

# Plazminių procesų tyrimas ir technologijų kūrimas Lietuvos energetikos institute

---

Vitas Valinčius,

Pranas Valatkevičius,

Romualdas Kėželis

*Lietuvos energetikos institutas,  
Plazminių technologijų laboratorija,  
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas  
El. paštas Vitas.Valincius@lei.lt*

Kruopštus nuolatinės srovės elektros lanko reiškinių tyrimas, teorijos kūrimas ir pritaikymas, taip pat plazmos srautų diagnostika leido sukurti didelės galios ilgai veikiančius plazmos šaltinius. Atlikus tyrimus nustatyta, kad konvekcinis šilumos pernešimo intensyvumas plazmos generatorių lanko iškrovos zonoje yra tiesiog proporcingas elektrinio lauko stipriui, o intensyviausi šilumos mainai vyksta plazmotrono anode dėl čia lokalizuotos lanko dėmės ir jos aplinkoje vykstančios konvekcijos. Sukurti plazmos šaltiniai tiekia nepusiausvirą plazmos srautą, kurio tekėjimo charakteristikos gali būti griežtai reguliuojamos ir valdomos keičiant plazmotrono parametrus, įtekančių plazmą sudarančių ir papildomų dujų srautus bei įpūtimo vietų dislokaciją.

Straipsnyje aptariami kai kurie žemos temperatūros plazmoje dominuojantys procesai, aprašomos naujos plazminės technologijos, sukurtos Lietuvos energetikos instituto Plazminių technologijų laboratorijoje: keraminių medžiagų lydymas ir pluošto sudarymas iš stiklo atliekų, korundo, dolomito, silicio dioksido ir jų mišinių; pavojingų medžiagų bei atliekų skaidymas plazmocheminiame sroviniame reaktoriuje; naujų katalizinių dangų iš pigių metalų oksidų sintezė ir panaudojimas vietoje įprastinių taurių metalų dangų; konstrukcinių medžiagų paviršinių sluoksnių modifikavimas; C:H dangų nusodinimas iš įvairių plazmą sudarančių dujų mišinių.

Aptartos kai kurios kitos technologijos ir naujos galimybės, pažymėta, kad atmosferinio slėgio nepusiausviroji plazma yra tinkama priemonė modifikuoti plačiai taikomas esamas medžiagas arba sintetinti naujas siekiant gauti specialios struktūros ir savybių produktus. Straipsnyje taip pat trumpai aprašoma nauja vandens garo plazminė technologija, kuri ateityje bus naudojama naudingų cheminių medžiagų sintezei, kuro konversijai, mikro- ir nanodalelių nusodinimui, įvairios paskirties katalizinių ir tribologinių dangų bei kompozitų sudarymui.

**Raktažodžiai:** plazma, plazminė technologija, plazmos generatorius, plazminis medžiagų modifikavimas, plazmos diagnostika

---

## ĮVADAS

XXI a. pasauliniame moksle ir praktikoje plazminėms technologijoms skiriama ypač daug dėmesio. Šiuo metu jos nepakeičiamos paviršių inžinerijoje (konstrukcinių medžiagų paviršinių

sluoksnių formavimas), aplinkosaugoje (pavojingų medžiagų ir atliekų konversija), chemijos pramonėje (įvairių naudingų chemikalų ir medžiagų sintezė), energetikoje (organinių atliekų ir kuro konversija), metalurgijoje (metalų ir lydinių gavimas bei apdorojimas), automobilių

pramonėje (korpusų, žibintų, variklio detalių gamyba), tekstilėje, elektronikoje ir netgi archeologijoje [1, 2]. Nėra žmogaus veiklos srities, kurioje tiesiogiai ar netiesiogiai nebūtų naudojama plazma. Beveik visa buitinė technika, kompiuteriai ir jų elementai, automobiliai ir jų dalys, lėktuvai ir kosminiai aparatai, karinė technika ir ginklai pagaminti naudojant plazmines technologijas.

Plazma – tai ketvirtoji medžiagos būseną – elektrai laidžios jonizuotos dujos, turinčios savyje laisvų elektronų, fotonų, fononų, teigiamai įkrautų jonų, radikalų ir kitų elementariųjų bei virtualiųjų dalelių. Realios terminės plazmos jonizacijos laipsnis sudaro nuo keleto iki kelių dešimčių procentų, tačiau to pakanka, kad dujos taptų laidžios elektrai. Vienas paprasčiausių plazmos gavimo būdų yra dujų terminė jonizacija elektros lanko iškrovos metu. Terminė plazma – svarbus naujų technologijų elementas, sudarantis sąlygas vyksti procesams, kurie normaliomis sąlygomis neįmanomi. Ji gaunama rusenančiose, barjerinėse, aukšto dažnio, labai aukšto dažnio, mikrobaniginėse, impulsinėse ir lankinėse iškrovose.

Šiuo metu pasaulinėje mokslinėje-techninėje literatūroje plazmai ir plazminėms technologijoms skiriama apie 20 specialiųjų žurnalų, kuriuose gausu mokslinių straipsnių plazmos generavimo, diagnostikos ir pritaikymo klausimais. Dar praėjusio šimtmečio aštuntajame dešimtmetyje Europoje egzistavo vos keletas plazmos ir plazminių technologijų tyrimo laboratorijų, o šiuo metu, pavyzdžiui, vien tik Vokietijoje yra per 2 000 laboratorijų, kurių moksliniai tyrimai vienaip ar kitaip susiję su plazma [3]. Visa tai rodo nepaprastą susidomėjimą šia unikalia mokslo sritimi.

2005–2015 m. darbai plazminių tyrimų srityje buvo plačiai vykdomi beveik visose išsivysčiusiose šalyse. Įtraukti stambiausi nacionaliniai mokslinio tyrimo centrai ir laboratorijos, įsteigtos naujos didelės mokslininkų grupės, kurios kuria eksperimentines bazines, tobulina elektros lanko plazmos generatorius (PG), vykdo įvairius fundamentinius bei taikomuosius tyrimus.

Dar praėjusiame šimtmetyje Lietuvos energetikos institute (LEI) buvo sukurti ir išbandyti iki 2 000 kW galios nuolatinės srovės plazmotronai, įrengta 3 000 kW galios lygintuvinė pastotė, sukurta plazmos generatorių aušinimo sistema su aušinamojo vandens baseinu, pastatyta azoto ir deguonies stotis su dujų kompresorine. Jau

tuometė LEI Aukštos temperatūros srautų (dabar – Plazminių technologijų) laboratorija sėkmingai vykdė fundamentinius ir taikomuosius tyrimus. Atkūrus Lietuvos nepriklausomybę ir sumažėjus mokslinių tyrimų finansavimui, dalis vykdomų programų buvo nutraukta, o laboratorijos personalo gerokai sumažėjo. Pakito požiūris į mokslą, o ypač į fundamentinius tyrimus, todėl labiau reikėjo rūpintis taikomojo pobūdžio darbais. Pereinamuoju laikotarpiu ypač susidomėta įvairių medžiagų apdorojimu plazmos aplinkoje, pavojingų medžiagų ir atliekų neutralizavimu, konstrukcinių medžiagų paviršinių sluoksnių formavimu ir kt. Atlikus tyrimus buvo sukurta nemažai naujų plazminių technologijų.

Plazminių technologijų laboratorijos (PTL) mokslininkai jau beveik 50 metų dirba įvairiose mokslinių tyrimų ir eksperimentinės plėtos (MTEP) bei plazminių technologijų kūrimo ir pritaikymo srityse. XXI a. pirmajame dešimtmetyje LEI darbų pobūdis ir apimtys nedaug pasikeitė. PTL darbuotojai toliau vykdo biudžetinius darbus pagal įvairias tematikas, aktyviai dalyvauja įvairiose tarptautinėse programose ir projektuose. Iki 2015 m. laboratorijos darbuotojų gretas papildė jauni mokslininkai. Daktaro disertacijas sėkmingai apgynė Vilma Snapkauskienė, Viktorija Grigaitienė, Liutauras Marcinauskas. Žydrūnas Kavaliauskas, Mindaugas Milieška, Andrius Tamošiūnas.

LEI PTL šiuo metu yra vienintelė laboratorija Baltijos šalyse, kur visapusiškai tiriama procesai, vykstantys atmosferinio slėgio elektros lanko plazmoje ir tyrimų rezultatų pagrindu kuriamos naujos technologijos. Šiuo metu čia dirba 9 daktaro laipsnį įgiję mokslininkai, 1 jaunesnysis mokslo darbuotojas, 1 doktorantas, 2 magistrantai, taip pat darbo patirtį turintis pagalbinis personalas – 2 inžinieriai ir aukštos kvalifikacijos meistras. Laboratorija dirba šiomis pagrindinėmis kryptimis:

- kuria ir tyrinėja įvairios paskirties nuolatinės srovės plazmos šaltinius;
- tiria reakcinėje lanko zonoje ir plazmoje vykstančius procesus ir reiškinius;
- nagrinėja aukštos temperatūros dujų srautų dinamikos ir šilumos-masės mainų procesų dėsninumus atmosferos ir redukuoto slėgio plazminėse aplinkose;
- atlieka plazmos ir aukštos temperatūros srautų diagnostiką bei kuria diagnostikos priemones;

- tiria plazmos srautų ir medžiagų sąveiką įvairiuose plazminiuose-technologiniuose procesuose;
- realizuoja plazminio ypač kenksmingų medžiagų neutralizavimo procesą ir atlieka jo tyrimus;
- sudaro katalizines ir tribologines dangas plazminėje aplinkoje bei analizuoja jų savybes;
- atlieka šiluminių ir heterogeninių procesų tyrimą reaguojantiems produktams aptekant katalizinių paviršių;
- vykdo plazminį konstrukcinių medžiagų paviršių formavimą ir modifikavimą;
- vykdo mikro- ir nanodispersinių dalelių, grūnelių bei mineralinio plaušo iš sunkiai besilydančių medžiagų sintezę ir tiria jų savybes;
- tyrinėja vandens garo plazmos srautų ir srovių generavimo ypatumus, elgseną bei savybes, jų panaudojimo galimybes kuro konversijai, vandenilio ir sintetinių dujų gamybai bei pavojingoms atliekomis neutralizuoti.

## TYRIMŲ METODAI IR ĮRENGINIAI

Dujų dinaminių ir šiluminių procesų tyrimas plazminio proceso metu yra sudėtingas uždavinys, todėl pasaulinėje mokslinėje-techninėje literatūroje šiais klausimais duomenų nuolat trūksta. Reikia pažymėti, kad tyrimus apsunkina tai, jog tuo pačiu metu plazmos srovėse ir srautuose vyksta daugybė įvairių reiškinių, pavyzdžiui, egzoterminės ir endoterminės reakcijos, disociacija, jonizacija, dispersinių dalelių lydymas, jų paviršių erozija ir t. t. Plazmos srovėje egzistuoja vidiniai energijos šaltiniai, vyksta cheminės reakcijos, intensyvūs šilumos-masės mainai tarp elektros lanko, srovės dujų ir kartu tekančių dispersinių dalelių. Kaip vieną iš hipotezių galima priimti, kad vidinių energijos šaltinių aktyvumas yra kintamas dydis, todėl jie „migruoja“. Jų tankis ir tiksli dislokacija nežinoma, greičiausiai jie yra išsidėstę chaotiškai ir pasiskirstę visoje srovėje netolygiai. Taip pat nežinomas ir šilumos išsiskyrimo mechanizmas. Reikia pažymėti, kad didžiulės reikšmės šiluminiam ir dinaminiam procesams turi dujų dinaminių ir energetinių charakteristikų pulsacijos. Šilumos pernešimo intensyvumas priklauso ne tik nuo temperatūros lygio, bet ir nuo medžiagos dispersinių dalelių vietinės koncentracijos, difuzijos, plazmos generatoriaus darbo režimo, sienelės šilumos laidumo, šiuurkštumo ir t. t. Taigi, šilumos-masės mainų koeficientai ir dujų dinaminės

charakteristikos plazmos srovėje yra daugelio kintamųjų funkcija, todėl matematiškai sumodeliuoti procesą praktiškai nėra galimybės. Atsižvelgiant į tai, procesų tyrimui kaip pagrindinis pasirinktas eksperimentinis būdas, kuris (kai kuriais atvejais) yra vienintelis. Tačiau skaitmeninis tyrimas taipogi labai svarbus, nes gali suteikti informacijos, kurios neįmanoma užfiksuoti eksperimentų metu.

Eksperimentinis dujų dinaminių charakteristikų tyrimas plazmos srautuose ir srovėse taip pat yra sudėtingas dėl aukštos temperatūros poveikio pirminiams keitikliams bei lokalių charakteristikų nustatymo problemų. Todėl dujų dinaminėms ir šiluminėms charakteristikoms nustatyti laboratorijoje dažniausiai pasirenkamas kombinuotas skaitinis ir eksperimentinis metodas.

## Skaitinis-analizinis tyrimas

Plazmos srautus skaitiniais metodais pradėta modeliuoti nuo 1980 m., tačiau erdvinis modeliavimas (3D) pradėtas visai neseniai, pradiniai modeliavimo darbai buvo atlikti plazmos srauto nepastovumui tirti [4]. Atlikti tyrimai parodė, kad esant vienodai PG darbinei galiai plazmos srauto temperatūrų ir greičių profiliai keičiasi labai panašiai ir net proporcingai [5, 6]. Taigi, visi skaitmeniniai plazmos srauto tyrimo metodai gali būti pagrįsti parametru profilių pasiskirstymo nustatymu, esant tam tikram dujų srautui bei entalpijai. Skaičiavimo rezultatai labai priklauso nuo pasirinktų pradinių parametru: temperatūros ir greičio profilių įtekėjime, geometrinio tinklelio ir turbulencijos modelio.

