
Aukštos temperatūros turbulentinės oro srovės tekėjimas virš baigtinio ilgio cilindro laisvojo galo plokštumos

**Viktorija Valinčiūtė,
Pranas Valatkevičius,
Vitas Valinčius**

*Lietuvos energetikos institutas,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas*

Skelbiami srauto dinamikos, aptekant baigtinio ilgio cilindro plokščią galą aukštos temperatūros turbulentiniam oro srautui, kurio $Re = 1,8 \cdot 10^4 - 2,2 \cdot 10^4$ ir $T = 1200K$, eksperimentiniai ir skaičiavimo rezultatai. Nustatyta srauto atitrūkimo ir prisijungimo linijų bei recirkuliacijos zonos matmenys ir padėtis, pastebėta intensyvi sukurių generacija ir intensyvūs šilumos mainai prie cilindro plokščiojo galo. Eksperimentiškai nustatytas greičių ir temperatūrų pasiskirstymas lyginamas su teorinio skaičiavimo rezultatais, gautais panaudojant „Fluent” programų paketą, pateiktas kokybinis ir kiekybinis rezultatų įvertinimas. Ištirta srovės greičių ir temperatūrų pasiskirstymo priklausomybė nuo tiriamojo taško erdvinės padėties.

Raktažodžiai: cilindro aptekėjimas, plokštės aptekėjimas, plazmos srovė, pasienio sluoksnis

1. ĮVADAS

Integralinių ir pulsacinių charakteristikų nustatymas yra svarbiausias aukštos temperatūros dujų ir plazmos srautų diagnostikos uždavinys. Matuojant dinamines ir šilumines srauto charakteristikas kontaktiniais metodais, dažniausiai naudojami baigtinio ilgio, apvalaus skerspjūvio cilindro formos šaldomi pirminiai keitikliai, kurie panardinami į srautą. Aptekant srautui tokio keitiklio galą, prie jo susidaręs dinaminis ir šiluminis pasienio sluoksnis gali turėti įtakos parametrų matavimo tikslumui. Manoma, kad tai gali atsiliepti ir matavimams Lietuvos energetikos instituto Plazminių technologijų laboratorijoje sukurtais ultragarsiniais keitikliais, skirtais aukštos temperatūros srautų temperatūrai bei jos pulsacijoms matuoti [1], nes toks matavimo metodas remiasi garso greičio priklausomybe nuo temperatūros. Vadinasi, kuo daugiau sutrikdytas srautas ir kuo storesnis šiluminio pasienio sluoksnis, tuo garso greitis ir signalo vėlavimo laikas yra didesni. Norint įvertinti matavimų tikslumą bei pasienio sluoksnio poveikį matuojamoms charakteristikoms, būtina nagrinėti tokios formos daviklių aptekėjimo panašiomis sąlygomis, kuriomis numatyta juos eksploatuoti, atvejį.

Kontaktinių aukštos temperatūros diagnostikos metodų įrenginių pirminiai keitikliai dažniausiai būna cilindro, kurio galas yra plokščias ir lygus, formos. Šiuo atveju tyrimus geriausiai būtų atlikti skait-

meniniais metodais, sprendžiant Navje–Stokso lygtis pasienio sluoksniui [2]. Tačiau tai įvykdyti kol kas nėra galimybės. Pusiau empiriniais metodais taip pat negalima gauti tikslių rezultatų, nes, taikant matematinis modelius, neįvertinama temperatūros faktoriaus, antrinio tekėjimo srauto atitrūkimo zonoje prie keitiklio paviršiaus, atitrūkstamojo tekėjimo ir aušinimo efektyvumo įtakos.

Ultragarso keitikliai – spinduoškis ir imtuvas aukštos temperatūros sraute dažniausiai būna orientuoti vienas prieš kitą, paliekant tarp jų nedidelį tarpą, vadinamą baze. Tekant srautui šiuo tarpu, arti paviršiaus vyksta sudėtingi dinaminiai, šilumos ir masės mainų procesai. Padarius tam tikras prielaidas, būtų galima tarti, kad tekėjimas cilindro galo plokštumoje vyksta panašiai kaip plokštės ar disko pradiniame ruože, jei ne keletas svarbių, toliau įvardytų veiksnių, kurie gali turėti lemiamą įtaką parametrų pasiskirstymui bei šilumos mainams. Vienas iš jų – galimas tekėjimas cilindro sudaromąja, atsirandantis dėl slėgių skirtumo cilindrą aptekančios srovės centrinėje ir periferinėje dalyse. Šis tekėjimas galimas ir dėl netikslaus keitiklio cilindrinės dalies orientavimo srovės ar srauto ašies atžvilgiu.

Kitas veiksnys, turintis įtakos parametrų pasiskirstymui, yra srovės atitrūkimas nuo laisvojo cilindro galo plokštumos. Jis priklauso nuo užtekančios srovės greičių, temperatūrų ir jų pulsacijų dydžio, kryp-

ties bei pasiskirstymo. Atitrūkimo zonos ilgį ir sutrikdyto srauto greičių ir temperatūrų pasiskirstymą, be srovės pradinių parametrų pasiskirstymo, taip pat lemia keitiklio orientacija srovės ašies atžvilgiu.

