

Plazminis įvairių pavojingų atliekų nukenksminimas

Vitas Valinčius,

Pranas Valatkevičius,

Romualdas Kėželis

*Lietuvos energetikos institutas,
Plazminių technologijų sektorius,
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas,
el. paštas vitas@mail.lei.lt*

Darbe pateikiama trumpa efektyviausių terminio pavojingų atliekų nukenksminimo metodų apžvalga ir įvertinimas. Atsižvelgiant į dabartinę padėtį pasaulinėje praktikoje bei pavojingų atliekų neutralizavimui keliamus tarptautinius reikalavimus, suprojektuotas ir pagamintas plazmocheminis reaktorius, kurio ilgis 1,5 m, vidinis skersmuo 0,2 m. Reaktoriaus vidinis paviršius padengtas Al_2O_3 ir ZrO_2 iškloja.

Nustatytos reaktoriaus šiluminės ir režiminės charakteristikos. Skaidomų medžiagų buvimo aukštatemperatūroje zonoje trukmė 1–2 s. Atliekant reaktoriaus eksperimentinį tyrimą, panaudoti atmosferos slėgio oro ir vandens garo plazmos generatoriai (plazmotronai), kurių tiekiamo plazmos srauto temperatūra reaktoriuje kito nuo 1500 iki 3500 K. Orą kaitinančio plazmotrono parametrai: galia iki 50 kW, srovės stipris 140–220 A, įtampos kritimas 200–360 V, plazmą sudarančių dujų srautas $(3,5–10) \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Vandens garo plazmotrono parametrai: galia 6–20 kW, srovės stipris 30–180 A, įtampos kritimas – 90–240 V, plazmą sudarančio garo srautas $0,6–1,7 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Nustatytos plazmos generatorių voltamperinės ir šiluminės charakteristikos.

Darbe pateikti skystųjų ir kietųjų organinių medžiagų deginimo plazmocheminiame reaktoriuje eksperimentiniai rezultatai.

Raktažodžiai: plazmos generatorius, plazmocheminis reaktorius, pavojingos atliekos, atliekų plazminis skaidymas, vandens garo plazma

1. ĮVADAS

Racionalus gamtos išteklių naudojimas ir aplinkos apsauga nuo taršos – vienas svarbiausių šiuolaikinių uždavinių. Pasaulyje, taip pat ir Lietuvoje, sukaupti milžiniški kiekiai įvairių atliekų ir kenksmingųjų medžiagų: tai netinkami naudoti pesticidai, pasenę medikamentai ir medicininės atliekos, panaudota transformatorinė alyva, senos padangos, įvairūs chemikalai, kenksmingosios pramonės įmonių ir buitinės atliekos ir t. t. Šių medžiagų poveikis kelia didžiulę grėsmę gamtai ir žmonėms. Ryšium su didėjančiais aplinkosaugos reikalavimais, šios problemos užsienio šalyse intensyviai sprendžiamos: kenksmingosios medžiagos rūšiuojamos, perdirbamos, taip pat kuriamos naujos beatliekinės ir mažai atliekų sudarančios technologijos. Tokioms technologijoms kurti reikalingas priemonių kompleksas – tai teisinės bazės sukūrimas ir tobulinimas, naujų valymo, perdirbimo ir nukenksminimo metodų diegimas.

Lietuvoje taip pat bandoma diegti naujas, pažangias kenksmingųjų medžiagų neutralizavimo ir visiško sunaikinimo technologijas [1]. Anksčiau į kai kurių dezinfekcijai, paviršių izoliacijai naudojamų medžiagų, tokių kaip DDT, chloro junginiai, asbestas, poveikį visuomenei ir aplinkai nebuvo atsižvelgiama, tuo tarpu dabar jos uždraustos, o jų atliekos naikinamos.

Iš daugybės šiuo metu pasaulyje egzistuojančių toksinių medžiagų nukenksminimo metodų pakankamai plačiai taikomi terminiai. Universaliausias iš jų yra liepsninis metodas (atliekų deginimas) [2]. Ypač pavojingoms atliekoms nukenksminti liepsninis metodas yra vienintelis. Kita vertus, deginant kai kurias toksiškas atliekas, kurių sudėtyje yra chloro organinių junginių, nesilaikant deginimui reikalingo režimo, gali susidaryti naujos toksinės medžiagos, kurios yra daug nuodingesnės už pradines atliekas. Norint visiškai suskaidyti toksiškas medžiagas, reakcijos temperatūrą reikia pakelti iki 1800°C ir išlaikyti jas degimo zonoje 1–2 s [2, 3]. Tokios sąlygos pasiekiamos naudojant plazminę technologiją.

Šio darbo tikslas – apžvelgti problemą ir ištirti plazminės technikos panaudojimo kenksmingosioms medžiagoms neutralizuoti galimybes.

2. ATLIEKŲ NUKENKSMINIMO PROBLEMA IR KELIAMI REIKALAVIMAI

Atliekų tvarkymo ir nukenksminimo metodai yra šie: mechaniniai, sorbciniai, cheminiai, biologiniai, terminiai, kombinuoti [4]. Kadangi darbe nagrinėjamas vienas iš terminių – plazminis metodas, todėl pravartu trumpai panagrinėti terminius atliekų nukenksminimo būdus.

2.1. Terminio atliekų nukenksminimo metodai

Pagrindiniai terminio atliekų nukenksminimo metodai yra šie:

Žematemperatūrė oksidacija. Metodo esmė – sudėtingų ar elementarių organinių junginių oksidavimas oro deguonimi esant 150–350°C temperatūrai ir 2–3 MPa slėgiui [5]. Šiuo metodu valomi nuotekų vandenys. Procesas vyksta dėl didelės ištirpusio deguonies koncentracijos.

Heterogeninės katalizės metodas. Taikomas dujinėms atliekoms nukenksminti, sumažinant kenksmingų komponentų oksidavimo temperatūrą [6]. Katalizatoriais neutralizacijos temperatūrą galima sumažinti iki 250–400°C. Reikia pabrėžti, kad termokatalizinių neutralizatorių metodo taikymo galimybės daug siauresnės negu kitų terminių metodų, nes maksimali darbo temperatūra dažnai būna 800–850°C [2]. Jeigu degių komponentų koncentracija atliekose yra didelė, tai degimo temperatūra būna aukšta ir katalizatorius gali perdegti.

Pirolizė. Tai medžiagų kaitinimas ir skaidymas be oro. Atsižvelgus į temperatūrą galima skirti žemos (450–550°C), vidutinės temperatūros pirolizę (800°C) ir koksavimą (900–1050°C) [2]. Pirolizės metu gaunami kieti, skysti ir dujiniai įvairios sudėties produktai: CO, CO₂, H₂, CH₄, vanduo, anglis, šlakai.

Atliekų dujinimas. Vyksta, kai į degiąsias atliekas pučiamas oras, deguonis, vandens garas ar jų mišiniai. Tokiu būdu atliekos kaitinamos, dalinai deginamos ir dujinamos. Dujų generatorius – tai vertikali šachta, į kurią iš viršaus tiekiamos kietos atliekos, o iš apačios – oras arba deguonis bei vandens garo mišinys. Nuo įpučiamų dujų rūšies ir srauto priklauso gaunamų dujų kalingumas. Atliekų perdirdimas dujinimu skiriasi nuo liepsninio neutralizavimo metodo (deginimo) tuo, kad gaunamos degiosios dujos, kurios gali būti panaudotos kaip energetinis ir technologinis kuras [2, 4], o gauta derva – kaip cheminė žaliava.

Liepsninis metodas, palyginus su kitais, yra pats universaliausias ir efektyviausias. Jis skirstomas į deginimą, liepsninį-oksidacinį ir liepsninį nereaguojantį metodą.

Atliekų deginimas, jų gebėjimas savarankiškai degti – paprasčiausias ir patikimiausias būdas jas apdoroti. Atliekos deginamos 1200–1300°C temperatūroje [1] pučiant orą arba oro ir deguonies mišinį. Liepsninis-oksidacinis metodas taikomas nedegioms medžiagoms neutralizuoti. Į įkaitintus degimo produktus tiekiamos atliekos, kurios įkaista ir įvyksta oksidacija.

