

---

# Tūtos formos įtaka užsuktos srovės struktūrai

---

**Aiveta Lapienienė,  
Ričardas Šležas**

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

Tirta tūtos formos įtaka užsuktos žiedinės vandens srovės struktūrai. Srovei užsukti panaudotas ašinis suktuvas. Eksperimentas atliktas tiesiai, konverguojančiai ir diverguojančiai tūtomis, kai užsukimo laipsnis  $S = 0,68$  ir  $Re = 5400$ . Tiesiai tūtai stebėtas burbulo tipo ir spiralinės recirkuliacinės zonos formavimasis. Konverguojančiai ir diverguojančiai tūtomis stebėtas spiralinės recirkuliacinės zonos formavimasis. Darbe pateikiama srovės ir recirkuliacinės zonos vizualizacijos nuotraukos, struktūrinė recirkuliacinės zonos analizė bei schemos visiems tirtiems tūtos tipams, taip pat lyginamoji srovės plėtimosi bei atstumo iki recirkuliacinės zonos analizė.

**Raktažodžiai:** žiočių forma, spiralinė recirkuliacinė zona

---

## 1. ĮVADAS

Užsuktos srovės su vidinėmis recirkuliacijos zonomis yra plačiai naudojamos įvairiuose kuro deginimo įrenginiuose. Recirkuliuojantys karšti degimo produktai palaiko degimo stabilumą, sudaro galimybes valdyti liepsnos formą, temperatūrą bei azoto oksidų susidarymą. Recirkuliacinės zonos formavimasis užsuktoje srovėje yra sudėtingas hidrodinaminis reiškinys, kuris tiriamas jau daugelį metų. Tačiau jo universalus teorinio modelio dar nėra sukurta. Vienas pirmųjų bandymų aprašyti recirkuliacinės zonos formavimąsi buvo Benjamin jungtinės būsenos teorija [1], pagrįsta banginiu modeliu ir eksperimentiškai patvirtinta užsuktiems tekėjimams kanale. Joje teigiama, kad recirkuliacinės zonos formavimasis yra pereinama būseną tarp tvarkingos simetrinės užsuktos srovės tekėjimo struktūros ir stipriai turbulizuoto srauto, kuriam nebūdinga simetrija. Tačiau laisvuose tekėjimuose ši teorija nepasitvirtino. Egzistuoja nemažai kitų teorijų, kuriomis bandoma nustatyti recirkuliacinės zonos formavimosi kriterijus [2, 3]. Pagrindinis šių teorijų trūkumas yra tai, kad gaunamos išvados galioja tik konkretaus eksperimento ar skaitmeninio modelio sąlygomis, tačiau jos negali būti vertinamos kaip universalūs recirkuliacinės zonos formavimosi teoriniai modeliai.

Per pastaruosius penkis dešimtmečius literatūroje buvo pateikta nemažai recirkuliacinės zonos klasifikacijos aprašymų. Pirminė recirkuliacinės zonos klasifikacija buvo įvesta sukurių virš delta sparno vizualizacijos eksperimentuose ir susijusi su vaizdine asociacija. Stebėtas į sukurių centrą įpurškiamos dažų srovelės susivijimas į spiralę aplink recirkuliacinę zoną buvo pavadintas spiraline arba S tipo forma, o

tolygus dažų pasiskirstymas apgaubiant recirkuliacinę zoną buvo pavadintas burbulo arba B tipo forma. Faler ir Leibovich [4] praplėtė šią klasifikaciją ir išskyrė septynis skirtingus tipus, numeruodami juos nuo 6 iki 0: spiralinis (6 tipas), dviguba spiralė (5 tipas), suplotas burbulas (4 tipas), spiralės vija (3 tipas), asimetrinė spiralė (2 tipas), burbulas (1 tipas), asimetrinis burbulas (0 tipas). Ilgą laiką būtent šia klasifikacija buvo naudojama. Ir tik gero kai vėliau buvo pastebėtas ir aprašytas kokybiškai naujas kūgio tipas, kai dažanti medžiaga tolygiai plečiasi sudarydama kūgio formą. Nors kūgio formos recirkuliacinės zonos egzistavimas buvo patvirtintas įvairiuose eksperimentuose [2, 5], kol kas nėra pateiktos klasifikacijos, kuri apimtų visas žinomas spirales, burbulo ir kūgio formos variacijas. Dauguma autorių tiesiog pridėdą egzistuojančias kūgio formos recirkuliacinės zonos atmainas prie Faler ir Leibovich pateiktos klasifikacijos. Kitas didelis naudojamos klasifikacijos trūkumas yra teorinio pagrindo nebuvimas. Nepaisant įvairių mėginimų teoriškai pagrįsti stebimų formų įvairovę, skirtingų autorių pateikiami teoriniai ir empiriniai perėjimo nuo vienos formos prie kitos kriterijai dažniausiai yra labai glaudžiai susiję su eksperimentinio įrenginio savybėmis ir sunkiai pritaikomi tiek kitų eksperimentatorių, tiek skaitmeninių modelių kūrėjų.

Bendros teorijos sukūrimą labai stabdo tai, kad recirkuliacinės zonos tyrimai užsukuose reaguojančiuose ir nereaguojančiuose srautuose išskyrė ją į atskiras kryptis. Nepaisant bendro tyrimo objekto, šių dviejų krypčių ryšys yra menkas. Nereaguojančiame sraute gauti rezultatai retai panaudojami recirkuliacinės zonos formavimuisi reaguojančiame