Jeigu matavimai atliekami plazmos sraute, tai svarbu pažymėti, kad plazma yra didesnio aktyvumo aplinka, kurioje egzistuoja individualūs dalelių, tokių kaip elektronai, jonai ir neutralės (suzadinti ir nesuzadinti atomai, molekulės ir radikalai), tipai, kurie gali būti grupuojami atsižvelgiant į jų temperatūrą. Tokiu būdu, arti nagrinėjamo paviršiaus vyksta reakcijos, kurių greitis ir kryptis priklauso nuo dalelių temperatūros ir koncentracijos, todėl paviršiaus ir plazmos srauto sąveika gali turėti įtakos dalelių srautui ir jų perduodamai energijai. Tai trečiasis veiksnys, turintis įtakos energijos mainams pasienio sluoksnyje. Be to, žinoma [3], kad srovės parametrų pasiskirstymas, esant aukštoms ir neaukštoms temperatūroms, skiriasi, todėl būtina žinoti jų pasiskirstymą abiem atvejais. Šio darbo tikslas ir užduotis – eksperimentiniu ir skaitmeniniu metodu nustatyti keitiklio galą aptekamųjų dujų srauto šiluminės ir dinaminės charakteristikas, įvertinti jų įtaką matavimo tikslumui.

2. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Turbulentiniai srautai apie baigtinio ilgio cilindrą ilgą laiką buvo svarbus dujų dinamikos, šilumos ir masės mainų tyrimų objektas. Kai kurie mokslininkai darbuose yra aprašę cilindro aptekėjimo dėsninumus aukštos temperatūros sraute, tačiau tyrimų rezultatų, aprašančių tekėjimą ir parametrų pasiskirstymą baigtinio ilgio cilindro laisvo galo paviršiuje, mokslinėje techninėje literatūroje surasti nepavyko. Darbuose [4–6] aprašomi tyrimai srautui aptekant dviejų skirtingo skersmens cilindrų sandūrą, tačiau šiuose darbuose nagrinėjamas srauto tekėjimas jau už cilindrus jungiančios plokštumos, be to, esant nedideliems (iki 10^4) Re skaičiams, neaukštoms (iki 300K) temperatūroms ir žemiems (iki 0,1%) turbulentiškumo laipsniams. Todėl iki šiol vis dar neturime netgi conceptualaus šiluminių ir dinaminių procesų aprašymo aukštatemperatūrinio turbulentinio srauto tekėjimo atveju.

Apie dešimt tyrinėtojų sprendė problemas aptekant vienišas apvalaus ir keturkampio skerspjūvio nupjauto cilindro formos kliūtis, esančias laisvojoje srovėje arba įvairių geometrinių matmenų kanalų srautuose. Iš jų galima paminėti darbus [7–10], kuriuose aprašomi naujausi tyrimo rezultatai, gauti aptekant cilindro formos vienišas kliūtis, įrengtas aerodinaminuose vamzdžiuose. Jų skaitmeninio ir eksperimentinio tyrimo rezultatai, išskyrus [9], daugiausia apibrėžia didelių sukurių dinamiką cilindro pėdsako zonoje, kai $Re < 2 \cdot 10^4$, ir tik nedaug apima srauto tekėjimą nupjautinėje kliūties plokštumoje. Apibendrinti laiko ir fazės atžvilgiu greitis ir tangentiniai

įtempimai lyginami su eksperimentiniais duomenimis [11].

Dauguma aštriabriaunes kliūtis aptekamųjų srautų eksperimentinių tyrimų apsiriboja dviejų matmenų geometrija. Šiuo atveju kur kas paprasčiau valdyti tyrimo procesą, o gauti rezultatai gana adekvačiai atspindi tikrovę. Tuo paaiškinama daugybės darbų, aprašančių dvimatį tekėjimą, egzistavimas, palyginti su nedaug darbų, nagrinėjančių trimatį tekėjimą. Tokiu būdu, kiekybiniai rezultatai, tiriant srauto struktūrą ir topologiją pasienio sluoksniuose apie kubo formos iškilimą kanale, aprašomi darbuose [12, 13]. Iš jų matyti, kad tik nuo 1993 m. buvo atkreiptas ypatingas dėmesys į srauto turbulentiškumo charakteristikas. Visi kiti surasti mokslinės techninės literatūros šaltiniai siejasi su srauto struktūros tyrimais cilindro pėdsake.

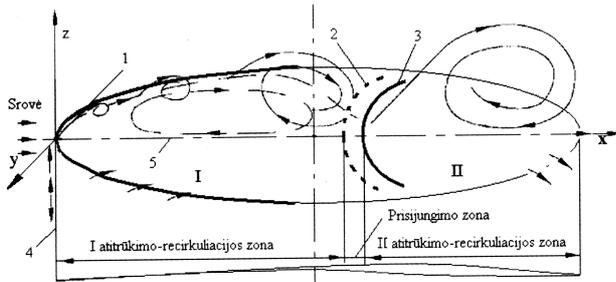
Srovė, tekanti baigtinio ilgio cilindro galo plokštuma, yra daug kuo panaši į srovę, aptekamąją plokštelę arba diską. Kai nusistovėjęs užtekantis srautas pasiekia baigtinio storio plokštelę, prie jos priekinio krašto vyksta srauto atitrūkimas. Srautas pakeliui vėl prisijungia prie plokštumos. Atitrūkusio srauto prisijungimo proceso dėsninumus nulemia didelių sukurių susidarymas ir plėtra. Literatūroje teigiama, kad ankstesnė srauto vizualizacija sukurinėje tekėjimo zonoje neduoda pakankamai geros informacijos apie srauto struktūrą ir sukurių formą, o apsiriboja tik didelių sukurių elgsenos aprašymu. Naujausiuose darbuose [14, 15], naudojant naujausias srauto tyrimo technologijas, tokias kaip greitaigio filmavimo ir lazerio pluoštelio metodai, leidžia sudaryti išsamius vaizdus apie laike vykstančius sukurinius procesus. Tačiau sunku surasti darbų, kurių tematika būtų panaši į šio darbo tematiką taip, kad būtų galima pasinaudoti tais tyrimų rezultatais arba palyginti juos su mūsų gautaisiais. Net ir plokštelės aptekėjimo atvejis [15] nagrinėjamas tik esant mažesnėms nei 50°C temperatūroms, nedideliems (iki 600) Re ir iki 0,5% turbulentiškumo laipsniams.