Liepsninis nereaguojantis metodas taikomas tuomet, kai reakcinėje kameroje nėra laisvo deguonies.

Atsižvelgus į galutinį rezultatą, liepsninis atliekų nukenksminimo metodas skirstomas dar į tris rūšis. Tai

- liepsninis atliekų likvidavimas, kai naikinant skystas, kietas ir dujines atliekas susidaro pavojingos ir nuodingos medžiagos;

- liepsninis atliekų perdirdimas kai deginant atliekas susidaro viena ar kelios naudingos medžiagos, pvz., kalcinuotoji soda, metalų milteliai;

- liepsninis atliekų regeneravimas, kai vėl gaunamas vienas iš reagentų. Šis būdas yra perspektyviausias, nes plėtojama beatliekinė arba mažai atliekų išskirianti technologija.

2.2. Plazminis atliekų nukenksminimas

Plazminis metodas naudojamas labai pavojingų atliekų nukenksminimui. Jeigu, deginant tokias atliekas, temperatūra būna žemesnė nei 1300–1500°C, iš chloro organinių atliekų gali susidaryti naujos toksinės medžiagos, tokios kaip dioksinai, furanai ir kitos, kurios yra daug nuodingesnės už pirminį produktą [7, 8]. Dioksinai – tai visas paketas labai nuodingų organinių junginių su chloru, vadinamų aromatiniais eteriais. Iš žinomų 75 dioksinų ir 135 furanų izomerų 17 yra ypač nuodingi. Pavojingiausi iš jų yra 2,3,7,8-tetrachlordibenzo-dioksinas ir 2,3,7,8-tetrachlordibenzofuranas. Jų leistina norma yra nustatyta tik 0,1 ng/m³ [7].

Norint visiškai suskaidyti toksines atliekas, temperatūrą reikia pakelti daugiau kaip 1800°C ir atliekas joje išlaikyti 3–4 s [8, 9]. Šios sąlygos įvykdomos plazmocheminiame reaktoriuje. Šiuo metu plazminis metodas taikomas skystoms ir dujinėms atliekoms nukenksminti, jei nėra galimybės nukenksminti liepsniniu metodu. Į reaktorių tiekiami įvairių dujų (oro, vandenilio, vandens garo ir kt.) srautai, įkaitinti plazmotrone iki 3000–4000 K. Atliekų molekulės skaidomos į atomus, radikalus, elektronus ir teigiamus jonus. Plazmai auštant, susidaro paprastos netoksinės medžiagos. Medžiagų nukenksminimo efektyvumas plazmos sraute siekia 99,99%. Taigi metodas labai efektyvus, tačiau brangus, todėl jį rekomenduojama taikyti toksinėms atliekoms nukenksminti, kai nėra galimybių jas deginti. Į tokių atliekų sąrašą įtraukiamos chloro organinius junginius turinčios medžiagos, gyvsidabrio ir fenolio preparatai, silpnai radioaktyvios atliekos.

Chloro organinių atliekų perdirdimo ir nukenksminimo plazminiu metodu procesas nagrinėjamas daugelyje darbų [10–13]. Čia aprašoma dichloretano, butilchlorido, heksachlorano ir įvairių mišinių, susidedančių iš chloro organinių junginių, plazminė pirolizė. Vykstant plazminiams procesams, galima gauti daug naudingų cheminių medžiagų ir junginių. Pvz., keičiant chloro angliavandenilių sudėtį pirolizės dujose, buvo gaunami įvairūs acetileno ir chloro vandenilio kiekiai. Jungiant chloro vandenilį su vandeniu, gaunama 33–34% koncentracijos druskos rūgštis. Perdirdant organinius junginius (polipropilena, polietilena, kaprolaktaną ir kitus) [14] vandens garo plazmoje, gauta 25–35% (tūrio) CO ir 40–55% (tūrio) vandenilio. Jeigu santykis C/O = 1, tai temperatūroje, aukštesnėje nei 1300 K, praktiškai visa žaliava virsta sintetinėmis dujomis (CO+H₂). Šiuo atveju taip pat gauta nedideli metano, acetileno, anglies dvideginio ir vandens garų kiekiai. Taigi panaudojus aukštatemperatūros pirolizės procesą perdirdant organines atliekas, gaunamos vandenilio prisotintos sintetinės dujos, kurias galima naudoti kaip kurą katiluose, šilumokaičiuose ir kuro elementuose.

Skaidant kai kurias toksines medžiagas, pvz., chloro organines atliekas, reikia naudoti vandenilį. Tam tikslui siūloma naudoti vandens garų plazmą, nes aukštesnėje kaip 1000°C temperatūroje vandens garas su organinėmis medžiagomis sudaro sintetines dujas (CO+H₂). Susidaręs vandenilis jungiasi su chloru, ir HCl sėkmingai galima atskirti skruberiuose. Pažymėtina, kad organinių medžiagų terminis skaidymas oro plazmoje – egzoterminis procesas, o skaidymas vandens garų plazmoje – endoterminis. Todėl vandens garų temperatūra yra daug aukštesnė, negu ta, kuriai esant vyksta reakcijos.

2.3. Radioaktyviųjų atliekų neutralizavimas plazmoje

Įvairių gumų, plastmasės ar celiuliozės atliekų, užterštų radioaktyviosiomis atliekomis, utilizavimui galima naudoti specialų plazmocheminį reaktorių [9]. Toks reaktorius susideda iš aušinamojo korpuso, kuriame įmontuotas plazmotronas, įrangos utilizuojamai medžiagai ir balastui tiekti, lydalo ir dujų išleidimo angos. Plazmotronas dirba argono arba argono ir deguonies mišinio aplinkoje. Jo anodas pagamintas iš molibdeno. Jis paprastai yra montuojamas reaktoriaus apačioje (dugne). Uždegus lanką, į reaktorių tiekiamas susmulkintas bazaltas, kuris lydosi ir, susikaupęs reaktoriaus dugne, sudaro lydalo vonią. Lankas toliau dega tarp katodo ir lydalo, kuris pradeda dirbti kaip anodas. Į reaktorių tiekiamos susmulkintos neutralizuojamos atliekos. Bazalto ir utilizuojamų atliekų mišinys išpilamas, ir, jam atvėsus, gaunama sustiklinta masė. Utilizuojamų atliekų su Ce, Co, Cs ir Sr izotopais eksperimentai parodė, kad 96–98% izotopų nusėda lydale, kita dalis – ant reaktoriaus sienelių, vamzdžiuose ir filtruose. Esant plazmotrono galiai 50 kW, reaktoriaus našumas yra 3 kg/h utilizuojamų atliekų. Kaip balasto naudojamo bazalto kiekis 4 kg/h. CO ir NO_x kiekis išmetamosiose dujose ne didesnis kaip 90 ir 300 ppm.

Stambios nerūdijančio plieno detalės, užterštos radioaktyviosiomis dulkėmis, gali būti valomos žemo slėgio difuzinės plazmos aplinkoje [10, 15–17]. Detalės sudedamos iš aliuminio pagamintoje kameroje, kurioje, esant 10–40 Pa slėgiui, sukuriama difuzinis išlydis. Jei detalės užterštos Pu ar PuO₂, valymui naudojama CF₄ ir O₂ plazma, o jei UO₂ – NF₃ plazma. Tokio įrenginio galia, atsižvelgus į darbo režimą, yra 25–210 kW, plazmą sudarančių dujų srautas – 3–18 cm³/min.

