

**ŠILUMOS
ENERGETIKA
IR TECHNOLOGIJOS – 2017**

Konferencijos pranešimų medžiaga



2017

Kauno technologijos universitetas
Lietuvos energetikos institutas
Lietuvos šiluminės technikos inžinierių asociacija
Branduolinės energetikos asociacija

**ŠILUMOS ENERGETIKA
IR TECHNOLOGIJOS – 2017**

Konferencijos pranešimų medžiaga



Kauno technologijos
universitetas
Konferencija, 2017 m.
sausio 26-27 d.

Kaunas * LEI * 2017

UDK 621.1 (474.5) (6)

Li 301

Tarptautinis mokslinis komitetas

prof. Michail Berengarten, Maskvos valstybinis inžinerinės ekologijos universitetas (Rusija)

prof. Elmar Blums, Latvijos universiteto Fizikos institutas (Latvija)

prof. Gintautas Miliauskas, Kauno technologijos universitetas (Lietuva)

prof. Simeon Oka, Branduolinių mokslų institutas VINČA (Serbija)

prof. Arvo Ots, Talino technikos universitetas (Estija)

prof. Bengt Sunden, Lundo technologijos institutas (Švedija)

prof. Stasys Šinkūnas, Kauno technologijos universitetas (Lietuva)

prof. Eugenijus Ušpuras, Lietuvos energetikos institutas (Lietuva)

prof. Jurgis Vilemas, Lietuvos mokslų akademija (Lietuva)

prof. Raymond Viskanta, Purdue universitetas (JAV)

dr. Rolandas Urbonas, Lietuvos energetikos institutas (Lietuva)

Redakcinė kolegija:

doc. Egidijus Puida (atsakingasis redaktorius)

prof. Gintautas Miliauskas

prof. Stasys Šinkūnas

doc. Kęstutis Buinevičius

doc. Juozas Gudzinskas

dr. Linas Paukštaitis

dr. Rolandas Jonynas

dr. Nerijus Striūgas

dr. Rolandas Urbonas

*Leidinio straipsnius recenzavo redakcinė kolegija
ir nepriklausomi recenzantai*

© Kauno technologijos universitetas, 2017

© Lietuvos energetikos institutas, 2017

1 ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI IR BIOSFEROS APSAUGA

Įrangos komplektas kietųjų dalelių emisijų matavimui gravimetriniu metodu stacionariuose objektuose EMIOTEST 3114

Rimvydas Ambrulevičius
UAB AUREGIS

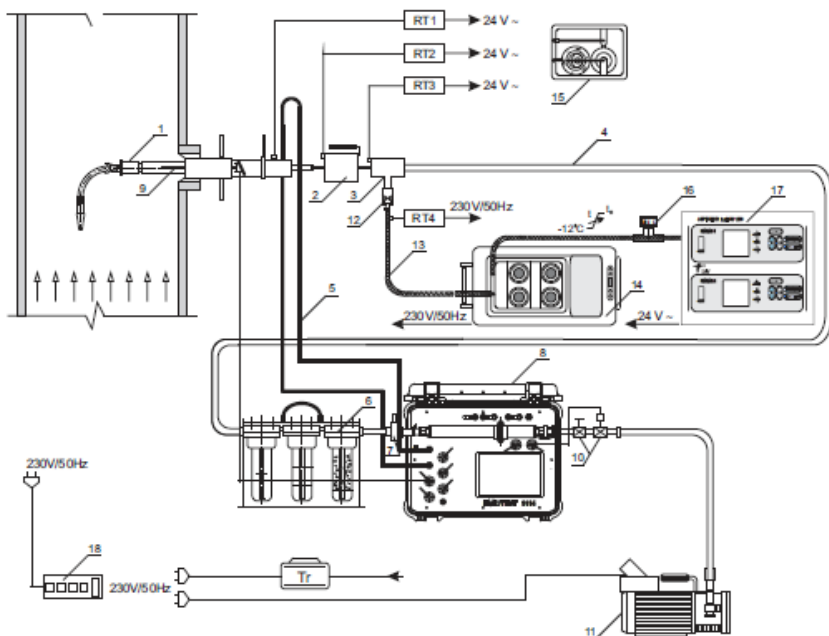
Kietųjų dalelių emisijų matavimai tapo itin aktualūs sugriežtinus taršos kontrolę gamybinuose objektuose – medienos perdirbimo įmonėse, malūnuose, statybinių medžiagų pramonėje, katilinėse ir koogeneracinėse jėgainėse, naudojančiose kietą kurą. Energetiniai objektai dažniausiai randasi miesto zonoje ir netoli gyvenamųjų namų kvartalų. Todėl jų taršos poveikis iššaukia daugiausia priekaištų. Kietųjų dalelių emisijų matavimai reglamentuojami normatyviniais dokumentais [1,2], o jų vykdymas nesilaikant juose keliamų reikalavimų duoda klaidingus, neatspindinčius faktinių emisijų, verčių rezultatus. Viena dažniausiai pasitaikančių klaidų – matavimui naudoti prietaisus, skirtus kontroliuoti ventiliavimo-vėdinimo, kondicionavimo sistemų veikimą. Energetiniuose objektuose keliolika kartų didesnės kietųjų dalelių koncentracijos, srautų greičiai, dujų temperatūra ir drėgmė. Reikia našesnių aspiracinių siurblių ir drėgmės separatorių, kad užtikrinti matavimo procesą. Plačiau ši problema aptarta 2016 m. vykusioje konferencijoje skaitytame pranešime. Kad išvengti tokių neleistinų nukrypimų nuo normatyvinių dokumentų reikalavimų, naujuose matavimo prietaisuose įdiegiama papildoma funkcija – automatinis aspiracinių antgalių ir matavimo taškų padėčių kanale parinkimas pagal standartų reikalavimus. Analogiškos funkcijos pradėtos taikyti naujuose dulkiamačių modeliuose. Įvedus ortakio diametrą, srauto greitį, terpės parametrus ir normatyvinio dokumento kodą, instaliuota programa paskaičiuoja ir parenka matavimui atlikti reikiamus parametrus. Tai ne tik apsauga nuo nekorektiškų matavimų, bet ir automatinis operatoriaus asistentas. Minėta funkcija yra ir naujame EMIO firmos gravimetriniame dulkiamatyje EMIOTEST 3114. Atliktų matavimų duomenų ataskaitoje tai atsispindi (įrašoma parinktas antgalių diametras, matavimo taškų skaičius, aspiravimo trukmė ir proceso parametrai). EMIO jau 30 metų gamina įvairius aspiratorius, gravimetrinius dulkiamačius ir jiems skirtus priedus, lakių medžiagų mėginių paėmimo įrangą analitiniams tyrimams. Todėl pasiteisinę sprendimai ir komponentai buvo pritaikyti ir naujame prietaise. Vienas jų, tai specialaus aspiracinio siurblio AZ-15 panaudojimas. Matavimo vietos katilinių degimo dujų išmetimo sistemose dažnai įrengiamos vertikalioje kanalo dalyje arba kamine (10 ir daugiau metrų aukštyje). Tokiu atveju atstumas tarp zondo ir dulkiamačio yra 20 ir daugiau metrų, o slėgio nuostoliai aspiravimo kanale – dideli. Be to, matuojant galiniuose taškuose, ortakių ir kaminų diametrai yra dideli. Todėl išlaikyti izokinetiškumo sąlygą be našaus siurblio nėra jokių galimybių, nes aspiracinio antgalio diametras turi būti ne mažesnis nei 8 mm [1].