Nepaisant aprašomų bandymų įrengimų geometrijų paprastumo, pripažintina, kad topologiniu požiūriu tyrimai gana sudėtingi, o vieningų metodų ir priemonių nėra. Vienas patrauklesnių naujausių metodų pasaulinėje praktikoje aptinkamas dalelių atvaizdo greičio nustatymas [16]. Srauto parametrai trimačiame lauke nustatomi naujais stereoskopiniais metodais, kai naudojama viena arba dvi greitaigės vaizdo kameros bei holografijos įrenginiai [17]. Energetinių parametrų tyrimo metodai kol kas nepasikeitė.

3. SKAITMENINIS TYRIMAS

Nustatant dujų dinaminių ir šiluminių parametrų kaitimo dėsninumus prie cilindro laisvojo galo plokštumos, Navje–Stokso ir energijos lygtims spręsti buvo panaudotas „Fluent“ programų paketas. Lygtys spren-

džiamos k-ε modelio fluído srautui cilindro galo aplinkoje. Tariaama, kad visa sistema yra simetrinė, fluído tekėjimas turbulentinis. Tekėjimas vyksta pagal 1 pav. pavaizduotą modelį. Srautas aprašytas Dekarto koordinatinių sistemoje (x, y, z), kurioje x ašis sutampa su srovės tekėjimo kryptimi, z ašis lygiagrečiai cilindro ašiai, o y – statmena x ir z. Fiksuotą dvimatį cilindrą apteka kintamo greičio aukštatemperatūre oro srovė.



1 pav. Srauto tekėjimo virš baigtinio ilgio cilindro laisvojo galo plokštumos modelis. I – pirmoji plokštumos skritulio pusė; II – antroji plokštumos skritulio pusė; 1 – I-oji atitrūkimo linija; 2 – prisijungimo linija; 3 – II-oji atitrūkimo linija; 4 – cilindro priekinė sudaromoji; 5 – srovės ašis

Remiantis šiluminio pasienio sluoksnio koncepcija, buvo tariama, kad visi šiluminių procesų pokyčiai yra vidiniai cilindro galo zonoje arti paviršiaus, pačiame pasienio sluoksnyje $\delta t / \delta z \neq 0$, o išorėje $\delta t / \delta z = 0$. Remiantis loginiais samprotavimais, taip pat galima teigti, kad $\delta^2 t / \delta y^2 = 0$, nes šiluminio pasienio sluoksnio storis numatytų matmenų cilindrai yra labai mažas. Taigi energijos lygtis tokiu atveju bus

$$\omega_y \left(\frac{\delta t}{\delta y} \right) + \omega_z \left(\frac{\delta t}{\delta z} \right) = a \left(\frac{\delta^2 t}{\delta z^2} \right); \quad (1)$$

$$\text{čia } a \left(\frac{\delta^2 t}{\delta z^2} \right) = -(\delta q_z / \delta z) (1 / \rho c_p). \quad (2)$$

Čia ω_y ir ω_z – greičio komponentės išilgai y ir z ašies, a – temperatūrio laidumo koeficientas, ρ – tankis, c_p – savitoji dujų šiluma, kai slėgis pastovus, q_z – šilumos srautas z ašies kryptimi.

Lygčių sistemai uždaryti panaudotos lygtys

$$\omega_y \left(\frac{\delta \omega_y}{\delta y} \right) + \omega_z \left(\frac{\delta \omega_z}{\delta z} \right) = v \left(\frac{\delta^2 \omega_y}{\delta z^2} \right) \text{ ir} \quad (3)$$

$$\frac{\delta \omega_y}{\delta y} + \frac{\delta \omega_z}{\delta z} = 0; \quad (4)$$

čia v – dujų kinematinis klampis.

Atlikus skaičiavimus, įsitikinta, kad pernešimo reiškiniai cilindro galo plokštumos aplinkoje nepriklauso nuo pasienio sluoksnio padėties. Šilumos srautai ir srauto tekėjimo pokyčiai dėl spinduliavimo įvertinti nebuvo, nes cilindro paviršiaus temperatūra artima 12°C (cilindras intensyviai aušinamas).

Kitos ribinės sąlygos yra šios:

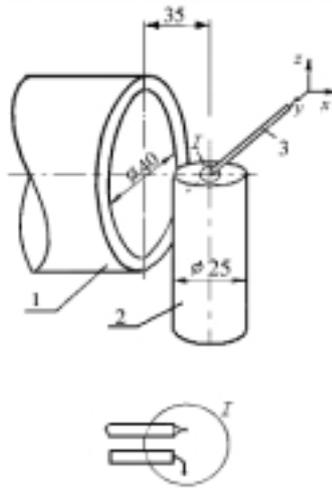
1. Užtekančio ant cilindro paviršiaus fluído temperatūra pastovi.
2. Normalės kryptimi užtekėjimo vietoje temperatūros ir greičio gradientų nėra.
3. Greičių ir temperatūros profiliai statūs. Jie nustatyti iš eksperimento rezultatų.
4. Užtekančio srauto turbulentiškumo laipsnis yra pastovus ir lygus 3%.

Be to, tariama, kad cilindro plokštumos paviršius yra neišurkštus, o slėgio gradientas pasienio sluoksnyje lygus 0.

Skaičiavimo objektas buvo aukštos temperatūros oro srauto greičio ir temperatūros laukai arti sienelės. Skaičiavimas atliktas naudojant kreivalinį ortogonalinį tinklą su $160 \times 160 \times 60$ akutėmis, kuris užima 1500×1500 mm plotą.