sraute analizuoti ar paaiškinti. Tokia padėtis istoriškai susiklostė dėl to, kad recirkuliacinės zonos formavimasis nereaguojančiuose srautuose su stipriu sukimosi momentu buvo nepageidautinas reiškinys, drastiškai keičiantis srauto tekėjimo lauką, sukeltis nestabilumus. Moksliniai tyrimai šioje srityje buvo nukreipti į recirkuliacinės zonos formos klasifikavimą, teorinių modelių, galinčių vienareikšmiai nusakyti recirkuliacinės zonos formavimosi sąlygas standartiniuose tekėjimuose (sūkurys virš delta sparno, užsuktas tekėjimas vamzdyje ar tūtoje, tornadinis sūkurys), kūrimą. Tuo tarpu recirkuliacinė zona reaguojančiame sraute nagrinėta kaip pageidautinas reiškinys, didinantis liepsnos stabilumo sritį, galintis sumažinti taršą ir pagerinti degimą. Būtent degimo eksperimento specifika išryškino recirkuliacinės zonos formavimosi savybes, kurios visiškai neakcentuotos nereaguojančio srauto eksperimentuose: vidinės recirkuliacinės zonos uždaramas ar atvirumas, išorinės recirkuliacijos svarba. Kadangi recirkuliacinės zonos formavimosi moksliniai tyrimai plėtojosi lygiagrečiai su deginimo įrenginių pramone, būtent šioje srityje buvo sukaupta daug empirinių duomenų apie įrenginio geometrijos svarbą ir įtaką recirkuliacijos stiprumui, recirkuliacinės zonos formai. Pastaruoju metu pasirodė moksliniai darbai, skirti recirkuliacijos priklausomybės nuo įrenginio geometrijos analizei.

Atlikto darbo tikslas buvo išanalizuoti, kaip tūtos forma veikia vidinę ir išorinę recirkuliaciją užsuktoje srovėje. Pirmiausia vizualizaciniais metodais buvo ištirta nereaguojančios užsuktos srovės sukurių struktūra ir palyginta su tokiais pat sąlygomis liepsnoje stebima struktūra. Vėliau degimo stende atlikti temperatūros ir degimo produktų sudėties matavimai, siekiant patvirtinti struktūrinės analizės prielaidas. Darbo rezultatai pateikiami dviejų straipsnių cikle. Šiame straipsnyje pateikiami vizualizacijos eksperimento užsuktoje nereaguojančioje žiedinėje srovėje rezultatai. Antrajame straipsnyje bus pateikti degimo eksperimento rezultatai.

## 2. NEREAGUOJANČIOS UŽSUKTOS SROVĖS VIZUALIZACIJOS STENDAS

Nereaguojančios užsuktos srovės tyrimui buvo naudojamas  $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$  destiliuoto vandens pripildytas stiklinis akvariumas. Stende įrengtą uždaro cirkuliacijos kontūrą sudarė aukšto slėgio žarnos sujungti akvariumas, išcentrinis vandens siurblys, ventilis vandens srauto greičiui kontūre reguliuoti. Vandens siurblys paimdavo vandenį iš akvariumo apačios ir tiekėdavo į akvariumą per vienos šoninės sienos viduryje įrengtą 60 mm skersmens angą. Ventiliu srauto greitį  $U_{vid}$  kontūre buvo galima keisti

nuo 0,01 m/s iki 0,25 m/s, o tai atitinka Re skaičių intervalą  $(0,6-15) \cdot 10^3$ . Čia  $U_{vid}$  yra vidutinis greitis tekėjimo kryptimi, išmatuotas Pito vamzdeliu už honekombo prieš suktuvą. Siekiant išvengti hidrodinaminių parametrų poveikio, srautų struktūra buvo lyginama esant tam pačiam greičiui  $U_{vid} = 0,09 \text{ m/s}$ . Tai mažiausias greitis, kuriam esant formuojasi stabili recirkuliacinė zona visais trimis tūtos formos atvejais. Srovei užsukti naudotas ašinis suktuvas su 12 mentelių, simetriškai išdėstytų aplink 8 mm centrinį kūną. Užsukimo laipsnis  $S = 0,68$  buvo apskaičiuotas pagal formulę [6]:

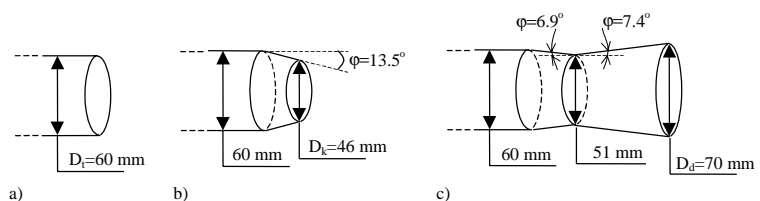
$$S = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{1 - (d_h/d)^3}{1 - (d_h/d)^2} \right) \cdot \text{tg} \varphi;$$

čia  $d = 60 \text{ mm}$  yra išorinis suktuvo skersmuo;  $d_h = 8 \text{ mm}$  yra užtamsinto suktuvo centro skersmuo;  $\varphi = 45^\circ$  yra suktuvo mentelių pasukimo kampas.

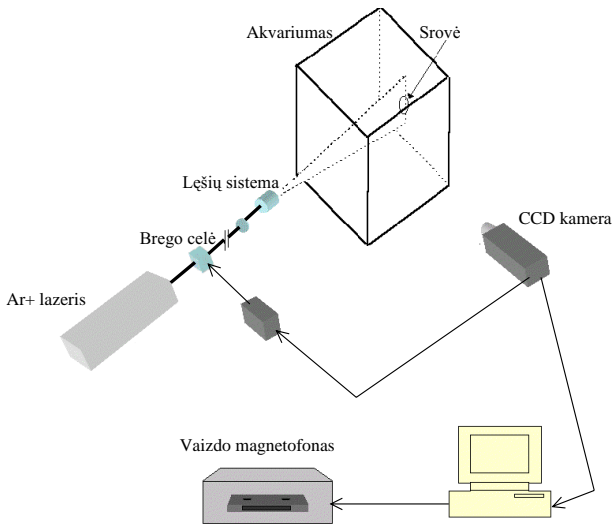
Suktuvas įtvirtintas  $D = 60 \text{ mm}$  skersmens ir 50 mm ilgio vamzdyje, prie kurio galo tvirtinama tūta. Atstumas tarp suktuvo ir tūtos išėjimo plokštumos  $1-1,5D$ . Tirtos tūtų formos ir matmenys pateikiami 1 pav.

Srauto vizualizacijai lazerio spindulys cilindrinis ir sferiniu lęšiais suformuojamas į norimo dydžio ir formos šviesos pluoštą, kuris nukreipiamas į tyrimo objektą. Burbuliukų arba dalelių judėjimas buvo filmuojamas vaizdo kamera ir analizuojamas naudojant sulėtintą videomagnetofono režimą, arba paimant norimą kadra į kompiuterį.