2.4. Kenksmingųjų medžiagų neutralizavimui keliami reikalavimai

Visi pavojingų medžiagų nukenksminimo įrenginiai yra didesnės rizikos objektai, todėl jiems keliami ypatingi techniniai, darbo saugos ir gamtosauginiai reikalavimai. Juos atitikti galima tik naudojant naujausius mokslo ir technikos laimėjimus, tiksliai matavimo aparatūrą, aukštos kvalifikacijos aptarnaujančią personalą. Pagrindinis reikalavimas atliekų nukenksminimo įrenginiui yra tai, kad po neutralizavimo kenksmingųjų medžiagų emisijų kiekis būtų ne didesnis už leistinas normas. Tai įmanoma, jei žinomos sąlygos, kurioms esant konkreti medžiaga suskai-

doma į nekenksmingus žmonėms ir aplinkai junginius. Todėl atliekamas eksperimentinis patikrinimas: nustatoma būtina temperatūra, maksimalus teršalų kiekis, papildomas cheminėms reakcijoms reikiamas dujų srautas ir sudėtis (pvz., O₂, H₂, vandens garas ir pan.), pateikiama išmetamų dujų, dulkių, pelenų analizė ir tik po to pradedamas pramoninis numatytos medžiagos neutralizavimas.

Pavojingų medžiagų nukenksminimo eigoje išmetamosiose dujose turi būti nustatyti maksimalūs kenksmingųjų medžiagų, tokių kaip CO, NO_x, dioksinai, furanai, chloro, fluoro, sieros junginiai, sunkieji metalai, kiekiai, taip pat deguonies kiekiai. Neutralizuojant dujines ir skystas medžiagas degimo produktuose O₂ turi būti ne mažiau kaip 3%, o kietųjų medžiagų ne daugiau kaip 6%.

Kuriant pavojingų atliekų tvarkymo nacionalinę sistemą ir teisinę reglamentaciją, rekomenduojama, kad šalyje, kurių ekonominės sąlygos panašios, konsultuotųsi ir remtųsi tarpusavio patirtimi. Remiantis tarptautinėmis atliekų tvarkymo specialistų rekomendacijomis kuriant patikimą pavojingų atliekų neutralizavimo sistemą, reikia tenkinti šias pagrindines sąlygas [1]:

- Turi galioti gerai suprantami įstatymai, reglamentuojantys buitinių ir pavojingų atliekų tvarkymo sistemos tam tikrus komponentus;
- Turi būti griežtai atskirta ir apibrėžta atliekų gamintojų, valdžios institucijų ir atliekų tvarkymo bei nukenksminimo procesą vykdančių asmenų kompetencija ir atsakomybė;
- Turi būti užtikrinta pagrindinių pavojingų atliekų sistemos priežiūra ir kontrolė;
- Turi būti siekiama, kad apdorojimo procesai būtų ekologiškai švarūs;
- Turi būti pakankami atliekų tvarkymo sistemos pajėgumai;
- Turi būti pakankamas pavojingų atliekų nukenksminimo įmonės našumas;
- Turi būti priimti regioniniai sprendimai didelėse šalyse ir visą šalį apimantys sprendimai mažose šalyse;
- Atliekų gamintojams ir visuomenei turi būti prieinama informacija apie saugius ir modernius buitinių ir pavojingų atliekų tvarkymo metodus;
- Turi būti skatinama pavojingų atliekų nukenksminimo įrenginių statyba atliekų gamintojų įmonėse.

3. EKSPERIMENTINIS PLAZMINIO TOKSINIŲ ATLIEKŲ NUKENKSMINIMO ĮRENGINYS IR METODAS

Terminiam buitinių ir pramoninių atliekų nukenksminimui naudojami įvairūs įrenginiai:

- kameriniai, šachtiniai;
- krosnys, kurių darbo temperatūra kinta nuo 900 iki 1400°C, atsižvelgus į jų konstrukcijas ir paskirtį;
- katilų kūryklos, naudojamos skystoms ir dujinėms atliekoms deginti. Temperatūra jose siekia 1400°C.
- Cikloniniai ir kombinuoti reaktoriai – dujinių, skystų ir miltelių pavidalo kietųjų atliekų neutralizavimui, kurių darbo temperatūra ne aukštesnė kaip 760°C.

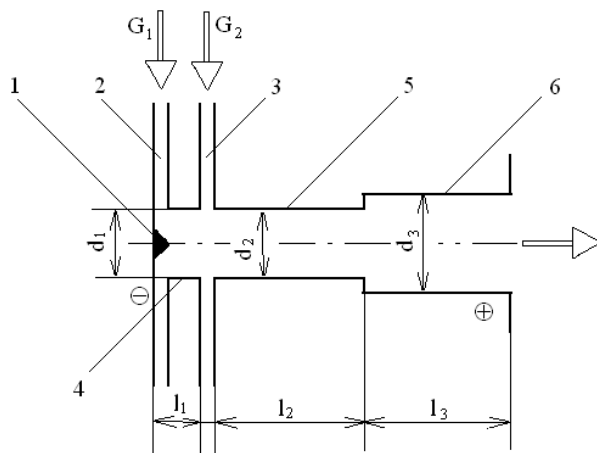
Pavojingoms medžiagoms visiškai nukenksminti reikia 1600–2000°C temperatūros. Esant tokiam režimui, anksčiau minėti nukenksminimo įrenginiai ilgalaikiam darbui netinka. Tam reikalingas specialus reaktorius. Be to, nustatyta, kad srauto temperatūra turi būti apie 150°C aukštesnė už nukenksminamų medžiagų lydymosi ir skilimo temperatūrą.

3.1. Oro plazmos generatoriaus konstrukcija ir charakteristikos

Pavojingoms atliekoms skaidyti reikia aukštos entalpijos dujų srauto. Jam generuoti naudojamas linijinis nuolatinės srovės plazmos generatorius (plazmotronas). Jo maksimali galia – 50 kW, o kaitinamo oro srautas – $10^2 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$.

Darbe aprašytiems eksperimentiniams tyrimams atlikti buvo naudojamas dujų dinaminis stendas su linijiniu sekcijiniu, turinčiu karštą katodą ir laiptuotą anodą, plazmotronu (1 pav.).

Jis susideda iš karšto (hafnio) katodo (1), izoliacinių (stiklo tekstolito) žiedų (2, 3) su dujų įpūtimo angomis, lanko uždegimo sekcijos (4) ir laiptuoto anodo (5, 6). Iš plazmotrono ištekantio oro vidutinė temperatūra ir greitis nustatomi iš šiluminio balanso, matuojant lanko galią (P), srovės stiprį (I) ir įtampos kritimą (U), nusta-



1 pav. Supaprastinta sekcijinio plazmotrono schema. Paaiškinimus žr. tekste

tant kaitinamo oro srautą (G) ir šilumos nuostolius plazmotrone (N_v) pagal aušinančio vandens srautą ir jo temperatūrą. Dujų srautui tenkanti galia

$$N_{sr} = P - N_v, \quad (1)$$

o jo entalpija

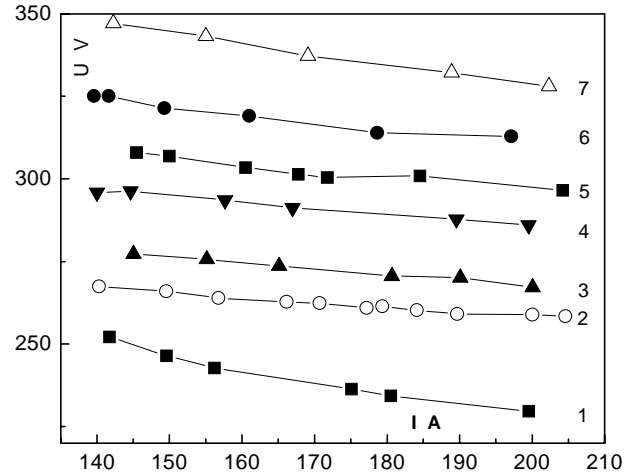
$$H = \frac{N_{sr}}{G} + H_1; \quad (2)$$

čia H_1 – šalto į plazmotroną patenkančio oro entalpija. Srauto greitis

$$w_f = \frac{G}{F \cdot \rho_f}; \quad (3)$$

čia F – kanalo skerspjūvis, o ρ_f – oro tankis.

Plazmotrono voltamperinės charakteristikos (2 pav.) nežymiai krįtančios. Norint užtikrinti reikiamą darbo režimą, eksperimentų metu plazmotronas buvo maitinamas elektros srove iš reguliuojamo tiristorinio lygintuvo per balastinį reostatą.