1 pav. Valdymo ir matavimo blokas EMIO3114

Tokio siurblio naudojimas įgalina, atliekant kietų dalelių emisijų matavimus, tuo pat metu paimti lakių kancerogeninių medžiagų mėginius analitiniams tyrimams. Naudojant papildomą aspiratorių, dalis srauto gali būti nukreipiama į papildomą kanalą, ir lakios medžiagos surenkamos absorberiuose (vamzdeliniuose, labirintiniuose ir pan.). Naudojant mažo našumo siurblį to padaryti negalima, nes aspiruojamas lakių medžiagų kanale dujų srautas sudarys didelę pagrindinio srauto dalį ir gausime dideles izokinetiškumo palaikymo paklaidas. Tokie matavimai ypač svarbūs atliekų deginimo ir utilizavimo įmonėse, nes lakių medžiagų ir kietų dalelių mėginiai turi būti paimti vienu metu, kad nustatyti realų taršos emisijų lygį. Reikia užtikrinti ne tik didelį našumą, bet ir pakankamą vakuumą kanale, kad kompensuoti filtravimo elemento dinaminį pasipriešinimą užsipildant kietomis dalelėmis. Kad galėtų atlikti emisijų matavimus mažos ir didelės galios jėgainėse, EMIO3114 turi du keičiamus aspiruojamo srauto matavimo kanalus. Pirmu atveju maksimalus debitas $4\text{ m}^3/\text{h}$, o antru – $15\text{ m}^3/\text{h}$. Papildomus reikalavimus kelia ir darbo aplinkos sąlygos. Matavimo bloko elektronikos modulio termostataavimas užtikrina stabilų prietaiso darbą diapazone nuo -10 iki $+50^\circ\text{C}$. Tai įgalina atlikti matavimus ir šaltuoju laikotarpiu, kai katilo generuojama galia artima vardinei. Jei matavimai jėgainėje buvo atlikti vasarą prie mažų katilo generuojamų galių, juos būtina pakartoti 3-5 mėnesių laikotarpiu prie didelių galių.

Tipinė matavimų schema naudojant EMIOTEST3114 su lakių medžiagų mėginio paėmimo kanalu parodyta 2 paveiksle.



2 pav. Kietų dalelių ir lakių junginių mėginių paėmimo schema: 1 – aspiracinis šildomas zondas su antgaliais ir greičio zondų; 2 – šildomas separatorius; 3 – šildomas trišakis; 4 – aspiracinė žarna; 5 – slėgių skirtumo vamzdeliai; 6 – drėgmės separatorius; 7 – dujų temperatūros ir drėgmės matavimo modulis; 8 – matavimo ir valdymo blokas; 9 – proceso dujų temperatūros jutiklis; 10 – automatinio ir rankinio reguliavimo vožtuvai; 11 – rotacinis siurblys; 12 – atbulinis vožtuvas; 13 – šildoma aspiracinė žarna; 14 – šaldytuvas su stelažais absorberiams; 15 – keičiami stelažai su absorberiais; 16 – elektroninis termometras; 17 – dviejų kanalų aspiratorius EAS-2; 18 – maitinimo šakotuvus su apsauginiu išjungėju; RT1...RT3 reguliatoriai; Tr1...Tr3 – maitinimo transformatoriai.

