir baigiant 5,45 %. O tai patvirtina teoriją, kad didėjant aukščiui vėjas vis mažiau veikiamas žemės trinties jėgos.



27 pav. II konstrukcinės schemos aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose



27 pav. II konstrukcinės schemos aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

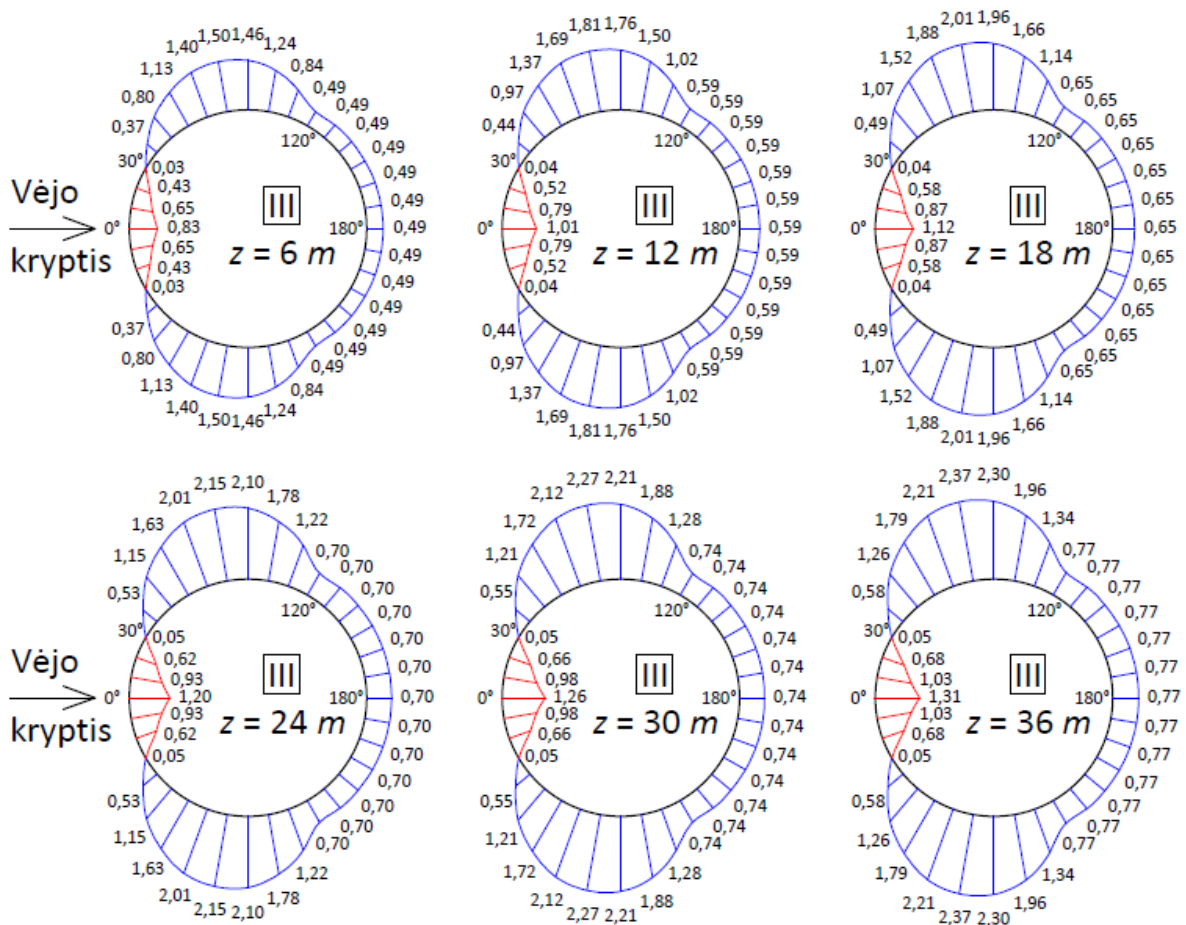
26 lentelė. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių $F_{w,e}$ apskaičiuotos reikšmės III konstrukcinei schemai

III konstrukcinė schema, kai aukštis 6 m										
Aukštyje $z = 6 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	0,83	0,65	0,43	0,03	-0,37	-0,80	-1,13	-1,40	-1,50	-1,46
Aukštyje $z = 6 m$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,24	-0,84	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49
III konstrukcinė schema, kai aukštis 12 m										
Aukštyje $z = 12 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,01	0,79	0,52	0,04	-0,44	-0,97	-1,37	-1,69	-1,81	-1,76
Aukštyje $z = 12 m$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,50	-1,02	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59
III konstrukcinė schema, kai aukštis 18 m										
Aukštyje $z = 18 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,12	0,87	0,58	0,04	-0,49	-1,07	-1,52	-1,88	-2,01	-1,96
Aukštyje $z = 18 m$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,66	-1,14	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65
III konstrukcinė schema, kai aukštis 24 m										
Aukštyje $z = 24 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,20	0,93	0,62	0,05	-0,53	-1,15	-1,63	-2,01	-2,15	-2,10
Aukštyje $z = 24 m$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,78	-1,22	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70
III konstrukcinė schema, kai aukštis 30 m										
Aukštyje $z = 30 m$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,26	0,98	0,66	0,05	-0,55	-1,21	-1,72	-2,12	-2,27	-2,21
Aukštyje $z = 30 m$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,88	-1,28	-0,74	-0,74	-0,74	-0,74	-0,74	-0,74	-0,74

III konstrukcinė schema, kai aukštis 36 m										
Aukštyje $z = 36\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	1,31	1,03	0,68	0,05	-0,58	-1,26	-1,79	-2,21	-2,37	-2,30
Aukštyje $z = 36\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$		-1,96	-1,34	-0,77	-0,77	-0,77	-0,77	-0,77	-0,77	-0,77

Norėdami pamatyti aerodinaminių poveikių įtaką III-ajai konstrukcinei schemai, pagal 26 lentelės apskaičiuotus duomenis braižomi poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose ir pateikiami 28 paveiksle. Žiūrėdami į skerspjūvius skirtinguose aukščiuose akivaizdžiai matome, kad kamino paviršiai tiesiogiai veikiami artėjančio oro srauto, nuo 0° iki 30° susidaro viršslėgis $F_{w,e} = 0,83 - 1,31 \text{ kN/m}^2$ (išryškintas raudona spalva). O kamino šoniniai paviršiai veikiami oro srauto siurbimo, susidaro neigiamas slėgis (išryškintas mėlyna spalva). Matome, kad ypač didelis neigiamas slėgis $F_{w,e} = 1,50 - 2,37 \text{ kN/m}^2$ susidaro šoniniuose paviršiuose nuo 30° iki 120° , o ties 120° , kur oro srautas yra atskiriamas nuo kamino paviršiaus, slėgis stipriai sumažėja iki $F_{w,e} = 0,49 - 0,77 \text{ kN/m}^2$ ir išlieka pastovus iki 180° .

Taip pat matome, kad kas 6 metrus nuo žemės paviršiaus iki 36 m, aerodinaminiai poveikiai skerspjūviuose procentaliai didėja, pradedant nuo 20,41 % ir baigiant 4,05 %. O tai patvirtina teoriją, kad didėjant aukščiui vėjas vis mažiau veikiamas žemės trinties jėgos.



28 pav. III konstrukcinės schemas aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

27 lentelė. Ekvivalentinių aerodinaminių poveikių $F_{w,e}$ apskaičiuotos reikšmės IV konstrukcinei schemai

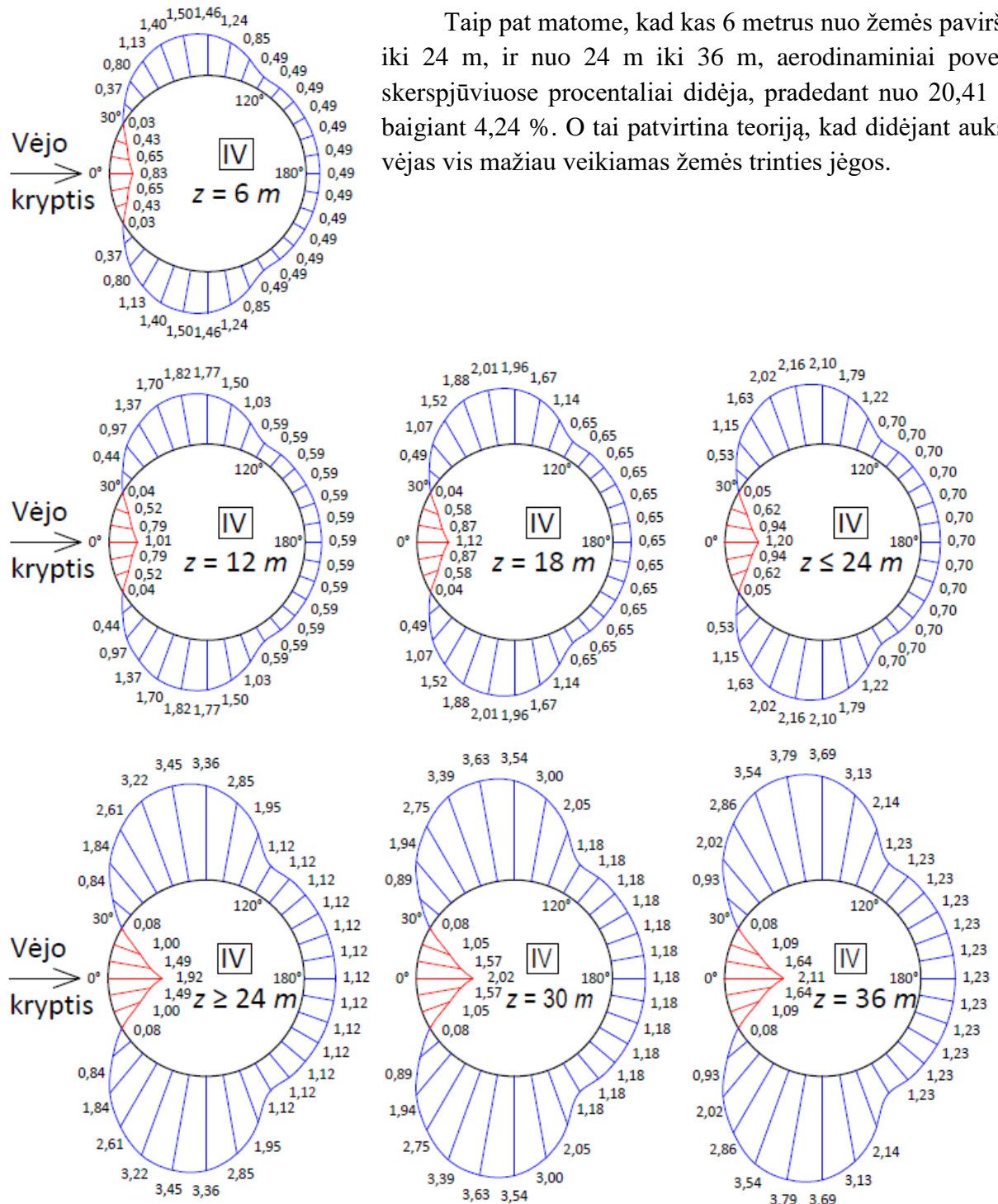
III konstrukcinė schema, kai aukštis 6 m										
Aukštyje $z = 6\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	0,83	0,65	0,43	0,03	-0,37	-0,80	-1,13	-1,40	-1,50	-1,46
Aukštyje $z = 6\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,24	-0,85	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49	-0,49
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 12 m										
Aukštyje $z = 12\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,01	0,79	0,52	0,04	-0,44	-0,97	-1,37	-1,70	-1,82	-1,77
Aukštyje $z = 12\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,50	-1,03	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 18 m										
Aukštyje $z = 18\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,12	0,87	0,58	0,04	-0,49	-1,07	-1,52	-1,88	-2,01	-1,96
Aukštyje $z = 18\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,67	-1,14	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65	-0,65
IV konstrukcinė schema, kai aukštis $\leq 24\text{ m}$										
Aukštyje $z \leq 24\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,20	0,94	0,62	0,05	-0,53	-1,15	-1,63	-2,02	-2,16	-2,10
Aukštyje $z \leq 24\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-1,79	-1,22	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70
IV konstrukcinė schema, kai aukštis $\geq 24\text{ m}$										
Aukštyje $z \geq 24\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	1,92	1,49	1,00	0,08	-0,84	-1,84	-2,61	-3,22	-3,45	-3,36
Aukštyje $z \geq 24\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-2,85	-1,95	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 30 m										
Aukštyje $z = 30\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	2,02	1,57	1,05	0,08	-0,89	-1,94	-2,75	-3,39	-3,63	-3,54
Aukštyje $z = 30\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-3,00	-2,05	-1,18	-1,18	-1,18	-1,18	-1,18	-1,18	-1,18
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 36 m										
Aukštyje $z = 36\text{ m}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$F_{w,e} = kN/m^2$	2,11	1,64	1,09	0,08	-0,93	-2,02	-2,86	-3,54	-3,79	-3,69
Aukštyje $z = 36\text{ m}$	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
$F_{w,e} = kN/m^2$		-3,13	-2,14	-1,23	-1,23	-1,23	-1,23	-1,23	-1,23	-1,23

Norėdami pamatyti aerodinaminių poveikių įtaką IV-ajai konstrukcinei schemai, pagal 27 lentelės apskaičiuotus duomenis braižomi poveikių pasiskirstymai skerspjuvių paviršiuose ir pateikiami 29 paveiksle. Žiūrėdami į skerspjuvius skirtinguose aukščiuose akivaizdžiai matome, kad

kamino paviršiai tiesiogiai veikiami artėjančio oro srauto, nuo 0° iki 30° susidaro viršslėgis $F_{w,e} = 0,83 - 2,11 \text{ kN/m}^2$ (išryškintas raudona spalva). O kamino šoniniai paviršiai veikiami oro srauto siurbimo, susidaro neigiamas slėgis (išryškintas mėlyna spalva). Matome, kad ypač didelis neigiamas slėgis $F_{w,e} = 1,50 - 3,79 \text{ kN/m}^2$ susidaro šoniniuose paviršiuose nuo 30° iki 120° , o ties 120° , kur oro srautas yra atskiriamas nuo kamino paviršiaus, slėgis stipriai sumažėja iki $F_{w,e} = 0,49 - 1,23 \text{ kN/m}^2$ ir išlieka pastovus iki 180° .

Pastebime, kad esant aukščiui nuo 24 m aerodinaminiai poveikiai skerspjūviuose staigiai išauga net iki 60 %. Tai lemia sraigtnių juostelių aukštis $t = 150 \text{ cm}$, ilgis $l_s = 12 \text{ m}$ bei skerspjūvių padidėjęs aerodinaminis pasipriešinimas vėjui.

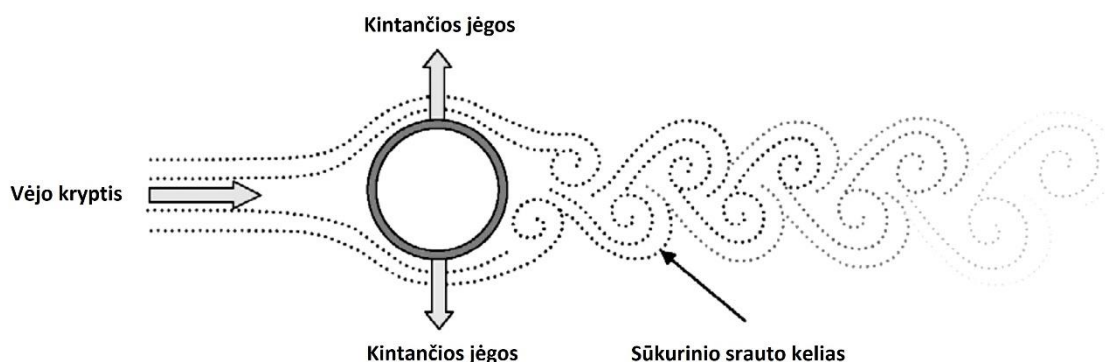
Taip pat matome, kad kas 6 metrus nuo žemės paviršiaus iki 24 m, ir nuo 24 m iki 36 m, aerodinaminiai poveikiai skerspjūviuose procentaliai didėja, pradedant nuo 20,41 % ir baigiant 4,24 %. O tai patvirtina teoriją, kad didėjant aukščiui vėjas vis mažiau veikiamas žemės trinties jėgos.



29 pav. IV konstrukcinės schemos aerodinaminių poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

2.3. Sūkurinio srauto poveikių skaičiavimas pagal Eurokodą 1991-1-4

Sūkurinis srautas dinamiškai veikia visą savilaikio kamino konstrukciją ir jos komponentus, tai lemia konstrukcijos liaunumas ir jos neaerodinaminė forma. Jis sukuria kintančius jėgas statmenai vėjo kryptčiai ar konstrukcijos ašiai (žr. 30 pav.), kurių dažnumas priklauso nuo vidutinio vėjo greičio ir konstrukcijos skerspjūvio bei aukščio. Kai sūkurinio srauto dažnis yra artimas konstrukcijos laisvųjų virpesių dažniui, gali atsirasti didelės virpesių amplitudės konstrukcijos viršūnėje. Taigi norint užtikrinti konstrukcijos saugumą, būtina tinkamai įvertinti sūkurinio srauto sukeltas virpesių amplitudes [8].

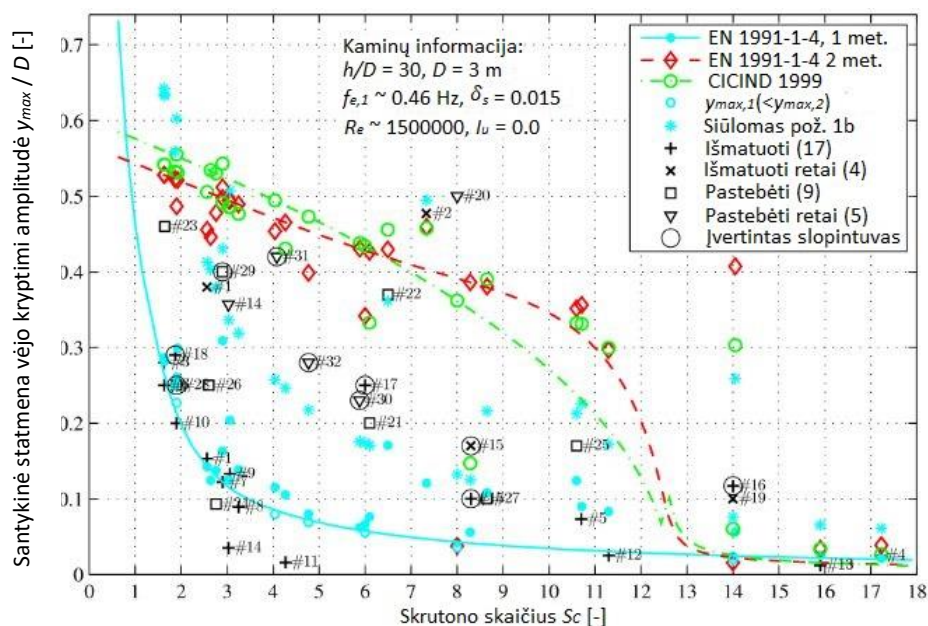


30 pav. Sūkurinio srauto sukeltos kintančios jėgos

Plieniniai kaminai nors ir laikomi paprastomis konstrukcijomis tiek konstrukciniu, tiek aerodinaminiu požiūriu, nustatyti statmenai vėjo kryptčiai virpesių amplitudes yra ganėtinai sudėtinga. Tai apima sudėtingą struktūrinės mechanikos ir oro srauto masių temų sąveiką, paverčiant konstrukcijos reakcijos nustatymą vienu iš sudėtingiausių vėjo inžinerijos uždaviniu [26]. Visiško analitinio reiškinio aprašymo vis dar nėra, o metodai, naudojami nustatyti sūkurinio srauto sukeltiems virpesiams, yra ganėtinai netikslūs. Skirtingos nuomonės, kaip matematiškai apibūdinti šį reiškinį, atsispindi skirtinguose skaičiavimo methoduose [27].