4. EKSPERIMENTINIS ĮRENGINYS IR DETALĖS

Kadangi natūralūs keitiklių matmenys yra maži (skersmuo ne didesnis kaip $4 \cdot 10^{-3}$ m), eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti naudojant daug didesnių matmenų keitiklių modelį. Eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti aukštos temperatūros oro srovėje, ištekančioje iš 250 kW galios plazmos generatoriaus. Šios srovės ašyje buvo įrengtas keitiklio modelis – baigtinio ilgio apvalus vandeniu aušinamas varinis cilindras. Jis buvo ištekintas, po to šlifluotas ir poliruotas išlaikant aštrias briaunas. Cilindro skersmuo – $25 \cdot 10^{-3}$ m, ilgis – $45 \cdot 10^{-3}$ m (2 pav.), jis buvo pastatytas statmenai aukštos temperatūros srovės ašyje, $35 \cdot 10^{-3}$ m atstumu nuo plazmotrono ištekėjimo tūtos taip, kad galinės plokštumos ašis sutaptų su srovės ašimi. Srovės atakos kampas buvo nustatytas $\pm 0,1^\circ$ tikslumu. Taigi galima teigti, kad srovės tėkmės linijos buvo lygiagrečios paviršiui. Oras buvo kaitinamas 250 kW linijiniu plazmos generatoriumi su karštu katodu ir laiptuotu anodu. Plazmos srovei stabilizuoti prie plazmos generatoriaus anodo buvo prijungtas 0,4 m ilgio apvalus kanalas su konfuzoriumi. Srovės parametrai (greičiai, temperatūros ir jų pulsacijos) buvo nustatyti iš anksto ir pastovūs visą eksperimento laiką. Srovės greitis buvo matuojamas plėveliniu termoanemometru su „Thermo Systems“ firmos jutikliu, platinos temperatūra – platinorodžio mikrotermopora, kurios elektrodų skersmuo $30 \cdot 10^{-6}$ m. Užtekančios srovės parametrai buvo



2 pav. Eksperimentinio įrenginio schema. 1 – plazmotrono ištekėjimo tūta, 2 – cilindras, 3 – matavimo įrenginio jautrusis elementas

reguliuojami keičiant plazmos šaltinio galią, pro jį pratekančio oro srautą ir kontroliuojami įprastiniais laboratorijoje sukurtais ir taikomais metodais.

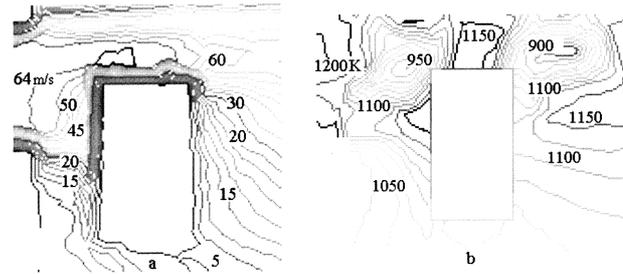
Dekarto koordinatų pradžia, kaip ir skaitmeninio tyrimo atveju, yra cilindro galo plokštumoje ašinių linijų susikirtimo taškas. Matavimai atlikti šiais intervalais: ašies x kryptimi – pradedant nuo $x = 15 \cdot 10^{-3}$, žingsniu $5 \cdot 10^{-3}$ m iki cilindro plokštumos pabaigos; ašies y kryptimi – nuo $y = 15 \cdot 10^{-3}$, žingsniu $1 \cdot 10^{-3}$ m iki $+15$ (plokštumos krašto); ašies z kryptimi – nuo 0, žingsniu $5 \cdot 10^{-3}$ m iki $z = 15 \cdot 10^{-3}$ m.

5. REZULTATAI IR JŲ APITARIMAS

Atlikus pirminius tyrimus, pastebėta, kad tekėjimas virš cilindro laisvojo galo plokštumos yra labai komplikotas. Sraute virš plokštumos egzistuoja atitrūkimo, sūkurinė-recirkuliacinė ir prisijungimo zonos. Srovės linijų konfigūracija čia labai įvairi, kintama ir labiausiai priklauso nuo užtekančio srauto parametrų pasiskirstymo.

Skaitmeniniams tyrimams panaudota „Fluent“ programa. Ją naudojant gautas greičių ir temperatūros laukų vaizdas sienelei artimoje zonoje, kai vidutinės masės greičio ir temperatūros reikšmės $w = 65$ m/s ir $T = 1200$ K (3 pav.).

Pagal „Fluent“, temperatūros pasiskirstymas išilgai statmenos srauto tekėjimo kryptimi ašies maksimalios dinaminio (δ_d) ir šiluminio (δ_r) pasienio sluoksnio storio yra srovės ašyje, sutampant su cilindro galo plokštumos ašimi (y ašis). Greičių ir temperatūros profiliai yra plokšti ir gerai užpildyti prie plokštumos briaunos išorinio krašto. Tai rodo, kad



3 pav. Izotachų (a) ir izotermų (b) pasiskirstymas aplink baigtinio ilgio cilindą

vyksta labai intensyvūs šilumos mainai tarp cilindro plokštumos paviršiaus ir aukštos temperatūros srauto. Prie priekinės ir galinės plokštumos briaunų, ašies zonoje, srauto tekėjimo kryptimi, pastebėtos dvi žemesnės temperatūros zonos (3b pav.). Pirmoji iš jų gali turėti didelę įtaką formuojantis pasienio sluoksniui, o antroji – mūsų atveju ne tiek svarbi, nes turės įtaką cilindro pėdsako konfigūracijai.