Išvados

Kaip matome, be pagrindinio valdymo ir matavimo bloko su registravimo funkcija, matavimui reikia daug papildomos įrangos: temperatūrų ir drėgmės jutiklių, aspiracinių zondų su filtrais ir antgaliais, drėgmės separatoriaus, lakių junginių aspiratoriaus. EMIO gamina visą papildomą įrangą ir, pateikus objektų, kuriuose numatoma atlikti matavimus, techninius duomenis bei proceso charakteristikas, pasiūlys optimalų komplektavimo variantą. Klientų pageidavimu, aspiraciniai zondų kanalai bei kiti elementai gali būti pagaminti iš titano. Pagrindinės tokių gaminių pritaikymo sritys: matavimai prie aukštų proceso dujų temperatūrų, mėginių paėmimas sunkių metalų, aromatinių angliavandenilių, sieros, chloro ir fluoro junginių, PCDD/PCDF nustatymui išmetamose dujose. Sukaupti prietaiso atmintyje atliktų matavimų duomenys gali būti perkeltami į PC, ir jie išlieka išjungus jo maitinimą prietaiso atmintyje. Kartu su prietaisu pateikiama programinė įranga darbui su prietaisu ir duomenims apdoroti bei ataskaitoms sudaryti.

Visos pateiktos įrangos patikrą galima atlikti gamintojo akredituotoje laboratorijoje (PCA Nr.AP-14) kartu su prietaisų techniniu aptarnavimu ir remontu. Šioje laboratorijoje tikrinami visų valstybinių aplinkos apsaugos funkcijas vykdančių įstaigų laboratorijose naudojami dulkiamačiai.

Literatūra

1. LST-EN 13284-1:2015 Emisijos iš stacionarių šaltinių. Mažų masės koncentracijų dulkių nustatymas. Rankinis gravimetrinis metodas.
2. LST ISO 9096+AC1:2015 Stacionarių šaltinių išmetami teršalai. Kietų dalelių masės koncentracijos nustatymas rankiniu būdu.

Equipment for measurement of particulates using gravimetric method in stationary installations

Summary

A new automatic particulate meter EMIOTEST3144 for measurement of particulates in industrial and energy sector companies is presented. EMIO produces not only main measurement and control equipment but also additional accessories, such as aspirator probes and their heads, separators for cartridge and flat filters, flow rate probes and humidity separators. The laboratory of the manufacturer is certified by national certification center and their products are utilized by national environmental control laboratories and specialized companies. Particulate meter EMIOTEST3114 conforms with all normative documents, which regulate measurements.

Šilumos polių integravimo į pastatų konstrukcijas tyrimas

Giedrius Gecevičius, Vaidotas Zimnickas
Lietuvos energetikos institutas

Didėjantis šilumos energijos poreikis ir griežtėjantys aplinkosauginiai reikalavimai tampa vis didesniu iššūkiu energijos gamintojams. Siekiant sumažinti į orą išmetamų teršalų, pastaruoju metu vis daugiau dėmesio skiriama atsinaujinantiems energijos ištekliais (AEI). Vienas iš didžiausio potencialo turinčių šilumos energijos gamybos būdų yra sekliųjų geoterminių šildymo sistemų panaudojimas. Seklioji geoterminė energija pranašesnė už kitus atsinaujinančius energijos išteklius tuo, jog tai yra pastovus ir menkai aplinkos sąlygų veikiamas energijos šaltinis. Vis dėlto, geoterminės energijos potencialas priklauso nuo metų laikų, tačiau grunto temperatūros priklausomumas stebimas tik iki 15-30 metrų gylio, o gilesniuose horizontuose grunto temperatūra išlieka stabili visus metus – apie 9 C° [1].

Pasaulyje vis daugiau dėmesio sulaukia pastato požeminių konstrukcijų panaudojimas geoterminei energijai gauti. Tokie projektai, kai statant pastatą į polių integruojami šilumos kolektoriaus vamzdeliai, tampa vis populiariesni visoje Europoje.

Šilumos mainų efektyvumas tarp grunto ir poliaus bei poliaus ir šilumos kolektoriaus priklauso nuo grunto tipo, tankio, grunto procentinio vandens įsisavinimo bei poringumo. Iki šiol atlikti darbai rodo, kad šilumos mainų efektyvumą grunte galima padidinti dirbtinai sukuriant vandens cirkuliaciją grunte, į jį pumpuojant orą. Taip sukuriamas slėgių skirtumas tarp vandens slėgio grunte ir vandens slėgio oro šulinyje. Straipsnyje pasiūlytas unikalus oro šulinys su dviem perforuotomis ir dviem termiškai izoliuotomis zonomis [2-4].

Šilumos mainai tarp grunto ir poliaus, bei poliaus ir šilumos kolektoriaus yra sudėtingi. Dėl šios priežasties modelyje buvo atlikti keli supaprastinimai.