Sūkurinio srauto poveikiai plieniniams kaminams gali būti skaičiuojami pagal skirtingus skaičiavimo metodus, remiantis nustatyta didžiausia virpesių amplitude [9]. Harmoninis metodus ilgus dešimtmečius buvo naudojamas prognozuojant reakciją dėl sūkurinio srauto. Realybėje išmatuotos virpesių amplitudės buvo daug didesnės nei apskaičiuotos, o tai sukėlė įtrūkimus plieniniuose kaminuose [28]. Taip pat netinkamai įvertintos virpesių amplitudės gali sukelti ir varžtinių jungčių atsipalaidavimą ar net sulaužymą plieniniuose kaminuose su flanšinėmis jungtimis [29]. 31 paveiksle galime pastebėti šį skirtumą tarp numatomų ir realybėje išmatuotų virpesių amplitudžių esant skirtingiems Skrutono skaičiams, kurias nustatė Mathias Klobes [30]. Tai pat galime palyginimui paanalizuoti įtrauktus spektrinį ir Cicind metodus, kurie apima realybėje išmatuotas virpesių amplitudes. Šie metodai kitaip dar žinomi kaip harmoninio metodo supaprastinimai ir patobulinimai.

Renkantis, kuris skaičiavimo metodus yra tinkamas, remiamasi Pedro-Gala ir kitų [26] atlikta skaičiavimų metodų analize. Joje analizuojama sūkurinio srauto reiškinų 7 nustatymo metodai ir palyginimai su viso masto duomenimis surinktais iš pramoninių kaminų. Pasirenkama analizuoti tik du skaičiavimo metodai, kurie bus taikomi skaičiuojant sūkurinio srauto poveikius. Tai darnųjų Eurokodo standartų numatyti pirmasis – harmoninis ir antrasis – spektrinis metodai.



31 pav. Numatomos ir realybėje išmatuotos virpesių amplitudės esant skirtingiems Skrutono skaičiams

28 lentelėje pateikiamos Pedro-Gala ir kitų [26] išmatuotos 42 kaminų konstrukcijų didžiausios virpesių amplitudės, esant skirtingiems Skrutono skaičiams, bei palyginimai su numatomais rezultatais, gautais atlikus harmoninio ir spektrinio metodų skaičiavimus. 28 lentelėje galime aiškiai pastebėti, kad harmoninio metodo nustatytos virpesių amplitudės yra daug mažesnės lyginant su realybėje išmatuotomis virpesių amplitudėmis. Tik 13 iš 42 kaminų konstrukcijų apskaičiuotos virpesių amplitudės tenkino saugumo sąlygas. Tai pat 28 lentelėje pastebime, kad spektrinio metodo nustatytos virpesių amplitudės yra daug didesnės negu realybėje išmatuotos amplitudės. Net 39 iš 42 kaminų konstrukcijų apskaičiuotos virpesių amplitudės tenkino saugumo sąlygas. 28 lentelėje saugumo sąlygų ribos yra žymimos pilka spalva, išskiriant palankius ir nepalankius skaičiavimo metodų rezultatus [26].

28 lentelė. Pramoninių kaminų išmatuotos ir nustatytos didžiausios virpesių amplitudžių reikšmės

Konstrukcija	Išmatuoti duomenys			Nustatyti duomenys	
	Eilės numeris	Išmatuoti	Pastebėti	Skrutono skaičius	Harmonis metodas
1	0,46	-	1,30	0,39	0,54
2	0,33	-	1,40	0,37	0,53
3	0,18	-	1,40	0,34	0,53
4	0,22	-	1,60	0,53	0,53
5	0,25	-	1,62	0,28	0,53
6	0,30	-	1,80	0,25	0,52
7	0,25	-	1,90	0,19	0,52
8	0,25	-	1,90	0,31	0,49
9	0,15	-	2,10	0,18	0,47
10	0,28	-	2,40	0,64	0,52
11	0,38	-	2,56	0,13	0,45
12	0,25	-	2,60	0,15	0,46

Konstrukcija	Išmatuoti duomenys			Nustatyti duomenys	
Eilės numeris	Išmatuoti	Pastebėti	Skrutono skaičius	Harmonis metodas	Spektrinis metodas
13	0,20	-	2,70	0,18	0,50
14	0,25	-	2,77	0,15	0,50
15	0,21	-	2,80	0,15	0,44
16	0,06	-	2,90	0,23	0,50
17	0,40	-	2,90	0,07	0,44
18	0,04	0,36	3,03	0,14	0,49
19	0,40	-	3,10	0,18	0,50
20	0,06	-	4,00	0,15	0,47
21	0,02	-	4,07	0,10	0,47
22	-	0,42	4,08	0,08	0,45
23	0,17	-	4,20	0,09	0,47
24	0,45	-	4,20	0,13	0,52
25	0,02	-	4,50	0,10	0,46
26	-	0,28	4,77	0,07	0,39
27	0,06	-	4,90	0,11	0,45
28	-	0,23	5,88	0,06	0,43
29	0,25	-	6,00	0,05	0,31
30	-	0,20	6,10	0,07	0,43
31	-	0,37	6,50	0,16	0,44
32	0,50	-	6,60	0,07	0,49
33	0,25	-	6,75	0,06	0,41
34	0,48	-	7,33	0,12	0,46
35	0,17	-	7,60	0,05	0,40
36	0,29	-	8,59	0,04	0,38
37	-	0,31	8,87	0,07	0,13
38	0,17	-	10,40	0,04	0,33
39	0,07	-	10,71	0,09	0,37
40	0,03	-	10,76	0,08	0,35
41	0,01	-	15,14	0,02	0,03
42	0,03	-	17,23	0,02	0,03

Atsižvelgiant į kamino konstrukcijos didžiausią virpesių amplitudę, harmoninis skaičiavimo metodas dažnai nuvertina virpesių amplitudę esant mažiems Skrutono skaičiams, nes harmoninis metodas pagrįstas sūkurinio srauto rezonanso modeliu ir nustato reakcijos įverčius, kurie paprastai yra didesni nei dažni įvykiai ir mažesni nei reti įvykiai [27]. Įvykiais apibūdinami sūkurinio srauto reiškiniai, pasireiškiantys per skirtingą laiko tarpą. O spektrinis skaičiavimo metodas pateikė geriausius artimus rezultatus su realybėje išmatuotais rezultatais, nes spektrinis metodas pagrįstas turbulencijos įtaka prognozuojamose virpesių amplitudėse. Šis metodas leidžia nenuvertinti reakcijos į retus įvykius ir nepervertinti reakcijos į dažnus įvykius [27].

Realybėje (žr. 28 lent.) išmatuotos virpesių amplitudės yra stipriai mažesnės už spektrinio metodo nustatytas amplitudes. Remiantis nustatytomis virpesių amplitudėmis 9-ajai ir 11-ajai konstrukcijai, kuri iš esmės yra ta pati konstrukcija, tik buvo stebima skirtingų mokslininkų skirtingais laikotarpiais [26], didžiausia realybėje išmatuota virpesių amplitudė 9-uju atveju yra $y = 0,15$, o 11-uju atveju $y = 0,38$. Tai leidžia daryti išvadą, kad spektrinis metodas nėra nuvertinamas, kai numatomi rezultatai 9-uju atveju yra $y = 0,47$, o 11-uju atveju $y = 0,45$. Todėl spektriniu metodu galime saugiai įvertinti sūkurinio srauto sukeltas virpesių amplitudes net ir esant mažiems Skrutono skaičiams. Šiame baigiamajame magistro projekte norėdami pamatyti ir palyginti numatomas didžiausias virpesių amplitudes, pasirenkama skaičiuoti pagal abu skaičiavimo metodus.

2.3.1. Pagrindinių parametrų skaičiavimas

Didžiausi sūkurinio srauto poveikiai, kuriuos sukelia sūkuriai paeiliui metami nuo priešingų konstrukcijos šonų, yra kintančios jėgos statmenai vėjo kryptčiai. Kintančios jėgos, dinamiškai veikiančios plieninio kamino konstrukcijas, yra apibrėžiamos pagrindiniais parametrais, tokiais kaip kritinis vėjo greitis $v_{cr,i}$, Skrutono Sc ir Reinoldso Re skaičiais.

Kritinis vėjo greitis $v_{cr,i}$, apibrėžiantis lenkiamųjų virpesių i režimą, kuriam esant sūkurinio srauto dažnis yra lygus konstrukcijos laisvųjų virpesių dažniui, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$v_{cr,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{St}; \quad (2.32)$$

29 lentelė. Kritinio vėjo greičio $v_{cr,i}$ apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$v_{cr,i} = m/s$	12,10	11,86	8,40	8,25

čia:

b – skerspjūvio skersmuo, ties kuriuo atsiranda sūkurinio srauto rezonansas (m);

$n_{i,y}$ – i režimo laisvųjų lenkiamųjų virpesių dažnis (žr. 1 priedą) (Hz);

St – Strouhala skaičius.

Kritinis vėjo greitis $v_{cr,o}$, apibrėžiantis ovalėjimo virpesių i režimą, kuriam esant sūkurinio srauto dažnis padauginamas iš 2, yra lygus konstrukcijos laisvųjų ovalėjimų dažniui, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$v_{cr,o} = \frac{b \cdot n_{o,y}}{2 \cdot St}; \quad (2.33)$$

30 lentelė. Kritinio vėjo greičio $v_{cr,o}$ apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$v_{cr,o} = m/s$	52,42	51,37	46,32	45,49

čia:

b – kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m);

$n_{o,y}$ – i režimo laisvųjų ovalėjimų virpesių dažnis (žr. 1 priedą) (Hz);

St – Strouhalo skaičius.

Į sūkurinio srauto poveikius, apibrėžiančius lenkiamųjų ir ovalėjimo virpesių i režimą, galime neatsižvelgti, jeigu jie tenkina šią sąlygą:

$$v_{crit,i,o} > 1,25 \cdot v_m; \quad (2.34)$$

31 lentelė. Lenkiamųjų ir ovalėjimų virpesių i režimo apskaičiuotos reikšmės, tenkinančios 2.34 sąlygą

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$v_{crit,i} = m/s$	$12,10 < 35,65$	$11,86 < 35,65$	$8,40 < 36,83$	$8,25 < 36,83$
$v_{crit,o} = m/s$	$52,42 > 35,65$	$51,37 > 35,65$	$46,32 > 36,83$	$45,49 > 36,83$

Pagal 31 lentelėje apskaičiuotas reikšmės į ovalėjimo virpesių i režimą galime neatsižvelgti, nes sąlygos tenkinamos visoms konstrukcinėms schemoms. O į lenkiamųjų virpesių i režimą būtina atsižvelgti, nes sąlygos netenkinamos visoms konstrukcinėms schemoms.

Strouhalo skaičius St , priklausantis nuo skerspjūvio geometrijos ir Reinoldso skaičiaus, apvaliems skerspjūviams yra lygus:

$$St = 0,18; \quad (2.35)$$

Skrutono skaičius Sc , apibūdinantis konstrukcijos virpesių imlumą (jautrumą, polinkį vibruoti), o taip pat priklausantis nuo kamino konstrukcijos slopumo ir santykio tarp konstrukcijos masės ir oro srauto masės, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2}; \quad (2.36)$$

32 lentelė. Skrutono skaičiaus Sc apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$Sc =$	11,86	12,19	7,85	8,02

čia:

δ_s – kamino konstrukcijos slopumas, išreiškiamas logaritminiu dekrementu (žr. 1 priedą);

$m_{i,e}$ – i virpesių režimo vienetinio ilgio ekvivalentinė masė (žr. 1 priedą) (kN/m);

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ – oro tankis sūkurinio srauto sąlygomis;

b – skerspjūvio skersmuo, ties kuriuo atsiranda sūkurinio srauto rezonansas (m).

Reinoldso skaičius Re , apibūdinantis skerspjūvių sūkurinio srauto poveikius, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$Re = \frac{b \cdot v_{crit,i}}{v}; \quad (2.37)$$

33 lentelė. Reinoldso skaičiaus Re apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$Re =$	1,13E+06	1,11E+06	7,84E+05	7,70E+05

čia:

b – kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m);

$v = 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/s$ – oro kinematinis klampis;

$v_{crit,i}$ – kritinis vėjo greitis (m/s).

2.3.2. Statmenai vėjo kryptiai amplitudės skaičiavimas pagal harmoninį metodą

Harmoninis metodas grindžiamas eksperimentiniais duomenimis iš įvairaus konstrukcijų spektro, bet kuriame laisvųjų virpesių režime. Įprastai metodas leidžia tiksliai numatyti konstrukcijos reakciją esant dideliems Skrutono skaičiams, tačiau nepakankamai įvertina sūkurinio srauto poveikius esant mažiems Skrutono skaičiams. Todėl šio metodo taikymas kartu su spektriniu metodu nėra nuvertinamas, kad būtų galima tinkamai įvertinti numatomą konstrukcijos reakciją, susijusią su dviem metodais.

Didžiausia statmenai vėjo kryptiai amplitudė, dar kitaip – poslinkis $y_{F,max}$, susietas su skerspjūvio skersmeniu, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{1}{Sc} \cdot K \cdot K_w \cdot c_{lat}; \quad (2.38)$$

34 lentelė. Didžiausių poslinkių $y_{F,max}$ apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$y_{F,max} = m$	0,065	0,020	0,088	0,038

čia:

b – kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m);

St – Strouhala skaičius;

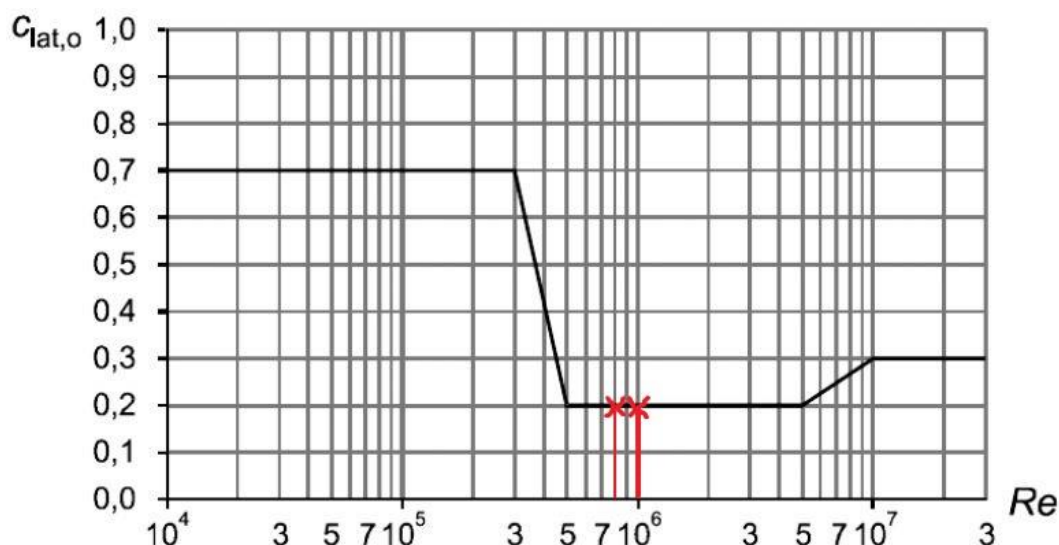
Sc – Skrutono skaičius;

K – virpesių režimo koeficientas;

K_w – koreliacijos ilgio koeficientas;

c_{lat} – aerodinaminio sužadavimo koeficientas.

Aerodinaminio sužadavimo koeficientas c_{lat} , priklausantis nuo Reinoldso skaičiaus, nustatomas pagal 32 paveikslą:



32 pav. Apvaliųjų cilindų aerodinaminio sužadavimo koeficiento c_{lat} pagrindinių reikšmių priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus $Re(v_{crit,i})$

35 lentelė. Aerodinaminio sužadavimo koeficiento c_{lat} nustatytos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$c_{lat} =$	0,200	0,200	0,200	0,200

Aerodinaminio sužadavimo koeficientas c_{lat} II-ajai ir IV-ajai konstrukcinei schemai gali būti perskaičiuojamas, nes sraigtinės juostelės mažina aerodinaminio sužadavimo koeficientą c_{lat} . Kai sraigtinės juostelės yra išdėstytos kamino viršuje, tai tenkina šią sąlygą. Sužadavimo koeficientas c_{lat} dauginamas iš koeficiento a , kuris apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$a = \left(1 - \frac{l_s}{h}\right)^3; \quad (2.39)$$

36 lentelė. Koeficiento c_{lat} perskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$c_{lat} =$	0,200	0,043	0,200	0,055

čia:

l_s – kamino su sraigtinėmis juostelėmis atkarpos ilgis (m);

h – kamino konstrukcijos aukštis (m).

Aerodinaminio sužadavimo koeficientas c_{lat} , priklausantis nuo kritinio vėjo greičio ir vidutinio vėjo greičio santykio, tikslinamas pagal išraiškas:

$$\text{kai } \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} \leq 0,83; \text{ tai } c_{lat} = c_{lat,0}; \quad (2.40)$$

$$\text{kai } 0,83 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}} < 1,25; \text{ tai } c_{lat} = \left(3 - 2,4 \cdot \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}}\right) \cdot c_{lat,0}; \quad (2.41)$$

$$\text{kai } 1,25 \leq \frac{v_{crit,i}}{v_{m,Lj}}; \text{ tai } c_{lat} = 0; \quad (2.42)$$

37 lentelė. Aerodinaminio sužadavimo koeficiento c_{lat} patikslintos reikšmės

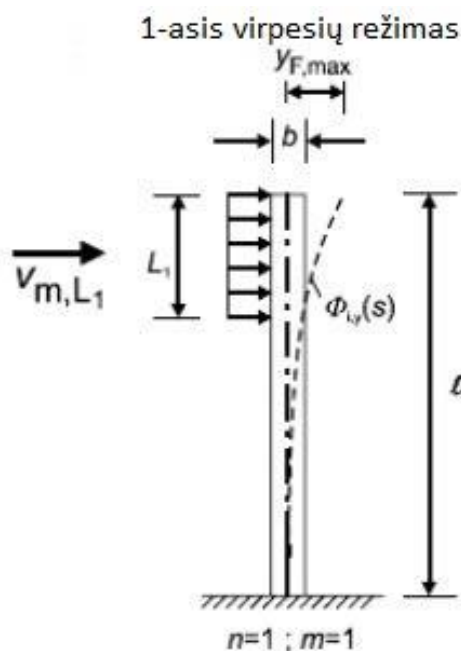
I konstrukcinė schema					
Kai santykis				Tai koeficientas	
$v_{crit,i}/v_{m,Lj} = m/s$	$0,42 \leq 0,83$	$0,83 > 0,42 < 1,25$	$1,25 > 0,42$	$c_{lat} = c_{lat,0} =$	0,200
II konstrukcinė schema					
Kai santykis				Tai koeficientas	
$v_{crit,i}/v_{m,Lj} = m/s$	$0,42 \leq 0,83$	$0,83 > 0,42 < 1,25$	$1,25 > 0,42$	$c_{lat} = c_{lat,0} =$	0,043
III konstrukcinė schema					
Kai santykis				Tai koeficientas	
$v_{crit,i}/v_{m,Lj} = m/s$	$0,29 \leq 0,83$	$0,83 > 0,29 < 1,25$	$1,25 > 0,29$	$c_{lat} = c_{lat,0} =$	0,200
IV konstrukcinė schema					
Kai santykis				Tai koeficientas	
$v_{crit,i}/v_{m,Lj} = m/s$	$0,28 \leq 0,83$	$0,83 > 0,28 < 1,25$	$1,25 > 0,28$	$c_{lat} = c_{lat,0} =$	0,066

čia:

$v_{crit,i}$ – kritinis vėjo greitis (m/s);

$v_{m,Lj}$ – vidutinis vėjo greitis koreliacijos ilgio centre (m/s);

Koreliacijos ilgis L_j , apibrėžiantis 1-ąją virpesių režimą, bei priklausantis nuo virpesių amplitudės, nustatomas pagal 33 paveikslą ir tikslinamas pagal išraiškas:



$$\text{kai } \frac{y_F(s_j)}{b} < 0,1; \text{ tai } \frac{L_j}{b} = 6; \quad (2.43)$$

$$\text{kai } 0,1 \leq \frac{y_F(s_j)}{b} \leq 0,6; \text{ tai } \frac{L_j}{b} = 4,8 + 12 \cdot \frac{y_F(s_j)}{b}; \quad (2.44)$$

$$\text{kai } \frac{y_F(s_j)}{b} > 0,6; \text{ tai } \frac{L_j}{b} = 12; \quad (2.45)$$

33 pav. Koreliacijos ilgio L_j padėties nustatymo pavyzdžiai

38 lentelė. Koreliacijos ilgio L_j nustatytos ir patikslintos reikšmės

I konstrukcinė schema					
Kai amplitudė				Tai koreliacijos ilgis	
$y_F(s_j)/b = m$	$0,065 < 0,1$	$0,1 > 0,065 \leq 0,6$	$0,065 < 0,6$	$L_j = 6 \cdot b = m$	8,40
II konstrukcinė schema					
Kai amplitudė				Tai koreliacijos ilgis	
$y_F(s_j)/b = m$	$0,020 < 0,1$	$0,1 > 0,020 \leq 0,6$	$0,020 < 0,6$	$L_j = 6 \cdot b = m$	8,40
III konstrukcinė schema					
Kai amplitudė				Tai koreliacijos ilgis	
$y_F(s_j)/b = m$	$0,088 < 0,1$	$0,1 > 0,088 \leq 0,6$	$0,088 < 0,6$	$L_j = 6 \cdot b = m$	8,40
IV konstrukcinė schema					
Kai amplitudė				Tai koreliacijos ilgis	
$y_F(s_j)/b = m$	$0,038 < 0,1$	$0,1 > 0,038 \leq 0,6$	$0,038 < 0,6$	$L_j = 6 \cdot b = m$	8,40

Koreliacijos ilgio koeficientas K_w apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$K_w = \frac{\sum_{j=1}^n \int_{L_j} |\varphi_{i,y}(s)| ds}{\sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\varphi_{i,y}(s)| ds}; \quad (2.46)$$

Koreliacijos ilgio koeficientas K_w konstrukcijoms su sraigtinėmis juostelėmis yra lygus 1, tai $K_w = 1$ priimu II ir IV konstrukcinei schemai.