Pirmoji žemos temperatūros zona, kurios skersmuo apytikriai lygus pusei cilindro skerspjūvio, yra nutolusi apie 0,5 kalibro nuo cilindro išorinio paviršiaus priešinga srovės tekėjimo kryptimi. Galima manyti, kad ji atsiranda dėl srauto antrinio sūkurinio tekėjimo nuo cilindro krašto priešinga srauto tekėjimo kryptimi. Kadangi cilindras yra intensyviai aušinamas, tai dujų temperatūra šioje vietoje gerokai sumažėja dėl to, kad sukurs, susidaręs dėl srauto sąveikos su cilindro paviršiumi, besisukdamas laikrodžio rodyklės kryptimi, atneša į šią zoną atšalusias dujas. Palyginus 3 pav. a ir b, pastebėta, kad šios žemos temperatūros zonos centras yra ant cilindro priekinės dalies sūkurio krašto. Taigi šis sūkurys ir formuoja žemos temperatūros zoną.

Remiantis tyrimų rezultatais ir loginiais samprotavimais galima teigti, kad plazmos srauto charakteristikos prie cilindro paviršiaus plokščiojo galo priklauso nuo: a) užtekančios srovės parametrų absoliučių reikšmių; b) šių parametrų pasiskirstymo; c) dujų rūšies ir sudėties; d) aušinimo intensyvumo ir įtekėjimo pobūdžio; f) cilindro padėties užtekančios srovės atžvilgiu. Profilių formai ir dydžių reikšmėms, savo ruožtu, nemažą įtaką turi plazmos šaltinio charakteristikos, dujų įpūtimo vieta ir srautas [18]. Be to, šiuo atveju, esant ištekančių iš plazmotrono dujų $Re_d \leq 2 \cdot 10^4$, svarbią reikšmę turės ir atitrūkusio srauto parametrai, sūkurių forma ir dydis. Esant $Re_d > 2 \cdot 10^4$, srauto recirkuliacijos zona bus jau už cilindro plokščiojo paviršiaus ribų. Iš gautų duomenų matyti, kad srauto vidurinė sritis yra dvimatė, kai $x/d > 5$. Atitrūkimo zona cilindro galo plokštumos priekinėje dalyje pagal sūkurių išvaizdą (jie pasiskirstę netolygiai tarp centrinės ašies ir plokštu-

mos skritulio krašto) apibūdinama kaip kvazireguliari.

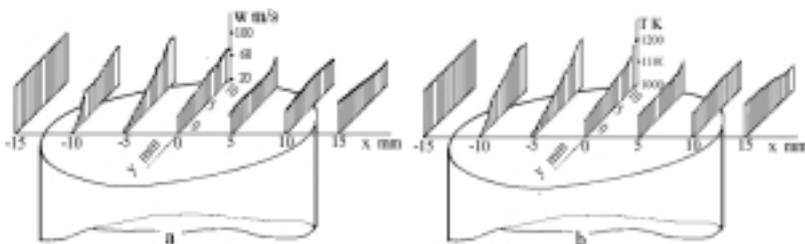
Išmatuoti greičių ir temperatūros laukai cilindro laisvojo galo plokštumoje turi tam tikrų panašumų su srauto, tekančio virš plokštės, greičių ir temperatūros laukais. Intensyviai aušinant plokštę srauto greičių ir temperatūros reikšmės prie sienelės staiga krenta. Mūsų atveju parametrų reikšmių mažėjimas pirmojoje cilindro plokštumos dalyje yra dar staigesnis. Antrojoje plokštumos skritulio pusėje parametrai kinta nedaug, galima teigti, kad jie pastovūs. Tačiau taip yra tik labai arti sienelės (4 pav.). Šis faktas gali būti paaiškintas panaudojus srauto atitrūkimo, prisijungimo ir recirkuliacijos sąvokas. Srovės linijų konfiguracija prie cilindro plokštumos paviršiaus patvirtina, kad čia egzistuoja srauto atitrūkimo, prisijungimo ir recirkuliacijos zonos.

Iš gautų eksperimentinių duomenų galima spręsti apie šių zonų lokalizaciją bei matmenis. Srautas atitrūksta cilindro galo plokštumos priekinėje dalyje. Srautui atitrūkus, nuo šios vietos tolyn link centro vyksta srauto recirkuliacija, dėl to jo greičio vektoriai gali keisti ne tik dydį, bet ir kryptį. Vėliau, srautui prisijungus, vėl formuojasi naujas pasienio sluoksnis su jam būdingais dėsniniais. Tai patvirtina ir srauto struktūra prie cilindro plokštumos paviršiaus (5, 6 pav.).

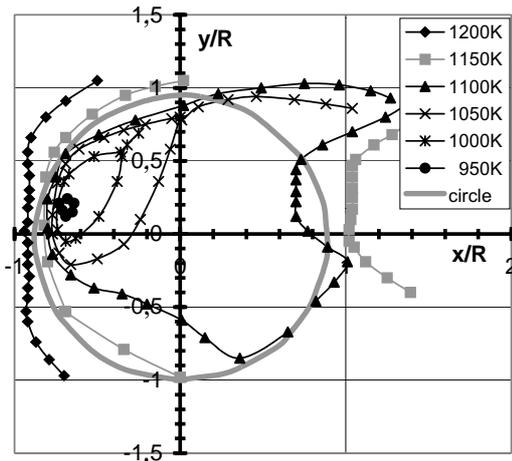
Iš jų matyti, kad atitrūkimo linija eina nuo cilindro plokštumos ir priekinės sudaromosios susikirtimo taško link periferijos, sudarydama parabolę, kurios viršūnės sritis sutampa su cilindro plokštumos skritulio apskritimu, o toliau jos šakos pasislenka arčiau plokštumos skritulio centro. Taigi atitrūkimo linijos puslankio kreivumo spindulys yra apie 5% mažesnis už plokštumos apskritimo spindulį. Išanalizavus gautus rezultatus, pastebėta, kad ši linija 5% tikslumu tenkina lygtį