Greičio laukų matavimo eksperimente lazerio spindulys praeina akustinę-optinę Brego celę, kurioje apie 70% galingumo difraguoja į  $-1$  maksimumą. Iš difragavusio spindulio cilindrinis ir sferiniu lęšiais suformuojamas  $1-1,5 \text{ mm}$  storio ir apie 200 mm pločio šviesos pluoštas, kuriuo apšviečiama tiriamoji srovė. Dalelių pasiskirstymo srovėje vaizdas užfiksuojamas CCD kamera, nukreipta statmenai apšvietimo plokštumai. Spindulys difraguoja ir apšviečia srautą, kai į Brego celę tiekiamas 80 MHz dažnumo impulsas, kuris suformuojamas iš CCD kameros vaizdo signalo. Iš kiekvieno kadro vaizdo signalo padaromi du aukšto dažnumo impulsai ir tiekiami į Brego celę taip, kad difragavęs spindulys vieną kartą apšvie-



1 pav. Vizualizacijos stende tirtos tūtų formos. a – tiesi tūta; b – konverguojanti tūta; c – diverguojanti tūta



2 pav. Vizualizacijos stendo schema

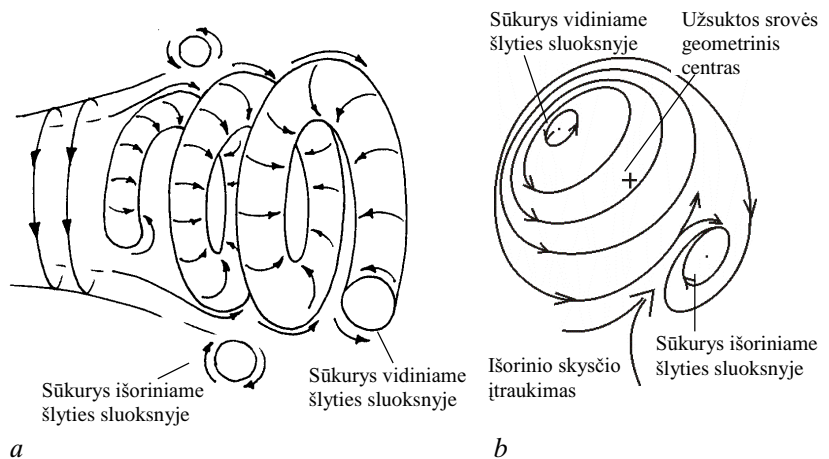
tų srovę pirmojo kadro pabaigoje, o kitą kartą – antrojo pradžioje. Valdymo impulsų formavimo sistema leidžia keisti apšvietimo trukmę ir intervalą tarp apšvietimų. CCD fotodaviklyje užregistruotą vaizdą vaizdo plokštė tiesiogiai paverčia į skaitmeninę matricą ir perduoda kompiuteriui. Ši matrica gali būti išsaugota grafinė byla, kuri panaudojama kaip pradiniai duomenys vaizdų analizės programoje [7]. Greičio laukams matuoti paruošto vizualizacijos stendo schema pavaizduota 2 pav.

### 3. REZULTATŲ APITARIMAS

Užsuktos srovės centre dėl išcentrinės jėgos veikimo mažėja slėgis ir stabdomas skysčio tekėjimas ašies kryptimi. Kai išcentrinės jėgos sukeltas išretinimas didesnis už srovės dinaminį slėgį, skystis prie ašies ima tekėti atgal. Srovės viduje susidaro stabili grįžtamo tekėjimo zona. Tokioje srovėje yra du šlyties sluoksniai, kuriuose generuojami sūkuriai: vidinis šlyties sluoksnis tarp grįžtamo tekėjimo ir srovės bei išorinis šlyties sluoksnis tarp srovės ir ją supančio stovinčio fluído. Priklausomai nuo pradinių sąlygų pasirinktoje geometrinėje sistemoje galima realizuoti dviejų tipų recirkuliacinę zoną: spiralės tipo ir burbulo tipo. Būdingi spiralinės recirkuliacinės zonos požymiai yra užsuktos srovės centrinės dalies formavimasis į savarankišką besisukančią struktūrą, šios struktūros precesija aplink sukimosi ašį ir sūkurių judėjimas vidiniame šlyties sluoksnyje spirالية trajektorija. Tuo tarpu burbulo tipo recir-

kuliacinei zonai būdingas užsuktos žiedinės srovės platėjimas, tolygus vidinės recirkuliacinės zonos ap-tekėjimas ir toroidinių sūkurių formavimasis vidiniame šlyties sluoksnyje. Burbulo ir spiralinės vidinės recirkuliacinės zonos klasifikacija neaprašo sūkurių elgesio išoriniame šlyties sluoksnyje. Ir vidinio, ir išorinio šlyties sluoksnių spiraliniai sūkuriai palaikomi energingo užsukto srauto. Jie konkuruoja tarpusavyje. Kurie sūkuriai vyrauja, nulemia tūtos forma.

Spiralinio tipo recirkuliacinėje zonoje sūkurys vidiniame šlyties sluoksnyje pradeda formotis netoli grįžtamojo tekėjimo zonos ribos. Stabdoma grįžtamojo tekėjimo, užsuktos srovės ašis pradeda stipriai precesuoti. Tikėtina, kad nusistovi toks precesijos dažnis, kuriuo generuojami nestabilumai labiausiai stiprinami vidiniame šlyties sluoksnyje. Dėl to vidiniame šlyties sluoksnyje susivirsta sūkurys, kuris tempiamas greito išorinio srovės žiedo spirale sukasi apie grįžtamojo tekėjimo zoną. Dėl sukimosi statmenoje srovės tekėjimo kryptčiai plokštumoje spiralinis sūkurys intensyviai maišo žiedu tekančios užsuktos srovės ir grįžtančio srauto mases. Kai kuriais atvejais spiralinis sūkurys praplėšia žiedinę srovę ir įtraukia skystį į grįžtamą tekėjimą ne tik iš jos, bet ir iš stovinčios aplinkos. Toks visiškas žiedinės srovės įtraukimas uždaro recirkuliacinę zoną. Dėl proceso nesimetriškumo ašies atžvilgiu momentinė recirkuliacinė zona yra nesimetriška užsuktos srovės geometrinės ašies atžvilgiu. Suvidurkinta laike spiralinė recirkuliacinė zona yra gana simetriška ir panaši į burbulo tipo recirkuliacinę zoną. Išoriniame šlyties sluoksnyje taip pat formuojasi spiralinis sūkurys, kuris sukasi apie užsuktą srovę iš išorinės pusės. Išorinės ir vidinės spiralės žingsniai yra vienodi. Spiralės sukasi taip, kad vienos spiralės vija gultų tarp kitos spiralės vijų. Schematiškai tekėjimo laukas su būdingais sūkuriais pavaizduotas 3 pav.