39 lentelė. Koreliacijos ilgio koeficientų K_w apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$K_w =$	0,696	0,696 = 1	0,617	0,617 = 1

čia:

n – 1-ojo virpesių režimo intervalų skaičius, ties koreliacijos ilgiu kuriame atsiranda sūkurinis srautas (žr. 1 priedą);

m – 1-ojo virpesių režimo intervalų skaičius, ties kamino konstrukcijos aukščiu (žr. 1 priedą);

L_j – koreliacijos ilgis (m);

l_j – kamino konstrukcijos aukštis (m);

$\Phi_{i,y}$ – virpesių i režimas (žr. 1 priedą).

Virpesių režimo koeficientas K , apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$K = \frac{\sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\varphi_{i,y}(s)| ds}{4 \cdot \pi \cdot \sum_{j=1}^m \int_{l_j} |\phi_{i,y}^2(s)| ds}; \quad (2.47)$$

40 lentelė. Virpesių režimo koeficientų K apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$K =$	0,128	0,128	0,129	0,129

čia:

m – 1-ojo virpesių režimo intervalų skaičius, ties kamino konstrukcijos aukščiu (žr. 1 priedą);

l_j – kamino konstrukcijos aukštis (m);

$\Phi_{i,y}$ – virpesių i režimas (žr. 1 priedą).

2.3.3. Statmenai vėjo kryptiai amplitudės skaičiavimas pagal spektrinį metodą

Spektrinis metodas grindžiamas eksperimentiniais duomenimis iš gembinių konstrukcijų, tokių kaip kamina, bokštai ar stiebai. Jis siejamas su atliktais bandymais 1-ajame laisvųjų virpesių režime ir su reguliariai keičiamomis skerspjūvio savybėmis. Įprastai metodas nenuvertina reakcijos į sukurini srautą esant mažiems Skrutono skaičiams, tačiau rezultatai gali pasirodyti pernelyg atsargūs.

Priimame, kad sraigtinės juostelės II-ajai ir IV-ajai konstrukcinei schemai yra išdėstytos viršuje ir tenkina juostelių geometrijos sąlygas. Tai yra 3 pradinės juostos, juostų žingsnis h_s nuo $4,5b$ iki $5,0b$, juostų aukštis t nuo $0,10b$ iki $0,12b$ ir juostos tęsiasi l_s atkarpą nuo $0,3h$ iki $0,5h$. Šiuo atveju sraigtinės juostelės yra 3, juostų žingsnis $h_s = 6$ m, juostų aukštis $t = 150$ mm ir tęsiasi 12 m atkarpą, o tai tenkina šias sąlygas. Todėl statmenai vėjo kryptiai amplitudė II ir IV konstrukcinei schemai gali būti skaičiuojama tik pagal harmoninį metodą.

Didžiausia statmenai vėjo kryptiai amplitudė, dar kitaip poslinkis $y_{F,max}$, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$y_{F,max} = \sigma_y \cdot k_p; \quad (2.48)$$

41 lentelė. Didžiausių poslinkių $y_{F,max}$ apskaičiuotos reikšmės

I ir III konstrukcinė schema		
Kai schema:	I	III
$y_{F,max} = m$	0,317	0,483

čia:

σ_y – standartinis poslinkio nuokrypis (m);

k_p – viršūninis koeficientas.

Standartinis poslinkio nuokrypis σ_y , kuriuo atsižvelgiama į kamino konstrukcijos didžiausią įlinkį $\Phi = 1$, susietą su skerspjūvio skersmeniu, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\left(\frac{\sigma_y}{b}\right)^2 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}; \quad (2.49)$$

42 lentelė. Standartinių poslinkių nuokrypių σ_y apskaičiuotos reikšmės

I ir III konstrukcinė schema		
Kai schema:	I	III
$\sigma_y = m$	0,136	0,253

čia:

b – kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m);

c_1 ir c_2 – konstantos, apskaičiuojamos pagal išraiškas:

$$c_1 = \frac{a_L^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a}\right); \quad (2.50)$$

$$c_2 = \frac{\rho \cdot b^2}{m_e} \cdot \frac{a_L^2}{K_a} \cdot \frac{C_c^2}{St^4} \cdot \frac{b}{h}; \quad (2.51)$$

43 lentelė. Konstantų c_1 ir c_2 apskaičiuotos reikšmės

I ir III konstrukcinė schema		
Kai schema:	I	III
$c_1 =$	0,004	0,016
$c_2 =$	4,80E-06	3,31E-06

čia:

C_c – aerodinaminė konstanta;

K_a – aerodinaminio slopinimo parametras;

a_L – normalizuotoji ribinė amplitudė, išreiškianti labai mažo slopumo konstrukcijų įlinkį;

St – Strouhalo skaičius;

Sc – Skrutono skaičius;

m_e – vienetinio ilgio ekvivalentinė masė (žr. 1 priedą) (kN/m).

Konstantos C_c , K_a ir a_L^2 , priklausančios nuo skerspjūvio formos ir Reinoldso skaičiaus, nustatomos taikant tiesinę interpoliaciją:

44 lentelė. Konstantų C_c , K_a ir a_L^2 nustatytos reikšmės

I ir III konstrukcinė schema						
Kai Reinoldso skaičius $Re = 1,13E + 0,6$	$Re \leq 10^5$	$Re = 5 \cdot 10^5$	$Re \geq 10^6$	Tai konstanta	Kai I schema	Kai III schema
$C_c =$	0,02	0,005	0,01	$C_c =$	0,01	0,01
$K_a =$	2,00	0,50	1,00	$K_a =$	1,00	0,78
$a_L =$	0,40	0,40	0,40	$a_L =$	0,40	0,40

Viršūninis koeficientas k_p , apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$k_p = \sqrt{2} \cdot \left\{ 1 + 1,2 \cdot \arctan \left(0,75 \cdot \left(\frac{Sc}{4 \cdot \pi \cdot K_a} \right)^4 \right) \right\}; \quad (2.52)$$

45 lentelė. Viršūninio koeficiento k_p apskaičiuotos reikšmės

I ir III konstrukcinė schema		
Kai schema:	I	III
$k_p =$	2,33	1,91

2.3.4. Ekvivalentinių sūkurinio srauto poveikių skaičiavimas

Ekvivalentiniai sūkurinio srauto poveikiai statmenai vėjo krypties apibrėžiami kaip statiniai poveikiai, kuriuos statiškai pritaikius kamino konstrukcijai sukeliama poslinkiai ir įtempiai. Statiniai poveikiai yra lygūs maksimalioms vertėms, kurias sukelia tikrieji rezonansiniai sūkurinio srauto poveikiai esant 1-ajam laisvųjų virpesių režimui.

Kamino konstrukciją veikiantys ekvivalentiniai sūkurinio srauto poveikiai $F_w(s)$, išreiškiami per vienutinio ilgio inercijos jėgą, apskaičiuojami pagal išraišką:

$$F_w(s) = \left(m(s) \cdot (2 \cdot \pi \cdot n_{i,y})^2 \cdot \Phi_{i,y}(s) \cdot y_{F,max} \right) / L_{arc}; \quad (2.53)$$

čia:

$m(s)$ – virpančio kamino konstrukcijos vienutinio ilgio masė (kN/m);

$n_{i,y}$ – kamino konstrukcijos laisvųjų virpesių pagrindinis dažnis (žr. 1 priedą) (Hz);

$\Phi_{i,y}(s) = 1$ – kamino konstrukcijos virpesių režimas, normalizuotas ties didžiausiu poslinkiu;

$y_{F,max}$ – ties vieta $\Phi_{i,y}(s) = 1$, didžiausias poslinkis per tam tikrą laiką, nustatomas iš 46 lentelės.

46 lentelėje pateikiamos didžiausių poslinkių pagal harmoninį ir spektrinį metodus apskaičiuotos reikšmės. Žiūrėdami į I ir III konstrukcinių schemų poslinkius matome, kad spektrinio metodo nustatytos reikšmės abiem atvejais yra apie 5 kartus didesnės nei harmoninio metodo nustatytos reikšmės. Remiantis aukščiau atlikta metodų analize galime teigti, kad spektrinis metodas geriausiai įvertina didžiausius poslinkius dėl sūkurinio srauto, kurie yra artimi realybėje išmatuotiems rezultatams. Todėl didžiausi poslinkiai (pažymėta pilka spalva) I ir III konstrukcinei schemai pasirenkami pagal spektrinį metodą, o II ir IV schemai belieka remtis harmoniniu metodu.

46 lentelė. Harmoninio ir spektrinio metodų didžiausių poslinkių $y_{F,max}$ apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema					
Metodas:	Kai schema:	I	II	III	IV
Harmoninis	$y_{F,max} = m$	0,065	0,020	0,088	0,038
Spektrinis	$y_{F,max} = m$	0,317	-	0,483	-

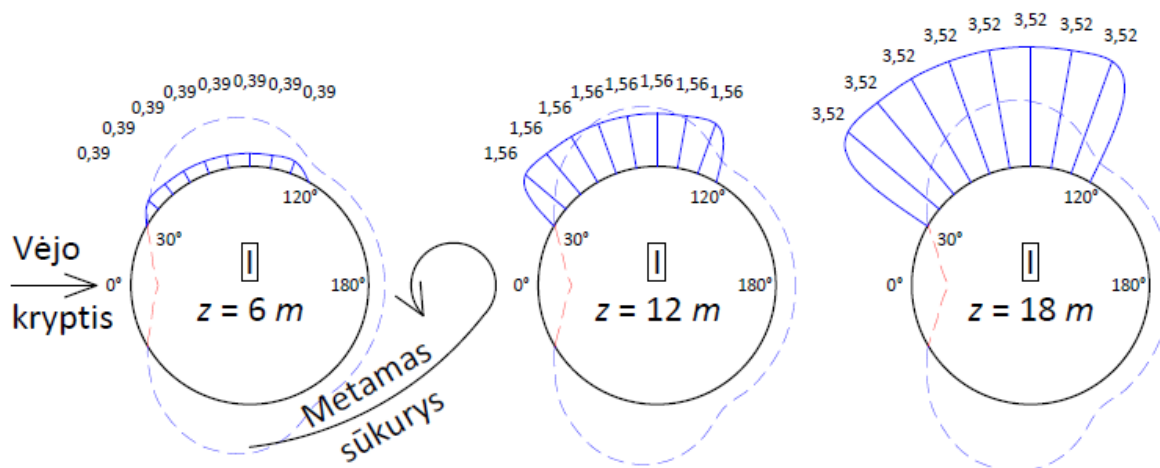
L_{arc} – kamino kevalo skerspjūvio lanko ilgis, ties kuriuo susidaro sūkurinio srauto sukeliamas neigiamas slėgis, nustatomas pagal išraišką:

$$L_{arc} = \frac{(120^\circ - 30^\circ)}{360^\circ} \cdot 2\pi R = 1,09 \text{ m}; \quad (2.54)$$

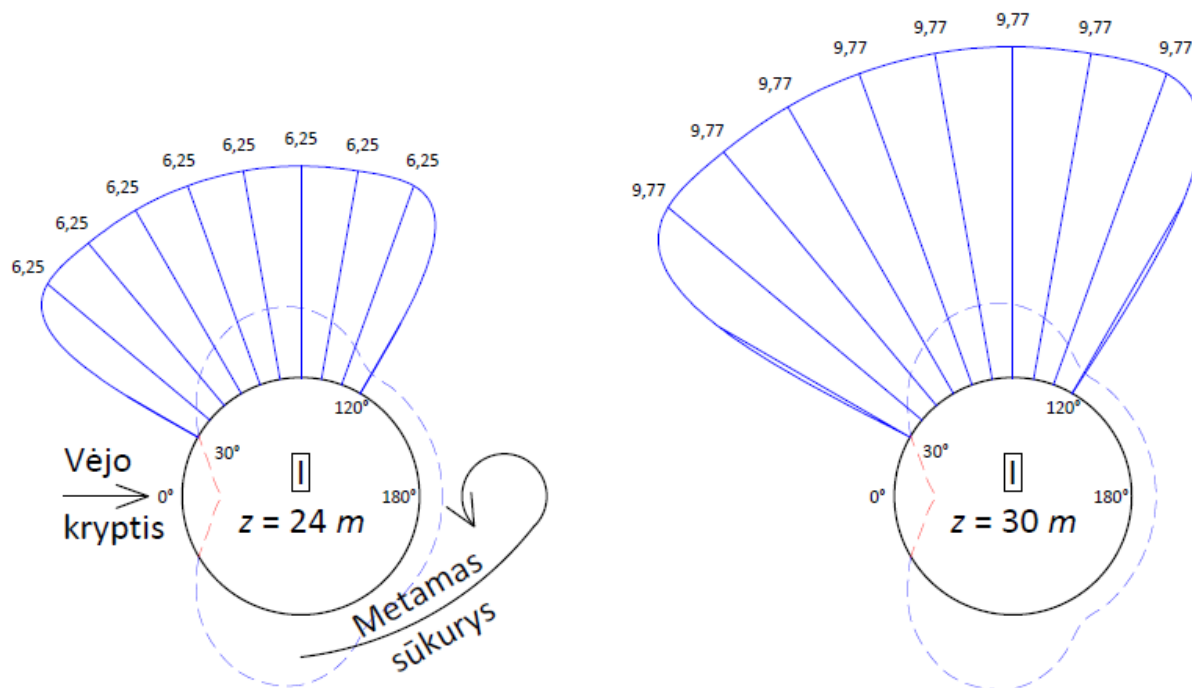
47 lentelė. Ekvivalentinių sūkurinio srauto poveikių $F_w(s)$ apskaičiuotos reikšmės I konstrukcinei schemai

I konstrukcinė schema, kai aukštis 6 m										
Aukštyje $z = 6 \text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_w(s) = kN/m^2$	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39
I konstrukcinė schema, kai aukštis 12 m										
Aukštyje $z = 12 \text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-1,56	-1,56	-1,56	-1,56	-1,56	-1,56	-1,56	-1,56	-1,56	-1,56
I konstrukcinė schema, kai aukštis 18 m										
Aukštyje $z = 18 \text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-3,52	-3,52	-3,52	-3,52	-3,52	-3,52	-3,52	-3,52	-3,52	-3,52
I konstrukcinė schema, kai aukštis 24 m										
Aukštyje $z = 24 \text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25	-6,25
I konstrukcinė schema, kai aukštis 30 m										
Aukštyje $z = 30 \text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77	-9,77

Norėdami pamatyti sūkurinio srauto poveikių įtaką I-ajai konstrukcinei schemai, pagal 47 lentelės apskaičiuotus duomenis braižomi poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose ir pateikiami 34 paveiksle. Žiūrėdami į skerspjūvius skirtinguose aukščiuose akivaizdžiai matome, kad sūkurinio srauto poveikiai yra stipriai didesni už aerodinaminius poveikius. Nuo žemės paviršiaus iki 12 m aukščio poveikiai procentaliai didėja ir yra mažesni už aerodinaminius poveikius. Bet nuo 12 m iki 30 m poveikiai toliau didėja ir yra jau iki 4,40 karto didesni už aerodinaminius poveikius. O tai patvirtina teoriją, kad būtina tinkamai įvertinti susidariusį sūkurinį srautą, kuris statmenai vėjo kryptiai sukelia dideles virpesių amplitudes.



34 pav. I konstrukcinės schemos sūkurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

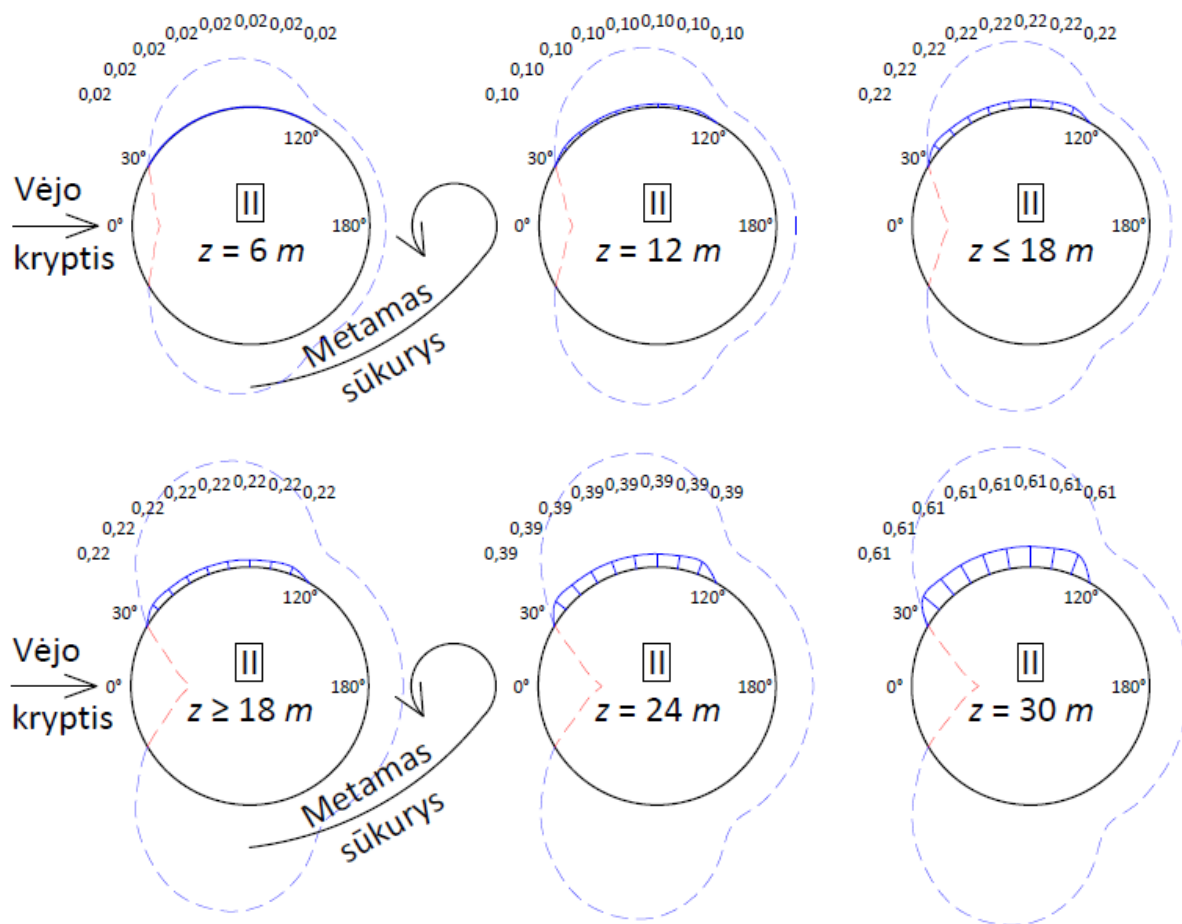


34 pav. I konstrukcinės schemas sukurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

48 lentelė. Ekvivalentinių sukurinio srauto poveikių $F_w(s)$ apskaičiuotos reikšmės II konstrukcinei schemei

II konstrukcinė schema, kai aukštis 6 m										
Aukštyje $z = 6\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_w(s) = kN/m^2$	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02
II konstrukcinė schema, kai aukštis 12 m										
Aukštyje $z = 12\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10
II konstrukcinė schema, kai aukštis 18 m										
Aukštyje $z = 18\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22	-0,22
II konstrukcinė schema, kai aukštis 24 m										
Aukštyje $z = 24\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39	-0,39
II konstrukcinė schema, kai aukštis 30 m										
Aukštyje $z = 30\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61	-0,61

Norėdami pamatyti sukurinio srauto poveikių įtaką II-ajai konstrukcinei schemei, pagal 48 lentelės apskaičiuotus duomenis braižomi poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose ir pateikiami 35 paveiksle. Žiūrėdami į skerspjūvius skirtinguose aukščiuose akivaizdžiai matome, kad sukurinio srauto poveikiai panaudojus sraigtnes juosteles stipriai sumažėjo ir yra nuo 5,83 kartus mažesni už aerodinaminis poveikius. Lyginandami I-osios ir II-osios konstrukcinių schemų skerspjūvius, sraigtnės juostelės padėjo sumažinti net iki 93,76 % sukurinio srauto poveikių. O tai patvirtina teoriją, kad sraigtnės juostelės neduoda susidaryti sukuriniam srautui, kuris statmenai vėjo kryptčiai sukelia virpesių amplitudes.