$$y^2 = px + d/2; \quad (5)$$

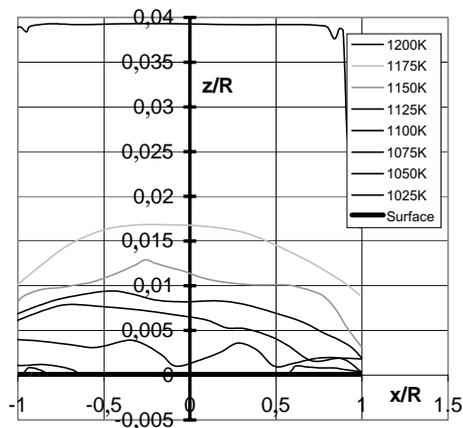
čia $p < 1$ ir priklauso nuo užtekančios srovės parametrų. Mūsų konkrečiu atveju $p = 0,845$.



4 pav. Greičių (a) ir temperatūros (b) profiliai atstumu $z/r = 0,04$ nuo cilindro plokštumos paviršiaus



5 pav. Izotermų laukas plokštumoje, nutolusioje atstumu $z/R = 0,04$ nuo cilindro plokštumos paviršiaus



6 pav. Izotermų laukas cilindro galui statmenoje plokštumoje

Srauto prisijungimo linija taip pat formuojasi parabolės pavidalo, tik jos viršūnės puslankio spindulys daug didesnis nei plokštumos apskritimo spindulys, o šakos nukreiptos į y ašies ir plokštumos apskritimo susikirtimo tašką. Tokią parabolę atitinka lygtis

$$y^2 = px + e/2; \quad (6)$$

čia $p > 1$, o e – atitrūkimo taško nuo koordinatų pradžios atstumas, kuris priklauso nuo užtekančios srovės parametrų ir cilindro linijinių matmenų.

Parametrų profiliai prie cilindro plokštumos tarp atitrūkimo ir prisijungimo linijų yra parabolės lanko formos su išlinkimu link centrinės paviršiaus skritulio ašies. Taigi mak-

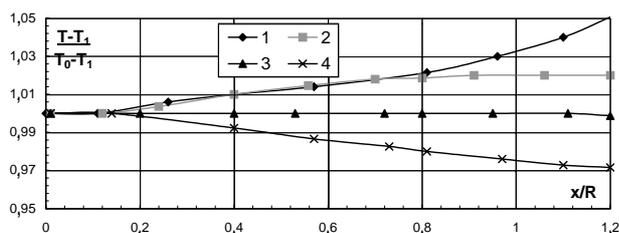
simalios temperatūros ir greičio reikšmės pirmojoje cilindro plokštumos pusėje pagal srauto tekėjimą yra išsidėsčiusios apie jos išorinį apskritimą. Kitoje paviršiaus plokštumos pusėje maksimalios parametrų reikšmės pasislinkusios cilindro pėdsako pusėn. Taigi, išilginis temperatūros ir greičių profilis deformuotėsnis esant mažesnėms z/r reikšmėms.

Svarbu pažymėti, kad daugeliu atvejų (priežastys tiksliai nežinomos) pastebėtas antrasis srauto atitrūkimas. Jo linijos padėtis – cilindro plokštumos antroji pusė atstumu $0,6 \leq x/R \leq 0,75$ nuo centro (5 pav.). Atitrūkimo linija yra trumpa (apie $0,4d$), jos forma – tiesė arba nedidelio kreivumo lankas.

Greičių ir temperatūros pasiskirstymas skersai srauto krypties yra parabolės formos, o jų reikšmės labai priklauso nuo atstumo iki paviršiaus. Fiksuotame atstume $z/R < 0,02$ temperatūros profilis visą laiką kyla tol, kol koordinatė y pasiekia plokštumos briaunos kraštą (6, 7 pav.).

Didžiausios temperatūros reikšmės čia artimos aplinkos srauto temperatūrai. Kai atstumas nuo plokštumos $0,08 \leq z/R \leq 0,16$, dujų dinaminių parametrų reikšmės yra pastovios arba šiek tiek mažėja. Tik toliau nuo plokščios sienelės, atstumu $z/R > 0,16$, srauto atitrūkimo įtaka parametrų dydžiui ir profilio formai sumažėja iki 5–6%. Šis reiškinys gali būti paaiškintas tuo, kad dėl galimos tėkmės išilgai cilindro egzistuoja recirkuliacijos zona ir formuojasi antrinis srauto tekėjimas virš pačios plokštumos.

Greičių ir temperatūros pasiskirstymo arti cilindro plokščiojo galo duomenys rodo, kad δ_d ir δ_t didžiausios reikšmės yra jo ašyje, sutampančioje su srovės ašimi. Matyti, kad parametrų profiliai užpildyti blogai ir tuo blogiau, kuo atstumas nuo sienelės yra mažesnis. Taigi šilumos mainai tarp paviršiaus ir srauto šiame ruože yra labai intensyvūs. Matavimai ir skaičiavimai nustatant δ_d ir δ_t buvo atlikti z kryptimi. Nustatyta, kad cilindro plokščio galo paviršiaus viduryje greičiai ir profiliai yra stabiliausi. Greičio profilis stabilizuojasi iki atstumo $z/R = 0,3$ (8 pav.), o temperatūros – iki $z/R = 0,25$ (9 pav.). Tačiau pasienio sluoksnio storis nėra stabilus dėl srauto atitrūkimo, prisijungimo, re-