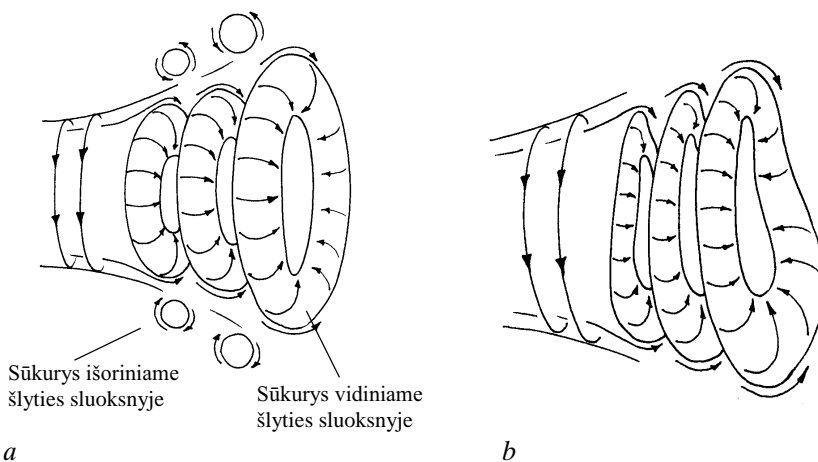
3 pav. Spiralinės recirkuliacinės zonos sūkurių struktūra. a – erdvinis vaizdas; b – pjūvis plokštumoje, statmenoje užsuktos srovės sukimosi ašiai

Burbulo tipo recirkuliacinėje zonoje užsuktoji srovė yra stabdoma tolygiai. Srovė prasiskiria ir apgaubia recirkuliacinę zoną, išvengdama išskaidymo ir savarankiško centrinio sūkurius susiformavimo. Vidiniame šlyties sluoksnyje tuoj pat už stagnacijos taško pradeda formuotis toroidinis sūkurys. Dėl stipraus turbulentiškumo ir proceso nestabilumo šis toroidinis sūkurys dažniausiai vystosi netolygiai: vienur auga greičiau, kitur slopinamas (4 pav. *b*). Esminis skirtumas nuo spiralinio vidinio šlyties sluoksnio sūkurius yra tai, kad šio sūkurius vijos išsidėsčiusios viena virš kitos, lygiagrečiai tūtos išėjimo plokštumai ir neturi spiralei būdingo žingsnio. Toroidiniai sūkuriai auga vystantis vidiniam šlyties sluoksniui bei intensyviai maišo pagrindinio ir recirkuliacinio srauto skystį. Augant toroidiniam sūkuriui pagrindinė užsuktoji srovė stipriai stabdoma ir tam tikru metu visiškai įtraukiama į vidinio šlyties sluoksnio toroidinį sūkurį. Momentinės recirkuliacinės zonos forma nėra visiškai taisyklinga, tačiau gana simetriška geometrinės užsuktos srovės ašies atžvilgiu. Suvidurkinta laike recirkuliacinė zona yra simetriška ir turi taisyklingą burbulo formą. Augant toroidiniam sūkuriui vidiniame šlyties sluoksnyje, sudaromos palankios sąlygos formuotis toroidiniam sūkuriui išoriniame šlyties sluoksnyje. Išorinio šlyties sluoksnio toroidai formuojasi tarpe tarp vidinio šlyties sluoksnio toroidų. Burbulo tipo recirkuliacinės zonos sūkurius struktūra pavaizduota 4 pav.

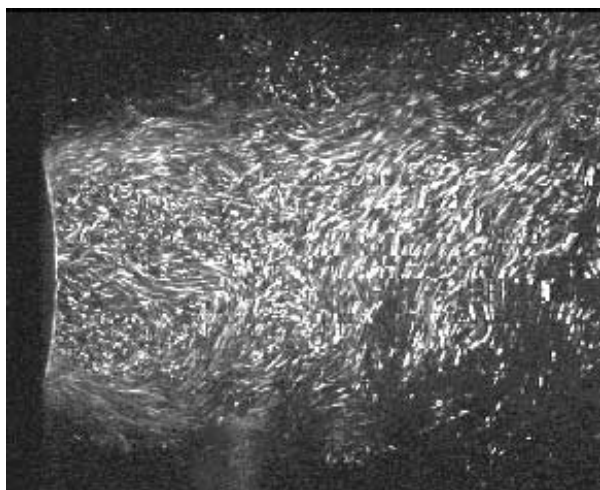
Kai vidutinis greitis  $U_{vid} = 0,09$  m/s ir užsikimo laipsnis  $S = 0,68$ , tiesios tūtos atveju recirkuliacinės zonos forma yra nepastovi. Eksperimento metu buvo fiksuojama tiek burbulo, tiek spiralinė formos, kurios keitė viena kitą. Abiejų formų pasireiškimo dažnumas maždaug vienodas. Burbulo formos atveju vidiniame šlyties sluoksnyje formuojasi toroidinis sūkurys. Antras toroidas jau būna užaugęs iki recirkuliacinės zonos dydžio ir visai ją užpildęs. Dažniau-