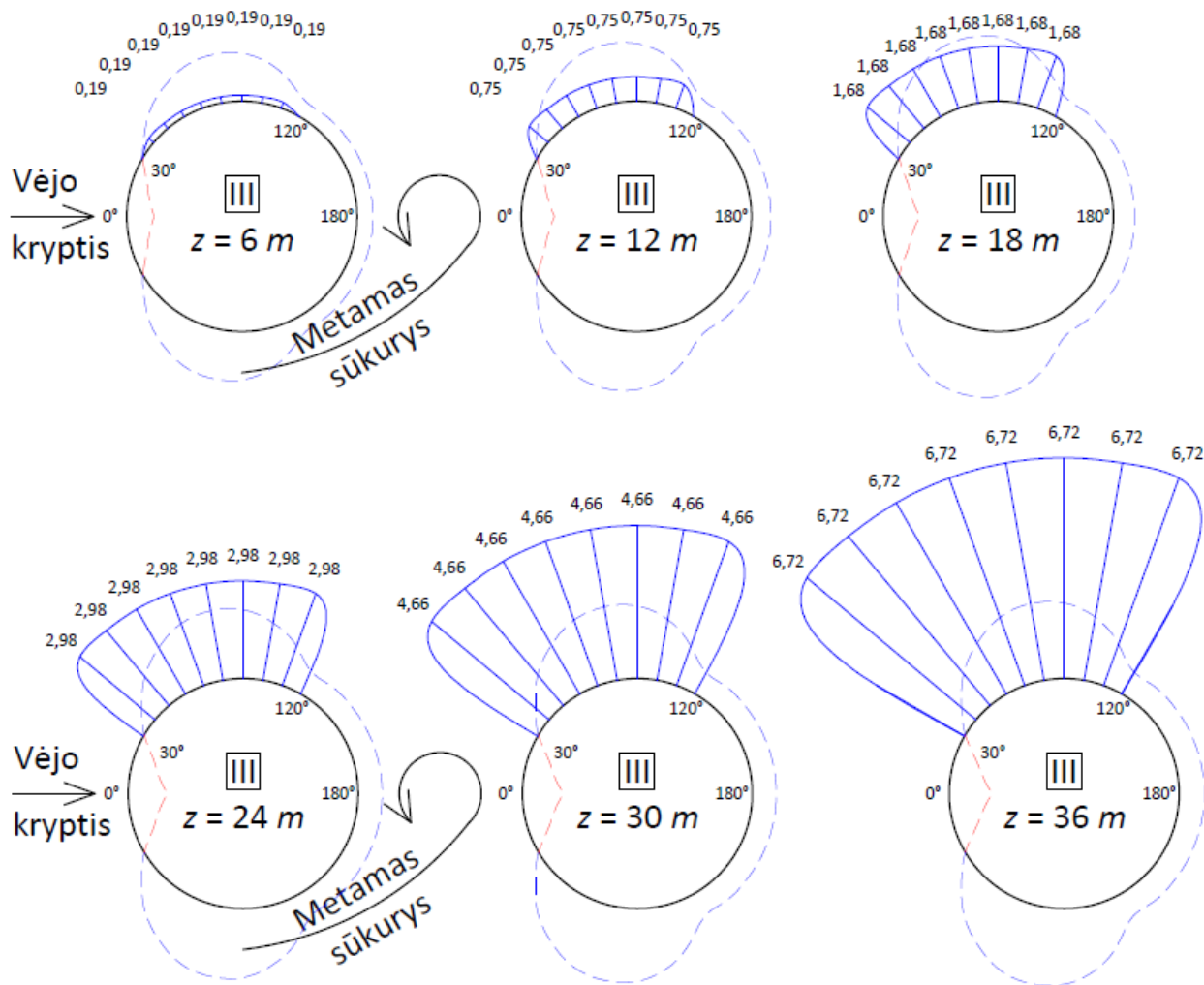


35 pav. II konstrukcinės schemas sūkurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

49 lentelė. Ekvivalentinių sūkurinio srauto poveikių $F_w(s)$ apskaičiuotos reikšmės III konstrukcinei schemei

III konstrukcinė schema, kai aukštis 6 m										
Aukštyje $z = 6\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_w(s) = \text{kN/m}^2$	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19
III konstrukcinė schema, kai aukštis 12 m										
Aukštyje $z = 12\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75	-0,75
III konstrukcinė schema, kai aukštis 18 m										
Aukštyje $z = 18\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68	-1,68
III konstrukcinė schema, kai aukštis 24 m										
Aukštyje $z = 24\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98	-2,98
III konstrukcinė schema, kai aukštis 30 m										
Aukštyje $z = 30\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	-4,66	-4,66	-4,66	-4,66	-4,66	-4,66	-4,66	-4,66	-4,66	-4,66
III konstrukcinė schema, kai aukštis 36 m										
Aukštyje $z = 36\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = \text{kN/m}^2$	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72	-6,72

Norėdami pamatyti sukurinio srauto poveikių įtaką III-ajai konstrukcinei schemai, pagal 49 lentelės apskaičiuotus duomenis braižomi poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose ir pateikiami 36 paveiksle. Žiūrėdami į skerspjūvius skirtinguose aukščiuose akivaizdžiai matome, kad sukurinio srauto poveikiai yra stipriai didesni už aerodinaminius poveikius. Nuo žemės paviršiaus iki 18 m aukščio poveikiai procentaliai didėja ir yra mažesni už aerodinaminius poveikius. Bet nuo 18 m iki 36 m poveikiai toliau didėja ir yra jau iki 2,84 karto didesni už aerodinaminius poveikius. O tai patvirtina teoriją, kad būtina tinkamai įvertinti susidariusį sukurinį srautą, kuris statmenai vėjo kryptiai sukelia dideles virpesių amplitudes.



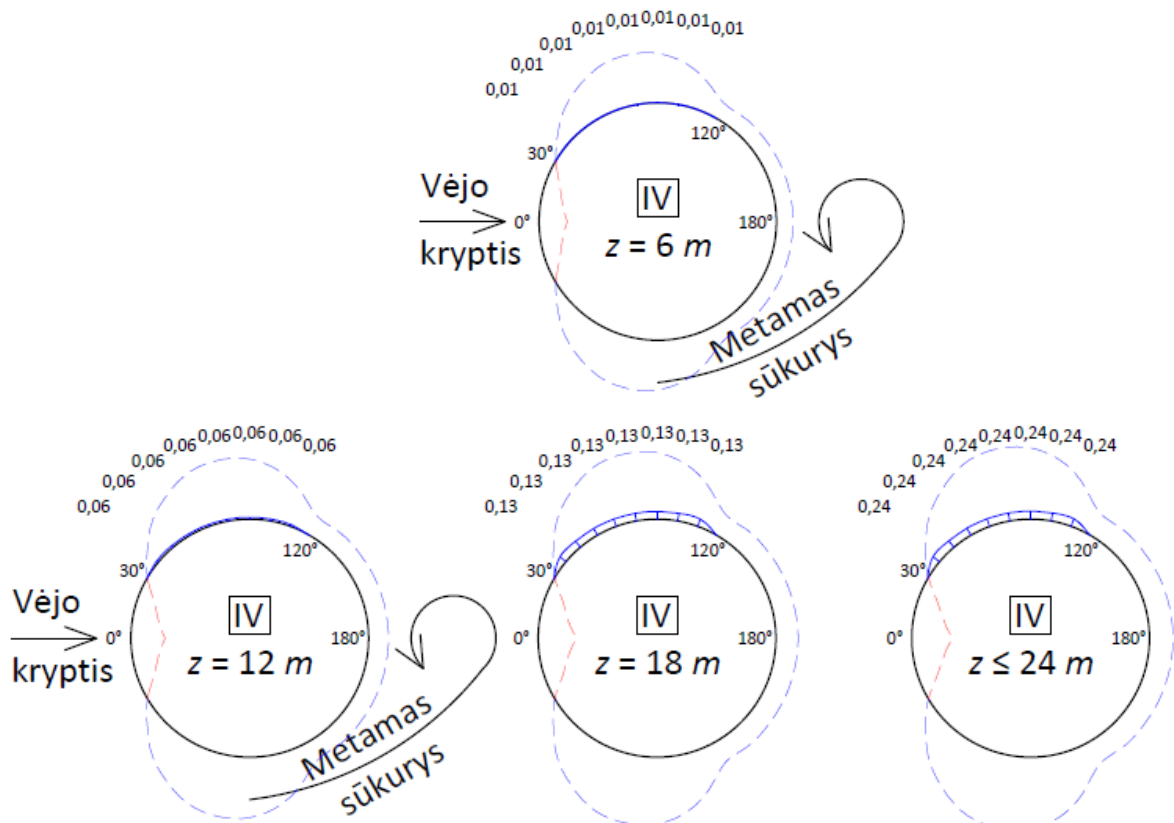
36 pav. III konstrukcinės schemos sukurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

50 lentelė. Ekvivalentiniai sukurinio srauto poveikių $F_w(s)$ apskaičiuotos reikšmės IV konstrukcinei schemai

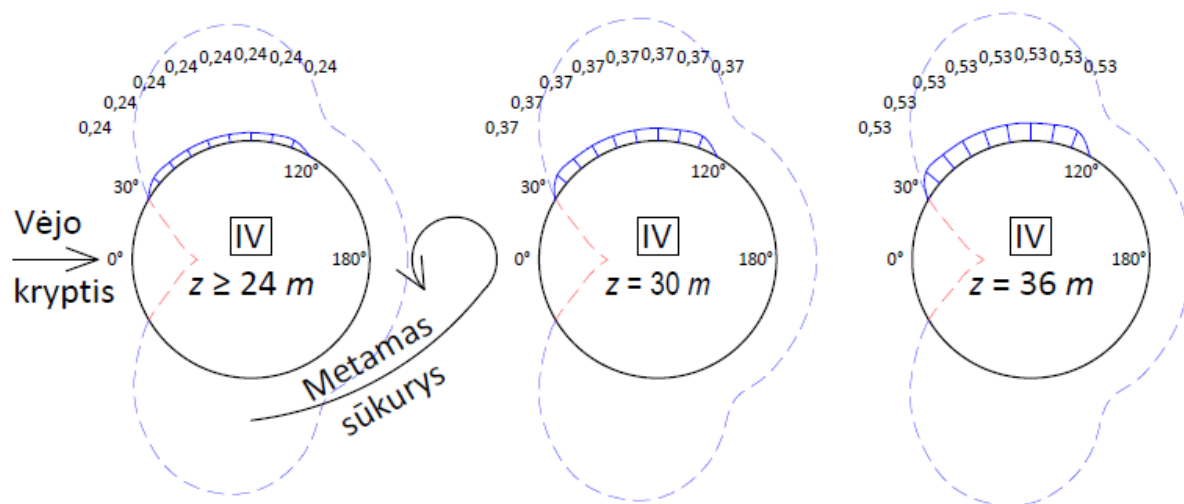
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 6 m										
Aukštyje $z = 6\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_w(s) = kN/m^2$	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 12 m										
Aukštyje $z = 12\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06	-0,06

IV konstrukcinė schema, kai aukštis 18 m										
Aukštyje $z = 18\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13	-0,13
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 24 m										
Aukštyje $z = 24\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24	-0,24
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 30 m										
Aukštyje $z = 30\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37	-0,37
IV konstrukcinė schema, kai aukštis 36 m										
Aukštyje $z = 36\text{ m}$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$F_{w,e} = kN/m^2$	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53

Norėdami pamatyti sukurinio srauto poveikių įtaką IV-ajai konstrukcinei schemai, pagal 50 lentelės apskaičiuotus duomenis braižomi poveikių pasiskirstymai skerspjuvių paviršiuose ir pateikiami 37 paveiksle. Žiūrėdami į skerspjuvius skirtinguose aukščiuose akivaizdžiai matome, kad sūkurinio srauto poveikiai panaudojus sraigines juosteles stipriai sumažėjo ir yra nuo 7,15 kartus mažesni už aerodinaminius poveikius. Lyginandami III-osios ir IV-osios konstrukcinių schemų skerspjuvius, sraigtinės juostelės padėjo sumažinti net 92,11 % sūkurinio srauto poveikių. O tai patvirtina teoriją, kad sraigtinės juostelės neduoda susidaryti sūkuriniam srautui, kurie statmenai vėjo kryptiai sukelia virpesių amplitudes.



37 pav. IV konstrukcinės schemos sūkurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjuvių paviršiuose



37 pav. IV konstrukcinės schemos sūkurinio srauto poveikių pasiskirstymai skerspjūvių paviršiuose

3. Kaminų konstrukcinių schemų analizė ir jų rezultatai

Savilaikių plieninių kaminų skerspjūvius nuolat veikia pastovios ir kintančios apkrovos – tai yra aerodinaminiai ir sūkurinio srauto poveikiai. Projektavimas yra grindžiamas tinkamumo ir saugos ribinių būvių sąlygomis, kai kamino konstrukcijos tinkamumas ir saugumas užtikrinamas apkrovų ir medžiagų daliniais koeficientais. Tinkamumo ribinis būvis pasiekiamas, kai kuri nors skerspjūvio dalis pasiekia ribinius įlinkius ar amplitudes. Saugos ribinis būvis pasiekiamas, kai kuri nors skerspjūvio dalis pasiekia ribinius įtempius, atitinkant plastiškumo ir ciklinio plastiškumo būvių sąlygoms. Ribinis įtempis yra apibrėžiamas kaip takumo ribos įtempis, padalinamas iš medžiagos dalinių koeficientų. Todėl įtempių pasiskirstymas ir skerspjūvių stipris skaičiuojami pagal tamprumo teoriją [31].

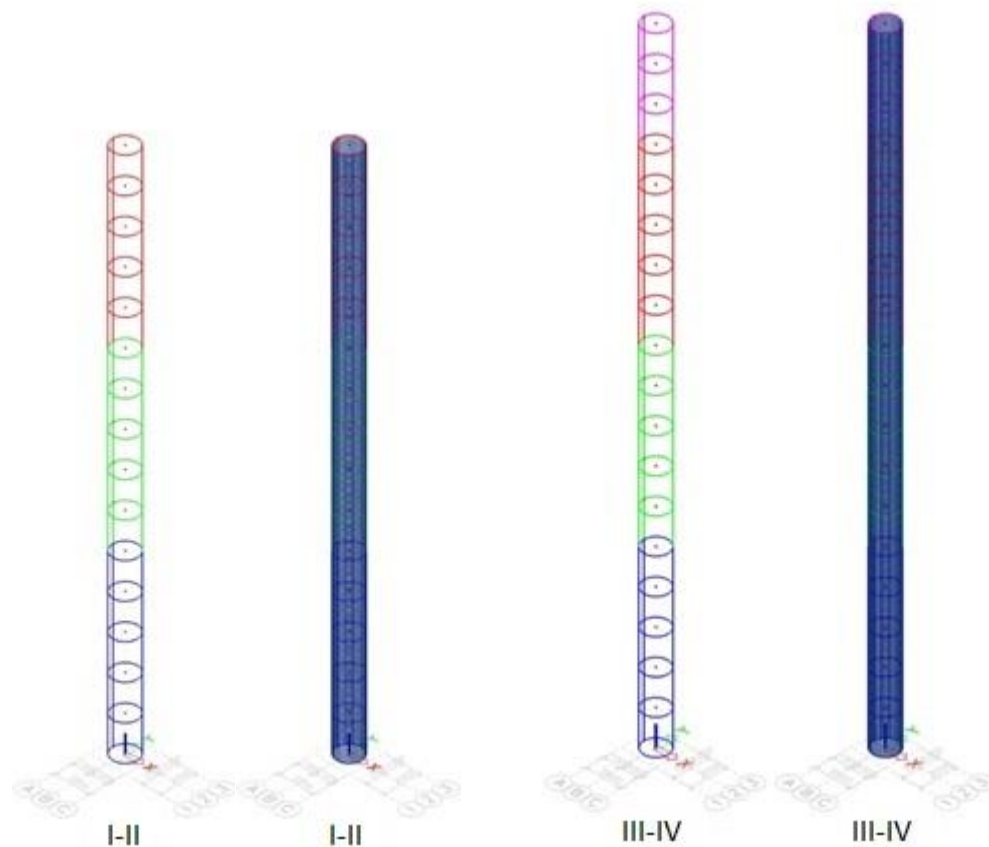
Kompiuterinės technologijos atveria naujus tyrimo kelius statybinių konstrukcijų tyrimui. Atsiveria galimybės realiau įvertinti konstrukcijų medžiagų įvairovę, apkrovų veikimo principus ir sudėtingus šalutinius poveikius. Taigi 4 konstrukcijų schemų galutinę analizę pasirenkama atlikti konstrukcijų analizės programine įranga „Scia Engineer 19.0“. Ši programinė įranga leidžia sukurti dvimačius kevalo modelius, suskaidyti juos baigtiniais elementais ir atlikti jų analizę baigtinių elementų metodo (BEM) pagalba.

BEM – tai skaitinis metodas, leidžiantis rasti apytikslius diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinių lygčių sprendinius. Metodo esmė – sritis, kurioje ieškomas sprendimas, suskaidoma į baigtinius elementus. Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomasis kinta nesudėtingu dėsnio ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visas elementų sistemas sudaroma sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas [32].

Norėdami atlikti 4 konstrukcinių schemų galutinę analizę, pagal jų pagrindinius duomenis sukuriama 4 dvimačiai kevalo modeliai programinėje terpėje. Pagrindiniai sukurtų dvimačių kevalo modelių duomenys pateikiami 51 lentelėje. I – II ar III – IV dvimačiai kevalo modeliai iš esmės yra vienodi, tik skiriasi tiriamojame dalyje jiems apskaičiuoti vėjo poveikiai dėl sraigtnių juostelių, todėl 38 paveiksle pateikiami tik 2 dvimačiai kevalo modeliai I – II ir III – IV konstrukcinių schemų. Dvimačiuose modeliuose laikančiojo kevalo segmentai išryškunami atskiromis linijomis, o skirtingi sienelių storai žymimi skirtingomis spalvomis. 38 paveiksle sukurti modeliai suskaidomi į baigtinius elementus – tai I – II modelis į 13200 elementus, o III – IV modelis į 15840 elementus, kurių dydis yra apie 10 cm.

51 lentelė. Konstrukcinių schemų dvimačių kevalo modelių pagrindiniai duomenys

Kaminų dvimačiai kevalo modeliai	Kamino aukštis h, m	Kamino išorinis diametras b_i, mm	Kamino vidinis diametras b_v, mm	Kamino kevalo sienelių storai t, mm	Kamino plieno markė	Kamino svoris W_s, t	Kamino visuminis svoris W_t, t
I	30	1400 - 1396	1376 - 1380	12; 10; 8	S355J2	10,26	10,26
II	30	1400 - 1396	1376 - 1380	12; 10; 8	S355J2	10,26	10,26
III	36	1400 - 1394	1376 - 1382	12; 10; 8; 6	S355J2	11,49	11,49
IV	36	1400 - 1394	1376 - 1382	12; 10; 8; 6	S355J2	11,49	11,49



38 pav. Konstrukcinių schemų dvimačiai kevalo modeliai ir jų suskaidymas į baigtinius elementus

Sukūrus 4 dvimačius kevalo modelius, jiems priskiriamos dinaminės konstrukcijų charakteristikos – tai yra masių grupės: MG1 – savasis svoris bei masių kombinacijos su daliniais koeficientais, kurie pateikiami 52 lentelėje. Taip pat dvimačiams kevalo modeliams sukuriama nuolatiniai ir kintantys apkrovų atvejai bei pritaikomi tiriamojoje dalyje apskaičiuoti aerodinaminiai ir sūkurinio srauto poveikiai. Tai yra: LC1 – kamino savasis svoris; LC2 – aerodinaminiai poveikiai vėjo kryptimi ir LC3 – sūkurinio srauto poveikiai statmenai vėjo kryptčiai. Pagal išvardintus apkrovų atvejus sukuriama skirtingos apkrovų veikimo kombinacijos su skirtingais daliniais koeficientais, pateikiamais 52 lentelėje.