Iš PG ištekantis plazmos srautas maišosi su aplinkos dujomis, o, patekus dispersinėms dalelėms, jis tampa dvifazis. Tai sudaro sunkumų teoriškai skaičiuojant procesą. Kita kliūtis tiksliam dujų srauto dinamikos skaičiavimui yra dvifazio srauto atitrūkimas: staigus ištekėjimas į neapribotą erdvę, parametru pasiskirstymo įvairovė ir pulsacijos, antrinis tekėjimas ir recirkuliacija visiškai atima galimybę matematiniais metodais išspręsti problemą. Todėl kylančius naujus uždavinius galima išspręsti tik kompleksiskai taikant fizikinius, techninius, cheminius, matematinius ir kt. metodus.

Šiuo metu plazmos tekėjimo dinaminių ir energetinių charakteristikų tyrimas LEI atliekamas panaudojant du programų paketus: „Fluent“ ir „Jets & Poudres“.

### Aukštatemperatūros srovės judėjimo modeliavimas „Fluent“ programų paketo pagalba

Skaitmeninis įkintintų dujų srauto kanale tyrimas atliktas naudojant „Fluent“ hidrodinamikos programinį paketą. Skaičiavimas vykdomas naudojant standartinį  $k$ - $\varepsilon$  modelį [7, 8], kuriame fluideo tekėjimui sprendžiamos pilnos Navje-Stokso ir energijos lygtys.

Standartinis  $k$ - $\varepsilon$  modelis papildomai aprašomas dviem pagrindinėmis lygtimis:

turbulentinės kinetinės energijos

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M, \quad (1)$$

$$+ G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M,$$

ir disipacijos

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{Pr_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (2)$$

čia:  $k$  – turbulentinė kinetinė energija ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ),  $\varepsilon$  – disipacijos laipsnis,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ,  $G_k$  – dydis, išreiškiantis turbulencijos kinetinės energijos atsiradimą dėl greičio gradiento,  $G_b$  – dydis, išreiškiantis turbulencinės energijos atsiradimą dėl plūduriavimo,  $Y_M$  – dydis, išreiškiantis srauto plėtimosi įtaką energijos disipacijai.  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$  ir  $C_{3\varepsilon}$  – šio modelio koeficientai,  $Pr$  – Prandlio skaičius.

Turbulentinis srauto klampis  $\mu_t$  išreiškiamas lygtimi

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (3)$$

čia:  $\rho$  – dujų tankis,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $C_\mu$  –  $k$ - $\varepsilon$  modelio konstanta.

Atlikus skaičiavimus naudojantis  $k$ - $\varepsilon$  turbulencijos modeliu, gauta papildomos informacijos apie tekančio srauto struktūrą ir jame vykstančius procesus, nustatytos srauto charakteristikos, tokios kaip greičio ir temperatūrų profiliai įvairiuose kanalo skerspjūviuose. Pagrindiniai srauto tekėjimo modeliavimo ir skaičiavimo privalumai yra tie, kad dar prieš atliekant eksperimentus plazmos srovėje galima bent apytiksliai paskaičiuoti įvairias srauto charakteristikas, gauti rezultatus atvejams, kai eksperimentiškai pamatuoti yra sunku arba praktiškai

neįmanoma, o atskirais atvejais ir visiškai atsisakyti brangiai kainuojančių eksperimentų.

Modelį dažniausiai sudaro iš PG į atmosferinio slėgio ir kambario temperatūros neribotą erdvę ištekančios srovės užimamas tūris, kuriame galioja visi fizikos dėsniai. Srovėje nenutrūkstamai juda įkintintų dujų (oro) srautas, kurio pradinė temperatūra visame įtekėjimo skerspjūvyje laikoma pastovi. Srovės tekėjimas modeliuojamas trimatėje erdvėje ir aprašomas Dekarto koordinatinių sistemoje ( $x, y, z$ ), kurioje  $y$  ašis sutampa su tekėjimo kryptimi,  $x$  ašis statmena kanalo ašiai, o  $z$  – statmena  $x$  ir  $y$ .

Uždaviniams supaprastinti dažnai laikoma, kad tipiškos ribinės sąlygos yra šios:

- greičio ir temperatūros profiliai ištekėjime yra statūs ir užpildantys visą srovės skerspjūvį;
- pradinė tekančio srauto temperatūra visame pradiniam skerspjūvyje vienoda;
- veikia gravitacijos jėga;
- aplinkos temperatūra už kanalo  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ;
- įtekančio srauto turbulentiškumo laipsnis yra pastovus ir lygus 2 %;
- slėgis atmosferinis ir yra pastovus ( $p = 101\,325\text{ Pa}$ ).

Sudarius tinkamą tinklėlį, padidinamas skaičiavimo tikslumas, konvergencija ir skaičiavimo greitis. Tinklelio sudarymas užima daug laiko, be to, norint labai tiksliai atlikti skaičiavimus, reikia nemažų kompiuterio operatyviosios ir ilgalaikės atminties resursų.

### Multifazinės aukštatemperatūros srovės judėjimo modeliavimas „Jets & Poudres“ programų paketo pagalba

Vos tik įvedamos į srautą kietos dalelės, skaičiavimas tampa ypač sudėtingas dėl išskirtinių plazmos savybių [9, 10]:

- supančio dalelę pasienio sluoksnio temperatūros gradiento;
- efekto dėl besikeičiančios supančios aplinkos;
- šiluminių pokyčių vykstant dalelių garavimui proceso metu;
- dalelės ir jos garų spinduliavimo;
- šilumos laidumo dalelės viduje;
- smulkių dalelių turbulentinės dispersijos.

Įprastiniame plazminiame procese į plazmos srautą įvedami labai dideli kiekiai įvairios sudėties dalelių (pvz., tekant  $3\text{ kg/s}$  srautui, į jį tiekiamas  $10^8$  vnt/s dispersinių  $20\text{ }\mu\text{m}$  dydžio aliuminio

dalelių). Tokiu atveju turi būti įvertinami 3 pagrindiniai veiksniai [11, 12]:

- dalelių pasiskirstymas plazmotrono tūtos ištekėjime, greičių vektorių pasiskirstymas po susidūrimų tarp dalelių ir kanalo sienelių;
- plazmos srauto sutrikdymas, dalelėms patekus į nešančiųjų dujų srautą. Šis veiksnys akcentuojamas įvairių autorių eksperimentiniuose darbuose ir labiausiai lemia plazmos srauto ir tiekiamų miltelių tarpusavio sąveiką;
- plazmos srovės tekėjimo nepastovumas dėl kintamos dalelių temperatūros, taip pat greičių ir trajektorijos kitimo.

Tyrinėti dvifazio srauto dinamiką skaitiniais metodais taip pat labai sudėtinga, todėl reikia ne tik vykdyti skaitmeninį srauto modeliavimą, bet jį lyginti su eksperimentų rezultatais. Jeigu užduodami pagrindinio srauto pradiniai parametrai yra analogiški, tai nemažai parametrų, nustatytų eksperimentais ir skaičiuotu skaitiniu būdu, sutampa, pavyzdžiui:

- plazmos srauto temperatūrų ir greičių profiliai už ištekėjimo tūtos;
- turbulencijos laipsnis;
- plazmos srovės sąveika su dispersinėmis dalelėmis;
- susidariusių plazmoje dalelių ir klasterių pasiskirstymas pagal dydį;
- plazmos srauto tekėjimo nepastovumas dėl kartu su dalelėmis įvedamo šalto dujų srauto įtakos.

Skaitmeniniai tyrimai atliekami naudojant „Jets & Poudres“ programinį paketą [11, 12], kuris sukurtas GENeral MIXing (Genmix) programos pagrindu, tačiau patobulintas ir pritaikytas modeliuoti plazmos srautus. Medžiagų cheminės ir fizikinės savybės parenkamos iš T & TWinner duomenų bazės [13]. „Jets & Poudres“ programa

naudojama tiriant į plazmos srautą įvestos vienos dalelės judėjimą. Rezultatai gauti oro plazmai tekant iš tiesiasrovio reaktoriaus link substrato, esant atmosferiniam aplinkos slėgiui. Laikoma, kad į plazmos srautą įvedamos sferinės  $Al_2O_3$ , ZrO, Zr dalelės.

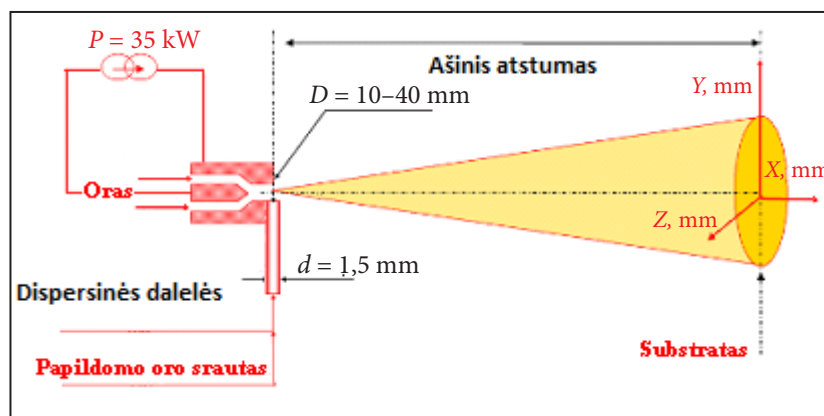
Principinė srauto modelio schema parodyta 1 pav. Modeliuojant plazmos srovę nustatomi kintami jos tekėjimo parametrai bei nuspėjama jų kintimo tendencija.

Kai kuriais atvejais nepaisoma plazmos srauto tekėjimo netolygumo, įtekėjime užduoti temperatūrų ir greičių profiliai yra statūs, srautas įpučiamas tik viena kryptimi ( $x$  ašis) ir yra pastovus. Taip pat nepaisoma recirkuliacijos ir difuzijos efektų. Modelio tinklelis turi maždaug 300 000 kintamo dydžio akučių. Plazmotrono galia (nustatyta eksperimentais),  $P = 35\text{--}70$  kW.

### Eksperimentiniai tyrimai

Aukštatemperatūros cheminės sintezės plazmos sraute sritis jau pasiekė tokią stadiją, kai yra gauta ne tik išsami informacija apie aukštatemperatūrio srauto dinamiką ir šilumos mainus, bet ir dispersinių dalelių judėjimo dėsningumus plazmos sraute, jų tarpusavio sąveiką, dalelių ir srauto sąveiką su reaktoriaus sienelėmis bei aplinka. Plazminio proceso sėkmė priklauso nuo daugelio veiksnių, iš jų ir nuo nešančios aplinkos temperatūros, greičio bei dispersinės medžiagos buvimo laiko reakcijos zonoje, cheminių reakcijų pobūdžio. Tačiau vienas iš lemiamų veiksnių proceso kokybei yra disponuojamų įrenginių ir analizinės aparatūros konstrukcijos tobulumas ir jų charakteristikų kokybė.

**Bendra plazminio eksperimentinio įrenginio schema.** Naudojant plazminę technologiją



1 pav. Supaprastinta plazminio proceso principinė schema

moksliniams tyrimams, svarbu turėti patikimus, ilgą laiką dirbančius įrenginius, tiekiančius stabilius aukštos temperatūros, reikalingos galios dujų srautus. Parenkant žemos temperatūros plazmos generatorių, įvertinama reikalinga galia, darbo trukmė, plazmos srauto temperatūra, greitis, užterštumas, n. v. k. ir t. t.

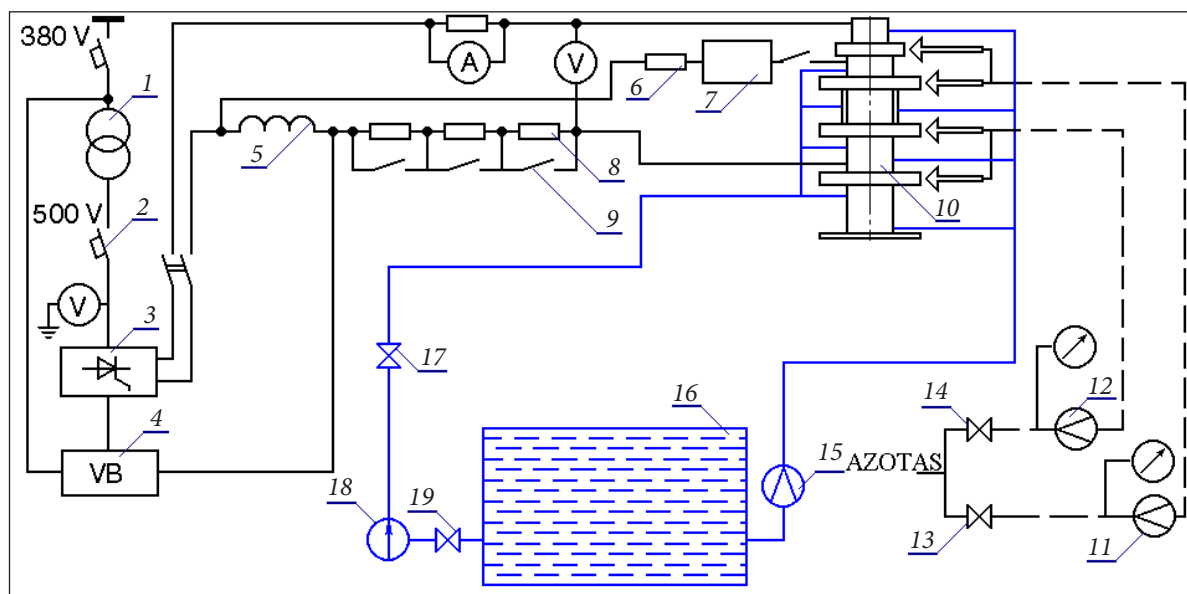
LEI PTL sukurta sistema, užtikrinanti stabilų plazmotrono darbą, valdymą ir srauto parametrų registravimą [14] (2 pav.). Jis susideda iš elektros, dujų ir vandens ūkio. Elektros ūkį sudaro aukštintantysis transformatorius (1), kontaktorius (2), lygintuvas (3), valdymo pultas (4), droselis (5), reostatai (6, 8), uždegimo sistema (7), plazmos generatorius (10). Dujų ūkį sudaro azoto rezervuarai, reduktoriai, adatiniai vožtuvai (13, 14). Dujų kiekiui matuoti naudojamos kritinio srauto tūtos (11, 12) arba diafragmos. Vandens ūkį sudaro rezervuarai (16), vandens siurbiai, filtrai. Optimalus aušinančio vandens slėgis 0,6 MPa. Vandens srautas matuojamas droseliacijos įrenginiais, o įtekančio ir ištekančio aušinančio vandens temperatūrų skirtumas – keturgubomis Cu-K diferencialinėmis termoporumis. Vidutinė dujų srauto temperatūra ir greitis nustatomi iš šilumos balanso, matuojant srovės stiprį, įtampos kritimą lanke, šilumos nuostolius su PG aušinančiu vandeniu ir bendrą pratekančių per plazmos generatorių dujų kiekį. Turint minėtus duomenis, paskaičiuojama srauto entalpija. Iš

nustatytos entalpijos pagal žinomus priklausomumus nustatoma vidutinė ištekančių iš plazmotrono dujų temperatūra ir greitis. Vietiniai ištekėjusios plazmos srovės parametrai matuojami šaldomu kalorimetriniu zondų, Lengmiūro zondais, spektrometrais ir kt.