siai stebimas netaisyklingas toroido augimas, kai viena toroido dalis auga greičiau nei kitos ir/arba greičiau juda sukimosi ašies kryptimi, dėl to toroidas yra nestipriai deformuojamas. Recirkuliacinė zona užsidaro už antro toroido maždaug vienu metu įtraukiant visą supančią žiedinę srovę, sudarydama trumpą, maždaug  $1 D$  ilgio gana taisyklingos formos burbulą (5 pav. *a*). Pati recirkuliacinė zona yra nedaug įtraukta į tūtą, todėl sūkurys išoriniame šlyties sluoksnyje pradeda formuotis šiek tiek vėliau ir iki vidinės recirkuliacinės zonos uždarymo susiformuoja vienas toroidas. Spiralinės atveju vidiniame šlyties sluoksnyje formuojasi spiralinis sūkurys. Kaip ir burbulo atveju, jis pradeda formuotis šiek tiek anksčiau nei sūkurys išoriniame šlyties sluoksnyje ir maždaug per vieną apsisukimą užpildo visą grįžtamo tekėjimo zoną. Tada priešpriešinės vijos dalys pradeda stabdyti viena kitą ir ardyti sūkurį. Grįžtamasis srautas vinguriuoja prie pat srovės ašies veikiamas spiralinio sūkurius. Jo kraštus nuolat įtraukinėja spiralinis sūkurys ir perneša į gaubiančią užsuktą srovę. Išoriniame šlyties sluoksnyje sūkurius augimas atsilieka per pusę vijos nuo vidinio sūkurius dėl nestipraus recirkuliacinės zonos įtraukimo į tūtą. Išorinis sūkurys iki subyrėjimo apsisuka apie srovę 2–3 kartus. Užsuktoje srovėje augantys sūkuriai stabdo jos tekėjimą. Per vieną apsisukimą jos greitis sumažėja tiek, kad maždaug  $1-1,5 D$  atstumu nuo tūtos srovė gana dažnai praplėsiama apie  $1/8-1/6$  perimetro ir per tą vietą skystis iš išorės yra įtraukiamas į grįžtamą srautą. Taip suformuojama truputį ilgesnė nei burbulo atveju netaisyklingos formos uždara recirkuliacinė zona (5 pav. *b*).

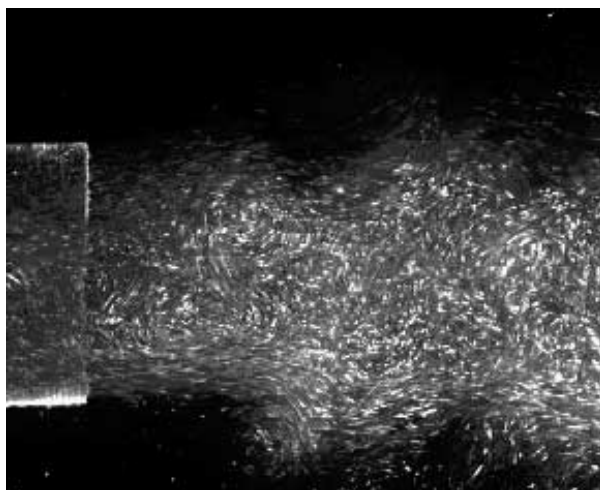
Naudojant diverguojančią tūtą stebimas spiralinės recirkuliacinės zonos formavimasis (6 pav.). Grįžtamo tekėjimo zona išsiskverbia giliai į tūtą. Apie šią zoną veja spiralinis vidinio šlyties sluoksnio sūkurys. Prie tūtos išėjimo šis sūkurys jau būna apsisukęs daugiau kaip vieną kartą ir kaip pirmu atveju užpildęs visą grįžtamo tekėjimo zoną. Grįžtamasis srautas yra siauras, besiplakantis tarp sūkurius vijų (6 pav. *b*). Prie tūtos sienelės tekančios užsuktos srovės ir grįžtamojo srauto maišymasis yra labai stiprus. Kaip ir anksčiau nagrinėtu atveju, sūkurius priešpriešinės vijos pradeda ardyti viena kitą, ir sūkurys subyra išeidamas iš tūtos arba tuoj už išėjimo. Konverguojančios tūtos atveju išorinio srauto įtraukimas už tūtos nestebėtas, todėl galima teigti, kad recirkuliacinė zona užsidaro dar tūtoje. Vizualiai zonos uždarymas yra sunkiai lokalizuojamas



4 pav. Burbulo tipo recirkuliacinės zonos sūkurius struktūra. *a* – erdvinis vaizdas; *b* – toroidinio sūkurius vidiniame šlyties sluoksnyje deformacija dėl netolygaus augimo

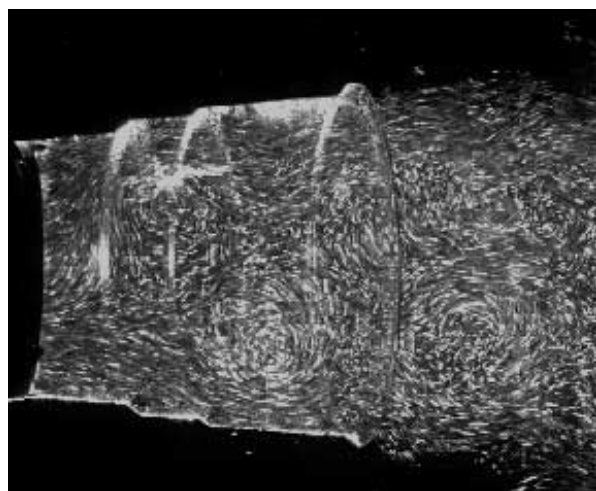


a

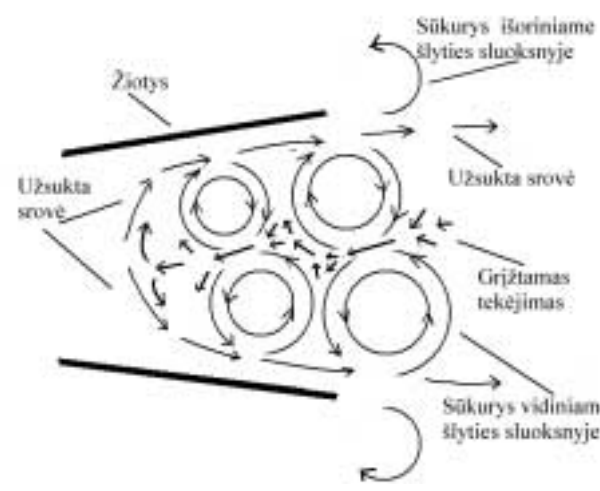


b

5 pav. Vidinės recirkuliacinės zonos tiesios tūtos atveju. a – burbulo tipo recirkuliacinė zona; b – spiralės tipo recirkuliacinė zona