2 pav. Plazmotrono voltamperinės charakteristikos. Įpučiamo oro kiekis $G_1 = 0,87 \times 10^{-3}$ ir $G_2 \times 10^{-3}$ atitinkamai: 1 – 2,07; 2 – 2,99; 3 – 3,64; 4 – 4,77; 5 – 5,85; 6 – 7,66; 7 – 9,68 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$

Reikalingiems darbo režimams pasirinkti plazmotrono voltamperinės charakteristikos, remiantis panašumo teorija [18, 19], buvo apibendrintos naudojant kritinę priklausomybę

$$\frac{U d \sigma_0}{I} = c \left(\frac{I^2}{G d \sigma_0 h_0} \right)^m \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Kn}^p. \quad (4)$$

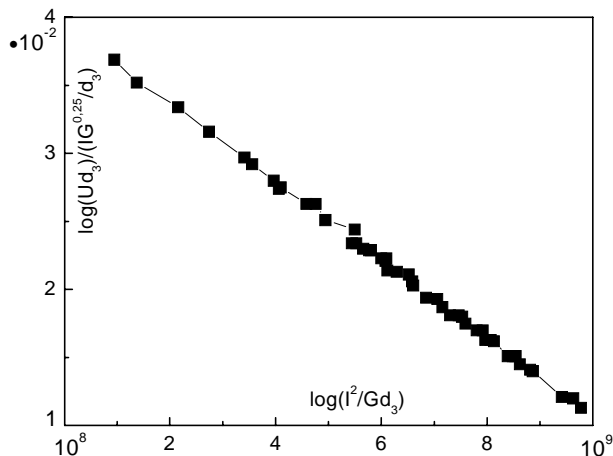
Kadangi šiuo atveju kaitinamas tik oras ir degimas vyksta aplinkoje, kurios slėgis artimas atmosferos slėgiui, gauta priklausomybė paprastesnė. Gauti rezultatai (3 pav.) aprašomi lygtimi

$$\frac{U d_3}{I} = 904 \left(\frac{I^2}{G d_3} \right)^{-0,55} \left(\frac{G}{d_3} \right)^{-0,25}. \quad (5)$$

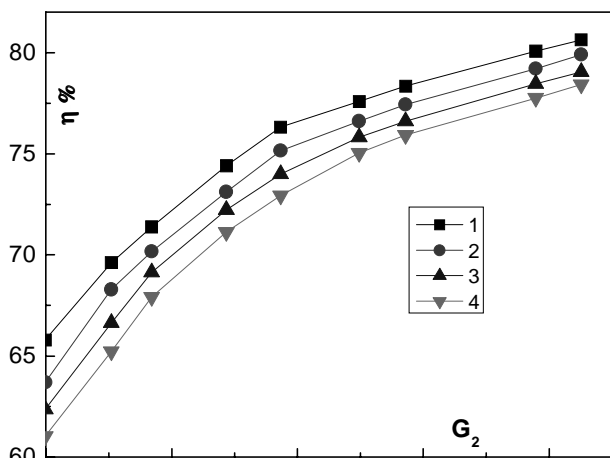
Elektros lanko įtampą ir plazmotrono galią labiausiai veikia įpučiamo į kamerą oro kiekis G_2 . To priežastis yra tangentinio įpučiamo oro greičio įtaka kameros pasienio sluoksniui, kuris sumažina elektros lanko kanalo skerspjūvį.

Pasienio sluoksnio storio ir elektros lanko įtampos didėjimas pagerina plazmotrono naudingumo koeficientą (4 pav.). Didėjant srovės stipriui, didėja šilumos nuostoliai į plazmotrono sienes, todėl mažėja naudingumo koeficientas. Gauti naudingumo koeficiento rezultatai (5 pav.) apibendrinami priklausomybe

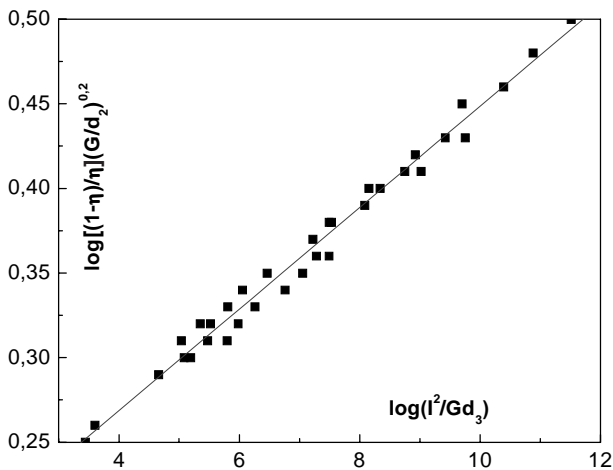
$$\frac{1-\eta}{\eta} = 11,6 \cdot 10^{-5} \left(\frac{I^2}{G d_3} \right)^{0,4} \left(\frac{G}{d_3} \right)^{-0,2}. \quad (6)$$



3 pav. Apibendrintos plazmotrono voltamperinės charakteristikos



4 pav. Plazmotrono naudingumo priklausomybė nuo srovės stiprio ir įpučiamo oro kiekio. $G_1 = 0,87 \times 10^{-3} \text{ kg} \times \text{s}^{-1}$, G_2 , atitinkamai, 1 – 150, 2 – 165, 3 – 180, 4 – 195 $\text{kg} \times \text{s}^{-1}$



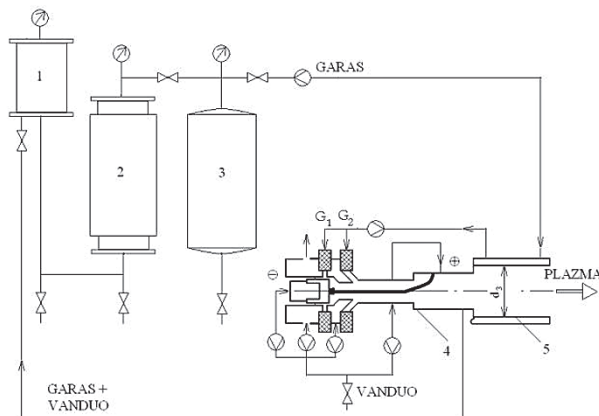
5 pav. Apibendrintas plazmotrono naudingumo koeficientas

3.2. Vandens garo plazmotronas, jo ypatumai ir charakteristikos

Perdirbant atliekas plazminiu metodu oksidatorius gali būti ne tik oras, bet ir vandens garas [3]. Naudojant oro plazmą, dėl aukštų srauto temperatūrų susidaro azoto oksidai, o vandens garo plazmoje to išvengiama.

Esant aukštai temperatūrai, vandens garas skyla į deguonį, vandenilį ir jų junginius, kurių reikia plazmocheminėse reakcijose. Vandens garo masinė entalpija, esant aukštomis temperatūroms (4000–5000 K) apie 6 kartus viršija oro entalpiją [18]. Taigi vandens garui įkaitinti reikalinga 6 kartus didesnė galia, negu tam pačiam oro masiniam debitui įkaitinti. Vandens garas pradeda disocijuoti esant 2000 K, o temperatūrai pasiekus 4000 K pilnai disocijuoja ir susidaro O_2 , O , H_2 , H , OH .

Eksperimentams buvo pagamintas ir išbandytas linijinis vandens garo plazmotronas (6 pav.), kuris nuo 1 pav. pavaizduoto skiriasi kanalų skersmens dydžiu ir elementų ilgiais, be to, jame įmontuota garų šaldoma perkaitinimo sekcija.