- Visos sąlygos nepriklauso nuo laiko (pastovios), atskirose sistemos dalyse parametrai pasiskirstę tolygiai.
- Polių supančio grunto savybės yra pastovios visame jo tūryje. Grunto temperatūra, šilumos laidumo koeficientas ir tankis yra pastovūs.
- Poliaus šiluminės savybės yra vienodos visame jo tūryje.
- Analizuojamu atveju neatsižvelgiama į procesus, vykstančius U – tipo jungtyje. Laikoma, kad fluido temperatūra vieno vertikalios vamzdelio apačioje lygi temperatūrai kito vamzdelio, sujungto su pirmuoju, apačioje.

Šilumos mainai sukurtame šilumos polių modelyje grunto srityje aprašomi 1 lygtimi:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = Q + q_s T - \rho C_p u \nabla T \quad (1)$$

čia: k – grunto šilumos laidumo koeficientas, ∇ – temperatūros gradientas, Q – grunto atiduotos šilumos kiekis, q_s – šilumos sugerties-generacijos koeficientas [$W/(m^3 \cdot K)$], T – grunto temperatūra [K]. Lygties narys $-\rho C_p u \nabla T$ aprašo šilumos mainus dėl konvekcijos, kai ρ – vandens tankis [kg/m^3], C_p – vandens šiluminė talpa [$J/(kg \cdot K)$], u – vandens tėkmės grunte greitis [m/s].

Šilumos mainų tarp šilumos kolektoriaus ir poliaus vertinimas aprašomas lygtimi:

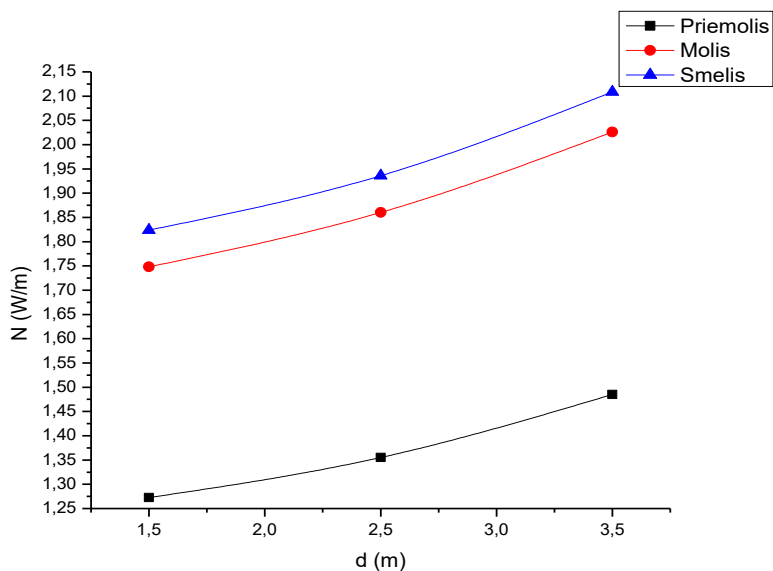
$$-n \cdot (-k \nabla T) = q_0 + h(T_{inf} - T) \quad (2)$$

čia: n – yra normalės vektorius, h – šilumos perdavimo koeficientas [$W/m^2 \cdot K$], T_{inf} – išorinė temperatūra [K], T – šilumnešio temperatūra tam tikrame taške [K]. Modelyje konvekcijos koeficientas yra pastovus ir apskaičiuojamas pagal formulę:

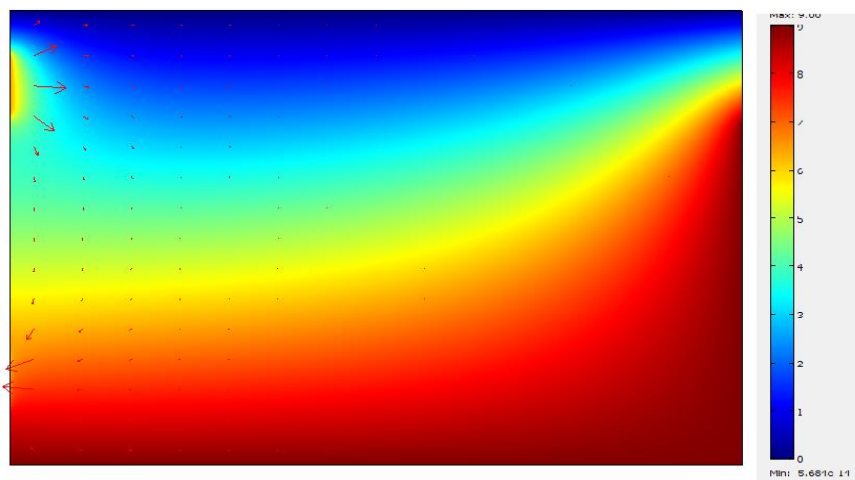
$$\frac{1}{\left(\frac{1}{h_s} + \left(\frac{r_o}{k_{vs}} \right) \cdot \log \left(\frac{r_i}{r_o} \right) \right)}, [W/m^2 \cdot K] \quad (3)$$

Nevykstant konvekciniais šilumos mainams grunte, efektyviausiai veikia polių sistema, kuri buvo modeliuota smėlio gruntui, o maksimali galia, esant 3,5m atstumui tarp polių, siekė 2,109W/m. Tuo tarpu mažiausia įvertinta galia, esant 3,5m atstumui tarp polių, buvo pasiekta priemolio grunte ir buvo lygi 1,485W/m (1 pav.). Galios sumažėjimą priemolio grunte paaiškina gruntų šilumos laidumo koeficientų skirtumas – smėlio ir priemolio gruntų šiluminiai laidumo koeficientai atitinkamai siekia 1,686W/m·K ir 1,093W/m·K.