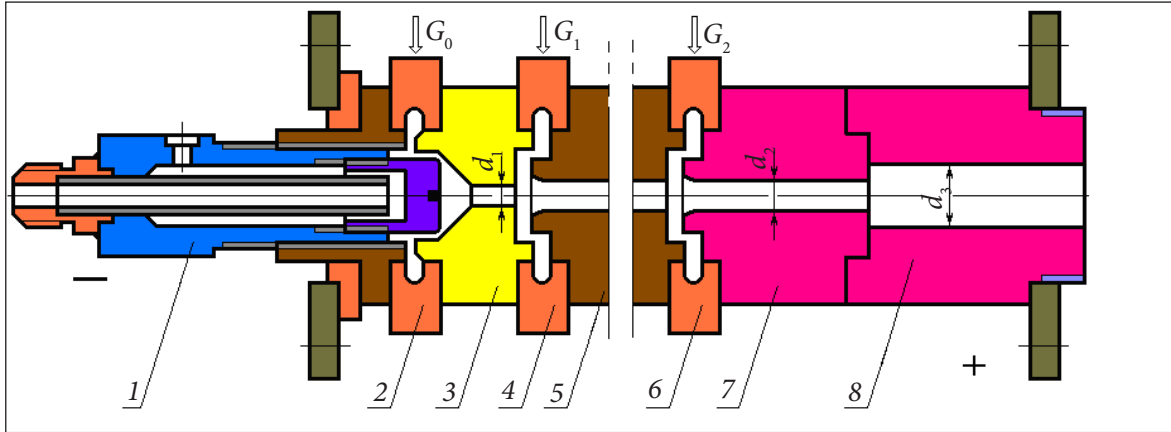
### Pastovios srovės elektros lanko plazmos šaltiniai, jų kūrimas ir tobulinimas

Anksčiau LEI buvo projektuojami didelio našumo dujų dinaminiai standai, todėl jiems aprūpinti plazma buvo pasirinkti didelės galios elektros lanko plazmos šaltiniai. Standų eksploatavimo metu tobulintos linijinių plazmotronų konstrukcijos, įsisavinama nauja PG eksploatavimo technika, bandomi laboratorijoje sukurti sekcijiniai plazmotronai su karštu katodu ir laiptuotu anodu. Plazmotronas laboratorijoje naudojamas kaip aukštos temperatūros dujų srauto šaltinis, t. y. jis nėra pagrindinis tyrimų objektas, nors fizikiniai procesai, vykstantys jame, tyrinėjami.

Plazmotroną sudaro karštas volframo arba hafnio emiteris, įvairios paskirties neutralios sekcijos ir laiptuotas vario anodas. Atsižvelgiant į neutralių sekcijų skaičių, jų ilgių ir skersmens santykį bei geometriją, plazmotrono galia gali siekti kelis megavatus. Pastaruoju metu PTL dažniausiai naudojami mažesnės (iki 150 kW) galios plazmos generatoriai (3 pav.), kuriuos sudaro katodo mazgas, izoliaciniai žiedai su plazmą sudarančių dujų



2 pav. Supaprastinta plazmos srautų generavimo stendo schema. Paaiškinimai tekste



3 pav. 70 kW galios PG schema. 1 – katodo mazgas, 2, 4, 6 – izoliaciniai žiedai su plazmą sudarantių dujų įpūtimo tangentiniais kanalais, 3 – tarpinis anodas, 5 – neutrodas, 8 – anodas

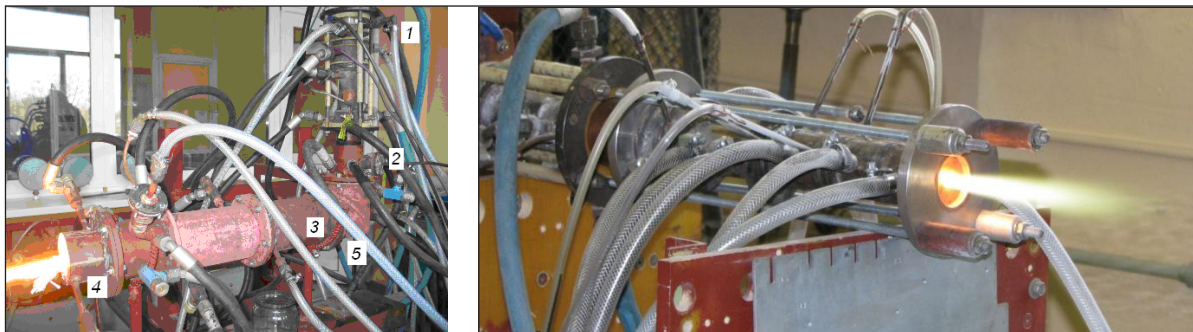
įpūtimo kiaurymėmis, tarpinis anodas, skirtas plazmotronui uždegti, neutralios sekcijos ir anodas. 3 pav. pavaizduoto PG katodo mazgas sudarytas iš aušinamo apvaskalo ir elektronų emiterio. Emiterio medžiaga gali būti volframas, hafnis, cirkonis ir kitos stipria elektronų emisija pasižyminčios medžiagos. Jeigu katodo emiteris pagamintas iš volframo, tai jis apipučiamas nedideliu kiekiu azoto arba argonu, kuris apsaugo emiterį nuo oksidacijos.

Į plazmotrono kamerą pro izoliacinius žiedus tangentiškai įpučiamas oras, azotas ir kitos dujos. Taigi, elektros lanko dėmė anode sukasi, taip sumažindama elektrodo (anodo) sienelės eroziją. Visos PG sekcijos varinės, šaldomos vandeniu. PG paleidžiamas osciliatoriaus iškrova (20 kV) uždegant nedidelės srovės elektros lanką tarp katodo ir tarpinio anodo. Dėl dujų tėkmės šis lankas iš-

tempiamas iki pagrindinio anodo, turinčio žymiai aukštesnę potencialą nei tarpinis elektrodas. Lankas „peršoka“ ir toliau dega tarp katodo ir pagrindinio anodo, o jo dalis išteka į aplinką (4 pav.).

#### PLAZMINIUOSE ĮRENGINIUOSE VYKSTANČIŲ PROCESŲ TYRIMAI

Plazmos savybių ir joje vykstančių procesų, reikšinių bei plazmos srovės nepusiausvyros sąlygų tyrimas turi didelės reikšmės nustatant tinkamus PG darbo režimus ir gaunant kokybišką produkciją. Būtina pažymėti, kad plazmos nepusiausvyros lygis lemia sudaromo produkto kokybę ir struktūrą, todėl atliekami specialūs tyrimai siekiant išaiškinti įvairių veiksnių įtaką plazminiams procesams, analizuojamos ir tiriamos šiluminės nepusiausvyros sąlygos reaguojančių dujų plazmoje. Gauta



4 pav. Šiuolaikiniai pastovios srovės linijiniai plazmos generatoriai darbo metu: kairėje – keraminių medžiagų lydymo ir pluoštinimo įrenginys (1 – plazmos generatorius, 2 – žaliavos dozavimo-maitinimo įrenginio įvedimo anga, 3 – plazmocheminio reaktoriaus korpusas, 4 – plaušinimo mazgas, 5 – anga papildomam dujų tiekimui), dešinėje – modifikuotas plazminis tiesiasrovės plazmocheminis reaktorius su 70 kW galios plazmotronu

svarbi informacija apie elektronų ir sunkiųjų dalelių temperatūrų pasiskirstymo dėsningumus.

### Lanko zonoje ir plazmoje vykstančių procesų ir reiškinų analizė

Elektrofizinių procesų aprašymas analitiškai galimas tik paprastomis sąlygomis. Daugeliu atvejų dujų tekėjimas plazmotrone yra turbulentinis, kanalo geometrija sudėtinga, kaitinamų dujų įvedimas į kamerą įvairaus pobūdžio. Taikant panašumo teoriją ypač svarbus didelių galių plazmotronų kūrimas, kadangi eksperimentiniai tyrimai šioje srityje yra brangūs ir sudėtingi.

Panašumo teorijos esmė yra sąryšio ir sąlygų tarp modelinio ir kuriamo plazmotrono nustatymas. Jeigu yra keletas kokybiškai vienodų reiškinų, aprašomų tais pačiais dydžiais, kurie charakterizuojami nustatytais parametrais: greičio, temperatūros, magnetinio lauko stiprumo, dalelių koncentracijos ir t. t. pasiskirstymu erdvėje ir bėgant laikui. Panašumo teorija nusako savitarpio ryšį, kurį tenkina panašūs reiškiniai, taip pat sąlygas, kurias reikia įvykdyti, kad reiškiniai būtų panašūs. PG iškrovų panašumo sąlygos nusakomos geometriniu ir kinetiniu magnetinių laukų panašumu, apsprendžiančių kriterijų lygybe. Todėl procesams aprašyti reikia panaudoti nuo temperatūros (entalpijos) priklausančius parametrus, kurie labiau įvertina neizotermiškumą. Santykinis elektros laidumas, tankumas, spinduliavimas gali būti aprašomi lygtimis:

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 [(h-h_w)/(h_0-h_w)]^n; \rho = \rho_0 (h/h_0)^{n_2}; \\ Q_{sp} &= Q_{sp,0} (h/h_0)^{h_3}, \end{aligned} \quad (4)$$

taip pat judėjimo režimo kriterijais  $Re$ , greičių ir temperatūrų panašumo kriterijais bei  $Pr$  kriterijumi. Prie šių kriterijų sistemos priskiriamas fizinių savybių priklausomumas nuo temperatūros. Apsprendžiančiaisiais taip pat yra  $P$ ,  $St$  ir  $C_p$  kriterijai, kurie yra visų kitų kriterijų funkcijos:

$$\begin{aligned} P_6 &= \frac{\sigma_0 UL}{I} = f_1(\mu, x, Pr, Re, P_1 - P_5, n_i) \\ \{St &= f_2(\mu, x, Re, Pr, P_1 - P_5, n_i) \\ C_p &= f_3(\mu, x, Re, Pr, P_1 - P_5, n_i). \end{aligned} \quad (5)$$

Ši sistema gauta iš lygčių, aprašančių simetrinį laminarinį tekėjimą, esant elektros lankui. Pasikeitus kanalo geometrijai ir dujų įtekėjimo pobūdžiui,

kriterijų kiekis padidėja. Turbulentinis tekėjimas nustatomas, jeigu dujų savybių ( $\lambda$ ,  $\mu$ ) įvertinama turbulentinė dedamoji. Iš pateiktų lygčių nustatomas potencialų skirtumas lanke, šilumos mainai, pasipriešinimas reakciniame kanale:

$$\frac{U\sigma_0 L}{I} = f_1\left(x, Pr, Re, \frac{\rho_0 u_0 h_{00} \sigma_0 L^3}{I^2}, \frac{\rho_0 u_0^2 L}{IB}, n_i\right); \quad (6)$$

$$St = f_2\left(x, Pr, Re, \frac{\rho_0 u_0 h_{00} \sigma_0 L^3}{I^2}, \frac{\rho_0 u_0^2 L}{IB}, n_i\right); \quad (7)$$

$$C_f = f_3\left(x, Pr, Re, \frac{\rho_0 u_0 h_{00} \sigma_0 L^3}{I^2}, \frac{\rho_0 u_0^2 L}{IB}, n_i\right). \quad (8)$$

Jeigu plazmotronuose nėra dirbtinio lanko suspaudimo, tekėjimas turbulentinis, slėgis ne didesnis kaip 0,2 MPa, nėra magnetinio lanko stabilizavimo (plazmotronas su sukuriniu lanko stabilizavimu dujomis), lygtis (6) supaprastėja:

$$\frac{UL}{I} = f\left(\frac{GL}{I^2}, \frac{G}{I}, Re\right). \quad (9)$$

Pagal sukauptą eksperimentinę medžiagą, plazmotrono VACH galima užrašyti

$$U = A \left(\frac{I^2}{Gd}\right)^2 \left(\frac{G}{d}\right)^\beta (P_d)^\gamma. \quad (10)$$

Gautos kriterinės lygtys panaudotos plazmotronų charakteristikoms apibendrinti ir naujiems plazmotronams projektuoti.