6 pav. Vandens garo plazmotronas su garo generavimo įrenginiais. 1 – vandens papildymo ir plėtimosi indas, 2 – garo generatorius, 3 – garo surinkimo ir plėtimosi indas, 4 – plazmotronas, 5 – garo perkaitintuvas

Vandens garas į plazmotroną tiekiamas tangentiškai per izoliacinius žiedus. Kadangi plazmotronų sekcijos visuomet aušinamos vandeniu, tai tiekiant į tokį plazmotroną vandens garą, jo dalis kondensuojasi ant šaltų sienelių ir labai padidėja elektrodų erozija. Kad nebūtų garo kondensacijos, elektrodų sienelių temperatūra turi būti ne žemesnė kaip 100°C. Be to, į plazmotroną tiekiamas vandens garas turi būti perkaitinamas iki 200–300°C temperatūros. Tuo tikslu prie plazmotrono jungiama sekcija 5, aušinama vandens garu.

Garų slėgio pulsacijoms išlyginti panaudotas garo išsiplėtimo indas. Vandens garo srautas matuotas kritinėmis tūtomis.

Įrenginio darbo režimams apibendrinti ir reguliuoti buvo nustatytos plazmotrono voltamperinės ir šiluminės charakteristikos. Plazmotrono parametrai kito: elektros srovės stipris $I = 30\text{--}180 \text{ A}$, įtampa $U = 90\text{--}240 \text{ V}$, plazmotrono galia $P = 6\text{--}20 \text{ kW}$, vandens garo kiekis $G = 0,6\text{--}1,7 \text{ g} \times \text{s}^{-1}$.

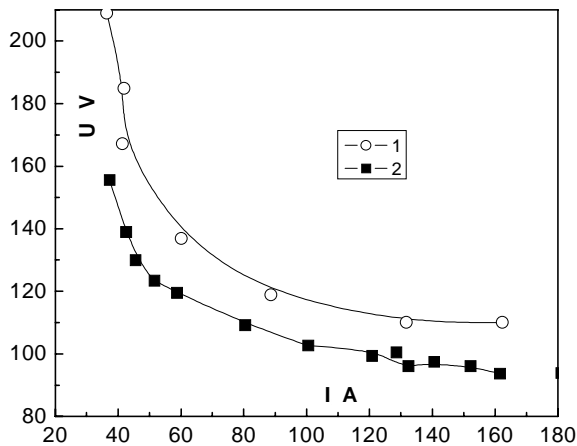
Vandens garo plazmotrono voltamperinės charakteristikos yra krentančios, tik esant srovės stipriui per 100 A, įtampa buvo beveik pastovi (7 pav.) [19].

Naudojant panašumo teoriją, vandens garą kaitinančio plazmotrono voltamperinės charakteristikos aprašytos kritine priklausomybe [20]

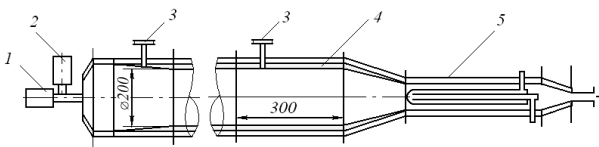
$$\frac{Ud_3}{I} = 2,81 \cdot 10^3 \left(\frac{I^2}{Gd_3} \right)^{-0,62} \cdot \left(\frac{G}{d} \right)^{-0,25} \quad (7)$$

3.3. Eksperimentinis plazmocheminis reaktorius

Pagrindinė pavojingų atliekų terminiam nukenksminimui sąlyga – aukšta degimo temperatūra reaktoriuje, pakankamas dujų buvimo aukštatemperatūroje zonoje laikas bei geras reagentų su plazma susimaišymas. Išanalizavus buitinių ir pramoninių atliekų utilizavimui naudojamų reaktorių našumo, galios ir tūrio santyki, buvo nustatyta, kad apytikriai jis yra 1 : 5 : 0,1. Esant dujų kiekiui $5 \times 10^{-3} \text{ kg} \times \text{s}^{-1}$ ir 2000°C temperatūrai, išlaikant sąlygą, kad nukenksminamos medžiagos dalelė aukštatemperatūroje zonoje išbūtų apie 2 s, reaktoriaus ilgis, kai skersmuo 0,2 m, turėtų būti 1,5 m. Remiantis šiais reikalavimais, laboratorijoje buvo suprojektuotas ir pagamintas eksperimentinis reaktorius su plazminiu dujų kaitinimu [21] (8 pav.).



7 pav. Vandens garo plazmotrono voltamperinės charakteristikos. Atitinkamai 1 – $G = 0,86$; 2 – $G = 0,64 \text{ g} \times \text{s}^{-1}$



8 pav. Atliekų nukenksminimo eksperimentinio plazmocheminio reaktoriaus schema. 1 – plazmotronas, 2 – atliekų tiekimo sekcija, 3 – anga zondui, 4 – iškloja, 5 – šilumokaitis

Reaktorius pagamintas iš 5 plieninių 0,3 m ilgio sekcijų su aušinamais apvalkalais. Kanalo vidus padengtas aliuminio ir cirkonio oksidų iškloja, kurios storis $23 \times 10^{-3} \text{ m}$. Kanalo vidinis skersmuo 0,2 m. Sekcijos turi angas, pro kurias galima įvesti zondus srauto temperatūrai ir greičiui matuoti. Visose sekcijose išklojos temperatūra buvo matuojama X-A termoporomis, jos vidinio paviršiaus temperatūra nustatoma trispalviu pirometru.

Plazmotronui prijungti prie reaktoriaus, taip pat nukenksminamoms medžiagoms tiekti pagaminta speciali sekcija, todėl plazmos srautą ir neutralizuojamą medžiagą į reaktorių galima tiekti įvairiomis kryptimis, t. y. statmenai ar išilgai reaktoriaus ašiai arba pagal liestinę.

Prie reaktoriaus prijungtas aušintuvas skirtas ištekantioms dujoms atšaldyti.

Nukenksminamoms medžiagoms tiekti į reaktorių buvo pagaminti specialūs dozatoriai.

3.4. Plazminių procesų kinetika

Plazminiai procesai gali būti padalyti į kvazipusiausvyrinius ir nepusiausvyrinius. Kvazipusiausvyriniuose procesuose dalelių energijų ir greičių pasiskirstymas praktiškai išsilaiko nesutrikdytas ir sistema apibūdinama vienintele temperatūra. Aprašant kvazipusiausvyrinius procesus galima naudotis cheminės kinetikos postulatais ir Arenijaus lygtimi, rišančia cheminės reakcijos greičio konstantą su temperatūra [16].

Nepusiausvyriniuose procesuose, pavyzdžiui, ruse nančiame išlydyje, vakuume, elektronų temperatūra gali 10 kartų viršyti jonų temperatūrą. Mūsų atveju iš plazmotrono išteka 10^5 Pa slėgio dujos, o plazma reaktoriuje pakankamai gerai susimaišiusi su reagentais ir dujomis, todėl galima teigti, kad nagrinėjamas procesas yra kvazipusiausvyrinis.

Kad medžiagos termiškai sureaguotų, jos turi išbūti reaktoriuje tam tikrą laiką. Tą laiką galima apskaičiuoti. Pagal veikiančių masių dėsnį reakcijos greitį galima išreikšti [2]

$$w = k \times c_1 \times c_2, \text{ kmol}/(\text{m}^3 \times \text{s}); \quad (8)$$

čia c_1, c_2 – reakcijoje dalyvaujančių medžiagų koncentracija, $\text{kmol} \times \text{m}^{-3}$; k – reakcijos greičio konstanta. Pagal Arenijaus dėsnį greičio konstanta priklauso nuo temperatūros:

$$k = k_0 \cdot e^{-E/RT}; \quad (9)$$

čia k_0 – konstanta; R – dujų pastovioji $\text{kJ} \times \text{kg}^{-1} \times \text{K}^{-1}$; T – absoliutinė temperatūra K; E – aktyvacijos energija $\text{kJ} \times \text{kg}^{-1}$.

Dalelių buvimo reaktoriuje laikas nustatytas remiantis lygtimi

$$t = \frac{1}{w} \sim A e^{E/RT}, \quad (10)$$

o temperatūra –

$$T \sim \frac{\beta}{\lg \tau - \lg A}. \quad (11)$$

Remiantis (11) buvo apskaičiuota kokso dalelių oksidacijos priklausomybė nuo temperatūros. Pakilus temperatūrai nuo 720 iki 1100 K, proceso greitis padidėja 100 kartų ir reakcijos trukmė sutrumpėja iki 10^{-2} s .