Temperatūros pasiskirstymas šulinio ašies plokštumoje, esant 500 Pa slėgio skirtumui tarp šulinio viršutinės ir apatinės perforuotų sričių, pateikiamas 2 paveiksle. Pumpuojant orą į šulinį susidaro oro ir vandens mišinys, šulinio dugne atsiranda slėgio deficitas lyginant su vandens slėgiu grunte tokiaame pat gylyje. Dėl šios priežasties vanduo, kurio temperatūra artima grunto temperatūrai, iš grunto pradeda tekėti į šulinį. Dėl slėgių skirtumo, tarp oro šulinio viršutinės ir apatinės dalies, žemesnės temperatūros vanduo viršuje juda žemyn apatinės perforuotos srities link. Vanduo iš vėsesnio paviršiaus sluoksnio atvėsina gruntinį vandenį, tačiau vandens temperatūra oro šulinyje vis tiek išlieka aukštesnė nei grunto temperatūra 2,5m nuo grunto paviršiaus gylyje. Dėl šios priežasties stebimas temperatūros padidėjimas viršutinėje oro šulinio perforuotoje srityje.



1 pav. Paimama šiluminė galia vienam kolektoriaus ilgio metrui, esant skirtingiems gruntų tipams ir atstumui tarp polių



2 pav. Temperatūros pasiskirstymas grunto sritys pjūvyje išilgai šulinio ašies

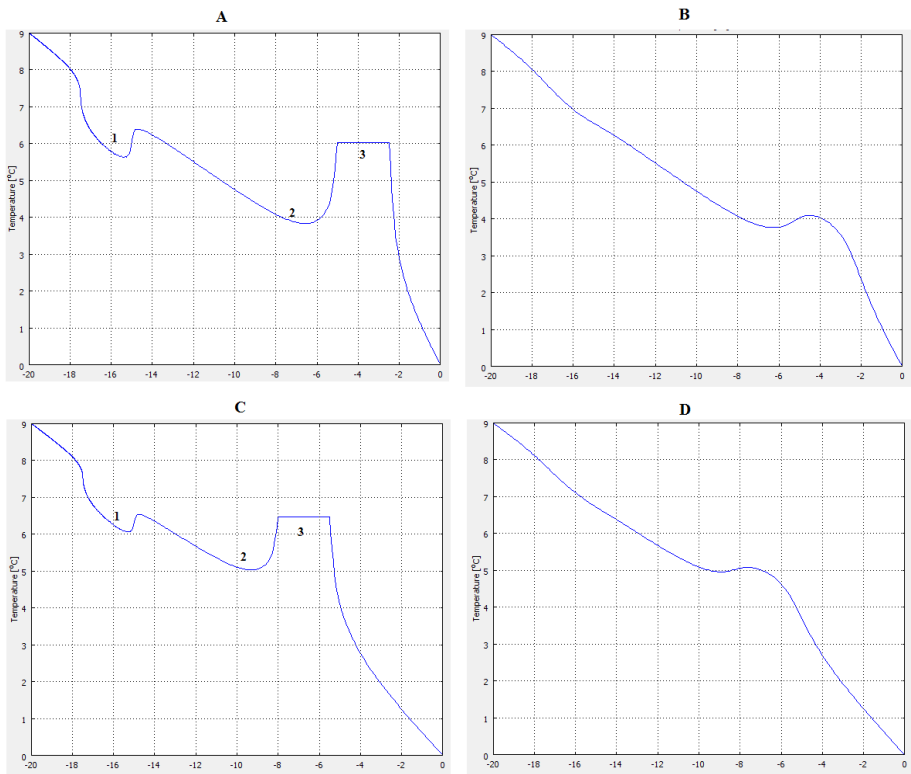
Atlikta modeliavimo rezultatų analizė rodo, kad viršutinei perforuotai oro šulinio sričiai tolstant nuo paviršiaus, ištekančio iš oro šulinio vandens temperatūra didėja.

Temperatūros kitimo grafikai išilgai oro šulinio pateikiami 3 paveikslė. A ir B dalyse pateikti temperatūrų kitimo grafikai, kai atstumas nuo grunto paviršiaus iki viršutinės perforuotos oro šulinio dalies 2,5m, o C ir D dalyje, kai atstumas nuo grunto paviršiaus 5m. A ir C dalių grafikuose išskirtos trys pažymėtos skaičiais sritys, kurios atitinkamai žymi:

1. Vandens įtekėjimo į šulinį sritį.
2. Temperatūros kitimo sritį tarp perforuotų šulinio sričių.
3. Vandens ištekėjimo sritį.