52 lentelė. Masių ir apkrovų kombinacijos bei dalinių koeficientų γ nustatytos reikšmės

Masių kombinacijos:	Masių grupės:	Daliniai koeficientai:	AA1 – Kamino savasis svoris		
MK1	MG1	$\gamma =$	1,0		
Apkrovų kombinacijos:	Apkrovų atvejai:	Daliniai koeficientai:	AA1 – Kamino savasis svoris	AA2 – Aerodin. poveikiai	AA3 – Sūkurinio srauto poveikiai
AK1	AA1+AA2	$\gamma =$	1,0	1,0	-
AK2	AA1+AA3	$\gamma =$	1,0	-	1,0
AK3	AA1+AA2+AA3	$\gamma =$	1,0	1,0	1,0
AK4	AA1+AA2	$\gamma =$	1,0	1,4	-
AK5	AA1+AA3	$\gamma =$	1,0	-	1,4
AK6	AA1+AA2+AA3	$\gamma =$	1,0	1,4	1,4

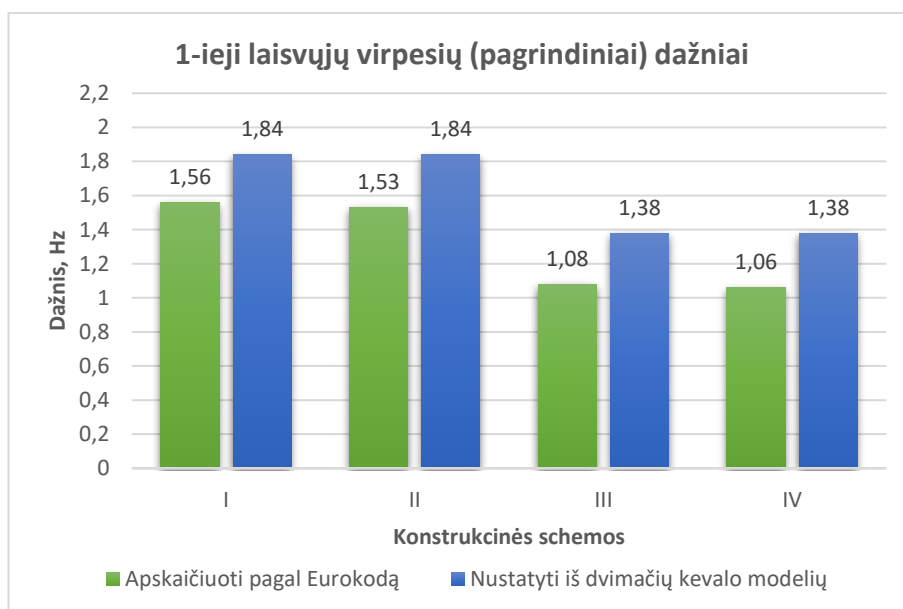
Pritaikius ir sukūrus 4-iems dvimačiams kevalo modeliams dinamines charakteristikas ir visus apkrovų atvejus, atliekama geometriškai netiesinė tamprioji analizė. Tai – idealiai konstrukcijai taikomas kevalų lenkimo teorijos principais pagrįsta analizė. Analizėje naudojamas tiesinės tampriosios medžiagos dėsnis, o poslinkiams taikoma netiesinė didelių įlinkių teorija, kurioje visiškai atsižvelgiama į bet kokią geometrijos pokytį dėl poveikių kevalo konstrukcijai [33].

Atliekama 4 dvimačių kevalo modelių geometriškai netiesinė tamprioji analizė. Pirmiausiai analizuojamos dinaminės charakteristikos, tai konstrukcinių schemų laisvųjų virpesių režimai, ypač 1-ojo laisvųjų virpesių pagrindinis režimo dažnis. Vėliau analizuojami tinkamumo ribiniai būviai, tai deformacijos arba įlinkiai dėl aerodinaminių poveikių ir virpesiai, svyravimai ar posvyriai dėl sūkurinio srauto poveikių [34]. O galiausiai analizuojami saugos ribinių būvių sąlygos – tai statinės pusiausvyros, bendrojo pastovumo ir konstrukcinių elementų stiprumo [34].

Išanalizavus 4-rių dvimačių kevalo modelių gautus rezultatus priimamos galutinės išvados. Lyginamos apskaičiuotos ir nustatytos konstrukcinių schemų dinaminės charakteristikos. O pagal tinkamumo ir saugos ribinius būvius lyginama aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių įtaka konstrukcinėms schemoms. Analizuojami aerodinaminių slopinimo priemonių, tai yra sraigčių juostelių, pasirinkimo sprendiniai konstrukcinėse schemose.

3.1. Dinaminių charakteristikų analizė

Skaičiuojant vėjo poveikius konstrukcinėms schemoms labai svarbu tiksliai įvertinti konstrukcijų dinamines charakteristikas. 40 ir 41 paveiksle pateikiami iš dvimačių kevalo modelių nustatyti 4 laisvųjų virpesių režimai. Svarbiausias iš jų yra 1-asis laisvųjų virpesių (pagrindinis) režimas, nuo kurio ir priklauso skaičiuojamieji aerodinaminiai ar sūkurinio srauto poveikiai konstrukcinėms schemoms.



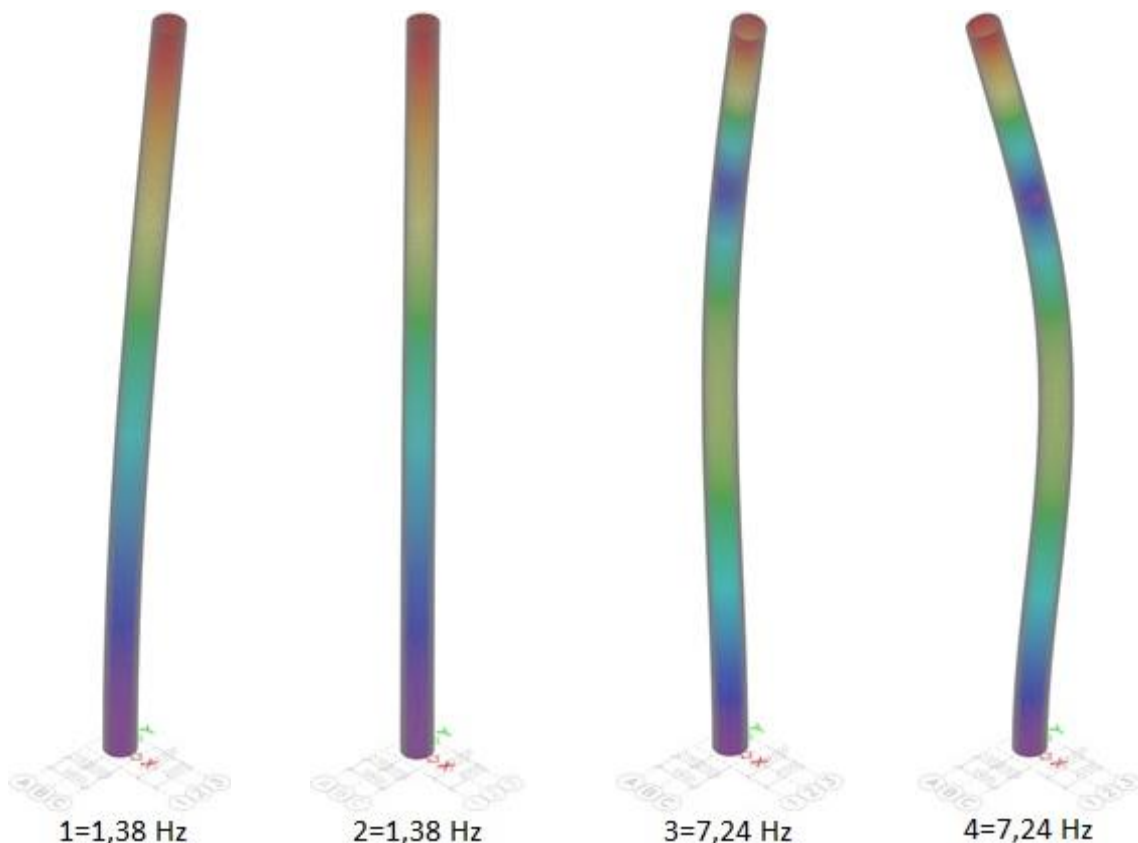
39 pav. Konstrukcinių schemų 1-ieji laisvųjų virpesių (pagrindiniai) dažniai

39 paveiksle pateikiami 1-ieji laisvųjų virpesių (pagrindiniai) dažniai 4-ioms konstrukcinėms schemoms, apskaičiuoti pagal Eurokodo darniuosius standartus ir nustatyti iš dvimačių kevalo modelių. 39 paveiksle galime pastebėti pastovų skirtumą tarp apskaičiuotų ir nustatytų dažnių 4-ioms konstrukcinėms schemoms. Nustatyti dažniai yra apie 17,95 – 30,19 % didesni už apskaičiuotus

dažnius. Galima daryti išvadą, kad skaičiuodami 1-ąjį laisvųjų virpesių dažnį ne visada tiksliai įvertinome konstrukcines schemas. Tiksliau būtų naudoti 1-ąjį laisvųjų virpesių dažnį, nustatytą iš dvimačių kevalo modelių, nes modelyje realiau įvertinama visa konstrukcija ir jos skerspjūvių savybės. Priimamas didesnis realus 1-asis laisvųjų virpesių dažnis leistų šiek tiek sumažinti skaičiuojamuosius aerodinaminius poveikius, tačiau stipriai padidintų skaičiuojamuosius sūkurinio srauto poveikius plieniniams kaminams.



40 pav. I ir II dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti 4 laisvųjų virpesių režimai ir jų dažniai MK1



41 pav. III ir IV dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti 4 laisvųjų virpesių režimai ir jų dažniai MK1

3.2. Tinkamumo ribinių būvių analizė

Konstruktinės schemos turi būti įvertinamos pagal tinkamumo ribinius būvius. Ribiniai būviai apima deformacijas arba įlinkius vėjo kryptimi dėl aerodinaminių poveikių, kurie turi neigiamos įtakos konstrukcijos išvaizdai. Ribiniai būviai taip pat apima virpesius, svyravimus arba posvyrius statmena vėjui kryptimi dėl sūkurinio srauto poveikių, kurie gali būti pavojingi gretimiems statiniams. Be to, išvardinti ribiniai būviai apima sąlygas, kurios gali sukelti nekonstrukcinių elementų pažeidimus [34].

Deformacijos arba įlinkiai dėl aerodinaminių poveikių yra apribojami didžiausiomis nustatytomis įlinkio reikšmėmis δ_{max} , apskaičiuojamomis pagal išraišką:

$$\delta_{max} = h/50; \quad (2.55)$$

53 lentelė. Didžiausių įlinkių δ_{max} apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema		
Kai schema:	I ir II	III ir IV
$\delta_{max} = cm$	600	720

Virpesiai, svyravimai arba posvyriai dėl sūkurinio srauto poveikių yra apribojami didžiausiomis virpesių amplitudžių reikšmėmis, nustatomomis pagal 54 lentelėje pateiktus duomenis:

54 lentelė. Didžiausių virpesių amplitudžių ribų nustatytos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Patikimumo klasė:	Virpesių amplitudžių statmena vėjui kryptimi ribos		Tai didžiausios amplitudžių ribos:	Visoms schemoms:
3	0,05	Išorinio skersmens	= cm	7
2	0,10	Išorinio skersmens	= cm	14
1	0,15	Išorinio skersmens	= cm	21

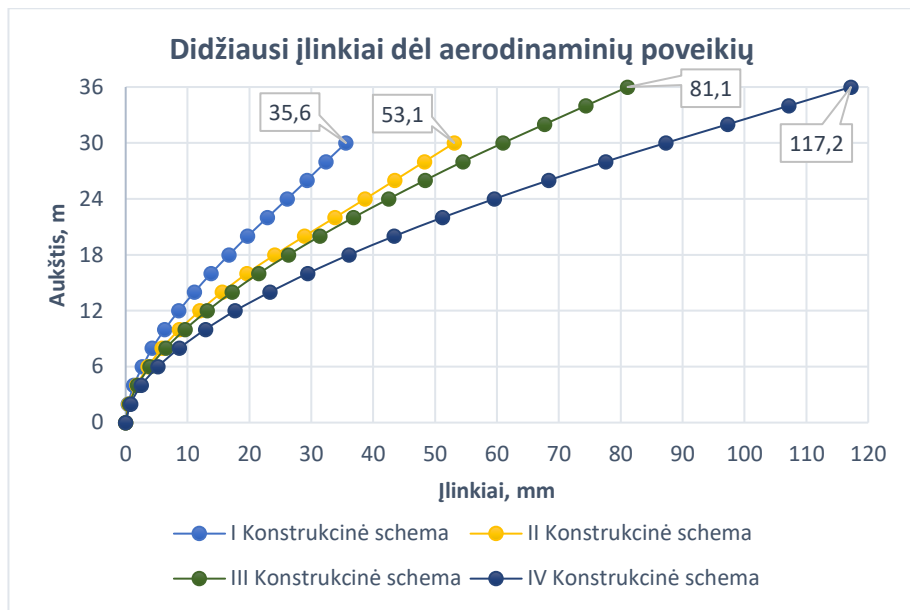
čia patikimumo klasės, priklausančios nuo kamino vietovės:

1-oji – kaminai statomi strateginėse vietose, atominėse elektrinėse, arba tankiai apgyvendintose miestų teritorijose. Kamino griūties atveju padariniai būtų socialiai ir ekonomiškai labai sunkūs;

2-oji – kaminai statomi pramonės įmonėse arba kitose vietovėse, kai negali būti priskiriami 1-ajai arba 3-ajai klasei;

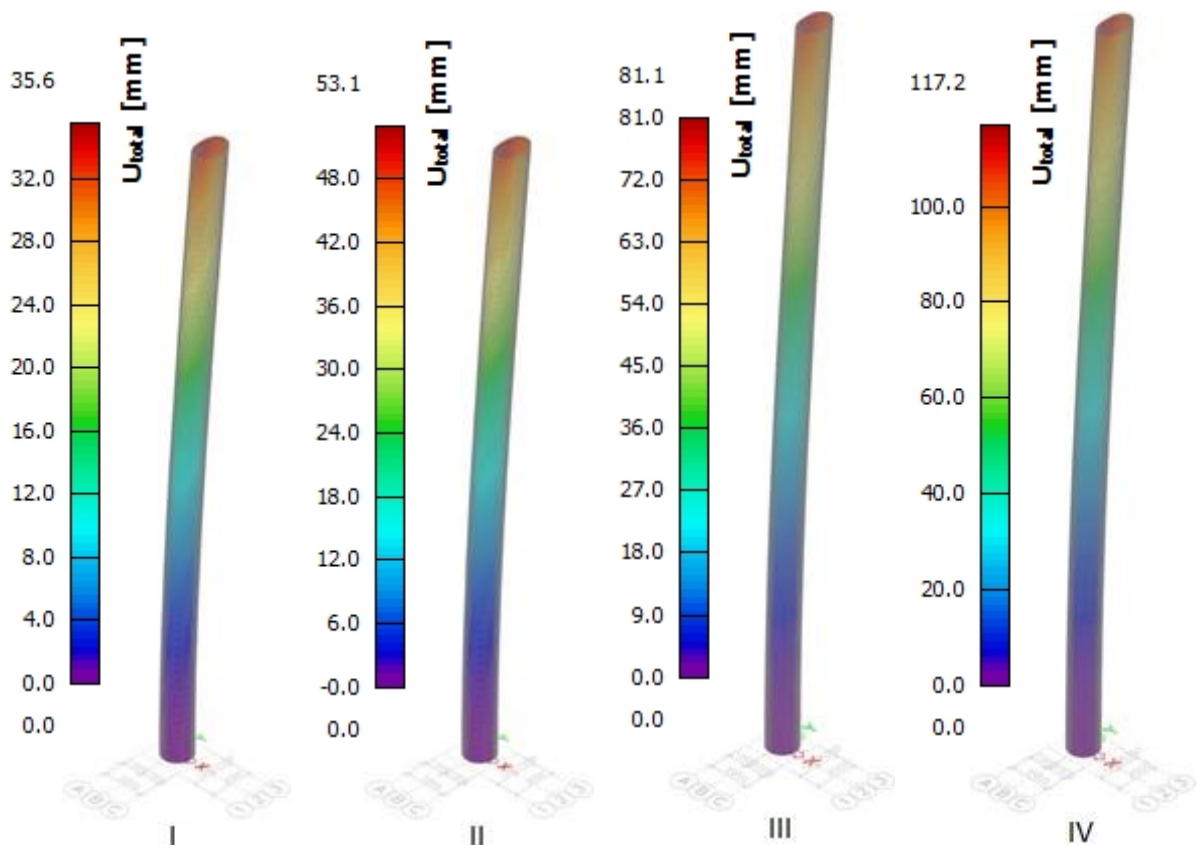
3-ioji – kaminai statomi atviroje kaimo vietovėje, kur nėra žmonių arba patys kaminai žemesni nei 16 m aukščio. Kamino griūties atveju padariniai neprisidarytų daug žalos.

43 paveiksle pateikiami didžiausiai įlinkiai dėl aerodinaminių poveikių, nustatyti iš dvimačių kevalo modelių. Didžiausių įlinkių rezultatai 4-ioms konstrukcinėms schemoms susistemunami ir yra pateikiami 42 paveiksle. Šiame paveiksle galime pastebėti skirtumą tarp konstrukcinių schemų nustatytų didžiausių įlinkių, kai schemos yra su sraigtinėmis juostelėmis ir be jų. II-sios ir IV-sios schemas įlinkiai yra apie 49,16 % - 44,51 % didesni už I-sios ir III-sios schemų įlinkius. Galime teigti, kad konstrukcinės schemos su sraigtinėmis juostelėmis iki 50 % gali padidinti įlinkius dėl aerodinaminių poveikių.



42 pav. Konstrukcinių schemų didžiausi įlinkiai dėl aerodinaminių poveikių

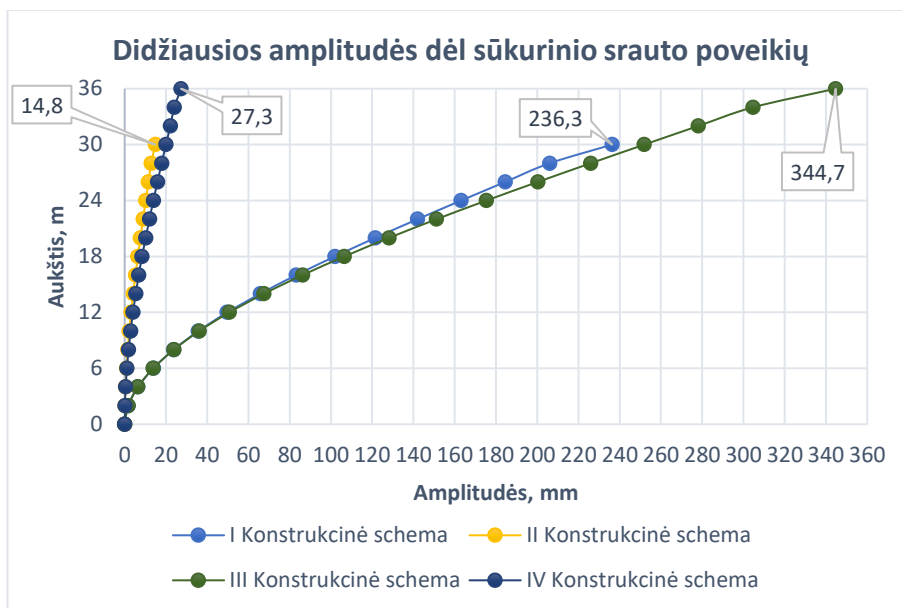
Visi nustatyti įlinkiai tenkina tinkamumo ribinio būvio sąlygas, nes yra mažesni už didžiausių įlinkių δ_{max} apskaičiuotas reikšmes. I-sios ir II-sios konstrukcinių schemų įlinkiai: 35,6 ir 53,1 < 600 mm yra mažesni, o III-sios ir IV-sios schemų įlinkiai: 81,1 ir 117,2 < 720 mm yra tai pat yra mažesni.