Skaičiuojant  $Re$ , dujų tankis visada nustatomas pagal vidutinę dujų masės temperatūrą  $T_f$ :

$$Re_d = \frac{wd}{v} = \frac{4Gd}{\pi d^2 \rho_f} \cdot \frac{\rho}{\mu}. \quad (11)$$

Šilumos atidavimo koeficientas skaičiuojamas pagal Niutono dėsnį:

$$\alpha = \frac{q_w}{T_f - T_w} = \frac{q_w \cdot \bar{c}_p}{(H_f - H_w)}, \quad (12)$$

o tekant disocijuotoms dujoms jis skaičiuojamas pagal visą dujų entalpiją, t. y. įvertinant ir chemines reakcijas:

$$\alpha = q_w \cdot \bar{c}_p / [(H_f + H_{ch.r.} + w^2/2) - H_w]. \quad (13)$$



Dujoms tekant vamzdžiais ikigarsiniais greičiais disipacijos energijos galima nepaisyti.

Šilumos mainų, turbulentiškai tekant karštomis dujomis kanaluose, kai oro temperatūra neviršija 4 000 K, o azoto – 5 000 K, šilumos atidavimo koeficientui skaičiuoti galima naudoti srauto ir sienelės temperatūrų skirtumą, o vietoje  $c_p'/-c_p$  naudoti  $(T'/T_D)^{0,9}$  (orui disociacijos pradžios temperatūra  $T_D = 2\,500$  K, o azotui – 4 000 K).

Norint sukurti įvairių konstrukcijų ir galių linijinius plazmotronus reikia žinių apie procesus, vykstančius reakcinėse iškrovo kamerose. Ši informacija gaunama apibendrinant plazmotronų voltamperines ir šilumines charakteristikas (VACH) [14, 15]. Jos nustatytos kaitinant įvairias dujas, esant skirtingiems slėgiams. Gauti rezultatai lyginami tarpusavyje ir su kitų autorių darbų rezultatais. Laboratorijoje tiriami šilumos mainai plazmotrono reakcinėje lanko zonoje, nagrinėjamas elektros lanko elektrinio stiprio kitimas esant laminariniam ir turbulentiniam tekėjimui, jo poveikis azoto oksidų susidarymui ir lanko spinduliavimas tekant skirtingoms dujoms.

### Plazmos diagnostika ir aukštatemperatūrio srauto charakteristikų tyrimas

Šaldomais entalpijos zondais (5 pav.) matuojami plazmos greičių ir temperatūrų profiliai, nustatomos vietinės jų reikšmės, lyginama su iš šilumos balanso lygčių gautomis vidutinėmis reikšmėmis,

nustatomi dinamiškieji ir energetiniai srauto charakteristikų pasiskirstymo dėsniniai.

Greičių ir temperatūrų matavimo metodika vadovaujasi šilumos balanso sudarymu atsiurbiant centriniu zondo vamzdeliu dujas, taip pat be atsiurbimo. Šilumos srautas, nuvedamas aušinančio skysčio atsiurbiant dujas, susideda iš šilumos srauto, perduoto nuo zondo išorinio paviršiaus  $Q_1$ , ir šilumos srauto, gauto nuo atsiurbiamų centriniu vamzdeliu dujų  $Q_2$ . Jeigu atsiurbimo nėra, tai šiluma paduodama tik per išorinį zondo paviršių ir lygi  $Q_3$ . Tada šilumos balanso lygtis bus:

$$(Q + Q_2) - Q_3 = G_{\text{H}_2\text{O}} c_p (\Delta T_2 - \Delta T_1). \quad (14)$$

Jeigu dujos neatsiurbiamos, tai  $Q_1 = Q_3$  ir šilumos kiekis  $Q_2$  bus lygus dujų entalpijos pokyčiui:

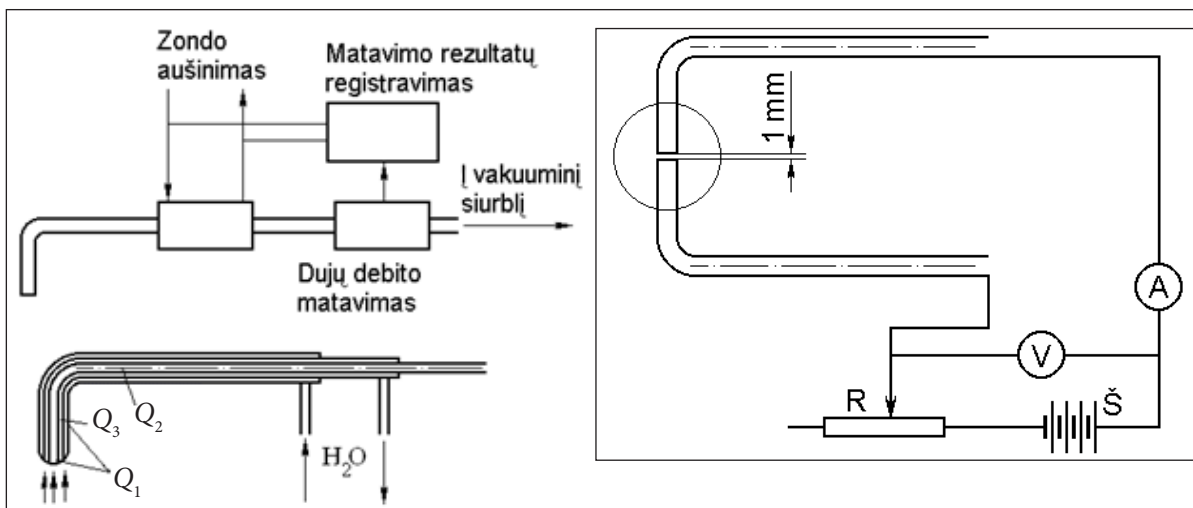
$$Q_2 = Gd \cdot \Delta T = Gd(I_1 - I_2). \quad (15)$$

Panaudoję (15) turime

$$I_1 = I_2 + \frac{G_{\text{H}_2\text{O}}}{Gd} c_p (\Delta T_2 - \Delta T_1). \quad (16)$$

Termoanemometru su šaldomu pirminiu keitikliu nustatytos greičių pulsacijos, o dvigubu elektriniu zondais (5 pav.) išmatuotos temperatūros pulsacijos ir nustatytas elektronų temperatūros pasiskirstymas.

Atlikus tyrimus nustatyti plazmos srovės tekėjimo dėsniniai, gauta, kad daugeliu atvejų



5 pav. Dujų dinamiškieji ir energetiniai charakteristikų nustatymo schemas: kairėje – šaldomu entalpijos zondais, dešinėje – dvigubu matavimo Lengmiūro zondais

atmosferos slėgio plazmoje elektronų temperatūra žymiai viršija dujų sunkiųjų dalelių temperatūrą. Greičių ir temperatūrų matavimų rezultatai pasienio sluoksnyje leido nustatyti Prandtlio kriterijaus ir Karmano pastoviosios reikšmes. Taip atsirado galimybė pritaikyti Cebesi-Smito metodą skaičiuojant šilumos mainus vamzdyje, esant kintamoms dujų savybėms.

Argono ir jo mišinių su molekulinėmis dujomis plazmoje buvo tyrinėjami procesai, sukelti nukrypimus nuo termodinaminės pusiausvyros. Šių darbų rezultatas – stabilus, neužteršto elektrodų emisijos produktais, elektros lanko plazmos šaltinio, skirto spektroskopinei analizei, sukūrimas. Įsivavinta atominės spektroskopijos su fotoelektronine registracija, kurią pasitelkus nagrinėti atominiai-molekuliniai procesai, lemiantys nukrypimus nuo termodinaminės pusiausvyros. Nustatyta, kad argono ir jo mišinio su molekulinėmis dujomis plazmos nepusiausvyros būvį lemia jonų disociatyvi rekombinacija.

Pastebėta, kad dėl sudėtingų srauto tekėjimo sąlygų ir plazmoje vykstančių heterogeninių procesų skaitiniu metodu gauti rezultatai nesutapdavo su eksperimentiniais, todėl jis buvo naudojamas tik kaip papildoma eksperimentinio tyrimo priemonė.

Plazmos sudėčiai, elektronų ir sunkiųjų dalelių temperatūrai, aukštos kokybės plazmos diagnostikai laboratorijoje naudojamas optinis emisinis spektrometras ir speciali plazmos diagnostikos sistema su dvigubu Lengmiūro zondų, o greitai vykstantiems procesams tyrinėti pasitelkiama greitaeigė optinė vaizdo kamera. Taip išsamiai ištirtos kintamos agregatinės būsenos dispersinių dalelių srautų charakteristikos ir judančių išlydytų sričių bei granulių judėjimo dėsningumai [16].

### Plazmos srauto ir dispersinių dalelių sąveika

PG ir plazmocheminiame reaktoriuje (PCHR) šiluminės charakteristikos nustatomos, eksperimentai atliekami tekant ir netekant dispersinėms dalelėms. Taip tiriami srauto tekėjimo dėsningumai. Naudojant greitaeigę optinę kamerą ištirta heterofazinio srauto, lydalo ir granulių dinamika, plačiau aprašyta [16]. Šiuo metodu taip pat stebima ir užfiksuojama pluošto susidarymo kinetika (6 pav.), pagal kurią sudarytas pluošto susidarymo modelis ir nustatytas jo susidarymo mechanizmas.

Stebėjimai greitaeigė optine kamera rodo, kad multifazinis srautas PCHR ištekėjimo tūtos aplin-

koje (6 pav.) susideda iš lydalo srovelių, įvairių dydžių iš dalies išlydytų arba aplydytų granulių ir dujinės srauto fazės. Tad dolomito+SiO<sub>2</sub> arba ceolitų dispersinės dalelės, įneštos į aukštos temperatūros srautą, išlydomos labai greitai.

### Šilumos mainų tyrimai plazmos įrenginiuose ir plazmocheminiuose reaktoriuose

Šilumos mainų intensyvumo tarp dvifazinio aukštatemperatūrio srauto ir sienelės nustatymas yra gana sudėtingas, kadangi vyksta cheminės reakcijos, nežinoma srauto atitrūkstamojo tekėjimo įtaka, sudėtingi ir nepakankamai ištirti masės mainai. Todėl eksperimentiškai nustatoma esamų vienfazinio srauto kriterinių lygčių pritaikymo galimybė dvifazinio srauto tekėjimo atvejui. Pagal tyrimų rezultatus [17], vietinių šilumos mainų intensyvumui įvertinti įtekant srautui į reaktorių iš maišymosi kameros su keliais kaitintuvais kriterinė lygtis:

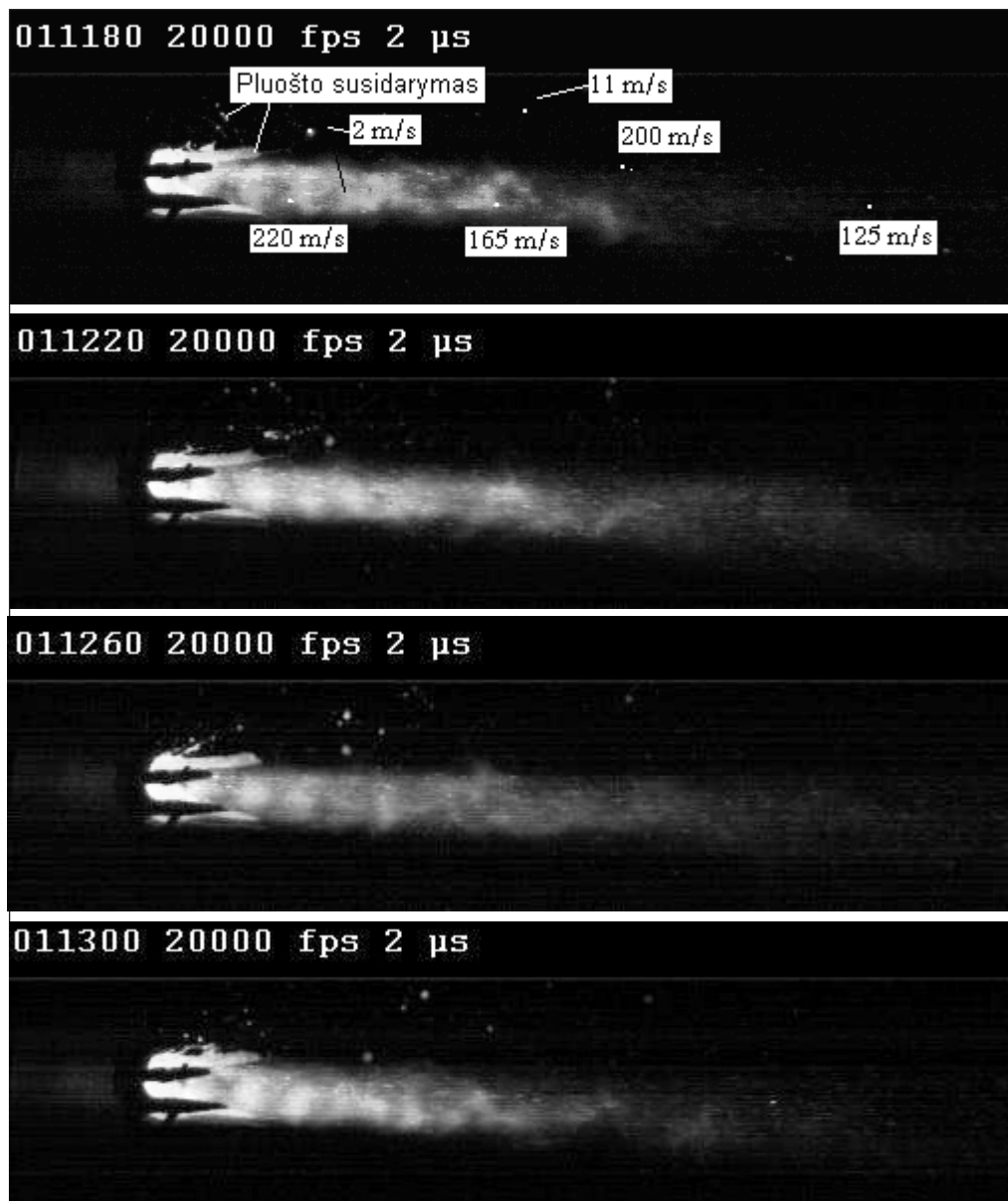
$$St = 0,2(d/d_{mk}) - 0,19(d_k/d_{mk})^{0,11} \quad (17)$$

$$Re^{-0,07} (1/(1+x/d))^{0,8} Pr^{-0,4},$$

čia:  $d_{mk}$  – maišymosi kameros skersmuo,  $d_k$  – apskritimo, kuriame išdėstyti plazmotronai, skersmuo.