a



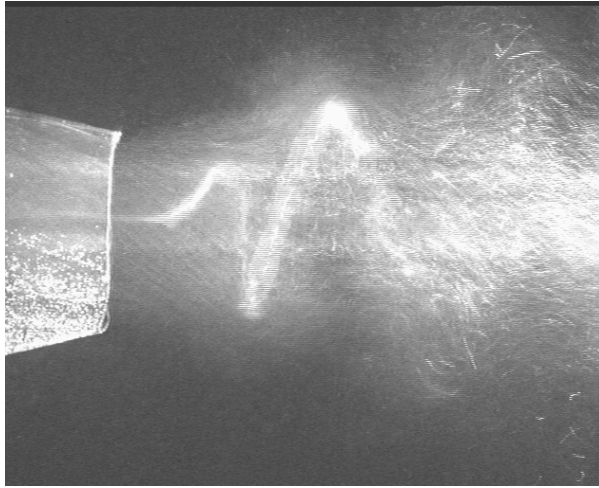
b

6 pav. Vidinė recirkuliacinė zona diverguojančios tūtos atveju. a – srovės nuotrauka; b – sūkurių vidiniame šlyties sluoksnyje schema

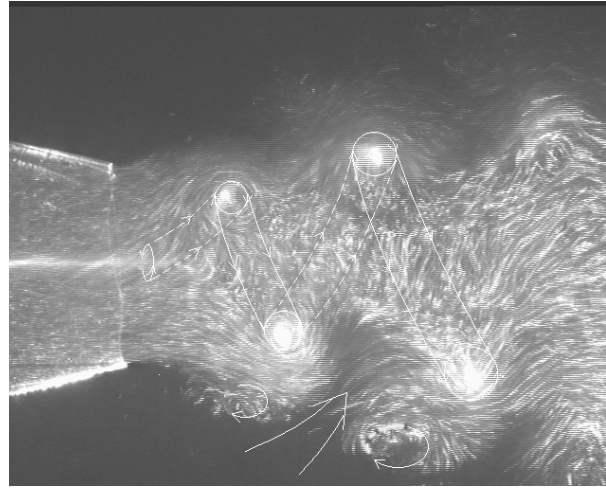
mas, kai naudojamas šviesos išbarstymas visame srovės tūryje ir nėra burbuliukais nudažyto srauto įtraukimo. Augdamas vidinis sūkurys stabdo greitą užsuktos srovės žiedą. Išėjęs iš tūtos srautas yra tiek sulėtėjęs, kad išoriniame šlyties sluoksnyje susidaro toroidiniai, o ne spiraliniai sūkuriai. Tačiau dėl gilaus recirkuliacinės zonos įtraukimo į tūtą sūkuriai išoriniame šlyties sluoksnyje pradeda formotis jau už recirkuliacinės zonos.

Konverguojančios tūtos atveju matyti labai ryškiai išreikštas spiralinės recirkuliacinės zonos formavimasis (7 pav.). Konverguojanti tūta greitina srovę ir kartu didina dinaminį slėgį jos centre. Todėl išcentrinės jėgos slėgis būna didesnis už dinaminį toliau nuo tūtos, kai dėl srovės plitimo jos greitis sumažėja. Parenkant suspaudimo kampą grįžtamo te-

kėjimo zoną galima formuoti daugiau ar mažiau nutolusią nuo tūtos. Tirtu atveju grįžtamo tekėjimo zona formuojasi netoli tūtos, maždaug  $0,3 D_k$  atstume. Išoriniame šlyties sluoksnyje sūkurys pradeda formotis anksčiau. Iki subyrėjimo sūkurys išoriniame šlyties sluoksnyje apsisuka 2–2,5 karto. Vidiniame šlyties sluoksnyje sūkurys pradeda augti kiek vėliau. Kitaip nei diverguojančiai ir tiesiai tūtomis, šio sūkurio matmenys mažesni už grįžtamo tekėjimo zoną ir jo augimo neriboja tūtos sienelės. Vidinis sūkurys, kaip ir išorinis, išsilaiko apie 2–2,5 vijos. Kadangi išorinis sūkurys jau būna užaugęs dar prieš grįžtamo tekėjimo zoną, tai jo sąveika su vidiniu sūkuriumi būna labai intensyvi. Jau už pirmos vidinio sūkurio vijos stebimi užsuktos srovės praplėsimai ir išorinio skysčio įtraukimai. Todėl konverguojančios tūtos at-



a



b

7 pav. Spiralinės recirkuliacinės zonos formavimasis konverguojančios tūtos atveju. *a* – erdvinis spiralinio sūkurio vidiniame šlyties sluoksnyje vaizdas; *b* – srovės vaizdas plokštumoje, išvestoje per sukimosi ašį bei statmenoje tūtos išėjimo plokštumai, ir spiralinio sūkurio vidiniame šlyties sluoksnyje schema

veju persimaišymas tarp srauto ir išorinio skysčio yra intensyvesnis nei tiesios tūtos atveju. Recirkuliacinė zona yra trumpa, maždaug  $1 D_k$  ilgio, ir labai netaisyklingos formos.