43 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti įlinkiai dėl aerodinaminių poveikių AK1

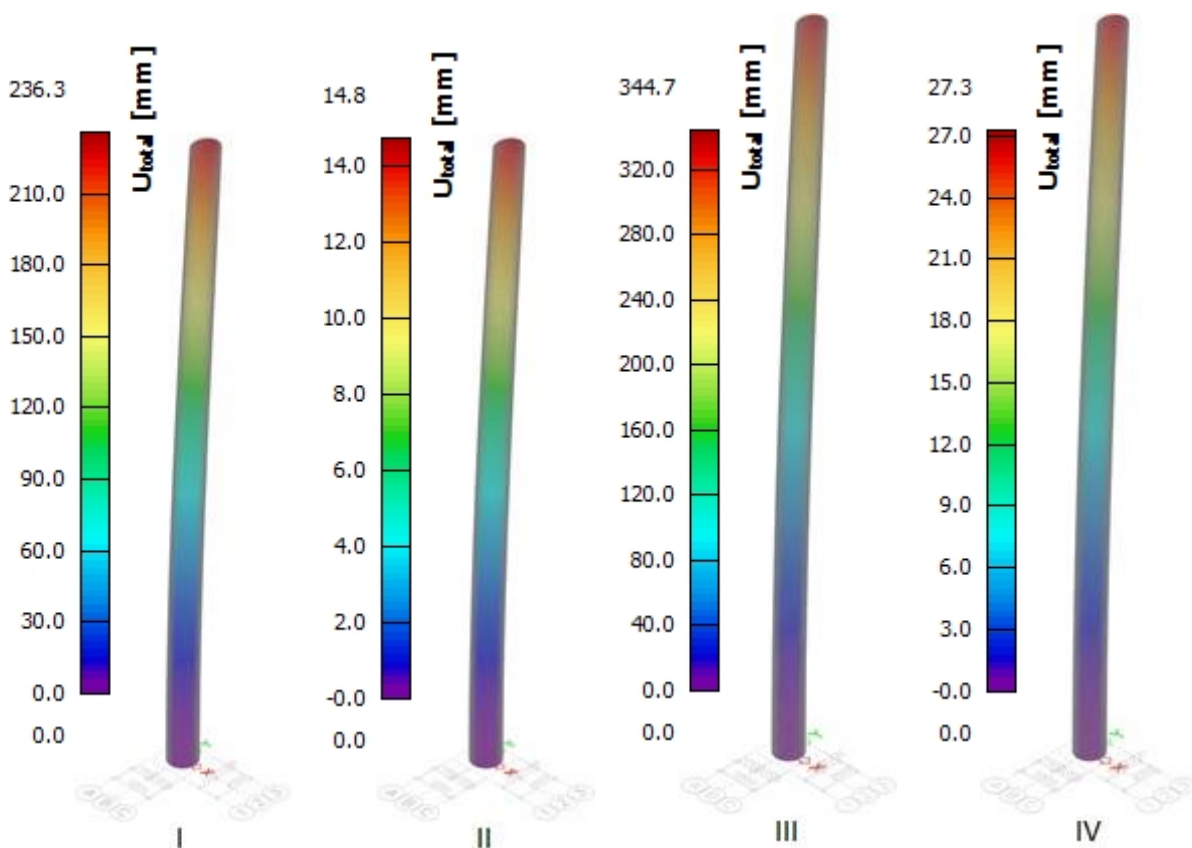
45 paveiksle pateikiamos didžiausios amplitudės dėl sukurinio srauto poveikių, nustatytos iš dvimačių kevalo modelių. Didžiausių amplitudžių rezultatai 4-ioms konstrukcinėms schemoms susistemunami ir yra pateikiami 44 paveiksle. Šiame paveiksle galime pastebėti skirtumą tarp konstrukcinių schemų nustatytų didžiausių amplitudžių, kai schemas yra su sraigtinėmis juostelėmis

ir be jų. II-sios ir IV-sios schemų amplitudės yra apie 93,74 % - 92,15 % mažesnės už I-sios ir III-sios schemų amplitudes. Galime teigti, kad konstrukcinės schemas su sraigtinėmis juostelėmis iki 94 % gali sumažinti virpesių amplitudes dėl sūkurinio srauto poveikių.



44 pav. Konstrukcinių schemų didžiausios amplitudės dėl sūkurinio srauto poveikių

Ne visos nustatytos amplitudės tenkina tinkamumo ribinio būvio sąlygas. Priimdami žemiausią 1-ąją patikimumo klasę, kurios didžiausia amplitudės riba yra iki 210 mm. I-sios ir III-sios konstrukcinių schemų amplitudės: 236,63 ir 344,7 > 210 mm yra didesnės, o II-sios ir IV-sios schemų amplitudės: 14,8 ir 27,3 < 210 mm yra mažesnės.



45 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatytos amplitudės dėl sūkurinio srauto poveikių AK2

42 ir 44 paveiksluose pateikti skirtingų konstrukcinių schemų gauti rezultatai. Remiantis I-osios ir II-osios ar III-osios ir IV-osios konstrukcinių schemų rezultatais, sūkurinio srauto poveikių sukeliama poslinkiai yra nuo 4,25 iki 6,64 karto didesni už aerodinaminių poveikių sukeltus poslinkius. Galime daryti išvadą, kad imdamiesi sūkurinio srauto slopinimo priemonių, tokių kaip sraigtinės juostelės, galime iki 50 % padidinti įlinkius dėl aerodinaminių poveikių, tačiau iki 94 % sumažinti virpesių amplitudes dėl sūkurinio srauto poveikių. Taip pat I-oji ir III-oji konstrukcinė schema netenkina ir tinkamumo ribinių būvių sąlygų, tai yra didžiausių leistinų virpesių amplitudžių.

3.3. Saugos ribinių būvių analizė

Konstrukcinės schemos turi būti įvertinamos pagal saugos ribinius būvius. Ribiniai būviai apima konstrukcijų statinės pusiausvyros, bendrojo pastovumo ir konstrukcinių elementų stiprumo sąlygas [34]. Šios sąlygos išreiškiamos per plastiškumo ribą ir ciklinį plastiškumą dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių [33].

3.3.1. Plastiškumo ribinis būvis

Plastiškumo ribinis būvis apima sąlygas konstrukcinėse schemose, kai konstrukcija nebegali priešintis ją veikiantiems poveikiams, nes įvyksta plastinė plieno deformacija. Pasiekus plastiškumo ribinį būvį, konstrukcijos laikomoji galia apibrėžiama kaip plastinės griūties poveikiai, gauti remiantis mažų poslinkių teorija [34].

Ribiniai įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių, kai atliekama geometriškai netiesinė analizė, išreiškiami ekvivalentiniais Von Miseso įtempiais:

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} + 3(\tau_{x\theta,Ed}^2)}; \quad (2.56)$$

Ribinių įtempių Von Miseso laikomoji galia $f_{eq,Rd}$ apskaičiuojama pagal išraišką:

$$f_{eq,Rd} = f_{yd} = f_{yk}/\gamma_{M0} = 355/1 = 355 \text{ Mpa}; \quad (2.57)$$

čia:

$f_{yk} = 355 \text{ Mpa}$ – charakteristinis stipris pagal takumo ribą, kai kamino plieno markė S355J2;

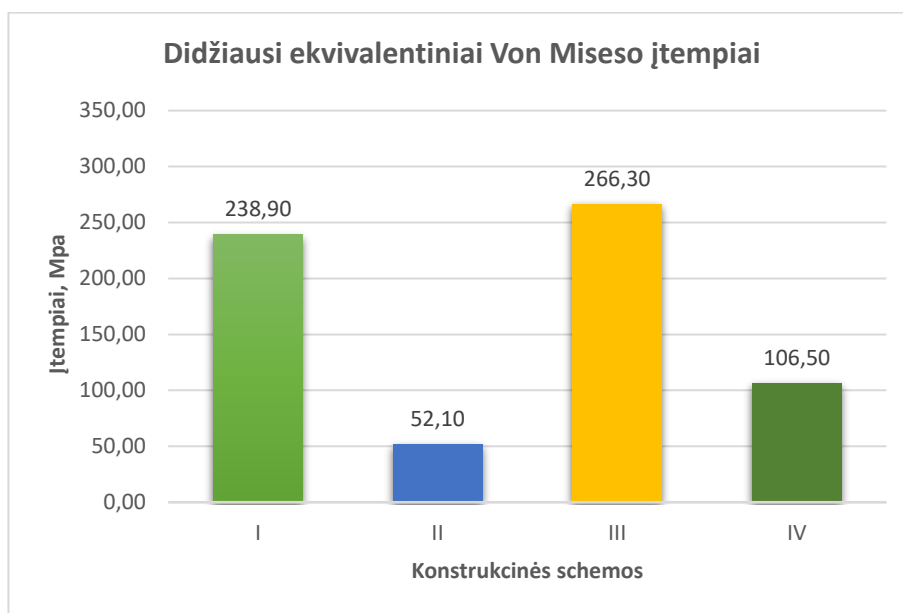
$\gamma_{M0} = 1$ – dalinis koeficientas, kai neatsižvelgiama į bendrąjį ar vietinį klupimą.

Ribiniai įtempiai yra apribojami įtempių sąlygomis:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} = 355 \text{ Mpa}; \quad (2.58)$$

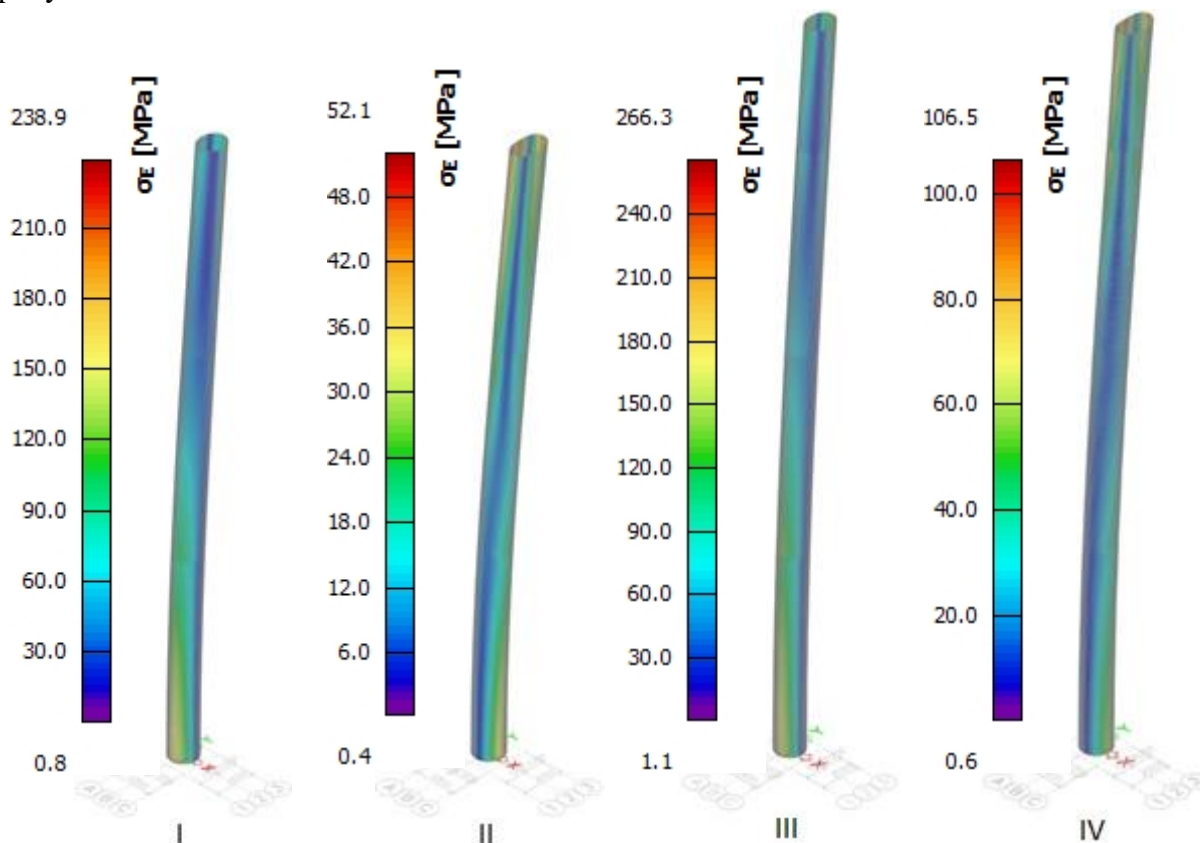
47 paveiksle pateikiami didžiausi ekvivalentiniai Von Miseso įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių, nustatyti iš dvimačių kevalo modelių. Didžiausi įtempių rezultatai 4-ioms konstrukcinėms schemoms susisteminami ir pateikiami 46 paveiksle. Šiame paveiksle galime pastebėti skirtumą tarp konstrukcinių schemų nustatytų didžiausių įtempių, kai schemos yra su sraigtinėmis juostelėmis ir be jų. II-sios ir IV-sios schemos įtempiai yra apie 78,62 % - 60,01 % mažesni už I-sios ir III-sios schemų įtempius. Galime teigti, kad konstrukcinės schemos su sraigtinėmis juostelėmis gali iki 80 % sumažinti įtempius, atsirandančius dėl aerodinaminių ir

sūkurinio srauto poveikių. Tačiau didėjant konstrukcinės schemos aukščiui, sraigtinės juostelėmis vis mažiau lemia įtempius, atsiradusius dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių.



46 pav. Konstrukcinių schemų didžiausi ekvivalentiniai Von Miseso įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių

Visi nustatyti įtempiai tenkina plastiškumo ribinio būvio sąlygas, nes yra mažesni už didžiausių įtempių $f_{eq,Rd}$ apskaičiuotas reikšmes. I-sios ir II-sios konstrukcinių schemų įtempiai: 238,90 ir 52,10 < 355 Mpa yra mažesni, o III-sios ir IV-sios schemų įtempiai: 266,30 ir 106,50 < 355 Mpa yra taip pat yra mažesni.



47 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti ekvivalentiniai Von Miseso įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6

3.3.2. Ciklinio plastiškumo ribinis būvis

Ciklinio plastiškumo ribinis būvis apima sąlygas konstrukcinėse schemose, kai konstrukcijoje dėl kartotinių apkrovos ciklų toje pačioje vietoje sukuriama tempiamoji ir gniuždomoji plastinė deformacija. Konstrukcija daug kartų plastiškai deformuojama kol galiausiai įvyksta vietinis supleišėjimas, išsekvojus plieno jėgos potencialą [33].

Ribiniai įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių, kai atliekama geometriškai netiesinė analizė, turi būti įvertinami per įtempių komponentes. Pagal gretimas ribines ciklinio proceso reikšmes turi būti nustatytos kiekvienos įtempių komponentės $\Delta\sigma_{x,Ed,i}$, $\Delta\sigma_{\theta,Ed,i}$, $\Delta\tau_{x\theta,Ed,i}$ reikšmės kiekviename konstrukcijos paviršiuje (vidiniame $i = 1$ ir išoriniame $i = 2$). Pagal šiuos įtempių pokyčius apskaičiuojami ekvivalentiniai Von Miseso įtempių pokytis vidiniuose ir išoriniuose paviršiuose:

$$\Delta\sigma_{eq,Ed,i} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,Ed,i}^2 + \Delta\sigma_{\theta,Ed,i}^2 - \Delta\sigma_{x,Ed,i} + 3(\Delta\tau_{x\theta,Ed,i}^2)}; (2.59)$$

čia:

$\Delta\sigma_{x,Ed,i}$ – meridianiniai įtempiai (*Mpa*);

$\Delta\sigma_{\theta,Ed,i}$ – perimetriniai įtempiai (*Mpa*);

$\Delta\tau_{x\theta,Ed,i}$ – šlyjamieji įtempiai (*Mpa*).

Ribinių įtempių Von Miseso laikomoji galia $f_{eq,Rd}$ apskaičiuojama pagal išraišką:

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2f_{yd} = 2 \cdot 355 = 710 \text{ Mpa}; (2.60)$$

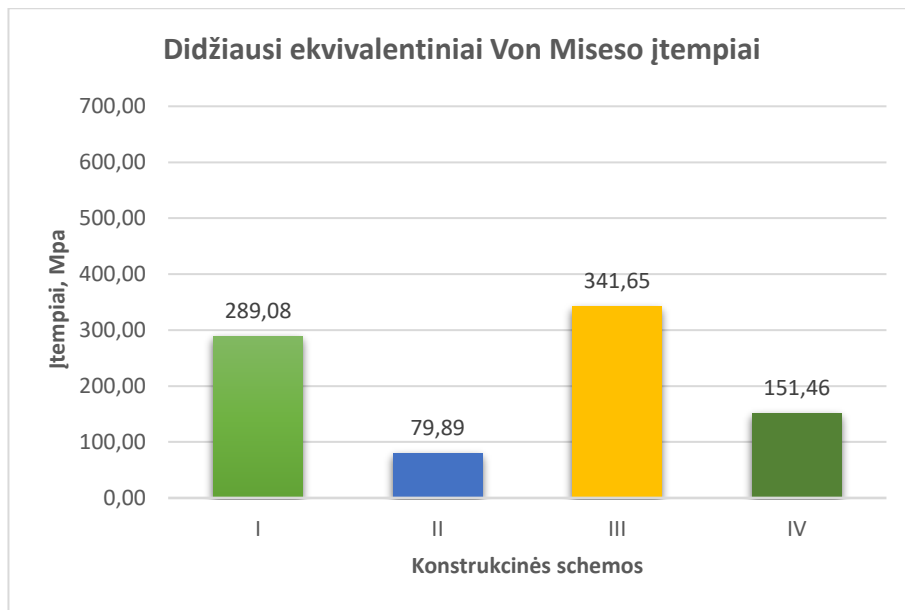
čia:

$f_{yd} = 355 \text{ Mpa}$ – skaičiuotinis stipris pagal takumo ribą, kai kamino plieno markė S355J2;

Ribiniai įtempiai yra apribojami įtempių sąlygomis:

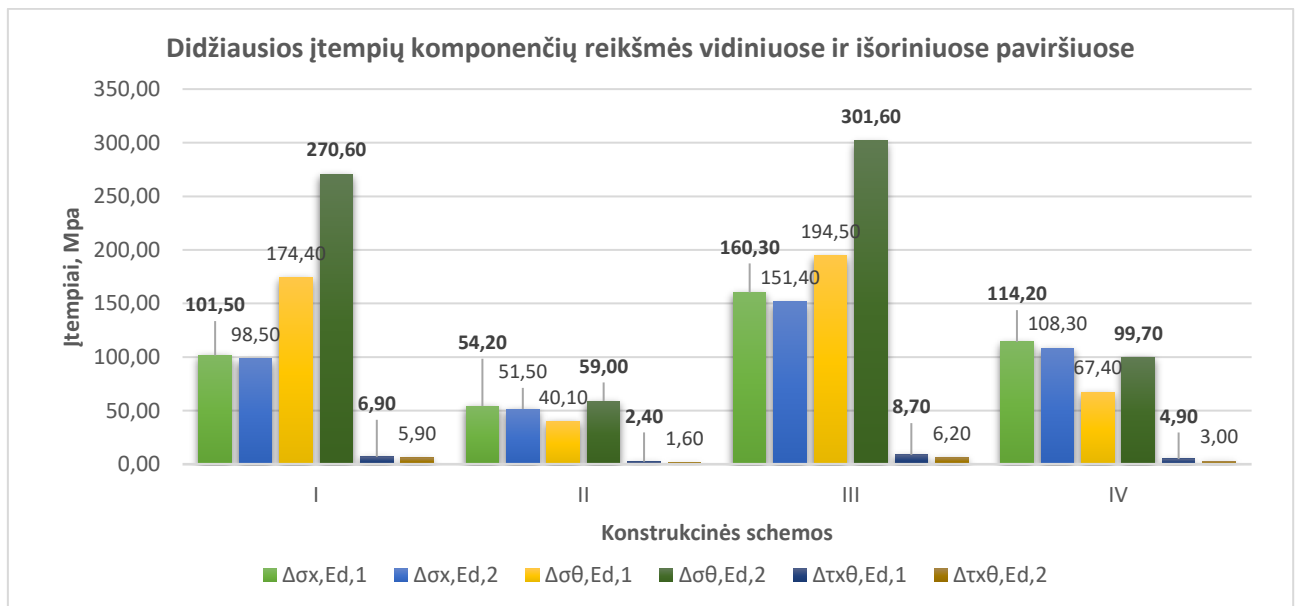
$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} = 710 \text{ Mpa}; (2.61)$$

49 paveiksle pateikiamos didžiausios įtempių komponentių reikšmės dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių, nustatytos iš dvimačių kevalo modelių (žr. 2 priedą). Šiame paveiksle tarp vidinių $i = 1$ ir išorinių $i = 2$ paviršių priimamos didžiausios įtempių komponentių reikšmės paviršiuose (žr. 49 pav. paryškintas reikšmes). Pagal įtempių pokyčius apskaičiuojami ekvivalentiniai Von Miseso įtempiai. Apskaičiuoti įtempių rezultatai 4-ioms konstrukcinėms schemoms susisteminami ir pateikiami 48 paveiksle. Šiame paveiksle galime pastebėti skirtumą tarp konstrukcinių schemų nustatytų didžiausių įtempių, kai schemas yra su sraigtinėmis juostelėmis ir be jų. II-sios ir IV-sios schemas įtempiai yra apie 72,36 % - 55,67 % mažesni už I-sios ir III-sios schemų įtempius. Galime teigti, kad konstrukcinės schemas su sraigtinėmis juostelėmis gali iki 73 % sumažinti įtempius, atsirandančius dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių. Tačiau didėjant konstrukcinės schemas aukščiui, sraigtinės juostelėmis vis mažiau lemia įtempius, atsiradusius dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių.