### PLAZMINĖS TECHNOLOGIJOS

Plazminiai procesai gali vykti esant tūkstančių ir dešimčių tūkstančių laipsnių temperatūrai, todėl tokioje aplinkoje cheminės reakcijos vyksta daug kartų greičiau. Atsižvelgiant į technologinio proceso paskirtį, gali būti naudojama rusenanti, elektros lanko, aukšto ir labai aukšto dažnio plazma. Plazmos sraute perdirbamos ir apdorojamos kietos (metalai, keramika), skystos (vanduo, druskų tirpalai, skystas kuras), dujinės (angliavandeniliai, ciano vandenilis, azoto junginiai ir t. t.) medžiagos. Plazmos srautuose gaminami nitridai, karbidai, oksidai. Pavyzdžiui, vandenilio plazma gali būti ne tik darbo agentas, bet ir reagentas. Aukšto dažnio plazmos sraute gaunamos labai švarios ultradispersinės dalelės, kurios plačiai naudojamos radioelektronikoje, chemijos pramonėje, automobilių pramonėje. Plazmos sraute gaunamos katalizinės, apsauginės dangos, grūdinami įrenginių paviršiai, atliekamas metalų paviršių azotinimas, perdirbamos įvairios medžiagos.



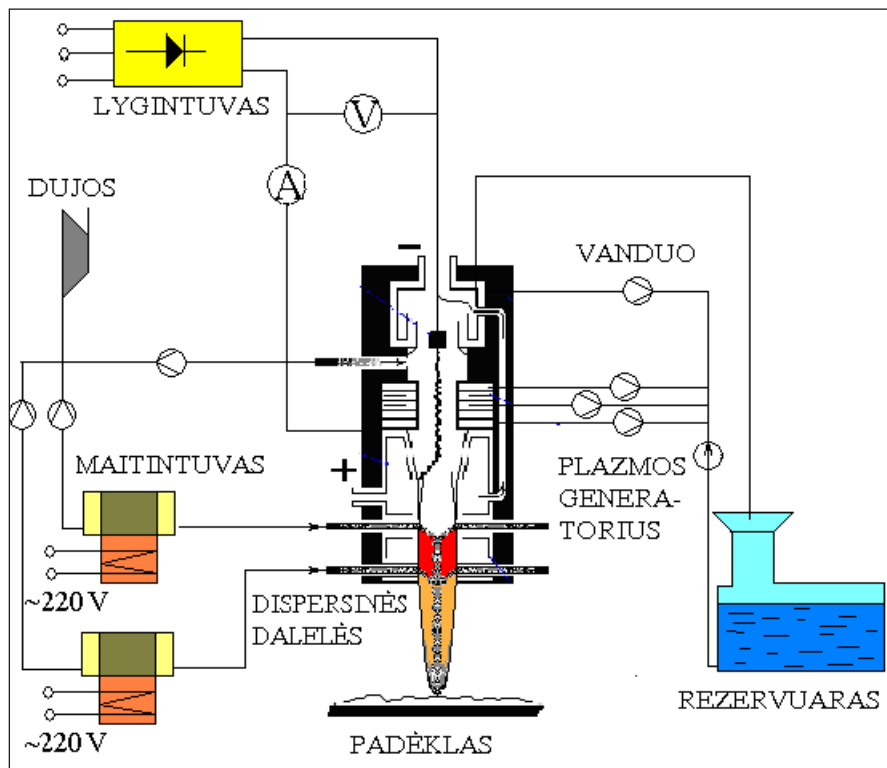
6 pav. Ceolitų lydalo ir granuliu judėjimas viršgarsiniame oro plazmos sraute

### Dujų dinaminė dangų sintezės sistema su plazmos generatoriumi

Be minėtų eksperimentinio stendo sistemų, dangų sintezės įrenginį (7 pav.) sudaro dispersinių dalelių maitinimo ir dozavimo sistema, dalelių ir jas nešančio oro tiekimo vamzdynų bei substrato judesio manipuliavimo įrenginiai. Maitinimo sistema susideda iš dviejų elektromagnetinių-vibracinių maitintuvų, kurie maitinami dviejų dažnių kintama elektros srove. Dispersinės dalelės tiekiamos tam tikro skersmens vamzdeliais, jas nešančio oro srautas reguliuojamas pastovaus slėgio reduktoriumi arba adatiniu vožtuvu.

Plačiausiai naudojami plazmotronai su dujų dinamine lanko stabilizacija. Lankas yra stabilizuojamas tangentiškai į reakcinę kamerą įpučiamomis dujomis. Iš sukurinės kameros ištekėję dujos patenka į tarpelektrodinę terpę, apgaubia lanką ir tempia jį dujų ištekėjimo link. Lanko pagrindinė dalis stabilizuojama elektrodo centre dėl slėgio gradiento sukuryje, o dalis lanko užtrumpinama į elektrodą.

Pagal tyrimus [17, 18] ir nustatytas esamų laboratorijoje lygintuvų bei plazmos generatorių charakteristikas (srovės stiprio, įtampos, dujų srauto ir geometrinių matmenų tarpusavio



7 pav. Dangų sintezės sistemos schema

priklausomumus), dangų sintezei pasirinkti linijiniai nuolatinės srovės fiksuotu lanko ilgiu plazmotronai. Pasirenkant taip pat atsižvelgta į praktikoje naudojamų plazmotronų darbo ypatumus, ilgaamžiškumą, kaitinamų dujų parametrų stabilumą. Šiems PG maitinti reikia nedidelės (100–300 A) srovės ir aukštos (200–500 V) įtampos. Degant lankui, elektrodų erozija intensyvėja didėjant srovei. Lankas tokio tipo PG degimo kameroje stabilizuojamas tangentiškai įpučiamomis dujomis, o jo ilgis fiksuojamas formuojant anodo srityje statų laiptą.

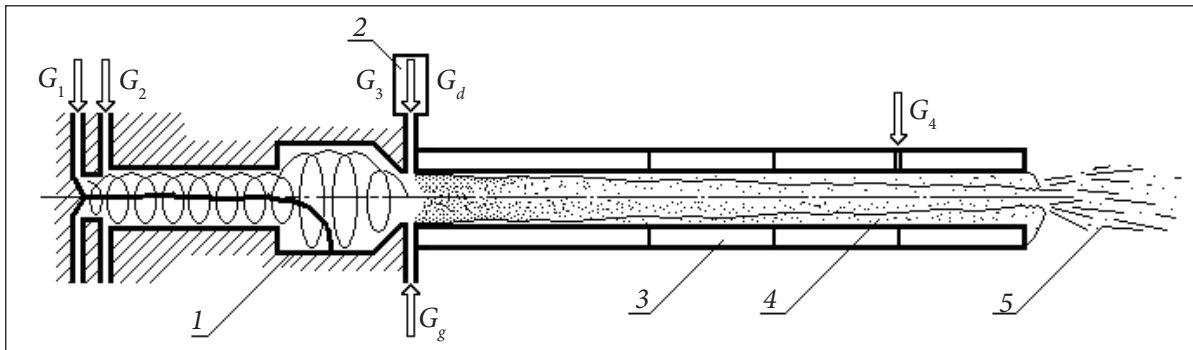
#### Aukštatemperatūrio keraminio plaušo sudarymas

Naudojama mineraliniam plaušui gaminti tradicinė technologija ir įrenginiai reikalauja nepertraukiamo veikimo proceso, sudėtingų ir brangių lydymo krosnių bei izoliacinių medžiagų. Lydant žaliavą lydymo krosnyse, po to lydalą plaušinant mechaniniais metodais, gaunamas plaušas, kurio siūlelių skersmuo viršija 10  $\mu\text{m}$ . To nepakanka naujuose šiuolaikiniuose preciziniuose šilumos išnaudojimo įrenginiuose ir technologijose. Tradiciniais metodais gaminamo plaušo kokybę ir sudėtį taip pat riboja žaliavos lydymosi temperatūra: šis metodas neleidžia gaminti aukštos tem-

peratūros termoizoliacinio plaušo, kuris vis plačiau naudojamas įvairiose srityse.

Vienas tokių būdų aukštos kokybės aukštatemperatūriam plaušui gauti yra plazminė technologija (8 pav.) [19, 20]. Kad ir sąlygiškai reikalauja daug elektros energijos, ši technologija leidžia sunkiai besilydancias medžiagas termiškai apdoroti per labai trumpą laiką, joms suteikti reikiamas savybes, išlydyti ir gautą lydalą plaušinti arba iš jo suformuoti reikiamo dydžio granules (9 pav.). Šiuo metodu gaunamas labai plonas pluoštas, kurio plaušelių skersmuo yra 0,5–1  $\mu\text{m}$ . Gaminant iš tokio plaušo izoliacines konstrukcijas nereikia papildomų rišamųjų medžiagų, su kuriomis maišomas tradiciniais metodais gautas 10–100  $\mu\text{m}$  skersmens pluoštas.

Kadangi ne visos medžiagos kaitinant vienodai reaguoja, t. y. skirtingai kinta mišinio klampis, todėl labai svarbu parinkti mišinių sudėtį. Si, Mg, Ca, Al ir kt. metalų oksidams bei jų junginiams išlydyti ir lydalui plaušinti pagamintas plazmocheminis reaktorius, kurio vidus padengtas aukštatemperatūre iškloja, jame išlydoma ir homogenizuojama žaliava. Pluoštas gaunamas iš Lietuvoje kasamo dolomito ir kvarcinio smėlio mišinių, panaudojant to paties plazmos srauto kinetinę energiją.



8 pav. Tiesiasrovio plazmocheminio įrenginio principinė schema. 1 – PG, 2 – dispersinių dalelių dozatorius, 3 – plazmocheminio reaktoriaus sekcija, 4 – lydaleto sluoksnis, 5 – pluoštas ir granulės

### PAVOJINGŲ MEDŽIAGŲ IR ATLIEKŲ NEUTRALIZAVIMAS PLAZMOJE

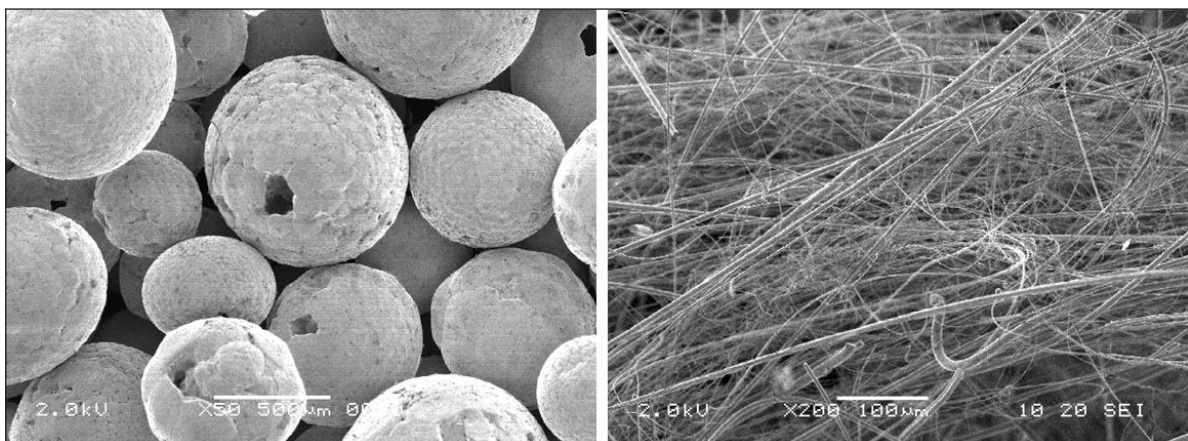
Jei deginant atliekas degimo kameroje temperatūra būna žemesnė nei  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$ , iš chlororganinių atliekų gali susidaryti tokios naujos toksinės medžiagos kaip dioksinai, furanai ir kt., kurios yra daug nuodingesnės už pirminį produktą. Dioksinai – tai grupė junginių, vadinamųjų aromatinių eterių. Didžiausia dioksinų koncentracija aptikta buitinių atliekų ir šiukšlių deginimo fabrikų išmetamosiose dujose. Iš aptiktų 135 dioksinų ir 75 furanų rūšių, 17 yra labai nuodingi. Jų leistina norma tik  $0,1\ \text{ng}/\text{m}^3$ .