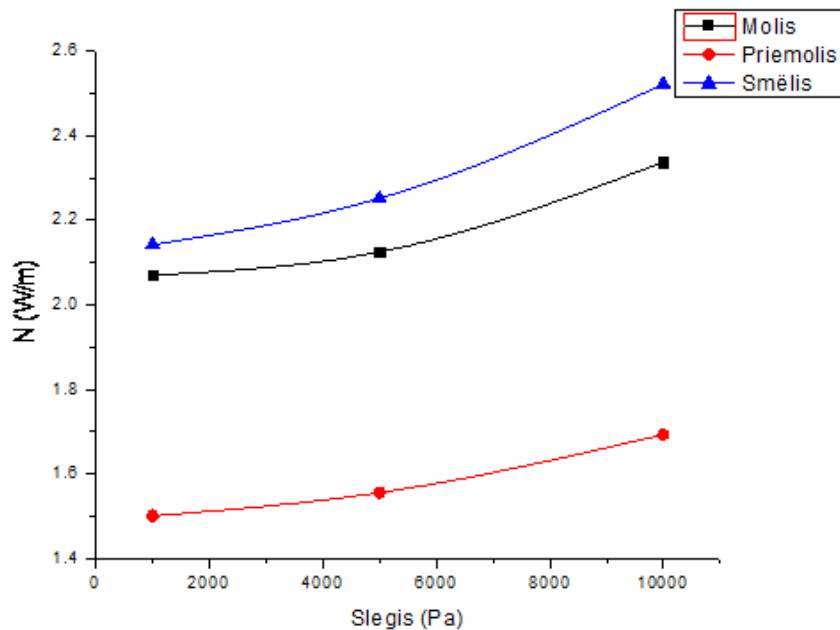
Iš pateiktų grafikų pastebėta, kad esant didesniai atstumui tarp grunto paviršiaus ir viršutinės perforuotos oro šulinio srities, į šulinį patenkančio vandens temperatūra yra aukštesnė. Esant 5m atstumui nuo paviršiaus iki viršutinės perforuotos šulinio srities, į šulinį patenkančio gruntinio vandens temperatūra svyruoja nuo 6⁰C iki 7,5⁰C. Kai atstumas nuo grunto paviršiaus iki perforuotos šulinio srities 2,5m, temperatūros svyruoja intervale nuo 5,6⁰C iki 7,4⁰C. Taip pat stebimas didesnis temperatūrų pokytis, kai atstumas tarp viršutinės perforuotos srities ir grunto yra didesnis – 2,5m ir 5m temperatūros svyruoja atitinkamai nuo 5⁰C iki 5,5⁰C ir nuo 3,8⁰C iki 5,4⁰C. Didesnė temperatūra išteklėjimo srityje ir mažesnis temperatūros kritimas srityje tarp perforuotų oro šulinio dalių stebimas dėl to, kad tolstant viršutinei perforuotai sričiai nuo grunto paviršiaus, žemesnės aplinkos temperatūros daroma įtaka sparčiai mažėja. Taip pat mažėjant atstumui tarp perforuotų grunto sričių, didėja vandens cirkuliacijos greitis. Sumažinus atstumą tarp sričių nuo 12,5m iki 10m, vandens cirkuliacijos greitis padidėjo $1,054 \cdot 10^{-5}$ m/s iki $1,093 \cdot 10^{-5}$ m/s, o tai atitinka 3,7%.

Atlikus šilumos polių su oro šiliniu modeliavimą, kai oro šulinys yra įdiegtas į gruntą tarp polių ir laikoma, kad oro šulinys sudarytas iš dviejų termiškai izoliuotų dviejų perforuotų sričių buvo įvertinta, kad esant 5000 Pa slėgių skirtumui tarp viršutinės ir apatinės perforuotos oro šulinio srities, kolektorių efektyvumas išaugo 6,8 % smėlio gruntui ir apie 4,8 % molio ir priemolio gruntui, lyginant su atveju, kai grunte nevyksta konvekciniai šilumos mainai. Atlikus tyrimą nustatyta, kad didinant slėgio skirtumus tarp perforuotų oro šulinio sričių poliaus paimama galia iš vieno metro kolektoriaus sparčiai didėja, tačiau tuo pačiu didėja ir elektros sąnaudos, reikalingos slėgių skirtumui palaikyti. Dėl šios priežasties slėgių skirtumą didinti daugiau nei 10000 Pa būtų finansiškai nenaudinga.

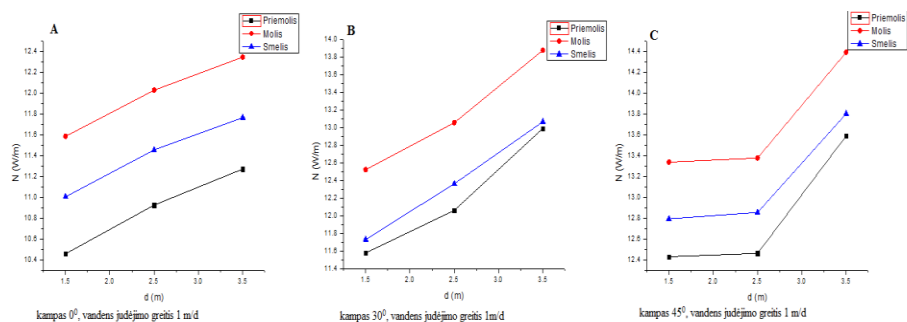


3 pav. Temperatūros kitimo grafikai išilgai oro šulinio, esant atstumui 2,5 m ir 5 m tarp šulinio viršutinės perforuotos sritys ir grunto paviršiaus, A ir C dalyse temperatūrų ties šulinio sienele, B ir D kai atstumas iki šulinio 0,75 m