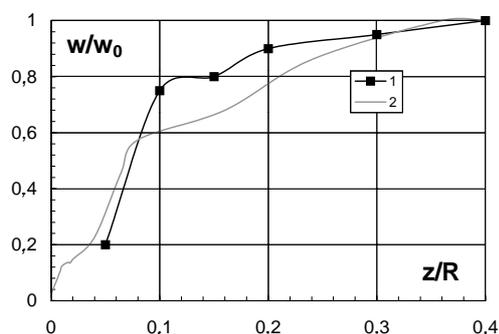


7 pav. Temperatūros pasiskirstymas prie cilindro laisvojo galo plokštumos paviršiaus pagal srovės tekėjimo kryptį. $y = 0$, z/R , atitinkamai, 1 – 0,008, 2 – 0,024, 3 – 0,08, 4 – 0,16

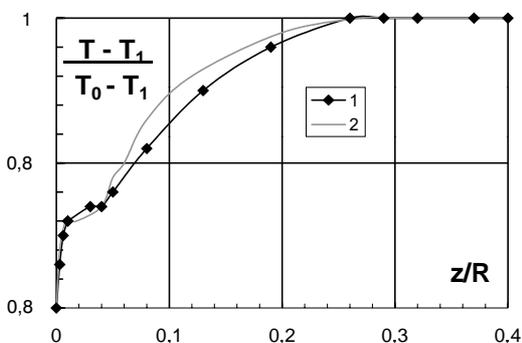
circuliacijos ir šlyties. Tik nuo plokštumos vidurio, t. y. prisijungimo linijos, δ_d ir δ_t reguliariai didėja. Temperatūros ir greičio perėjimas nuo reikšmių pasienio sluoksnyje iki nusistovėjusio tekėjimo reikšmių yra asimptotinis. Šiame darbe gauti greičio ir temperatūros pasiskirstymo sukurinėje ir sienelės zonoje eksperimentiniai ir skaičiavimų rezultatai lyginami tarpusavyje (8, 9 pav.).

Kadangi dauguma skaičiavimo pradinių duomenų paimta tiesiogiai iš eksperimentinių duomenų (ribinės sąlygos, pradinis užtekančios srovės profilis bei absoliutinės pradinės dinaminių parametrų reikšmės), todėl jie gerai tarpusavyje sutapo. Didelę reikšmę parametrų pasiskirstymui ir šilumos mainams prie sienelės turi cilindro terminis režimas. Kaip matyti 5 pav., didžiausias temperatūros gradientas formuojasi priekinėje paviršiaus dalyje, netoli srauto prisijungimo linijos, o ryškiausias temperatūros profilių netolygumas matyti prie sienelės (6 pav.). Vadinasi, izotermų lauko konfiguracija z kryptimi yra sutankinta ir labai įvairi. Kai $z/R > 0,2$, izotermų laukas stabilizuojasi.

Įvertinus čia išdėstytą medžiagą, galima teigti, kad pirminiai keitikliai aukštos temperatūros srovėje dir-



8 pav. Greičio pasiskirstymas cilindro galo plokštumos pasienio sluoksnyje ir sukurinėje zonoje. 1 – eksperimento duomenys, 2 – skaičiavimo duomenys



9 pav. Temperatūros pasiskirstymas cilindro galo plokštumos pasienio sluoksnyje ir sukurinėje zonoje. 1 – eksperimento duomenys, 2 – skaičiavimo duomenys

ba ekstremaliomis sąlygomis, egzistuojant dideliems greičio ir temperatūros gradientams bei šilumos srautams. Tačiau, teisingai juos orientuojant srovės atžvilgiu, galima pasiekti minimaliai iškraipytą signalą. Pvz., ultragarso keitiklius būtina orientuoti griežtai statmenai srautui. Atlikus nesudėtingus skaičiavimus, pastebėta, kad didžiausi pasienio sluoksnio storiai yra $\delta_d = 0,35x/R$ ir $\delta_t = 0,25x/R$. Ultragarso keitikliui, atsižvelgiant į jo matmenis, šis dydis sudarytų mažiau kaip 10% bazės ilgio. Įvertinę srauto netolygumą pagal visą jo paviršių, sąlygas prisijungimo zonoje, pasienio sluoksnio formavimosi proceso ypatumus bei atlikę vienalaikius matavimus ultragarso keitikliais ir chromelio–aliumelio termopora pastebėjime, kad temperatūros matavimo ultragarso keitikliais paklaida bus ne didesnė už 3%. Tai nustatyta ankstesniuose mūsų tyrimuose [1].

Šiluminio ir dinaminio pasienio sluoksnių poveikis kalorimetriniam ar Prandtlio-Pito vamzdeliu aušinamam zondui yra dar mažesnis, nes centrinėje jų dalyje yra kiaurymės, kurios vaidina didelį vaidmenį. Čia svarbiausia jų orientavimas – keitiklių ašys ir tėkmės ašis turi sutapti.

6. IŠVADOS

1. Baigtinio ilgio cilindro laisvojo galo plokštumoje vyksta sudėtingas atitrūkstamasis tekėjimas. Srauto atitrūkimas prasideda nuo cilindro plokštumos krašto ir tęsiasi iki $x/R = 0,45$.

2. Srauto atitrūkimo linija yra parabolė, kurios viršūnės koordinatės sutampa su srauto atakos centriniu tašku prie cilindro plokštumos krašto, o šakos kerta y ašį, 2% nutolusią nuo plokštumos apskritimo.

3. Srauto prisijungimo linija yra parabolė, kurios viršūnė yra x ašyje, atstume $x/R = 0,45$ priklausomai nuo užtekančio srauto parametrų tėkmės plėtimosi kampo.

4. Didžiausi pasienio sluoksnio storiai, įskaitant sūkurinę zoną, sudaro apie $\delta_d = 0,35x/R$ ir $\delta_t = 0,25x/R$.