Plazminė toksinių medžiagų nukenksminimo technologija leidžia sukurti nedidelių gabaritų mobilių įrenginių, kuriuo galima neutralizuoti pavojingas visų rūšių medžiagas. Tokios plazminio įrenginio savybės kaip labai aukšta temperatūra, neilgas reakcijos laikas, galimybė kaitinti įvairias dujas,

99,99 % toksinių medžiagų neutralizavimas, nepriklausymas nuo kuro šaltinių (naudojant autonominį elektros generatorių) leidžia jį naudoti tiesiog toksinių medžiagų sandėliavimo vietose.

Norint visiškai suskaidyti toksines medžiagas reikia temperatūrą pakelti daugiau kaip iki  $1\ 500\ ^\circ\text{C}$ . Tai galima pasiekti tik plazmocheminiame reaktoriuje, į kurį paduodami įvairių dujų (oro, vandens garų, vandenilio) srautai, įkaitinti plazmotrone iki  $3\ 000\text{--}4\ 000\ \text{K}$ . Kad atliekos būtų tinkamai nukenksmintos, be reikiamos temperatūros, jos turi išbūti reaktoriuje tam tikrą laiką. Padidėjus temperatūrai nuo 600 iki  $1\ 500\ \text{K}$ , proceso greitis padidėja  $10^4$  kartų, o reakcijos laikas sumažėja iki  $10^{-3}$  s. Kad visiškai įvyktų reakcijos, reikalaujama, jog medžiaga išbūtų reaktoriuje 1–2 s esant  $1\ 300\ ^\circ\text{C}$  temperatūrai.

Atliekų ir toksinių medžiagų deginimo įmonių įrenginiai ir eksploatacija reikalauja daug išlaidų ir duoda nedidelį pelną, o procesas nėra visai



9 pav. Plazminio purškimo metodu sudarytos  $\text{Al}_2\text{O}_3$  granulės ir mineralinis pluoštas prie  $2\ 500\ ^\circ\text{C}$

ekologiškai švarus. Be to, tokiai įmonei reikia brangios įrangos su aplinkos stebėsenos aparata ir valdymu. Medžiagų destrukcijai, taikant plazmines technologijas, pasiekiamas gerokai geresnis rezultatas, procesas ekologiškai švarus, tačiau brangesnė jo savikaina.

Vadovaujantis ilgalaike LEI mokslo darbuotojų patirtimi, jų publikacijomis, mokslinės-techninės literatūros šaltinių analize ir žiniomis apie kitų pasaulio šalių pasiekimus taikant plazmines technologijas atliekų perdirbimo srityje, galima daryti šias išvadas:

- nauji, technologiškai pažangūs plazminiai įrenginiai gali neutralizuoti atliekas ir kenksmingas medžiagas neteršdami aplinkos, o deginimo procesas juose gali būti panaudojamas energijai gaminti;

- plazmos aplinkoje, esant 5 000–7 000 K temperatūrai, visos organinės ir neorganinės medžiagos suskyla į atomus, molekules ir radikalus;

- plazminėmis technologijomis perdirbtose visų rūšių atliekose nelieka jokių toksinių medžiagų nei antrinių kenksmingų produktų. Galutiniai perdirbimo produktai yra tamsusis stiklas arba šlakas, metalas ir kurui tinkamos vandenilio prisotintos dujos.

Pavojingoms medžiagoms nukenksminti LEI buvo pagamintas srovinis reaktorius, kurio vidus padengtas cirkonio oksido iškloja, nustatyti jo darbo parametrai. Temperatūra per reaktoriaus ilgį nukrenta nuo 3 500 iki 1 500 K, srauto buvi-

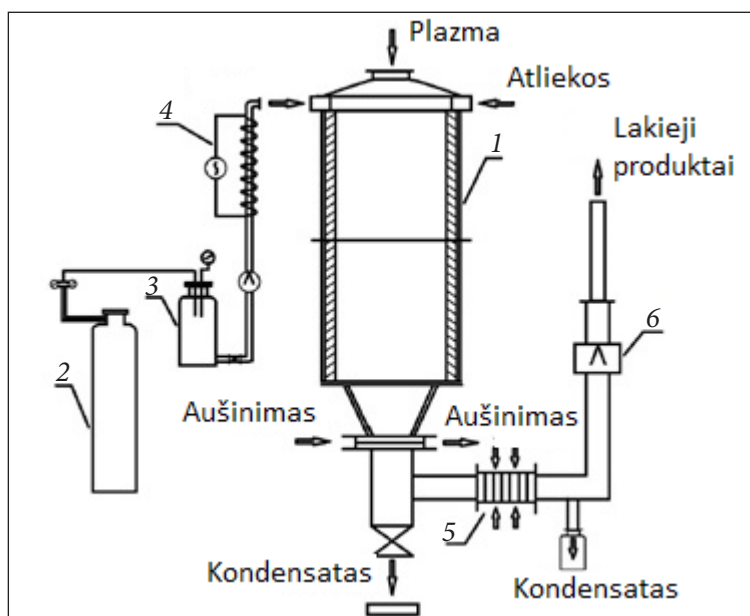
mo laikas reaktoriuje 1,5–2,5 s. Šios sąlygos atitinka toksinių atliekų nukenksminimui keliamus reikalavimus. Šiuo metu šis įrenginys gerokai patobulintas, jam nereikia brangiai kainuojančios aukštatemperatūros išklojos.

Pastaruoju metu PTL darbuotojai sėkmingai dirba kurdami naujas plazmines kenksmingų medžiagų neutralizavimo technologijas [21]. Įvairių atliekų ir kenksmingų medžiagų destrukcijos procesui siūlo taikyti kombinuotą metodą (10 pav.). Jo esmė ta, kad, realizuojant procesą tūriname reaktoriuje, vienu metu arba skirtingais laiko tarpais naudojami du arba keli apdorojimo metodai: plazminis-pirolizinis, liepsninis arba liepsninis-pirolizinis.

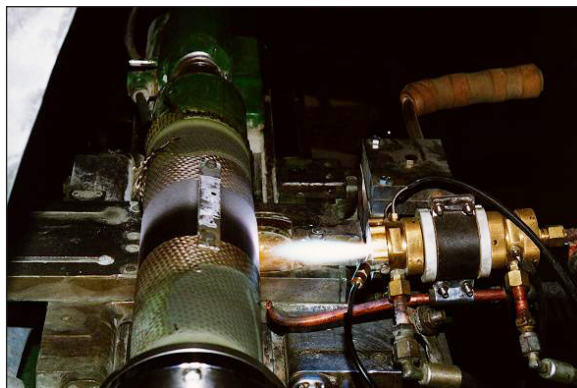
Reikia pažymėti, kad plazminės pavojingų atliekų neutralizavimo technologijos efektyvumas siekia 99,99 %. Laboratorijoje buvo paruoštas plazminio mobilaus pavojingų atliekų neutralizavimo įrenginio projektas ir pasiūlytas LR Aplinkos apsaugos ministerijai, tačiau dėl nepalankaus LR Vyriausybės požiūrio į mokslą iki šiol ši technologija Lietuvoje neįdiegta.

## KATALIZATORIŲ SINTEZĖ PLAZMOS SROVĖJE IR JŲ TYRIMAS

Įrenginyje, pavaizduotame 11 pav., sukūrus nepusiausvirą atmosferos slėgio plazmos srautą su nebalansuotomis atskirų komponentų temperatūromis, įvairios medžiagos aktyvinamos, sin-



10 pav. Plazminio atliekų skaidymo įrenginio schema: 1 – plazmocheminis reaktorius, 2 – nešančios dujos, 3 – skystos atliekos, 4 – šildytuvas, 5 – rėtinės, 6 – dujų srauto matuoklis



11 pav. Plazminis įvairių dangų sudarymo įrenginys darbo metu

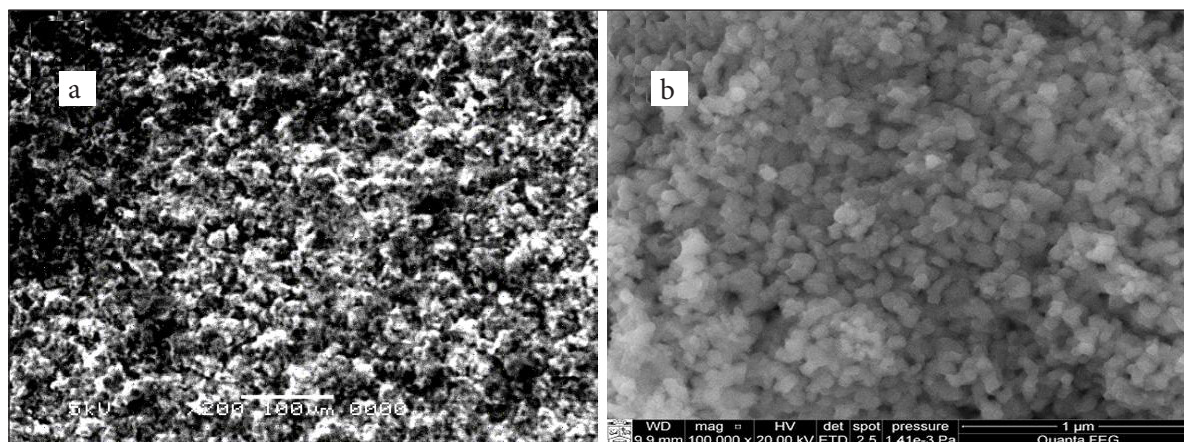
tetinamos ir apdorojamą paviršių pasiekia turėdamos skirtingas energijas. Tai sudaro reikiamas sąlygas kai kurioms cheminėms reakcijoms blokuotis ir plazmos sraute, ir substrato paviršiuje. Taip buvo sintetinės  $\gamma$  fazės  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dangos su labai išvystytu ir aktyviu paviršiumi, o tai labai aktualu sudarant katalizines dangas. Dangos savitasis paviršius buvo dar daugiau padidinamas ją atkaitinus tam tikroje temperatūroje.

Apie 70 % visų pasaulyje vykdomų cheminių reakcijų naudojami katalizatoriai. Šiuolaikiniai kataliziniai reaktoriai gaminami didelių materialinių ir laiko sąnaudų reikalaujančiu cheminiu būdu, nusodinant platinos grupės metalus, todėl yra brangūs, jų keraminiai substratai nepatvarūs, o substratų korozija dėl prasto šilumos laidumo dažnai išsilydo, ir katalizinis reaktorius (KR) užsikemša. Pastaruoju metu laipsniškai diegiamos pažangesnės ir efektyvesnės katalizinės sistemos. Naujojoje katalizinių neutralizatorių kartoje vietoj keramikos naudoja-

mas metalinis substratas, o tauriuosius metalus mažiau keičia pigesni metalų oksidai, ceolitai ir kitos medžiagos, kurios sėkmingai gali būti naudojamos kaip efektyvūs katalizatoriai.

Pagrindinė danga skirta CO oksiduoti, sudaryta plazma transportuojant ant metalinio substrato  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , CuO ir  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  dalelių mišinį. Į  $\text{Al}(\text{OH})_3$  įmaišius metalų (Cu, Cr) oksidų dispersinių dalelių, plazmine technologija buvo gautos katalizinės dangos, kurios gali būti naudojamos katalizatoriuose ir pakeisti šiuo metu naudojamus brangius tauriuosius (platinos grupės) metalus. Tokių dangų sintezė realizuojama parenkant specialią plazmos generatoriaus konstrukciją, dalelių maišymo, džiovavimo sistemą, jų įpūtimo į plazmos srautą vietą ir, be abejo, parenkant reikiamus PG parametrus. Ištyrus sudarytų dangų (12 pav.) savybes [22, 23], pagamintas KR, kurio paviršius ( $0,26 \text{ m}^2$ ) parinktas atsižvelgus į suprojektotą dangų katalizinių savybių tyrimo standą bei vidaus degimo varikliuose naudojamų katalizatorių paviršius ir variklių galią.

Iš dangų pagamintuose KR masės ir šilumos pernašos procesai tirti naujai sukurta katalizinių dangų savybių tyrimo įrenginyje. Propano-butano dujų degimo ore produktams susimaišius su oksidatoriumi (oru), gaunamos išmetamosios dujos, turinčios vidaus degimo varikliams būdingas CO koncentracijas, ir pasiekiami katalizinei teršalo oksidacijai vyksti reikiama temperatūra. Darbui atlikti sukurta dujų dinaminė ir šiluminių charakteristikų tyrimo pasienio sluoksnio zonoje metodika, sukomplektuota įranga ir aparatura srauto struktūrai tirti. Nustatyti reaguojančių



12 pav. Tribologinė danga, nusodinta ant plieninio substrato, tiekiant dispersines daleles: a) į reaktorių, b) į reakcinę lanko zoną

dujų greičių, temperatūros, medžiagų koncentracijos, pasiskirstymas prie katalizatoriaus sienelės, srauto ir sienelės šilumos-masės mainų koeficientai. Pasiūlytas metodas KR aktyvumui įvertinti ir šilumos srautui jame nustatyti.

### ANGLIES DARINIŲ DANGOS

Konstrucinių medžiagų paviršinių sluoksnių modifikavimas technologijomis, formuojant įvairios paskirties dangas, plačiai taikomas paviršiaus inžinerijoje. Viena iš plazminių technologijų pritaikymo galimybių – tai plazminių polimerų sintezė. Plazminiai polimerai – plazminiu būdu nusodintos plonos plėvelės turi daugybę pritaikymo sričių: mikroelektronika, medicina, biotechnologijos, puslaidininkų gamyba ir kt. Jų struktūros dar nėra pakankamai gerai iširtos. Žema kaina ir geros mechaninės savybės, pavyzdžiui, atsparumas korozijai, stiprumas, nedidelė savitoji masė, mažas drėkinimo kampas leidžia konkuruoti su šiuolaikinėmis medžiagomis ir lydiniais.