3.5. Tyrimų metodika

Eksperimentų metu buvo matuojami šie parametrai:

- Plazmotrono galia;
- Įpučiamo į reaktorių oro kiekis;
- Plazmotroną ir reaktorių aušinančio vandens kiekis;
- Nukenksminamos medžiagos kiekis;

- Ištekantių iš reaktoriaus dujų sudėtis;
- Aušinančio vandens temperatūra;
- Reaktoriaus sienelių ir išklojos temperatūra.

Plazmotrono galia buvo nustatoma matuojant jo įtampą ir pratekančios elektros srovės stiprį. Plačiau eksperimentinio įrenginio sistemos aprašytos [21, 22].

Oro srautas buvo matuojamas kritinėmis tūtomis ir manometrais, aušinančio vandens kiekis buvo nustatomas tūriniu metodu. Skystoms nukenksminamoms medžiagoms tiekti naudojama speciali suprojektuota sistema. Įpurškiamo skysčio kiekis matuojamas tūriniu metodu.

Skysčio lašelių dydis buvo keičiamas reguliuojant per purškuką pratekančio oro kiekį. Ištekantių iš reaktoriaus dujų sudėtis ir koncentracija buvo matuojama dujų analizatoriumi Technotest 488.

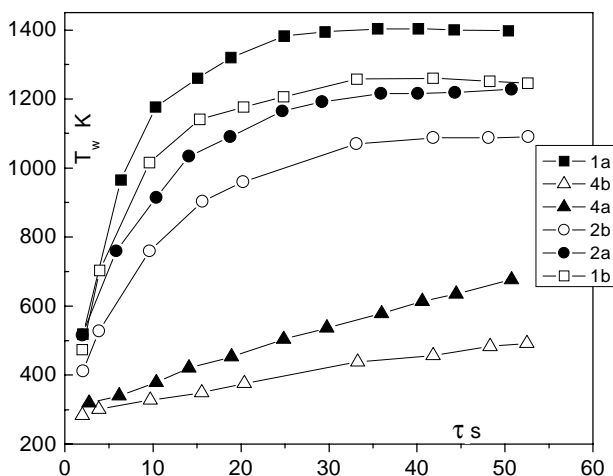
Kietos dispersinės nukenksminamos medžiagos buvo dozuojamos sraigtinu dozatoriumi. Tiekiamų medžiagų kiekis reguliuojamas keičiant maitintuvo variklio apsisukimų skaičių.

4. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

Visų pirma plazmocheminiame reaktoriuje išmatuotos šiluminės charakteristikos netiekiant į jį kenksmingų medžiagų. Buvo išmatuotos sienelės temperatūros priklausomybės nuo laiko, vidutinės masinės temperatūros pasiskirstymas pagal reaktoriaus ilgį ir skersmenį ir šilumos srautai į sienelę. Po to buvo vykdomas skystų ir kietų medžiagų terminis skaidymas oro plazmos sraute.

4.1. Plazmocheminio reaktoriaus charakteristikos

Plazmocheminio reaktoriaus šiluminių charakteristikų nustatymui buvo atlikti tyrimai dirbant plazmotronui ir netiekiant į jo srautą kenksmingų medžiagų. Matuojant reaktoriaus sienelės, išklojos temperatūros pasiskirstymą laike nustatyta, kad, kai $P \approx 40$ kW ir $G = 3,5\text{--}6,5 \times 10^{-3}$ kg \times s $^{-1}$, po 35–40 min. jos temperatūra nusistovi, t. y. režimas tampa stacionarus (9 pav.).



9 pav. Plazmocheminio reaktoriaus išklojos vidinio paviršiaus temperatūros kitimo priklausomybė nuo laiko. 1; 2; 4 – atitinkamai pirmoje, antroje ir ketvirtoje sekcijose. a – $P = 42$ kW; $G = 6,9 \cdot 10^{-3}$ kg \times s $^{-1}$; b – $P = 39$ kW; $G = 3,5 \cdot 10^{-3}$ kg \times s $^{-1}$. Taškai – matavimai pirometru, linija – termoporomis

Esant didesnei srauto galiai, reaktoriaus šiluminis balansas nusistovi greičiau, tačiau, didinant dujų srautą, ypač pradiniu darbo momentu, kyla pavojus, kad dėl terminių įtempimų iškloja gali suirti.

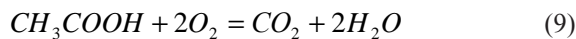
Srauto temperatūra per reaktoriaus ilgį sumažėja nuo 3500 iki 1500 K. Eksperimentinio ruožo karštas vidinis paviršius sąlygoja tolygų temperatūros pasiskirstymą per visą ruožo skerspjūvį. Srauto temperatūra skerspjūvyje buvo matuojama X-A termoporomis. Temperatūros pasiskirstymas skerspjūvyje tolygus [16, 21]. Galima daryti išvadą, kad, patiekus į srautą nukenksminamas medžiagas, jų skaidymas šiame eksperimentinio ruožo skerspjūvyje vyks tolygiai.

Neutralizuojant kenksmingas medžiagas, joms sąveikaujant su aukštos temperatūros srautu cheminių reakcijų pobūdis yra egzoterminis, o kartais endoterminis. Daugumai medžiagų degimo metu išsiskiriančios šilumos kiekis yra nežinomas, nes nežinoma tiksliai jų cheminė sudėtis, drėgnumas ir t. t. Todėl labai svarbu, kad būtų žinomas plazmocheminio reaktoriaus šilumos balansas, kad būtų galima įvertinti jo šiluminius parametrus norimoje vietoje. Nevykstant reakcijai, eksperimentiniam ruožui suteiktas šilumos kiekis yra plazmotrono elektrinė galia.

Nuostolių sumą sudaro šilumos srautas, prarandamas aušinant plazmotroną ir eksperimentinį ruožą vandeniu, ir ištekanti iš ruožo dujų srauto galia. Tyrimai parodė [21], kad, nusistovėjus šiluminiui balansui (10 pav.) po 30–40 min. darbo, atsižvelgus į plazmotrono galią ir dujų kiekį, šis skirtumas yra 4%. Galima daryti išvadą, kad naudojama matavimo ir skaičiavimo metodika teisinga ir ja remiantis galima nustatyti srauto parametrus reikiamame eksperimentinio ruožo skerspjūvyje degant organinėms medžiagoms.

4.2. Skystų organinių medžiagų terminis skaidymas

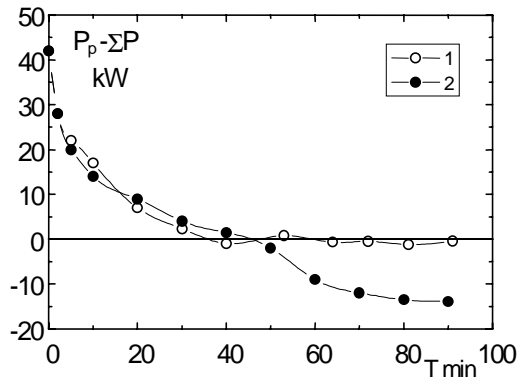
Preliminariems bandymams atlikti buvo pasirinkta chemiškai švari koncentruota acto rūgštis. Ji pasirinkta todėl, kad tiksliai žinoma jos cheminė sudėtis bei priemaišų kiekis. Deginant ji skyla pagal



išskirdama apie 13,6 kJ \times g $^{-1}$ energijos.

Eksperimentų metu buvo matuojami visi šiluminiai įrenginio parametrai, tiekiamos medžiagos kiekis, degimo produktų koncentracija įvairiose ruožo vietose ir jo ištekėjime. Degimo produktų koncentracija buvo nustatoma analizatoriumi Technotest 488.