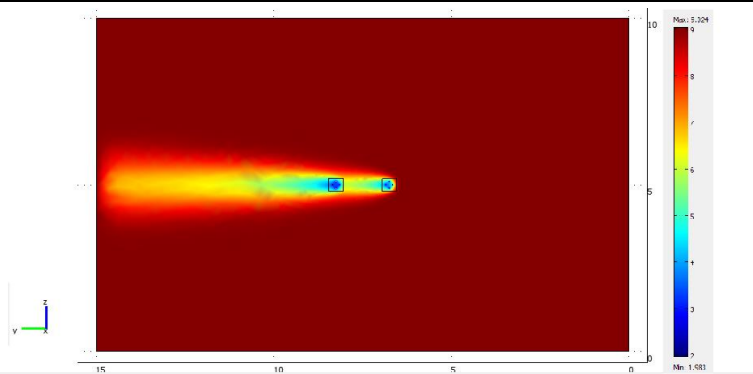
Konvekcinių šilumos mainų vertinimas, esant skirtingiems grunto tipams, bei vandens pritekėjimo kampas pateikiamas 5 paveiksle. Visais analizuotais atvejais, didžiausia paimama galia buvo šilumos polių sistemoje, esančioje molio grunte, mažiausia – priemolio grunte. Didžiausia paimama galia 14,4 W/m pasiekta molio grunte esant 3,5m atstumui tarp polių, kai vandens judėjimo greitis 1m/parą, taip pat esant 450 kampui tarp vandens judėjimo grunte krypties ir linijos, jungiančios polių ašis plokštumoje, statmenoje poliams. Mažiausia galia 10,458 W/m pasiekta priemolio grunte, esant 1,5m atstumui tarp polių, esant 1 m/parą vandens judėjimo greičiui bei 00 kampui tarp linijos jungiančios polių ašis plokštumoje, statmenoje poliams ir vandens judėjimo krypties. Tokiu atveju sistemos efektyvumas yra mažiausias, kadangi gruntinis vanduo, aptekantis antrąjį polių, yra atvėsintas pirmojo poliaus. Šis efektas pateikiamas 6 paveiksle.



4 pav. Šiluminės galios kiekio kitimas skirtinguose gruntuose, atsižvelgiant į slėgio skirtumą oro šulinyje



5 pav. Paimamos galios kiekis vienam kolektoriaus ilgio metrui, esant skirtingiems grunto tipams ir kintant atstumui tarp polių



6 pav. Temperatūros pasiskirstymas plokštumoje, statmenoje polių ašims, gruntiniam vandeniui judant išilgai tiesės, jungiančios polių ašis

Išvados

1. Nustatyta, kad padidėjus atstumui tarp polių nuo 1,5m iki 3,5m, polių šiluminė galia padidėja iki 16 %.
2. Vieno poliaus, atvėsinto ir aptekancio kitą polių, gruntinio vandens įtaka kitam poliui yra nedidelė, kol kampas tarp tiesės, jungiančios polių ašis ir gruntinio vandens tekėjimo krypties, yra didesnis už 45° .
3. Nustatyta, kad oro šulins šilumos polių efektyvumą padidina iki 15%, kai slėgio skirtumas oro šulinyje siekia 10 kPa. Efektyvumas daugiausiai padidėjo dėl oro šulinyje sukeltos priverstinės gruntinio vandens cirkuliacijos, gaunamos smėlio grunte.

Literatūra

1. Smith R. and Linnhoff B. Process Integration using Pinch Technology, paper presented at ATEE Symposium, Energy Management in Industry, Paris, March 31 – April 3, 1987.
2. Sinnathamby G., Gustavsson H., Korkiala-Tanttu L. and Perez Cervera C. Numerical Analysis of Seasonal Heat Storage Systems of Alternative Geothermal Energy Pile Foundations. Journal of Energy Engineering, 2014.
3. Farouki, O.T. Thermal Properties of Soils. CRREL Monograph 81-1; U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Lab: Hanover, New Hampshire, 1981.
4. Kurevija T., Vulin D. and Krapec V. Influence of Undisturbed Ground Temperature and Geothermal Gradient on the Sizing of Borehole Heat Exchangers. World Renewable Energy Congress 2011 – Sweden Geothermal Applications (GA) 8-11 May, 2011, Linköping, Sweden.

NO_x mažinimo, naudojant anglies kalatalizatorius, galimybių analizė

E. Kaliatkienė, K. Buinevičius

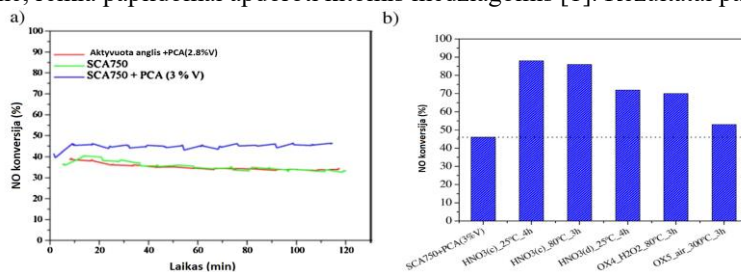
Kauno technologijos universitetas

Deginant kurą, į aplinką išmetami degimo produktai, kuriuose daug įvairių kenksmingų medžiagų, tokių kaip azoto oksidai (NO_x) ir anglies monoksidas (CO). Lietuvoje, kaip ir visoje Europos Sąjungoje, galioja griežti aplinkosauginiai reikalavimai. Mažinamos kurą deginančių įrenginių išmetamų teršalų koncentracijų normos. Todėl teršalų mažinimo būdai, kurie leistų sumažinti išmetamų kenksmingų medžiagų koncentracijas katilų degimo produktuose, labai aktualūs. Vienas iš degimo produktuose esančių teršalų mažinimo būdų yra selektyvus katalitinis metodas. Šis NO_x mažinimo metodas pagrįstas dūmų valymu naudojant katalizines medžiagas. Tačiau efektyvūs katalizatoriai gaminami retų ar brangių metalų pagrindu, todėl yra brangūs ir nėra plačiai naudojami.