LEI atlikti tyrimai ir nustatyta technologinių procesų (galios, dujų kiekio) įtaka ištekancio plazmos srauto temperatūrai. Iširta argono-acetileno ir argono-vandenilio-acetileno plazmos sudėtis, vyraujančių radikalų bei dalelių tipai ir jų kitimo dėsningumai. Suformuotos anglies struktūros dangos iš argono-acetileno ir argono-vandenilio-acetileno dujų plazmos (13 pav.). Nustatyta acetileno dujų srauto ir atstumo (temperatūros) įtaka formuojamų anglies dangų ryšių tipui, optinėms savybėms bei savitajam paviršiaus plotui. Įvertinta vandenilio dujų įtaka gautų dangų morfologijai,

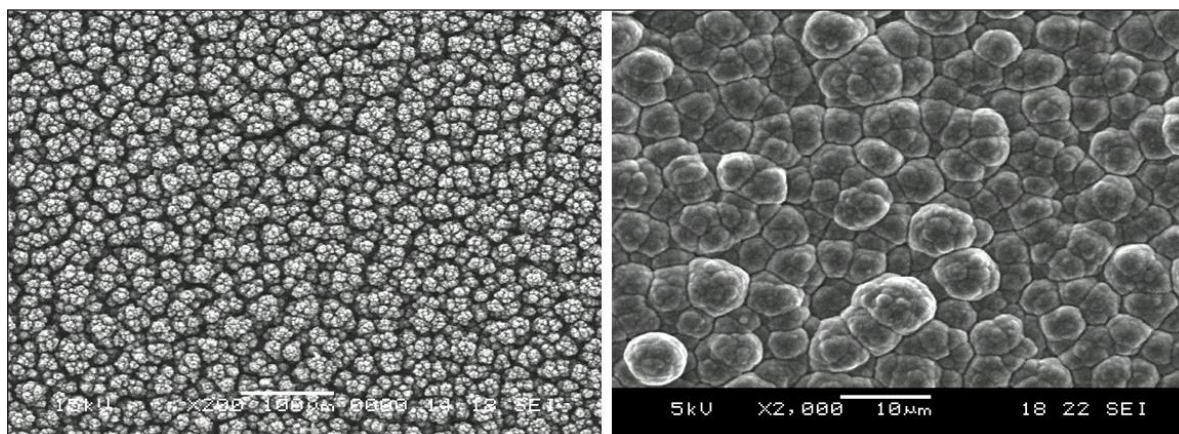
struktūrai. Atlikta grafito-tipo anglies dangų apšvita nanosekundinės ir pikosekundinės trukmės impulsais. Nustatyta lazerinės apšvitos proceso parametrų (impulsų skaičiaus, impulsų energijos, bangos ilgio) įtaka grafito-tipo anglies dangų elementinei sudėčiai, ryšių tipui, įvertintos optinės dangų savybės [24].

Be to, tyrimai atliekami naudojant grafito ir medžio anglies dispersines daleles, taip pat propano-butano, acetileno ir vandenilio dujų mišinius. Naudojant SEM, XRD, IR ir Ramano spektroskopijos metodus, nustatyta dangų paviršių struktūra, jų dalelių dydis ir forma, sudėtis ir jos priklausomumas nuo plazmą sudarančių ir transportuojančių dujų sudėties, įvedimo į plazmotroną vietos ir būdo. Pastebėta, kad visų dangų IR laidžio ir atspindžio spektruose esama  $\text{CH}_x$ , OH, CO,  $\text{CO}_2$  ir C=C grupėms būdingų ryšių.

### Vandens garo plazminė technologija

**Angliavandenilinių dujų skaidymas vandens garo plazmos sraute.** Vandens garo plazmoje vyksta ypač greiti cheminiai procesai, kai susidaro reaktyvieji elementai H, O ir OH. Dėl šios srauto savybės į vandens garo plazmą įvedami angliavandeniliai suskaidomi labai efektyviai. Ši technologija gali būti pritaikyta atliekoms ir aplinkai pavojingoms medžiagoms skaidyti arba vykstant kuro konversijai jį paversti į sintetines dujas ar vandeniliui gaminti ( $\text{H}_2$  riformingas).

LEI atlikti organinių medžiagų skaidymo bandymai [25, 26]. Konversijai vykdyti pasirinktos angliavandenilius turinčios dujos ir įvestos į plazmocheminį reaktorių. Kaip pradinis mėginys



13 pav. Anglies dangos, nusodintos atmosferinio slėgio  $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2 = 100:1$  dujų plazmoje a)  $d = 0,005$  m, b)  $d = 0,01$  m



skaidymui buvo pasirinktos propano dujos ( $C_3H_8$ ), kadangi jų sudėtyje yra aktyvios anglies bei vandenilio, o jas skaidant vandens garo aplinkoje išvengiama ir į aplinką neišmetama kenksmingų medžiagų. Propano konversijos vandens garo plazmos aplinkoje yra endoterminė reakcija ( $498 \text{ kJ mol}^{-1}$ ):



Ekspertimentų metu įtekanti į PChR vidutinė plazmos temperatūra siekė apie  $2\,800 \text{ K}$ . Ji nežymiai kinta keičiant vandens garo srautą, kai srovės stipris pastovus (apie  $200 \text{ A}$ ).

Vandens garas jonizuojamas degančio elektros lanko dėka plazmos generatoriaus išlydžio kameroje. Į aplinką išteka aukštos temperatūros plazmos srovė, kurią sudaro atomai ( $H$ ,  $O$ ), molekulės ( $H_2$ ,  $O_2$ ), radikalai ( $OH$ ) ir dalis nedisocijavusio vandens garo. Aukšta temperatūra ir šių radikalų buvimas leidžia greičiau ir efektyviau suskaidyti įvairios būsenos organines atliekas, nei tai būtų atlikta su tradiciniais konversijos metodais. Pagrindiniai po reakcijos susidarę produktai yra sintetinės dujos, inertinis šlakas ir dalis kondensato.

Ekspertimentiniai tyrimai skaidant dujinės kilmės organines medžiagas vandens garo aplinkoje buvo atlikti keičiant eksperimento parametrus platesniame intervale nei naudojant skystas ar kietas organines medžiagas. Naudojant propano dujas buvo galima lengviau keisti paduodamų

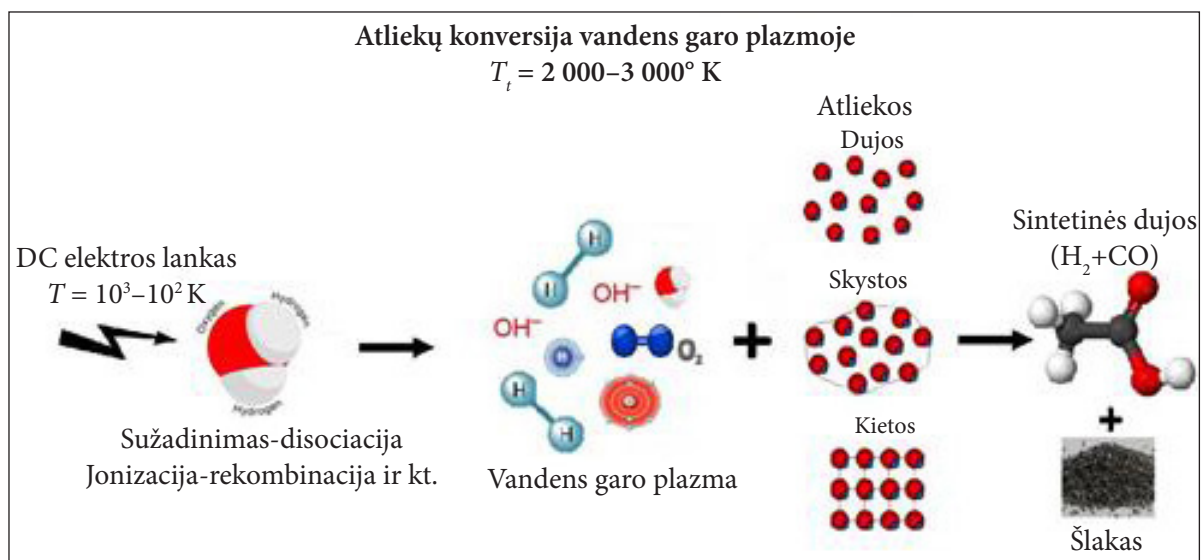
dujų masinį srautą, nesustabdžius proceso. Naudojant skystas medžiagas dozavimas ir jo kontrolė buvo žymiai sudėtingesnė, nes, norint pakeisti skystų organinių medžiagų srautą, reikėjo sustabdyti visą sistemą, pakeičiant žaliavos tiekimo kiekio reguliavimą, vėliau ją paleisti iš naujo, o tai reikalauja didelių resursų.

**Realizuojant vandens garo plazminę technologiją pasiekti šie rezultatai:** suprojektuotas ir pagamintas linijinis nuolatinės srovės vandens garo plazmos generatorius su laiptuotu anodu. Plazmotronas išbandytas prie įvairių režimų, tiekiant orą bei perkaitintą vandens garą.

Nustatytos vandens garo plazmos generatoriaus šiluminės ir elektrinės charakteristikos. Paaikškėjo, kad ištekancio iš plazmotrono srauto tekėjimas yra turbulentinis. Šilumos atidavimas vandens garo plazmotrone tarp elektros lanko, plazmą sudarančių dujų ir elektrodų sienelių dažniausiai vyksta konvekcijos būdu.

Nustatyti plazmotrone kaitinamų dujų plazmos srauto parametrai: kaitinamo vandens garo srautas  $2,63\text{--}4,48 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$ , plazmos srauto vidutinė temperatūra  $2\,400\text{--}3\,300 \text{ K}$ , vidutinis srauto greitis  $210\text{--}600 \text{ m/s}$ , naudingumo koeficientas  $0,7\text{--}0,78$ , Reinoldso kriterijus  $2\,750\text{--}6\,000$ .

Atlikus vandens garo plazmos srauto diagnostiką optinės emisijos spektrometru, rezultatai patvirtino, kad vandens garas plazmotrono ištekėjime yra disocijavęs ir jį sudaro  $OH$ ,  $H_2$ ,  $O(I)$ ,  $Ar(I)$  elementai. Aptikti atominio vandenilio pikai



H $\alpha$  (656,2 nm), H $\beta$  (486,1 nm) ir H $\gamma$  (434,1 nm) rodo, kad vandenilio atomai vandens garų plazmoje yra sužadintos būsenos ir chemiškai labai aktyvūs. Metalų dalelių Cu ir Fe spektriniai pikai yra labai intensyvūs, jie parodo plazmotrono elektrodų eroziją, kurią reikia stengtis sumažinti.

Skaitiniais metodais išanalizavus aktyviųjų radikalų susidarymą vandens garų plazmoje nustatyta, kad, didėjant temperatūrai iki 4 100 K, vyksta vandens garų disociacija. Vandens garų koncentracija sumažėja iki 1 %, o jį sudarančių atominio H ir O elementų koncentracija nuolat auga.

Atlikti dujinių, skystų ir kietų medžiagų konversijos bandymai parodė, kad vandens garų plazmos aplinkoje galima gauti sintetines, H<sub>2</sub>+CO dujas. Jų koncentracija bendrame reakcijos produktų masės balanse buvo per 55 %.

Atlikus įvairių organinių atliekų konversijos tyrimus nustatyta, kad didžiausias efektyvumas (67 % H<sub>2</sub>) pasiekiamas skaidant dujines atliekas. Skaidant skystas bei kietas atliekas gauta 34–27 % H<sub>2</sub>, kadangi teko suteikti papildomos energijos jiems dujinti.

## KITOS PLAZMINĖS TECHNOLOGIJOS

Skyriuje „Plazminės technologijos“ trumpai aprašyta tik keletas PTL sukurtų ir šiuo metu plačiausiai tyrinėjamų plazminių technologijų. Reikia paminėti ir nemažai kitų sukurtų technologijų, pavyzdžiui, plazminis betono pjaustymas, ketaus lydymas plazminėje krosnyje, azoto oksidų fiksacija ir silpnos azoto rūgšties gamyba nepusiausvirojoje plazmoje, nerūdijančio plieno ir legruotų lydinių azotinimas, borinimas bei karbidizavimas, kietųjų ir deimanto tipo dangų sintezė mikrokanaaluose, mikro- ir nanodalelių sintezė plazmos aplinkoje ir kt. Taip gali būti sudaromos kietosios keraminės dangos, naudojamos konstrukcinių medžiagų paviršinių sluoksnių eksploatacinėms savybėms mechanikoje, chemijoje, energetikoje, medicinoje pagerinti. Jos padidina atsparumą korozijai nuo šimto iki tūkstančio kartų, gerokai sumažina trinties koeficientą ir padidina atsparumą mechaniniam dėvėjimuisi.

Naudojant plazminę technologiją mažėja brangių konstrukcinių medžiagų paklausa, nes įvairaus storio dangomis padengtos pigios konstrukcinės medžiagos pakeičia didelius kiekius su naudojamų brangių medžiagų.

Visos paminėtos plazminės technologijos yra paruoštos pritaikymui ir eksploatavimui, todėl, esant poreikiui, gali būti greitai atnaujinamos ir realizuojamos.