Gauta

2002 09 05

Literatūra

1. Valinčius V., Kėželis R., Valatkevičius V., and Butkus J. Peculiarities and accuracy of low-temperature plasma diagnostics employing modified ultrasonic transducers. Proc. Conf. Physics and Technology of Plasma. Minsk, 1994. Vol. 1. P. 414–417.
2. Schlichting H. Boundary Layer Theory. New York: Mc Graw-Hill, 1979. P. 740.
3. Валинчюс В., Кежялис Р., Юшкявичюс Р., Амбразявичюс А. Распределение параметров в нагретой

- осисимметричной струе воздуха // Lietuvos TSR Mokslų Akademijos darbai. B ser. 1981. T. 5(126). P. 111–116.
4. Ko N. W. M., Leung W. L. and Au H. Flow behind two coaxial circular cylinders // J. Fluids Eng. (ASME). 1982. Vol. 104. P. 213–221.
5. Yagita M., Kojima Y. and Matsuzaki K. On vortex shedding from circular cylinder with step // Bull. JSME 27. 1990. Vol. 225. P. 426–431.
6. Norberg C. An experimental study of the flow around cylinders joined with a step in the diameter // Proc. of the 11th Australian Fluid Mechanics Conference. Hobart, Australia, 1992. Vol. 1. P. 507–510.
7. Sousa J. M. M., Freek C. and Pereira J. C. F. PIV Measurement of turbulence statistics in the three-dimensional flow over a surface-mounted obstacle // Laser Techniques Applied to Fluid Mechanics. Springer-Verlag, 2000. P. 157–176.
8. Sousa J. M. M. Turbulent flow around a surface-mounted obstacle using 2D-3C DPIV // 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry. Göttingen, Germany, 2001. P. 1–9.
9. Hussein H. J. and Martinuzzi R. J. Energy balance for turbulent flow around mounted cube placed in a channel // Phys. Fluids. 1996. Vol. 8. No. 3. P. 764–780.
10. Kogaki T., Kobayashi T. and Taniguchi N. Large eddy simulation of flow around a rectangular cylinder // Fluid Dynamics Research. 1997. Vol. 20. P. 11–24.
11. Lyn D. A., Einav S., Rodi W. and Park J. H. A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder. Report No. SFB 210/E/100.
12. Castro I. P. and Robins A. G. The flow around a surface mounted cube in uniform and turbulent streams // J. Fluid Mech. 1997. Vol. 79. P. 307–335.
13. Hunt J. C. R., Abel C. J., Peterka J. A. and Woo H. Kinematic studies of the flows around free- or surface mounted obstacles: applying topology to flow visualisation // J. Fluid Mech. 1978. Vol. 86. P. 179–200.
14. Hwang K. S., Sung H. J. and Hyun J. M. Visualisations of large-scale vortices in flow about a blunt-faced flat plate // Experiments in fluids. 2000. Vol. 29. P. 198–201.
15. Hwang K. S., Sung H. J. and Hyun J. M. An experimental study of large-scale vortices over a blunt-faced flat plate in pulsating flow // Experiments in fluids. Vol. 30. P. 202–213.
16. Hinch K. D. The three-dimensional particle velocimetry // Meas. Sci. Tech. 1995. Vol. 6. P. 307–335.
17. Royar H. and Stanislas M. Stereoscopic and holographic approaches to get the third velocity component in PIV // Von Carman Institute for Fluid Dynamics. Lecture Series 1996-03. Particle Image Velocimetry.
18. Valatkevičius P., Valinčius V. and Kėželis R. The effect of gas inlet location and intensity on plasma torch characteristics // Proceedings of 15th International Symposium on Plasma Chemistry ISPC-15. Orleans, France. 2001. Vol. 4. P. 1585–1590.

Viktorija Valinčiūtė, Pranas Valatkevičius, Vitas Valinčius
HIGH TEMPERATURE TURBULENT AIR JET
AROUND THE FLAT SURFACE OF A FINITE
LENGTH CIRCULAR CYLINDER

S u m m a r y

The results of an experimental and numerical research of two-dimensional unsteady flow around the butt end of a model of cylinder-shaped ultrasonic transducer at a zero angle attack are presented. The flow, formed employing a linear dc plasma torch, is turbulent with the Re number between $1.8 \cdot 10^4$ and $2.2 \cdot 10^4$ and a temperature of 1200K. At this regime, the flow boundary layers at the cylinder edge separate laminaarly and transition takes place in the free shear layers. In the shear layer, a strong vortex shedding and temperature fluctuations are observed. The experimentally estimated distribution of velocities and temperatures on the flat surface of a circular cylinder were compared to those predicted and found to be in good agreement. The influence of the location to distribution and quantity of dynamic and thermal parameters was investigated.

Key words: flow around the cylinder, flat plate, plasma jet, boundary layer

Виктория Валинчюте, Пранас Валаткявичюс,
Витас Валинчюс

ТЕЧЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ ВОЗДУХА НА
ТОРЦЕВОЙ ПЛОСКОСТИ ЦИЛИНДРА
КОНЕЧНОЙ ДЛИНЫ

Р е з ю м е

Публикуются расчетные и экспериментальные результаты распределения скоростей и температур при обтекании торцевой поверхности круглого цилиндра турбулентной струей воздуха. Параметры набегающего потока – $Re = 1,8 \cdot 10^4 - 2,2 \cdot 10^4$ и $T = 1200K$. Установлены положения и размеры линий отрыва и присоединения, а также рециркуляционной зоны потока. Получено хорошее совпадение экспериментальных данных с данными расчета по пакету программ „Fluent”.

Ключевые слова: обтекание цилиндра, плоская пластина, высокотемпературный поток, пограничный слой