Paleidus plazmotroną ir nusistovėjus kanalo šiluminiui balansui, esant $P = 43$ kW ir $G = 6,9 \times 10^{-3}$ kg \times s $^{-1}$, į srautą buvo purškama $1,23 \times 10^{-3}$ kg \times s $^{-1}$ acto rūgštis. Kad ruožo išėjime CO koncentracija būtų lygi nuliui, eksperimento metu buvo padidintas tiekiamo oro kiekis. Iš šiluminio balanso deginant acto rūgštį matyti (10 pav.), kad po 20–25 min., kai prasidėjo deginimo procesas, ruožo šiluminis balansas nusistovėjo. Teoriškai, deginant $1,23 \times 10^{-3}$ kg \times s $^{-1}$ koncentruotos acto



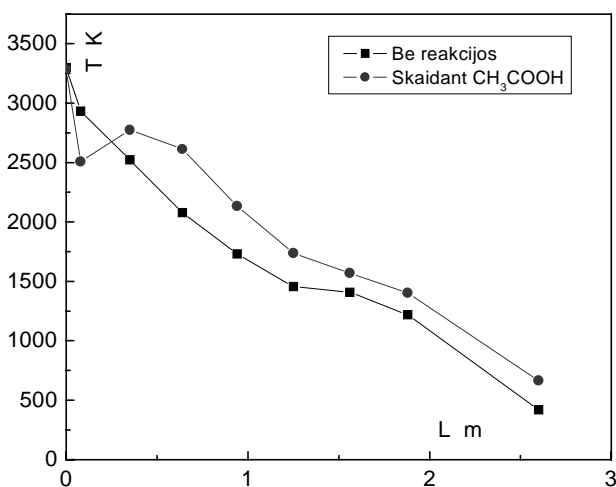
10 pav. Eksperimentinio įrenginio šiluminis balansas. Rezultatai, atitinkamai, 1 – nevykstant reakcijai ir 2 – termiškai skaidant CH_3COOH

rūgštis, turėtų išsiskirti 16,73 kW energijos. Iš šiluminio balanso matyti, kad dalis energijos sunaudojama rūgštis išgarinimui.

Degimo produktų koncentracija buvo matuojama viename eksperimentiniame ruože. Acto rūgštis intensyviai dega jos įpurškimo vietoje [16]. Jau už $x/d = 1$ nuo įpurškimo vietos CO koncentracija ne didesnė kaip 1%, o esant $x/d = 3$, CO visiškai sudega. Žymesnis sienelės temperatūros padidėjimas taip pat pastebimas pradinėje eksperimentinio ruožo dalyje. Vidutinė srauto temperatūra, pradėjus skaidyti acto rūgštį, padidėja (11 pav.). Tik įpurškimo vietoje dėl intensyvaus jos garavimo temperatūra yra žemesnė, negu srauto temperatūra dar neįpurškus į srautą rūgštis.

Acto rūgštis sudėtyje yra deguonies, todėl ją deginant reikia mažiau oro. Norint patikrinti, kaip reaktorius dirba utilizuojant medžiagą, neturinčią savo sudėtyje deguonies, buvo atlikti eksperimentai termiškai skaidant C_7H_8 .

Norint išlaikyti sąlygą, kad skaidoma medžiaga išbūtų reaktoriuje 2 s, be oro, į reaktorių buvo įpučiamas ir deguonis. Teoriškai sudegus 1 g toluolo, išsiskiria $402 \text{ kJ} \times \text{g}^{-1}$ energijos. Reakcijos procesas vyksta analogiškai, tik reaktoriuje išsiskiria didesni energijos kiekiai ir reikia intensyviai aušinti reaktorių.



11 pav. Vidutinės srauto temperatūros pasiskirstymas skaidant acto rūgštį. 1 – be reakcijos; 2 – vykstant reakcijai

4.3. Plazminis kietų atliekų nukenksminimas

Į reaktorių dažniausiai tiekiamos dispersinio pavidalo kietos medžiagos. Atsižvelgus į technologinį procesą, jos gali būti nuo kelių mikronų iki kelių milimetrų dydžio. Ištekejusio iš plazmotrono dujų srauto greitis siekia kelis šimtus metrų per sekundę. Sraute dalelės dėl terminio smūgio skyla, bet garuojama nuo jų paviršiaus. Norint maksimaliai išgarinti daleles aukštatemperatūroje zonoje, reikia didinti jų buvimą šioje zonoje laiką. Šios išvados patvirtinimui buvo deginamos kietos organinės medžiagos (naftalinas) anksčiau aprašytame reaktoriuje.

Naudojant sraigtinį dozatorių, dalelės buvo tiekiamos už plazmotrono statmenai ištekančiam plazmos srautui, kuris tangentiškai įtekėdavo į pirmąją reaktoriaus sekciją. Sraute jos intensyviai garuoja, skyla, vyksta oksidacija. Todėl šioje zonoje labai padidėja temperatūra, o tai reikalauja papildomo kai kurių reaktoriaus dalių aušinimo. Dėl didelės ištekejusių dalelių kinetinės energijos tam tikra jų dalis patenka suodžių pavidalo į „šaltą“ reaktoriaus dalį bei išteka iš šilumokaičio.

Įkaitintoms dujoms tekant išilgai reaktoriaus, o skaidomoms medžiagoms – tangentiškai, jų pradinis greitis gerokai mažesnis, skilimas tolygesnis. Atliekant eksperimentinius tyrimus lokalinio temperatūros padidėjimo nepastebėta, bet pats procesas reaktoriuje vyksta analogiškai: ištekejusių dujų sraute yra suodžių dalelių ir dujinio pavidalo nesureagavusios žaliavos. Taigi nors ir išlaikomos reikalingos režiminės charakteristikos: temperatūra ir buvimas aukštatemperatūroje zonoje trukmė, išmetamose dujose aptinkama ne tik N_2 ; H_2O ; CO_2 , bet ir C bei C_{10}H_8 dujų.

Tokiu būdu, skaidant kietas toksines medžiagas, reikia jas išskaidyti (atlikti pirolizę), o galutinį dujinimą vykdyti antrinėje degimo kameroje, palaikant reikalingą terminį režimą. Kitais atvejais galima kietas medžiagas ištirpinti specialiaame tirpiklyje ir jas deginti skystas.

Skaidant sudėtingas chloro organines medžiagas būtina temperatūrą pakelti per 2100 K bei papildomai naudoti vandenilį [23].

5. IŠVADOS

Išnagrinėti terminiai pavojingų atliekų nukenksminimo būdai, įgytas patyrimas plazminiu būdu deginant organines medžiagas leidžia organizuoti terminių atliekų nukenksminimą Lietuvoje.

Remiantis pasauline praktika ir autentiškais eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad, esant ypatingoms sąlygoms (nepakankamai geras atliekų rūšiavimas, dideli chloro kiekiai, policikliniai junginiai), pavojingų atliekų nukenksminimui reikia naudoti žemos temperatūros oro, vandens, garo, vandenilio plazmą.

Atsižvelgiant į nukenksminimo procesui keliamus reikalavimus ir sąlygas (reakcijos temperatūra 2000 K ir trukmė 1–2 s) buvo sukurtas dujų dinaminis įrenginys su plazmocheminiu reaktoriumi ir orą bei vandens garą kaitinančiais plazmotronais. Apibendrintos plazmotronų VACH (5), (7). Nustatyta, kad, esant pastoviams para-

metrams (galiai, kaitinamų dujų kiekiui), plazminio pavojingų atliekų neutralizavimo įrenginio darbo režimas tampa stabilus po 35–40 min. Srauto temperatūra reaktoriaus pradžioje 3500 K, o esant $x/d = 5$ ji lygi 2000 K.

Skaidant skystas organines medžiagas, kurių sudėtyje nėra deguonies, deginimo sąlygoms palaikyti vietoje oro į reakcinę zoną būtina įpūsti deguonies.

Nustatyta, kad, termiškai skaidant kietas organines medžiagas, reikia jas papildomai smulkinti, didinti jų buvimo reaktoriuje trukmę, o esant nepakankamam nukenksminimo efektyvumui, jas tikslinga dujinti ir deginti antrinėje kameroje.