48 pav. Konstrukcinių schemų didžiausi ekvivalentiniai Von Miseso įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių

Visi nustatyti įtempiai tenkina ciklinio plastiškumo ribinio būvio sąlygas, nes yra mažesni už didžiausių įtempių $\Delta f_{eq,Rd}$ apskaičiuotas reikšmes. I-sios ir II-sios konstrukcinių schemų įtempiai: 289,08 – 79,89 < 710 Mpa yra mažesni, o III-sios ir IV-sios schemų įtempiai: 341,65 – 151,46 < 355 Mpa yra taip pat yra mažesni.



49 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatytos didžiausios įtempių komponentių reikšmės dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6 vidiniuose $i = 1$ ir išoriniuose $i = 2$ paviršiuose

46 ir 48 paveiksluose pateikti skirtingų konstrukcinių schemų gauti rezultatai. Remiantis I-osios ir II-osios ar III-osios ir IV-osios konstrukcinių schemų rezultatais, kai neatsižvelgiama į sūkurinio srauto sukiamus poveikius, ekvivalentiniai įtempiai yra nuo 2,26 iki 4,59 karto didesni už įtempius, kai atsižvelgiama į sūkurį srautą. Galime daryti išvadą, kad sraigtinės juostelės gali iki 80 % sumažinti įtempius esant plastiškumo sąlygoms ir iki 73 % esant ciklinio plastiškumo sąlygoms. Tačiau didėjant konstrukcijos aukščiui, sraigtinės juostelės vis mažiau lemia įtempius, atsiradusius dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių.

Išvados

1. Atlikus mokslinės ir praktinės literatūros analizę nustatyta, kad plieniniams kaminams vėjas daro žymiai didesnę žalą negu mūriniams arba gelžbetoniniams. Vėjo poveikiai priklauso nuo kelių veiksnių – vėjo greičio ir vėjo poveikių kryptių. Poveikių kryptys skirstomos į vėjo kryptimi (aerodinaminiai poveikiai) ir į statmena vėjui kryptimi (sūkurinio srauto poveikiai).
2. Atlikus konstrukcinių schemų aerodinaminių ir sūkurinio srauto skaičiuojamų poveikių analizę skerspjūvių paviršiuose nustatyta, kad būtina tinkamai įvertinti vėjo poveikius. Konstrukcinės schemas be sraigtnių juostelių patiria nuo 2,84 iki 4,4 karto didesnius skaičiuojamuosius sūkurinio srauto poveikius už aerodinaminius poveikius. Konstrukcinės schemas su sraigtnėmis juostelėmis padeda iki 94 % sumažinti skaičiuojamuosius sūkurinio srauto poveikius, tačiau iki 60 % padidino skaičiuojamuosius aerodinaminius poveikius.
3. Atlikus dvimačių kevalo modelių dinaminių charakteristikų analizę, 1-asis laisvųjų virpesių (pagrindinis) dažnis tarp apskaičiuotų pagal darniuosius Europos standartus ir nustatytų iš dvimačių kevalo modelių skiriasi. Nustatyti dažniai yra nuo 17,95 % iki 30,19 % didesni už apskaičiuotus dažnius. Priimamas didesnis realus nustatytas, o ne apskaičiuotas 1-asis laisvųjų virpesių dažnis leistų šiek tiek sumažinti skaičiuojamuosius aerodinaminius poveikius, tačiau stipriai padidintų skaičiuojamuosius sūkurinio srauto poveikius plieniniams kaminams.
4. Atlikus dvimačių kevalo modelių tinkamumo ribinių būvių analizę nustatyta, kad didžiausi įlinkiai ir didžiausios virpesių amplitudės tarp konstrukcinių schemų stipriai skiriasi. Įprasti plieniniai kaminai dėl sūkurinio srauto poveikių patiria nuo 4,25 iki 6,64 karto didesnius poslinkius nei dėl aerodinaminių poveikių. Plieniniuose kaminuose imdamesi sūkurinio srauto slopinimo priemonių, tai yra sraigtnių juostelių, galime iki 50 % padidinti įlinkius dėl aerodinaminių poveikių, tačiau iki 94 % sumažinti virpesių amplitudes dėl sūkurinio srauto poveikių.
5. Atlikus dvimačių kevalo modelių saugos ribinių būvių analizę, nustatyta, kad didžiausi ekvivalentiniai įtempiai tarp konstrukcinių schemų stipriai skiriasi. Įprasti plieniniai kaminai, kai neatsižvelgiama į sūkurinio srauto poveikius, patiria nuo 2,26 iki 4,59 karto didesnius įtempius nei atsižvelgus į sūkurinį srautą. Plieniniuose kaminuose imdamesi sūkurinio srauto slopinimo priemonių, tai yra sraigtnių juostelių, galime iki 80 % sumažinti įtempius esant plastiškumo sąlygoms ir iki 73 % esant ciklinio plastiškumo sąlygoms. Tačiau didėjant kamino konstrukcijos aukščiui, sraigtnės juostelės vis mažiau lemia įtempius, atsiradusius dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių.

Literatūros sąrašas

1. A. P. Pawar, "Optimization and Analysis of Steel Stacks for Weight Reduction.," *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 01, pp. 11–18, 2017.
2. R. B. D., "Analysis of Cantilever Steel Chimney As Per Indian Standards," *J. Eng. Res. Appl. www.ijera.com*, vol. 5, no. 55, pp. 151–162, 2015.
3. D. Bru, R. Reynau, F. J. Baeza, and S. Ivorra, "Structural damage evaluation of industrial masonry chimneys," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 51, no. 1, pp. 1–16, 2018.
4. B. Vananje, N. Shinde, A. Vishe, H. Hazare, and V. Mahtre, "Comparison between Steel Chimney and R . C . C . Chimney," *Int. J. on Rec. on Rec.*, pp. 277–279, 2016.
5. L. Wang and X. yan Fan, "Failure cases of high chimneys: A review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 105, no. February, pp. 1107–1117, 2019.
6. G. Kuriyan and C. G. Nandakumar, "Wind induced torsion in chimney structures," vol. 3, no. 1, pp. 24–29, 2016.
7. M. Gordan, M. Izadifar, A. Haddadiasl, and H. Mohammad, "Interaction of Across-Wind and Along-Wind with Tall Buildings Authors Interaction of Across-Wind and Along-Wind with Tall Buildings," no. November, 2013.
8. NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF ITALY. *Guide for the assessment of wind actions and effects on structures*. [Roma, Italy]: Advisory committee on technical recommendations for constructions, 2010. CNR-DT 207/208.
9. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1991-1-4:2005]. *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 1-4 dalis. Bendrieji poveikiai. Vėjo poveikiai. = Eurocode 1: Action on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions: Europos standartas EN 1991-1-4 turi Lietuvos standarto statusq*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
10. P. Mendis, T. Ngo, N. Haritos, A. Hira, B. Samali, and J. Cheung, "Wind loading on tall buildings," *Electron. J. Struct. Eng.*, vol. 7, no. December 2014, pp. 41–54, 2007.
11. STATYBOS TECHININIS REGLAMENTAS. [STR 2.05.04:2003]. *Poveikiai ir apkrovos*. Patvirtinta Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2003 m gegužės 15 d. įsakymų Nr. 233.
12. D. H. Mudimeli, "Boundary Layer Separation from a Circular Cylinder," no. Oct, 2018.
13. M. Mawat, "Simulation of Cylindrical Body Structure Subjected to Flow in Different Reynolds Number Regimes," *Muthanna J. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 1, pp. 45–51, 2018.
14. J. H. Lienhard, "Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders," *Bulletin 300*. pp. 1–36, 1966.
15. I. Giosan and P. Eng, "Vortex shedding induced loads on free standing structures," *Struct. Vor. Shedding Response Estim. Methodol. ...*, 2000.
16. Y. O. Venkata, V. Gupta, and A. Attri, "Experimental vortex-induced vibration of spring mounted cylinder: Achieving Lock-In," *5th Int. Conf. Sh. Offshore Technol. ICSOT*, no. m, pp. 1–7, 2017.
17. G. Solari, "Wind Loading of Structures: Framework, Phenomena, Tools and Codification," *Structures*, vol. 12, pp. 265–285, 2017.
18. KARGAUDAS, Vytautas ir Rimas VAIČAITIS. *Konstrukcijų virpesiai*. Kaunas Technologija, 2014. ISBN 9786090210338.

19. B. Tharun Kumar Reddy, "Analysis of Self Supported Steel Chimney as Per Indian Standard," *Ijmer*, vol. 4, no. Part 1, pp. 14–17, 2014.
20. H. Ishizaki, H. Hara, and T. Shimada, "The efficiency of helical strakes for the suppression of vortex-excited oscillation of steel stacks," *Eng. Struct.*, vol. 6, no. 4, pp. 334–339, 1984.
21. F. Gómez, J. H. Quesada, R. Gómez, V. Theofilis, B. Carmo, and J. Meneghini, "Stability analysis of the flow around a cylinder fitted with helical strakes," *43rd Fluid Dyn. Conf.*, pp. 1–18, 2013.
22. R. Kumar, C.-H. Sohn, and B. Gowda, "Passive Control of Vortex-Induced Vibrations: An Overview," *Recent Patents Mech. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2012.
23. M. M. Zdravkovich, "Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 7, no. 2, pp. 145–189, 1981.
24. T. Zhou, S. F. M. Razali, Z. Hao, and L. Cheng, "On the study of vortex-induced vibration of a cylinder with helical strakes," *J. Fluids Struct.*, vol. 27, no. 7, pp. 903–917, 2011.
25. H. J. Niemann, F. Lupi, and R. Hoeffler, "Vibrations of chimneys under the action of the wind," *Proc. Int. Conf. Struct. Dyn. , EUROODYN*, vol. 2014-Janua, no. July, pp. 1385–1391, 2014.
26. Grala, P., Loredou-Souza, A. M., Rocha, M. M., "A comparison study between seven procedures to predict vortex-induced vibrations on industrial chimneys," *Rev. Sul-americana Eng. Estrutural*, vol. 13, no. 2, pp. 1–20, 2016.
27. S. A. Hall, "Vortex-induced vibrations of structures.," 1981.
28. D. Livanos. Investigation of Vortex Induced Vibrations on Wind Turbine Towers: Master of Science Thesis. Siemens Gamesa Renewable Energy, 2018
29. J. Kawecki and J. A. Zurański, "Cross-wind vibrations of steel chimneys-A new case history," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 95, no. 9–11, pp. 1166–1175, 2007.
30. M. Clobes, A. Willecke, and U. Peil, "Vortex excitation of steel chimneys : Two ultimate limit states," no. 1986, pp. 2–9, 2005.
31. THE CICIND CHIMNEY STANDART. *Model code for steel chimneys. Revision 1 – December 1999. Revision 2 – September 2010.* [Ratingen, Germany]: International Committee on industrial chimneys, 1999, 2002, 2010. ISBN 1-902998-16-2.
32. BARAUSKAS, Vytautas, Rimantas KAČIANAUSKAS ir Rimantas BELEVIČIUS. *Baigtinių elementų metodo pagrindai.* Vilnius Technika, 2004. ISBN 9986057922.
33. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1993-1-6:2007]. Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-6 dalis. Kevalinių konstrukcijų stipris ir stabilumas. = Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures: Europos standartas EN 1993-1-6 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
34. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1993-1-6:2007]. Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-6 dalis. Kevalinių konstrukcijų stipris ir stabilumas. = Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures: Europos standartas EN 1993-1-6 turi Lietuvos standarto statusą. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.

Priedai

1 priedas. Dinaminių charakteristikų skaičiavimas pagal Eurokodą 1991-1-4

Atskaitos aukštis z_s , kai kaminai priklauso vertikalioms konstrukcijoms ir yra reikšmingas tik pagrindinis virpesių režimas vėjo kryptimi, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$z_s = 0,6 \cdot h \geq z_{min}; \quad (2.62)$$

55 lentelė. Atskaitos aukščio z_s apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema		
Kai schema:	I – II	III – IV
$z_s \geq z_{min} = m$	$18 \geq 2$	$22 \geq 2$

čia:

$z_{min} = 2 m$ – mažiausias aukštis, kai II vietovės kategorija.

Kaminų pagrindinis lenkiamasis dažnis n_1 , priklausantis nuo dažnio koeficiento, skerspjūvio skersmens bei nuo efektyviojo aukščio, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$n_1 = \frac{\varepsilon_1 \cdot b}{h_{eff}^2} \cdot \sqrt{\frac{W_s}{W_t}}; \quad (2.63)$$

56 lentelė. Kaminų pagrindinio lenkiamojo dažnio n_1 apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$n_1 = Hz$	1,556	1,524	1,080	1,061

čia:

$\varepsilon_1 = 1000$ – plieninių kaminų dažnio koeficientas;

b – viršutinis kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m);

h_{eff} – efektyvusis kamino konstrukcijos aukštis (m);

W_s – konstrukcijos dalių, turinčių įtakos kamino standumui svoris (t);

W_t – visuminis kamino konstrukcijos svoris (t).

Kaminų be standinančiųjų žiedų pagrindinis ovalėjimo dažnis $n_{1,0}$, priklausantis nuo kevalo sienelių storių ir ploto masės bei skerspjūvio skersmens, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$n_{1,0} = 0,492 \cdot \sqrt{\frac{t^3 \cdot E}{\mu_s \cdot (1 - \nu^2) \cdot b^4}}; \quad (2.64)$$

57 lentelė. Kaminių pagrindinio ovalėjimo dažnio $n_{1,0}$ apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$n_{1,0} = Hz$	13,48	13,21	11,91	11,70

čia:

t – kamino kevalo sienelių storis (m);

$E = 210000000000 \text{ N/m}^2$ – Jungo modulis;

b – viršutinis kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m);

μ_s – kamino konstrukcijos vienetinio kevalo ploto masė (kg/m^2);

b – viršutinis kamino konstrukcijos skerspjūvio skersmuo (m).

Pagrindinis lenkiamasis virpesių režimas $\phi_1(z)$ aukštyje z , kai kaminai apibūdinami kaip žemėje įtvirtintos gembinės konstrukcijos, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\zeta; \quad (2.65)$$

58 lentelė. Pagrindiniai lenkiamųjų virpesių režimo $\phi_1(z)$ aukštyje z apskaičiuotos reikšmės

I ir II konstrukcinė schema										
Aukštyje $z = m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi_1(z) =$	0,001	0,004	0,010	0,018	0,028	0,040	0,054	0,071	0,090	0,111
Aukštyje $z = m$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\phi_1(z) =$	0,134	0,160	0,188	0,218	0,250	0,284	0,321	0,360	0,401	0,444
Aukštyje $z = m$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\phi_1(z) =$	0,490	0,538	0,588	0,640	0,694	0,751	0,810	0,871	0,934	1,00
III ir IV konstrukcinė schema										
Aukštyje $z = m$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\phi_1(z) =$	0,001	0,003	0,007	0,012	0,019	0,028	0,038	0,049	0,063	0,077
Aukštyje $z = m$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\phi_1(z) =$	0,093	0,111	0,130	1,151	0,174	0,198	0,223	0,250	0,279	0,309
Aukštyje $z = m$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\phi_1(z) =$	0,340	0,373	0,408	0,444	0,482	0,522	0,563	0,605	0,649	0,694
Aukštyje $z = m$	31	32	33	34	35	36				
$\phi_1(z) =$	0,742	0,790	0,840	0,892	0,945	1,00				

čia:

$\zeta = 2$ – kamino virpesių režimo eksponentė.

Vienetinio ilgio ekvivalentinė masė m_e , priklausanti nuo pagrindinio virpesių režimo, apskaičiuojama pagal išraišką:

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \phi_1^2(s) ds}; \quad (2.66)$$

59 lentelė. Vienetinio ilgio ekvivalentinės masės m_e apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$m_e = kN/m$	3,63	3,73	3,44	3,51

čia:

m – kamino konstrukcijos vienetinio ilgio masė (kN/m);

ϕ_1 – pagrindinis virpesių režimas;

$i = 1$ – virpesių režimas aukštyje z ;

l – kamino konstrukcijos aukštis (m).

Logaritminis slopinimo dekrementas δ , priklausantis nuo pagrindinio virpesių režimo, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d; \quad (2.67)$$

60 lentelė. Logaritminio slopinimo dekremento δ apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$\delta =$	0,069	0,069	0,074	0,073

čia:

δ_s – konstrukcinis logaritminis slopinimo dekrementas;

δ_a – pagrindinio virpesių režimo aerodinaminis logaritminis slopinimo dekrementas;

$\delta_d = 0$ – specialiųjų įtaisų (masės ar skysčio slopintuvų) logaritminis slopinimo dekrementas.