Analizuojant vaizdus nustatyta stagnacijos taško vieta ir srovės plėtimosi kampas visiems trimis tūtos tipams spiralinei recirkuliacinės zonos formai. Duomenys rinkti iš grupės atsitiktinai parinktų nuotraukų ir vidurkinti. Analizei panaudotos nuotraukos, darytos plokštumoje, kuri yra statmena tūtos išėjimo plokštumai ir išvesta per užsuktos srovės sukimosi ašį. Dėl separacijos didesni oro burbuliukai telkiasi prie sukimosi ašies, ir ašis nuotraukose ryškiai išsiskiria. Spiralinės recirkuliacinės zonos atveju stebima užsuktos srovės centrinės dalies precesija, o tai sukelia centre susikaupusių ryškiai apšviestų oro burbuliukų nukrypimą nuo tiesios sūkurio ašies. Centrinės ašies precesija prasideda prieš pat stagnacijos tašką, todėl stagnacijos taškas žymimas toje vietoje, kurioje stebimas ryškios centrinės ašies atsilenkimas nuo tiesiosios. Srovės plėtimasis įvertinamas brėžiant tiesią ribą tarp burbuliukais nudažytos užsuktos srovės ir tamsaus supančios aplinkos skysčio. Dalinai nudažyti išorinio šlyties sluoksnio sūkuriai paliekami

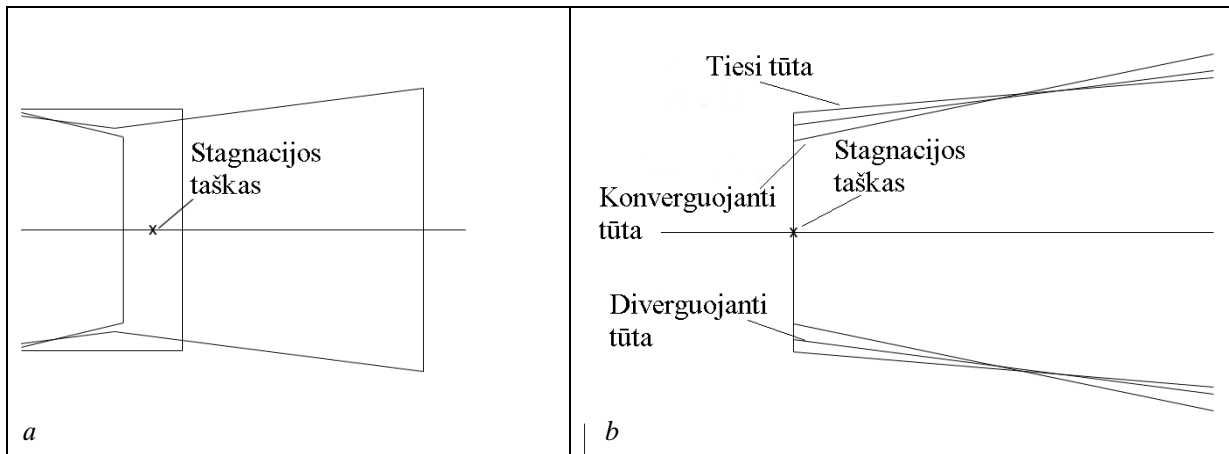
už srovės ribos. Srovės plėtimosi kampas yra kampas tarp išvestos tiesės ir užsuktos srovės sukimosi ašies. Nustatant srovės plėtimosi kampą buvo analizuojama srovės dalis tarp stagnacijos taško ir recirkuliacinės zonos uždarymo. Kiekybiškai toks ribos nustatymo būdas yra nepatikimas, tačiau jis priimtinas palyginamajai analizei, teigiant, kad visi vaizdai yra filmuoti vienodomis sąlygomis (lentelė).

Tiesiai ir diverguojančiai tūtoms stagnacijos taškas yra tūtoje. Tiesiai tūtai atstumas tarp tūtos išėjimo plokštumos ir stagnacijos taško yra  $0,12 D_t$ . Diverguojančiai tūtai šis atstumas yra  $0,96 D_d$ . Konverguojančiai tūtai stagnacijos taškas yra už tūtos išėjimo plokštumos, nutolęs  $1,15 D_k$  atstumu. Čia  $D_t$ ,  $D_d$  ir  $D_k$  yra tiesios, diverguojančios ir konverguojančios tūtų išėjimo skersmenys. Stagnacijos taško išsidėstymas tūtos išėjimo atžvilgiu visoms trimis tūtoms paivaizduotas 8 pav. *a*.

Tiesiai tūtai recirkuliacinė zona formuojasi ne daug įtraukta į tūtą, tačiau didžioji jos dalis yra už tūtos išėjimo plokštumos. Vidutiniškai recirkuliacinės zonos uždarymas įvyksta  $1,2 D_t$  atstumu nuo tūtos išėjimo plokštumos. Iš tūtos išpučiama srovė plečiasi  $4,8^\circ$  kampui. Diverguojančiai tūtai recirkuliaci-

Lentelė. Atstumas iki stagnacijos taško ir srovės plėtimosi kampo vertės visiems trimis nagrinėtiems tūtos tipams

Tūta	Tiesi	Konverguojanti	Diverguojanti
Tūtos išėjimo skersmuo mm	$D_t = 60$ mm	$D_k = 46$ mm	$D_d = 70$ mm
Atstumas nuo tūtos išėjimo plokštumos iki stagnacijos taško mm	$-0,12 D_t$	$0,15 D_k$	$-0,96 D_d$
Atstumas nuo tūtos išėjimo plokštumos iki recirkuliacinės zonos uždarymo mm	$1,2 D_t$	$1,1 D_k$	$0,1 D_d$
Srovės plėtimosi kampas laipsniais	$4,8^\circ$	$11,7^\circ$	$7,4^\circ$



8 pav. Stagnacijos taško ir srovės plėtimosi kampo schema. *a* – stagnacijos taško lokalizacija tūtos atžvilgiu; *b* – srovės plėtimosi schema

nė zona formuojasi giliai tūtoje ir beveik neišeina už tūtos ribų. Recirkuliacinės zonos uždarymas vyksta tuoj pat už tūtos, maždaug  $0,1 D_d$  atstumu. Išėjusi iš tūtos užsukta srovė toliau plečiasi tuo pačiu  $7,4^\circ$  kampui kaip ir tūta. Konverguojančiai tūtai recirkuliacinė zona formuojasi už tūtos,  $0,15 D_k$  atstumu nuo tūtos išėjimo plokštumos. Visiškas recirkuliacinės zonos uždarymas vyksta maždaug  $1,1 D_k$  atstumu nuo tūtos išėjimo plokštumos. Srovės plėtimosi kampas yra gana didelis –  $11,7^\circ$ . 8 pav. *b* pavaizduotas srovės plėtimasis visoms trimis tūtomis.