## IŠVADOS

Lietuvos energetikos instituto Plazminių technologijų laboratorijos mokslininkai beveik 50 metų dirba įvairiose plazminių procesų tyrimo, plazminių technologijų kūrimo ir pritaikymo srityse. Tyrimai atliekami naudojant atmosferinio ir redukuoto slėgio elektros lanko plazmos generatorius, srovinius bei tūrinius plazmocheminius reaktorius, kuriuose teka iki 7 000 K įkaitintos, plazmą sudarančios, įvairios dujos ir jų mišiniai.

Vadovaujantis pasauline praktika, patirtimi ir autentiškais skaitiniais bei eksperimentiniais tyrimais, suprojektuoti, pagaminti ir išbandyti iki 3 000 kW galios plazminiai įrenginiai, iširtos jų elektrinės, šiluminės ir dinaminės charakteristikos. Nustatyta, kad plazminiai įrenginiai tiekia nepusirausvirąjį plazmos srautą, kurio tekėjimo charakteristikos gali būti griežtai reguliuojamos ir valdomos keičiant plazmotrono parametrus, įtekančių plazmą sudarančių ir papildomų dujų srautus bei įpūtimo vietų dislokaciją. Nustatyta, kad laboratorijoje sukurti plazminiai įrenginiai atitinka keliamus plazmos šaltinių reikalavimus ir yra pripažinti tinkamais realizuojant plazminius procesus atmosferinio slėgio aplinkoje.

Nustatyta, kad dėl ypatingų plazmos savybių ji gali būti naudojama kaip aktyvuojanti aplinka įvairių medžiagų ir dangų sintezės procese, o jos kinetinė energija – kaip dangos, medžiagos, lydalo ar pluošto apdorojimo įrankis.

Plazmoje sudarant pluoštus ir dangas lydalo sferų susidarymas iš dalelių vyksta kaupiantis ant sienelių aplydytoms dalelėms; visiškai išlydytas arba išgaravusias daleles plazmos srautas išneša iš reaktoriaus ir, vykstant plazminės purškimo pirulizės procesui, paverčia į mikro- ir nanodaleles, klasterius bei granules. Sferų, apsilydžiusių dalelių bei klasterių sancaupos susidaro betarpiškai pluoštinimo mazgo ištekėjimo zonoje dėl žemos aplinkos temperatūros ir nulinio greičio.

Nustatyta, kad esant ypatingoms sąlygoms (nepakankamai geras atliekų rūšiavimas, dideli chloro kiekiai, policikliniai junginiai) pavojingoms atliekoms nukenkmsinti būtina naudoti

terminę oro, azoto, vandens garo, vandenilio ir šių dujų mišinių plazmą. Atsižvelgiant į pavojingų atliekų šalinimo procesui keliamus reikalavimus ir sąlygas (reakcijos temperatūra 1 800 K ir trukmė 1–2 s), sukurtas dujų dinaminis įrenginys su plazmos generatoriumi bei sroviniu plazmocheminiu reaktoriumi, tinkamas visų rūšių atliekoms neutralizuoti.

Realizavus organinių medžiagų konversijos procesą vandens garo plazmoje ir ištyrus pagrindinių produktų sintezės dėsningumus nustatyta, kad pagrindiniai reakcijos produktai yra  $H_2$  ir CO dujos. Jų išėiga visada priklauso nuo plazminės aplinkos parametrų, įnešamos žaliavos sudėties, plazmos generatoriaus darbo režimų, vandens garo plazmos disociacijos ir jonizacijos laipsnio, taip pat nuo plazmos būsenos (elektronų bei sunkųjų dalelių temperatūros).

Atmosferinio slėgio pastovios srovės elektros lanko plazma yra tinkama priemonė anglies darinų dangų sintezės procesuose. Pastebėta, kad visų dangų IR laidžio ir atspindžio spektruose esama CH<sub>x</sub>, OH, CO, CO<sub>2</sub> ir C=C grupėms būdingų ryšių.

#### Pagrindiniai žymėjimai:

$d_0$  – ištekėjimo kameros skersmuo, m;  $d_2$  – reakcinės kameros skersmuo, m;  $E$  – elektros lauko stipris, V/m;  $G$  – bendras kaitinamo oro srautas, kg/s;  $G_1$  – kaitinamo oro srautas prie tarpinio žiedo (trijų sekcijų plazmotronui) arba prie anodo (dviejų sekcijų plazmotronui), kg/s;  $h$  – entalpija, J/kg;  $I$  – lanko srovės stipris, A;  $j$  – elektros srovės tankis, A/m<sup>2</sup>;  $l$  – iškrovos kanalo ilgis, m;  $P$  – plazmotrono galia, kW;  $Pr$  – Prandtl'o kriterijus;  $p$  – slėgis, Pa;  $Re$  – Reinoldso kriterijus;  $R_d$  – dujų pastovioji, J/kmolK;  $St$  – Stanton'o kriterijus;  $t$  – laikas, s;  $U$  – lanko įtampa, V;  $U_0$  – įtampos kitimo katode koeficientas, priklausantis nuo jo medžiagos;  $U_1$  – potencialų skirtumas prie elektrodų, V;  $\vec{v}$  – greičio vektorius;  $Q$  – šilumos nuostoliai, W;  $Q_{ek}$  – ekvivalentinis šilumos srautas, W;  $\lambda$  – šilumos laidumo koeficientas, W/mK;  $\mu$  – dinaminis klampis, Ns/m<sup>2</sup>;  $\mu_e$  – magnetinė aplinkos skvarba, H/m;  $\sigma$  – specifinė elektrinė varža, S/m;  $\sigma_e$  – elektrinis laidumas, 1/Ωm;  $\rho$  – dujų tankis, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_e$  – elektrinių krūvių tankis, C/m<sup>3</sup>;  $\varphi$  – darbas, atliktas išnešant elektronus iš elektrodų paviršiaus;  $\Phi$  – disociacijos funkcija.

**Indeksai:** a – anodas; k – katodas; pl – plazmotronas; p.s – priekatodinė sekcija; r – spinduliavimas; t.s – tarpinė sekcija.

Gauta 2016 06 30

Priimta 2016 09 09

#### Literatūra

1. Chen F. F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016. 490 p.
2. Inan U. S., Gokowski M. *Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists*. Cambridge University Press, 2011.
3. Plasmatechnik: Prozessvielfalt und Nachhaltigkeit. Bundesministerium für Bildung, Bonn, 2011. 40 S.
4. Dussoubs B., Vardelle A., Mariaux G., Fauchais P., Themelis N. J. Modeling of plasma spraying of two powders. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2001. Vol. 10. P. 105–110.
5. Park J. H., Heberlein J., Pfender E., Lan Y. C., Rund J., Wang H. P. Heat and mass transfer under plasma conditions. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1999. Vol. 891. P. 417–424.
6. Wan Y. P., Fincke J. R., Sampath S., Prasad V., Herman H. Modelling and experimental observation of evaporation from oxidizing molybdenum particles entrained in a thermal plasma jet. *Heat Mass Transfer*. 2002. Vol. 45. P. 1007–1015.
7. FLUENT 6.1 UDF Manual. Fluent Inc. 2003. 462 p.
8. FLUENT 6.0 Dynamic Mesh Manual. Fluent Inc., 2001. 99 p.
9. Fauchais P., Vardelle M. Plasma spraying: present and future. *Pure and Applied Chemistry*. 1994. Vol. 66. No. 6. P. 1247–1258.
10. Pfender E., Chang C. H. Plasma spray jets and plasma-particulate interaction: modeling and experiments. *Proceedings of the 15th International Spray Conference, 25–29 May, 1998, Nice, France*. P. 315.
11. Delluc G., Mariaux G., Vardelle A., Fauchais P., Pateyron B. A numerical tool for plasma spraying. Part I: Modelling of plasma jet and particle behaviour. *The 16th International Symposium on*

- Plasma Chemistry, June 22–27, 2003, Taormina, Italy.* 6 p.
12. Delluc G., Perrin L., Ageorges H., Fauchais P., Pateyron B. A numerical tool for plasma spraying. Part II: Model of statistic distribution of alumina multi particle powder. *The 16th International Symposium on Plasma Chemistry, June 22–27, 2003, Taormina, Italy.* 6 p.
  13. T & TWINner, <http://ttwinner.free.fr/index.html>.
  14. Valinčius V., Krušinskaitė V., Valatkevičius P., Valinčiūtė V., Marcinauskas L. Electric and thermal characteristics of the linear, sectional DC plasma generator. *Plasma Sources Science and Technology.* 2004. Vol. 13. P.199–206.
  15. Valinčius V., Grigaitienė V., Valatkevičius P. Design and characterization of the linear atmospheric pressure DC ARC plasma source for flue gas treatment. *International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 21), August 4–9, 2013, Cairns, Australia.* P. 1–4.
  16. Valinčius V., Grigaitienė V., Valatkevičius P. Behaviour of dispersed ceramic particles in DC arc plasma jet during the spray deposition of coatings. *2014 IEEE 41st International Conference on Plasma Sciences (ICOPS) held with 2014 IEEE International Conference on High-Power Particle Beams (BEAMS), 25–29 May, 2014.* P. 1–6.
  17. Milieška M., Kėželis R., Valinčius V., Grigaitienė V. Heat transfer in plasma – chemical reactor for conversion of hard ceramic into fibre. *The 8th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, June 16–20, 2013, Lisbon, Portugal.* P. 1–6.
  18. Valinčius V., Grigonis A., Valatkevičius P., Marcinauskas L., Valinčiūtė V., Buinevičius K. Deposition of hydrocarbon containing coatings by plasma spray pyrolysis. *Plasma Polymers and Related Materials.* 2005. P. 63–67.
  19. Valinčius V., Snapkauskienė V., Kėželis R., Valinčiūtė V., Mečius V. Preparation of insulating refractory materials by plasma spray technology. *High Temperature Material Processes.* 2006. Vol. 10. Iss. 3. P. 365–378.
  20. Valinčius V., Kėželis R., Valatkevičius P., Milieška M. Melting and conversion into fibre dolomite and quartz sand mixtures by means of plasma spraying. *Известия вузов. Физика.* 2007. №.9. C. 441–444.
  21. Kavaliauskas Ž., Valinčius V., Kėželis R., Milieška M. The investigation of neutralization process of gas-phase sewage sludge using thermal plasma method (doi:10.1016/j.elstat.2015.03.003). *Journal of Electrostatics.* 2015. Vol. 75. P. 99–103.
  22. Grigaitienė V., Valinčius V., Snapkauskienė V. Plasma spray deposition and characterization of catalytic coatings for environmental application. *Proceedings of the 4th International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning and Economics (CEMEPE) and SEC-OTOX Conference, June 24–28, 2013, Mykonos Island, Greece.* Greece: Grafima Publications, 2013. P. 584–588.
  23. Valinčius V., Grigaitienė V., Valatkevičius P., Milieška M. Synthesis of catalytic fibers employing atmospheric pressure arc plasma technology. *The 19th IEEE Pulsed Power Conference (PPC), June 16–21, 2013, San Francisco, USA.* P. 1–6.
  24. Marcinauskas L., Valinčius V., Grigonis A. Deposition and structure characterization of carbon films prepared at atmospheric pressure by plasma jet. *Surface & Coatings Technology.* 2011. Vol. 205. Suppl. 2. P. 571–574.
  25. Tamošiūnas A., Valatkevičius P., Valinčius V., Grigaitienė V. Production of synthesis gas from propane using thermal water vapor plasma. *International Journal of Hydrogen Energy.* 2014. Vol. 39. P. 2078–2086.
  26. Tamošiūnas A., Valatkevičius P., Valinčius V., Levinskas R. Biomass conversion to hydrogen-rich synthesis fuels using water steam plasma (doi:10.1016/j.crci.2015.12.002). *Comptes Rendus Chimie.* 2016. Vol. 19. P. 433–440.

**Vitas Valinčius, Pranas Valatkevičius,  
Romualdas Kėželis**

**THE RESEARCH ON PLASMA PROCESSES AND  
DEVELOPMENT OF PLASMA TECHNOLOGIES  
IN THE LITHUANIAN ENERGY INSTITUTE**

*Summary*

A thorough study of the dynamical DC electric arc theory and solution of problems of plasma flow diagnostics allowed designing powerful plasma, namely long-term arc generators. The intensity of convection heat transfer in the plasma generator is directly proportional to the strength of the electric field. Heat transfer is most intense in the anode part of the plasma generator due to the arc spot and convection.

Some examples of investigated prevailing processes in low-temperature plasma and some new technologies in the Lithuanian Energy Institute, such as melting of ceramic substances by electric arc plasma at the atmospheric pressure; production of mineral fiber from glass waste, corundum, dolomite, silicon oxide and their mixtures employed as heat saving materials; destruction of hazardous substanc-

es in the plasma jet reactor; synthesis of new catalytic coatings with active elements of metal oxides which appear to be cheaper than conventional catalytic coatings made of noble metals; plasma nitriding of austenitic stainless steels and alloys employing atmospheric pressure nitrogen-hydrogen plasma; modification of material surface layer by deposition of a-C:H films from the mixture of plasma of various gases; possibilities of novel developed water vapour plasma technology, and some others are discussed in the article.

The use of the non-equilibrium plasma technology also demonstrates the ability to process a wide range of materials and gases to obtain new products with specific structure and characteristics. Water vapour plasma technology allows the synthesis of very useful chemical substances, the performance of fuel conversion, deposition of micro- and nanostructured particles, coatings and composites with controlled characteristics for specific applications.

**Keywords:** plasma torch, plasma technology, plasma treatment, plasma modification of materials, plasma diagnostics