Konstrukcinis logaritminis slopinimo dekrementas δ_s , priklausantis nuo konstrukcijos tipo, aukščio ir skerspjūvio, nustatomas pagal išraiškas taikant tiesinę interpoliaciją:

- Plieniniams kaminams su vienu dūmtraukiu ir su išorine šilumos izoliacija:

$$\text{kai } h/b < 18 \text{ m; tai } \delta_s = 0,020; \quad (2.68)$$

$$\text{kai } 20 \leq h/b < 24 \text{ m; tai } \delta_s = 0,040; \quad (2.69)$$

$$\text{kai } h/b \geq 26 \text{ m; tai } \delta_s = 0,014; \quad (2.70)$$

- Plieniniams kaminams su daugiau nei vienu dūmtraukiu ir su išorine šilumos izoliacija:

$$\text{kai } h/b < 18 \text{ m; tai } \delta_s = 0,020; \quad (2.71)$$

$$\text{kai } 20 \leq h/b < 24 \text{ m; tai } \delta_s = 0,040; \quad (2.72)$$

$$\text{kai } h/b \geq 26 \text{ m; tai } \delta_s = 0,025; \quad (2.73)$$

61 lentelė. Konstrukcinio logaritminio slopinimo dekremento δ_s nustatytos reikšmės

I ir II konstrukcinė schema					
Kai santykis				Tai dekrementas	
$h/b = m$	$21,43 > 18$	$20 \leq 21,43 < 24$	$21,43 < 26$	$\delta_s =$	0,040
III ir IV konstrukcinė schema					
Kai santykis				Tai dekrementas	
$h/b = m$	$25,71 > 18$	$20 \leq 25,71 > 24$	$25,71 < 26$	$\delta_s =$	0,028

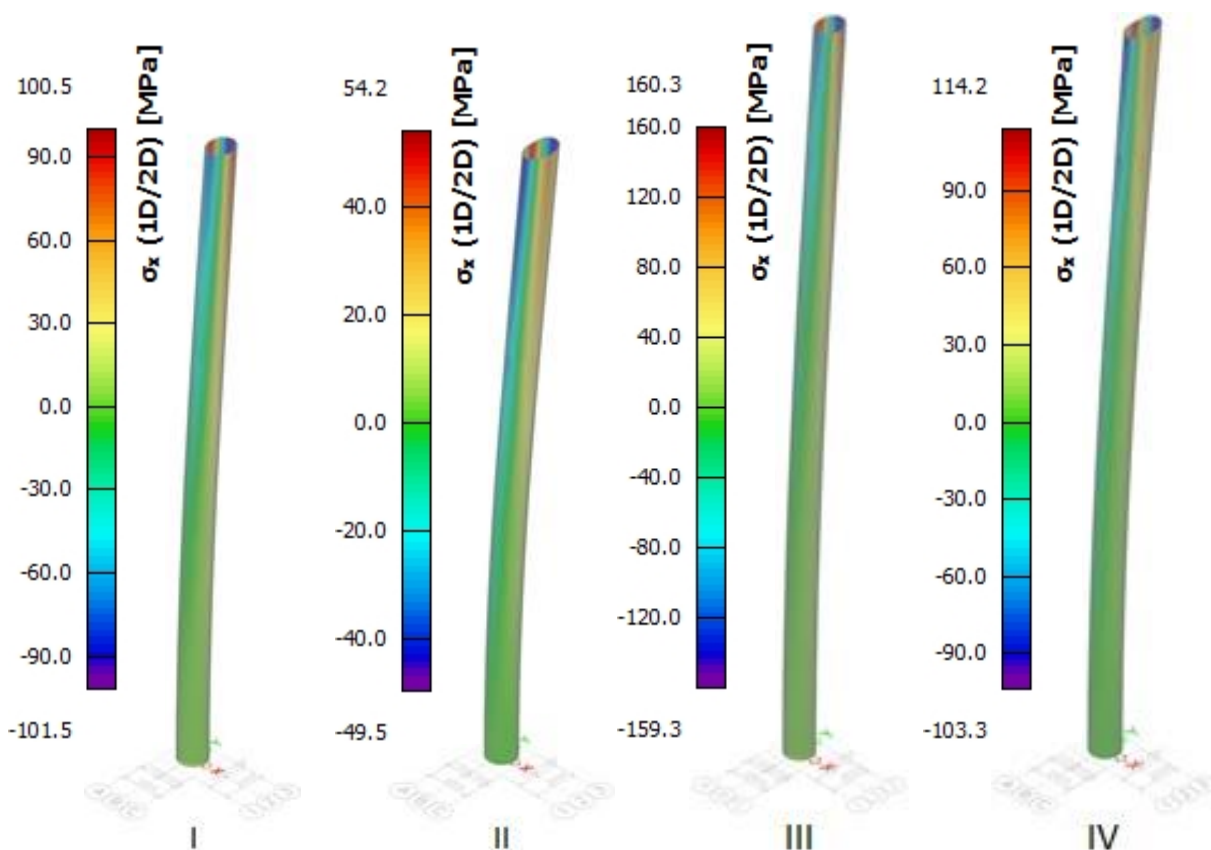
Aerodinaminis logaritminis slopinimo dekrementas δ_a , priklausantis nuo pagrindinio virpesių režimo, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e}; \quad (2.74)$$

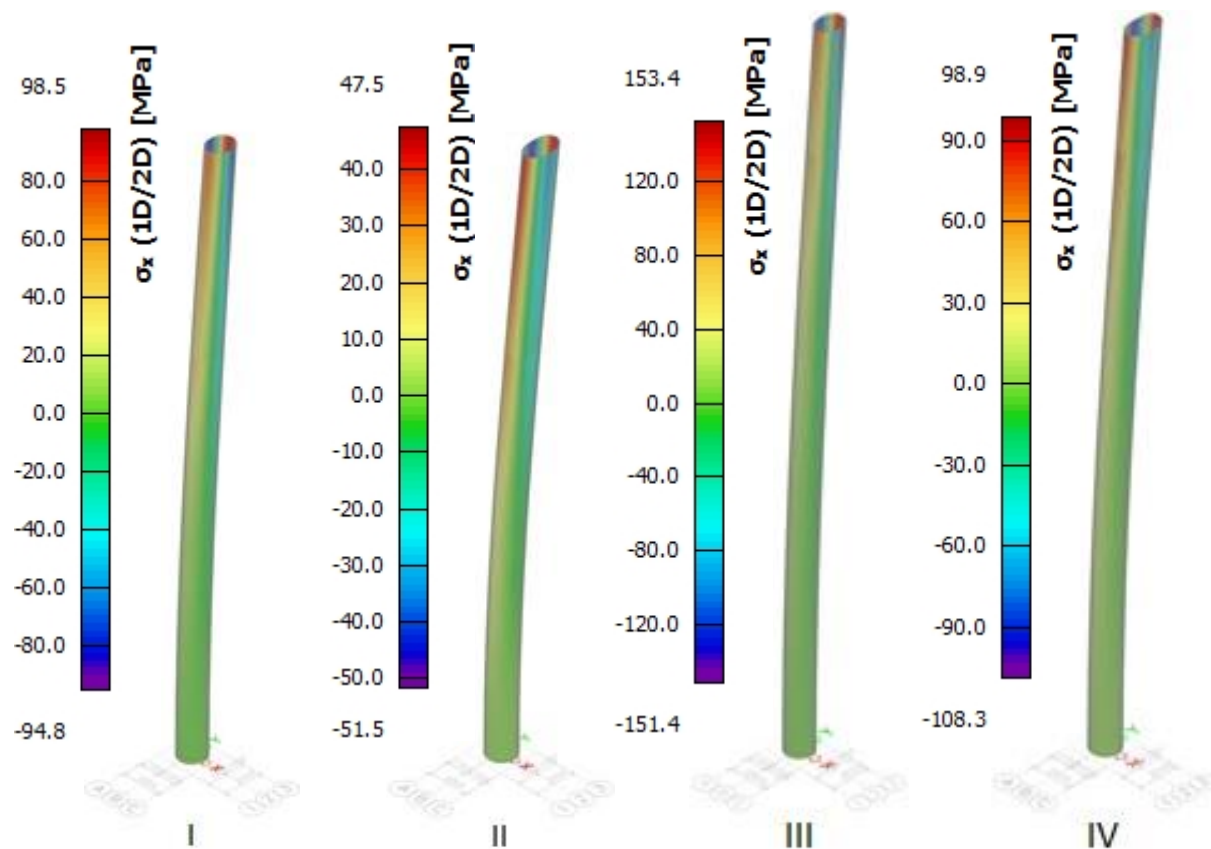
62 lentelė. Aerodinaminio logaritminio slopinimo dekremento δ_a apskaičiuotos reikšmės

I, II, III ir IV konstrukcinė schema				
Kai schema:	I	II	III	IV
$\delta_a =$	0,029	0,029	0,046	0,045

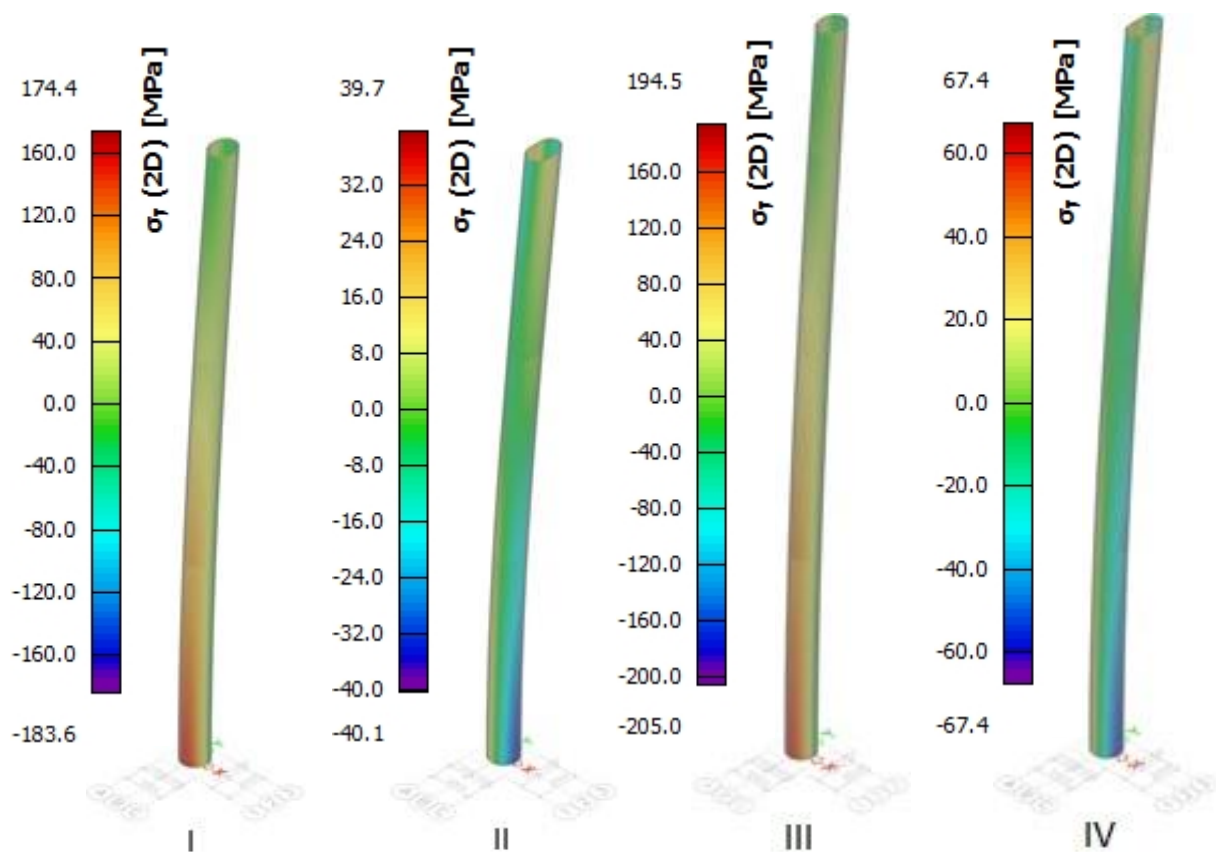
2 priedas. Dvimačių kevalo modelių nustatytos įtėpių komponentės



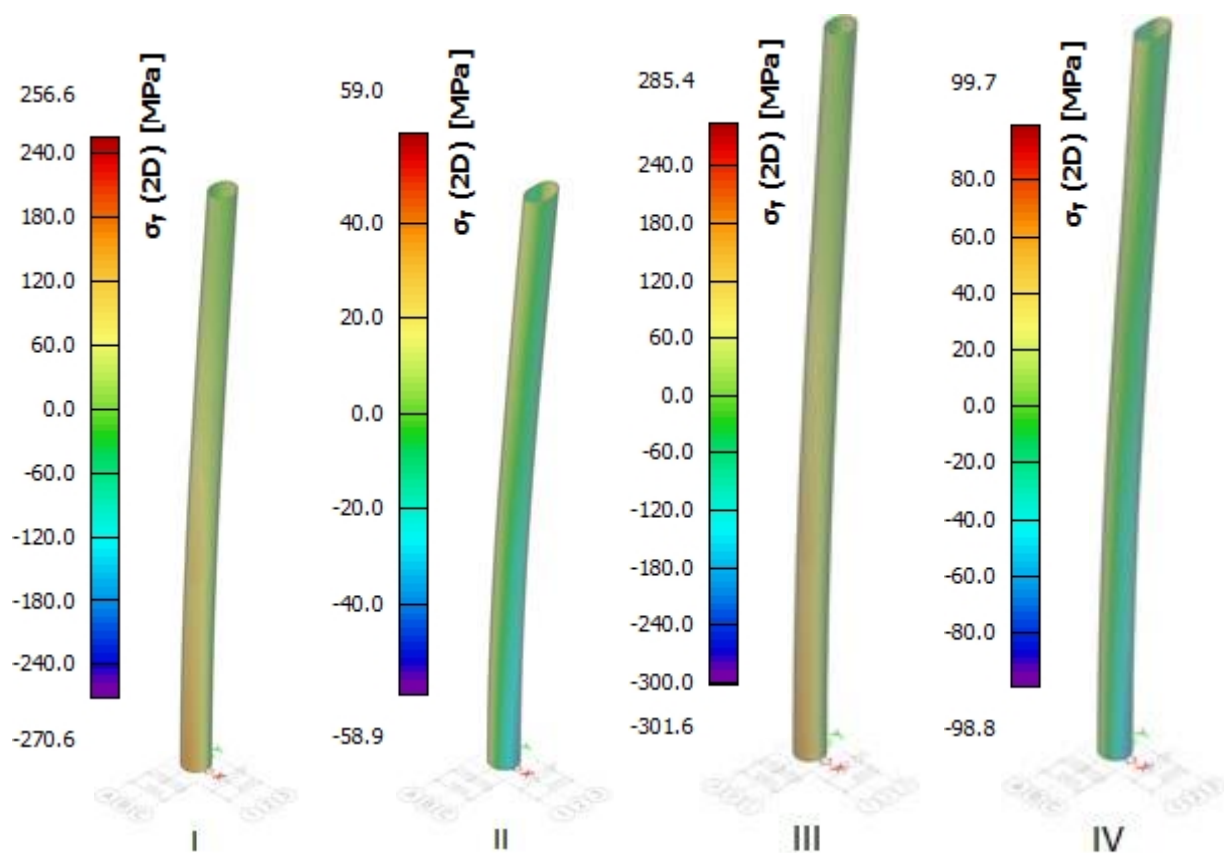
50 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti meridianiniai įtėpiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6 vidiniuose $i = 1$ paviršiuose



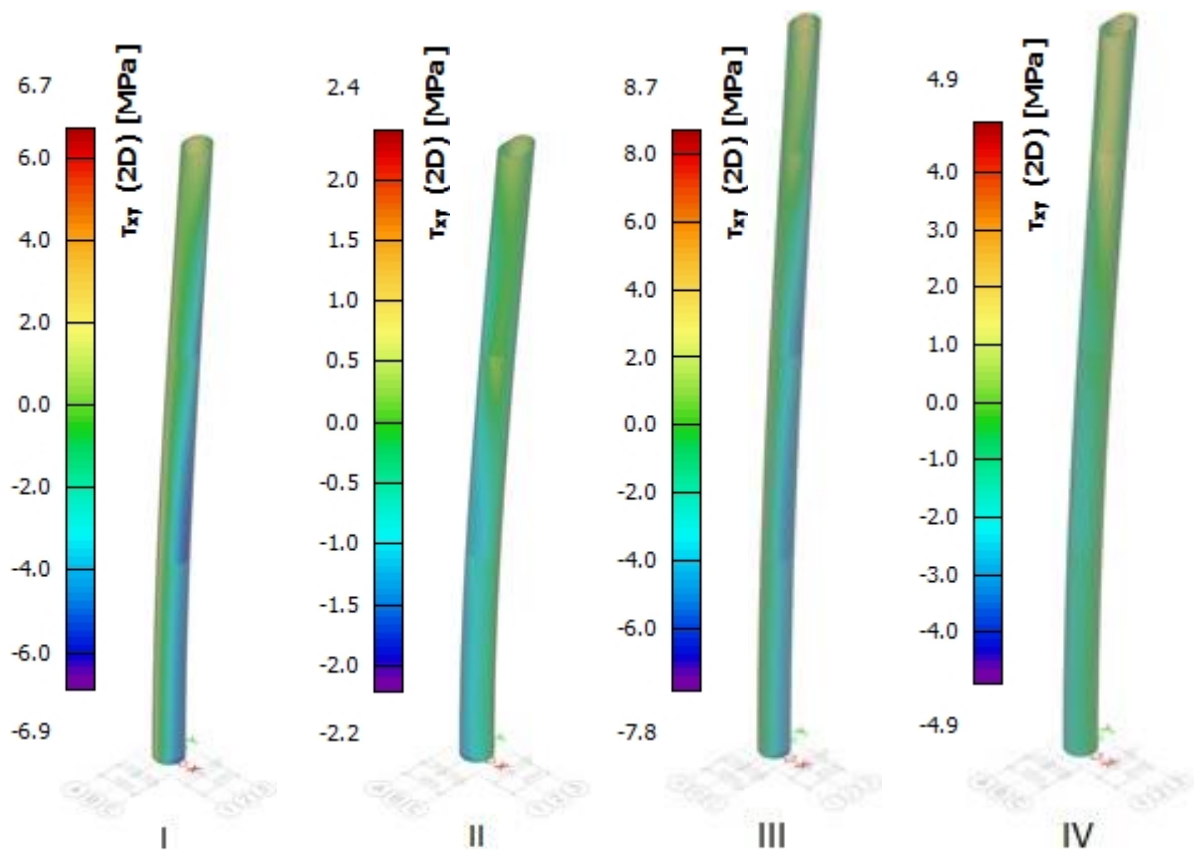
51 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti meridianiniai įtėpiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6 išoriniuose $i = 2$ paviršiuose



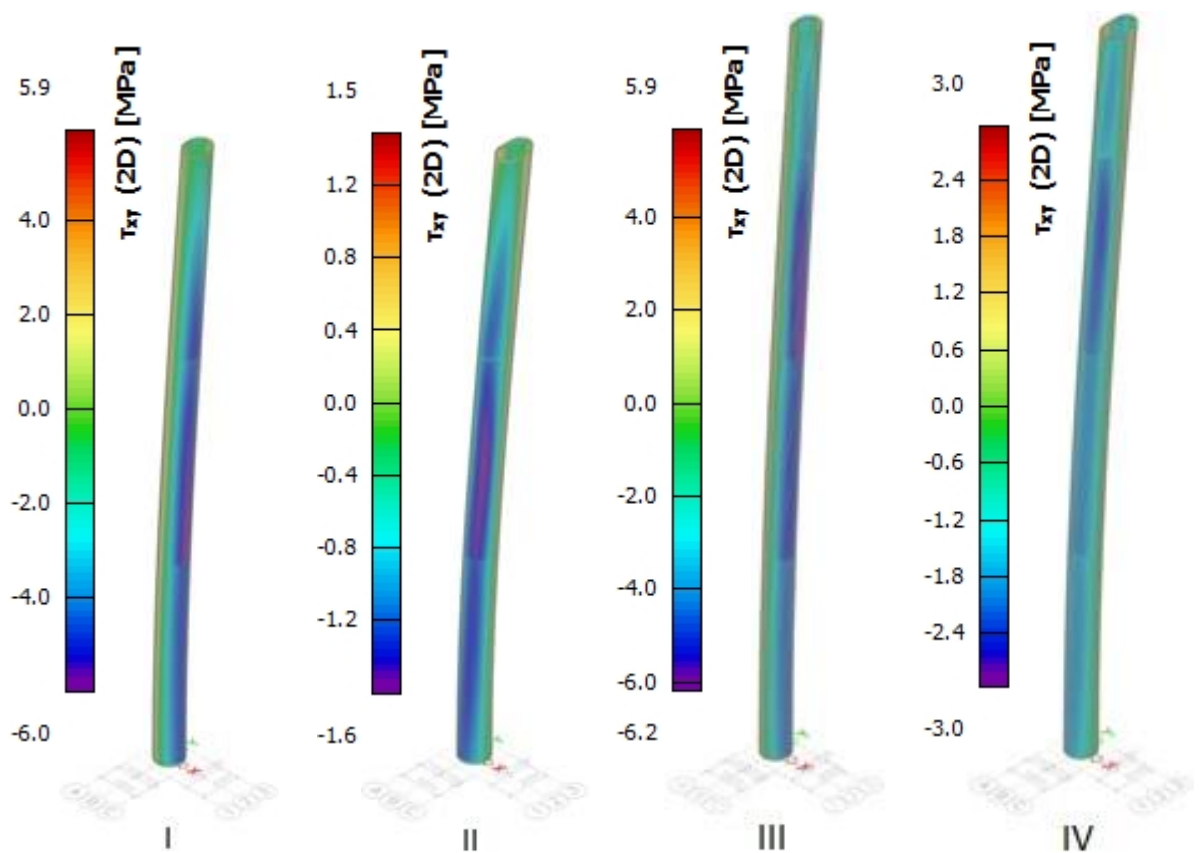
52 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti perimetriniai įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6 vidiniuose $i = 1$ paviršiuose



53 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti perimetriniai įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6 išoriniuose $i = 2$ paviršiuose



54 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti šlyjamieji įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6 vidiniuose $i = 1$ paviršiuose



55 pav. Dvimačiuose kevalo modeliuose nustatyti šlyjamieji įtempiai dėl aerodinaminių ir sūkurinio srauto poveikių AK6 išoriniuose $i = 2$ paviršiuose