#### 4. IŠVADOS

Priklausomai nuo tūtos formos, kai užsukimo laipsnis  $S = 0,68$  ir  $Re = 5400$ , galima realizuoti spiralinės ir burbulo tipo recirkuliacinių zonų formavimąsi. Recirkuliacinės zonos forma vienareikšmiai susijusi su sukurių vidiniame šlyties sluoksnyje judėjimu: spiralinei recirkuliacinei zonai būdingas sukurių judėjimas spiraline trajektorija, burbulo tipo recirkuliacinei zonai būdingi toroidiniai sukurių.

Kai užsukimo laipsnis  $S = 0,68$  ir  $Re = 5400$ , tiesios tūtos atveju galimas abiejų tipų recirkuliacinės zonos formavimasis. Tuo tarpu konverguojančiai ir diverguojančiai tūtomis stebima tik spiralinio tipo recirkuliacinė zona. Labai tikėtina, kad toks elgesio skirtumas tomis pačiomis hidrodinaminėmis sąlygomis susijęs su konverguojančio elemento įvedimu tiek konverguojančioje, tiek ir diverguojančioje tūtose. Būtent konverguojantis tūtos elementas padidina vidutinį ašinį greitį, o tai sukelia sistemos perėjimas iš tarpinės būsenos į spiralinės recirkuliacinės zonos formavimosi būseną, kuri, daugelio autorių teigimu, yra būdinga pereinant į didesnių  $Re$  sritis.

Konverguojančio elemento įvedimas taip pat leidžia reguliuoti stagnacijos taško bei recirkuliacinės zonos pradžios vietą ir sustiprina išpučiamos iš tū-

tos srovės plėtimąsi. Stebėjimai rodo, kad išpūstos iš konverguojančios tūtos srovės plėtimosi kampas artimas diverguojančio elemento siaurėjimo kampui.

Diverguojančio tūtos elemento įvedimas leidžia lokalizuoti recirkuliacinę zoną pačioje tūtoje ir taip atsiriboti nuo išorinio šlyties sluoksnių sukurių poveikio. Be to, diverguojantis tūtos elementas gali padidinti srovės plėtimąsi. Dėl pasienio sluoksnių formavimosi srovė prilimpa prie tūtos sienelių, o išėjus iš tūtos plečiasi tuo pačiu kampui. Diverguojančioje tūtoje srovė užpildė visą tūtos tūrį ir toliau plėtėsi  $7,45^\circ$ , tuo tarpu maksimalus galimas plėtimasis nenaudojant diverguojančio tūtos elemento yra  $6,9^\circ$ . Tačiau naudojant per didelį tūtos išsiplėtimą srovė prilimpa prie vieno tūtos krašto.

Gauta  
2001 07 26

#### Literatūra

1. Benjamin T. B. Theory of the vortex breakdown phenomena // *J. Fluid Mech.* 1962. Vol. 11. P. 593–692.
2. Billant P., Chomaz J.-M., Huerre P. Experimental study of vortex breakdown in swirling jets // *J. Fluid Mech.* 1998. Vol. 376. P. 183–219.
3. Stein C. F. On vortex breakdown in swirling annular jets. Licentiate thesis, Preprint 1998–14. Dept. of Mathematics, Chalmers Tekniska Högskola, 1998.
4. Faler J. H., Leibovich S. Disrupted states of vortex flow and vortex breakdown // *Phys. Fluids.* 1977, N 20. P. 1385–1400.
5. Khoo B. C., Yeo K. S., Lim D. F., He X. Vortex breakdown in an unconfined vortical flow // *Experimental Thermal and Fluid Science.* 1997. N 14, P. 131–148.
6. Gupta A. K., Lilley D. G., Syred N. *Swirl Flows*. Abacus press. 1984.
7. Lapienienė A., Šležas R. Momentinių greičio vektorių lauko matavimas pagal dalelių vaizdo poslinkį // *Energetika.* 1997. Nr. 4. P. 9–15.

Aiveta Lapienienė, Ričardas Šležas

### THE INFLUENCE OF NOZZLE SHAPE ON THE STRUCTURE OF SWIRLING JET

#### S u m m a r y

The influence of nozzle form on vortex breakdown in a swirling water jet was studied using a laser image visualization technique. The swirl is imparted by injecting water into a large water tank through axial swirl vanes. The swirl ratio  $S = 0.68$  and Reynolds numbers  $Re = 5400$  were maintained the same for all experiments. Experiments were conducted for straight, converging, and diverging nozzles. The vortex breakdown type changes between bubble and spiral for the straight nozzle. The spiral type vortex breakdown takes place for the converging and diverging nozzles. The main flow parameters, visualization images, and schematic representation for each nozzle are presented. The influence of nozzle form on vortex core precession and vortex formation in the outer shear layer of the jet is discussed. A comparison of the vortex core expansion ratio and downstream distance till a complete vortex breakdown for different nozzles is provided.

**Key words:** nozzle shape, structure of swirling jet

Айвета Лапенене, Ричардас Шляжас

### ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СОПЛА НА СТРУКТУРУ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

#### Р е з ю м е

Исследовалось влияние формы сопла на структуру закрученного потока. Струя воды втекала в резервуар и закручивалась аксиальным завихрителем. Исследования проводились с соплами цилиндрической, конфузорной и диффузорной форм. Во всех опытах использовались параметр закрутки  $S = 0,68$  и число Рейнольдса  $Re = 5400$ . В случае цилиндрического сопла получены две формы рециркуляционной зоны — пузырьная и спиральная. При использовании конфузорного и диффузорного сопел формировалась только спиральная рециркуляционная зона. В работе представлены структура вихрей во внешнем и внутреннем сдвиговых слоях при образовании пузырьной и спиральной рециркуляционных зон и визуализация течения для различных форм сопел. Обсуждается влияние формы сопла на угол раскрытия струи и длину рециркуляционной зоны.

**Ключевые слова:** форма сопла, структура закрученного потока