Gauta 2006 08 31

Parengta 2006 09 25

Literatūra

- Pavojingų atliekų tvarkymas Lietuvoje. Žaliųjų klubas „Skroblas“, Baltijos konsultacinė grupė. Vilnius, 1994. 40 p.
- Бернардинер М. Н., Шурыгин А. Л. Огневая переработка и обезвреживание промышленных отходов. Москва, 1990. 304 с.
- Артамонов А. Г. Переработка различных органических отходов в плазмохимическом реакторе // Аппараты высокотемпературной техники. Москва, 1988. С. 56–75.
- Jackman A. P., Powell R. L. Hazardous waste treatment technologies. New Jersey, USA, 1991. 276 p.
- Fehlner F. P. Low Temperature Oxidation: The Role of Vitreous Oxides. New York: Wiley, 1986. 257 p.
- Satterfield C. N. Heterogeneous Catalysis in Industrial Practice. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 572 p.
- Lepa V. Dioksinai // Mokslas ir technika. 1996. Nr. 6. P. 7.
- Сурис А. Л., Бесков А. Г., Фролов К. И. Плазмохимические установки по обезвреживанию токсических органических соединений // Тезисы докладов научно-практической конференции по плазмохимии. Москва, 1990. С. 9–10.
- Mosse A. L., Gorbunov A. V., Hvedchin I. V. Thermal plasma systems for the treatment of wastes and material regeneration // Proceedings of International Conf. in Physics of Low Temperature Plasma PLTP-03. Kyiv, 2003. P. 442–446.
- Тухватулин А. М., Изингер Ю. В., Береснева И. В. и др. Плазмохимическая переработка отходов хлорорганических производств // Плазменные процессы и аппараты. Минск, 1984. С. 118–128.
- Шмыков Ю. И., Шорин С. Н., Сурис А. Л. и др. Плазмохимический пиролиз отходов хлорорганических производств на опытной установке мощностью 200 кВт // Тез. докл. II всесоюз. совещ. по плазмохимической технологии и аппаратостроению. Москва, 1977. Т. 1. С. 247–249.
- Пархоменко В. Д., Сорока П. И., Краснокутский М. Н. и др. Плазма в химической технологии. Киев, 1986. 228 с.
- Володин Н. Л., Вурзель Ф. Б., Полак Л. С. и др. Плазмохимический пиролиз хлоруглеводородов // Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы. Алма-Ата, 1970. С. 583–585.
- Артамонов А. Г. Переработка различных органических отходов в плазмохимическом реакторе // Аппараты высокотемпературной техники. Москва, 1988. С. 56–75.
- Valinčius V., Valatkevičius P. Toksinių medžiagų terminio nukenksminimo aukštos temperatūros dujų sraute galimybių tyrimas // Šilumos energetika ir technologijos. KTU konf. medžiaga. 1997. P. 111–116.
- Veillenx J. M., El-Genk M. S. Plasma decontamination of depleted uranium oxide from stainless steel surfaces // 2nd International Symposium on Heat and Mass Transfer under Plasma Condition / Book of Abstracts. Antalya, Turkey, 1999. P. 39–41.
- El-Genk M. S., Sabev H. H., Veillenx J. Analysis and modeling of decontamination experiments of depleted uranium dioxide // 2nd International Symposium on Heat and Mass Transfer under Plasma Condition / Book of Abstracts. Antalya, Turkey, 1999. P. 162–164.
- Valinčius V., Kėželis R., Juškevičius R. Heat transfer in plasma jet reactor for hazardous waste treatment // Progress in Engineering Heat Transfer. Proceedings of the 3rd Baltic Heat Transfer Conference. Gdansk, 1999. P. 103–110.
- Valinčius V., Krušinskaitė V., Valatkevičius P., Valinčiūtė V., Marcinauskas L. Electric and thermal characteristics of the linear, sectional dc plasma generator // Plasma Sources Sci. Technol. 13. 2004. P. 199–206.
- Juškevičius R., Kėželis R., Valatkevičius P., Ambrazevičius A. Vandens garo plazmotrono tyrimai // Energetika. 1999. Nr. 4. P. 3–7.
- Kėželis R., Juškevičius R., Mėčius V. Water vapour plasma torch for hazardous waste treatment. Heat and mass transfer under plasma conditions // Annals of the New York Academy of Sciences. 1999. Vol. 89. P. 43–48.
- Kėželis R., Mėčius V., Valinčiūtė V., Valinčius V. Waste and biomass treatment employing plasma technology // High Temperature Material Processes. 2004. Vol. 8. P. 273–282.
- Kėželis R., Juškevičius R., Mėčius V. Toksinių medžiagų terminio skaidymo plazmocheminio reaktoriaus šiluminių parametrų tyrimas // Šilumos energetika ir technologijos. KTU konf. medž. Kaunas, 1999. P. 171–176.

Vitas Valinčius, Pranas Valatkevičius, Romualdas Kėželis

PLAZMA TREATMENT OF HAZARDOUS WASTE

Summary

The paper contains a short description and assessment of different hazardous waste treatment methods. Thermal treatment, especially plasma technological processes, are indicated as most effective. A technology related to a high temperature thermal destruction and a waste processing system based on plasma torch technology have been selected for further realization.

In compliance with the international specifications of hazardous waste treatment the technological equipment for plasma

treatment has been designed and manufactured. Two kinds of plasma sources have been developed and employed. The first one is an atmospheric pressure DC air plasma torch, power 50 kW, air flow rate $(3.5-10) \times 10^{-3} \text{ kg} \times \text{s}^{-1}$. The outflow temperature varies up to 3500 K. The second source is a DC plasma torch operating on water vapour, power 6–20 kW, the plasma forming vapour flow rate being $(0.6-1.7) \times 10^{-3} \text{ kg} \times \text{s}^{-1}$.

A plasma chemical reactor (length 1.5 m, internal diameter 0.2 m) was connected to a linear sectional plasma torch. The distribution of plasma source and reactor operating parameters have been established. The system was applied for the treatment of waste containing organic substances such as acetic acid and naphthalene. Results on heat balance and heat transfer have shown that the combustion process takes place over the whole reactor volume.

The good characteristics of plasma equipment offer unique solutions to meet the increasing demands of pyrolysis, vitrification and thermal destruction of hazardous organic wastes.

Key words: plasma torch, hazardous waste treatment, plasma processing, plasma chemical reactor, water steam plasma

**Витас Валинčius, Пранас Валаткевичюс,
Ромуальдас Кежялис**

ПЛАЗМЕННОЕ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ВРЕДНЫХ ОТХОДОВ РАЗНОГО ТИПА

Резюме

Даны краткое описание и оценка термических методов нейтрализации вредных отходов. Наиболее эффективными

акцентируются плазменные технологические методы, которые применены в дальнейшей практической реализации процесса нейтрализации. В соответствии международным требованиям качеству нейтрализации вредных веществ создана, изготовлена и испытана плазменно-технологическая установка с плазменными генераторами двух видов. Один из них представляет собой плазматрон постоянного тока, мощность которого до 50 кВт, рабочим газом которого является воздух, расход – $(3,5-10) \times 10^{-3} \text{ кг} \times \text{с}^{-1}$. Температура потока на выходном сопле плазматрона достигала 3500 К. Другим источником плазмы служил плазматрон водяного пара, мощность которого – 6–20 кВт, расходом $(0,6-1,7) \times 10^{-3} \text{ кг} \times \text{с}^{-1}$.

Плазмохимический реактор (длина 1,5 м, внутренний диаметр 0,2 м) был подсоединен к плазматрону и проведены экспериментальные исследования всей установки в целом. Определены вольтамперные характеристики плазматронов и режимные параметры реактора. Результаты обобщены на основе теории подобности.

Плазмохимическая установка была применена для экспериментального разложения органических жидких и твердых веществ, таких как уксусная кислота и нафталин. Результаты анализа теплового баланса реактора показали, что процесс разложения введенного материала происходит по всему объему реактора.

Разработанная система может быть использована в качестве мобильной установки.

Ключевые слова: плазматрон, плазмохимический реактор, вредные отходы, плазменное разложение, плазма водяного пара