Vis plačiau atliekami pigesnių medžiagų pagrindu sukurti katalizatoriai. KTU Šilumos ir atomo energetikos katedroje buvo tiriami vario oksido pagrindu pagaminti katalizatoriai [4-6]. Tyrimų rezultatai parodė, kad daugelis išbandytų katalizatorių, kurie pagaminti iš pigių metalų, mažina CO ir NO_x koncentracijas vandens šildymo katilo degimo produktuose. Išbandytas ir aktyvuotos medžio anglies katalizatorius. Pirminiai rezultatai daug žada – redukcijos efektyvumas siekia 65 %. Medžio anglies katalizatorius taip pat patrauklus dėl savo ekonominių ir ekologinių aspektų.

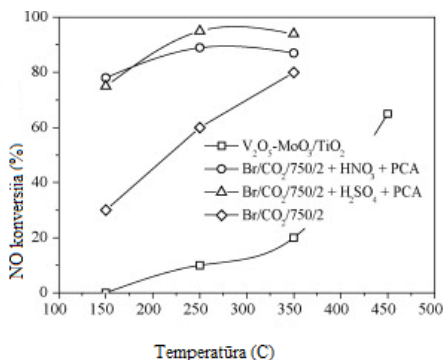
Mokslinės literatūros analizė parodė, kad yra keli būdai naudoti medžio anglis kataliziniui NO mažinimui.

NO mažinimas naudojant aktyvuotą anglį, kartu naudojant NH₃ ir O₂. Procesas vyksta jau esant 150 °C temperatūrai. Šis NO mažinimo būdas yra efektyvus, jeigu naudojant aktyvuotą anglį su vanadžio priedais, dar panaudojamas amoniakas (NH₃) ar vandens garai. Naudojant šį būdą, NO redukcija gali siekti net iki 90 %. Pačios aktyvuotos anglies su vanadžiu, kurio sudėtyje ~ 3 %, be pagalbinių medžiagų, NO redukcija gali siekti nuo 25 iki 45 %. Kad redukcija būtų didesnė, reikia papildomai apdoroti kitomis medžiagomis [1]. Rezultatai pateikti 1 pav.



1 pav. a) Vanadziu padengta aktyvuota anglis; b) katalizatoriai, pagaminti naudojant aktyvuotą anglį [1].

Aktyvuotos anglies briketai. Kitas NO mažinimo būdas, tai aktyvuotos anglies briketų naudojimas. Anglies briketus apdorojus HNO_3 , H_2SO_4 , galimas didelis NO konversijos procentas.



2 pav. NO mažinimo priklausomumas nuo temperatūros [2]. Katalizinių briketų, oksiduotų HNO_3 ir H_2SO_4 , palyginimas su pramoniniu katalizatoriumi $\text{V}_2\text{O}_5\text{-MO}_3/\text{TiO}_2$.

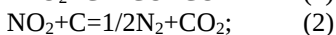
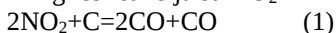
2 pav. pavaizduota, kaip NO konversija padidėja, jei su aktyvuotos anglies briketais, naudosome ir HNO_3 , H_2SO_4 medžiagas (dujų pavidalu) [2]. Jei su aktyvuotos anglies briketais naudosome HNO_3 – konversija gali siekti iki 90 %, prie 275 °C, jei su briketais naudosome oksiduotą H_2SO_4 – konversija pasiekama net iki 95 %, prie 275 °C. Su pramoniniu katalizatoriumi ($\text{V}_2\text{O}_5\text{-MO}_3/\text{TiO}_2$), prie 275 °C konversija siekia apie 18 %, o didžiausią konversijos rezultatą pasiekia prie 450 °C, 65 %.

Anglimi dengti monolitai. Tai puikus NO_x mažinimo būdas, kadangi NO_x konversija gali siekti arti 100 %.

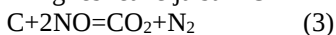
Tyrimai parodė, kad esant 5 % vanadžiui, paveiktam sieros rūgšties, pradiname mišinyje, dar papildomai paduodamos sieros (SO_2) ar garo (H_2O) mišiniui, NO konversija gali pakilti iki 100 %, esant 206° C temperatūrai. Tuo tarpu esant pradiniam katalizatorių mišiniui, kuriame yra 5 % vanadžio, didžiausias konversijos kiekis pasiekiamas 60 %, prie 247° C temperatūros.

NO_x mažinimas naudojant anglį. Analizuojant užsienio literatūrą, kurioje apžvelgti panašūs eksperimentiniai tyrimai, rasta ir kitų anglies ir NO_x reakcijų [4]:

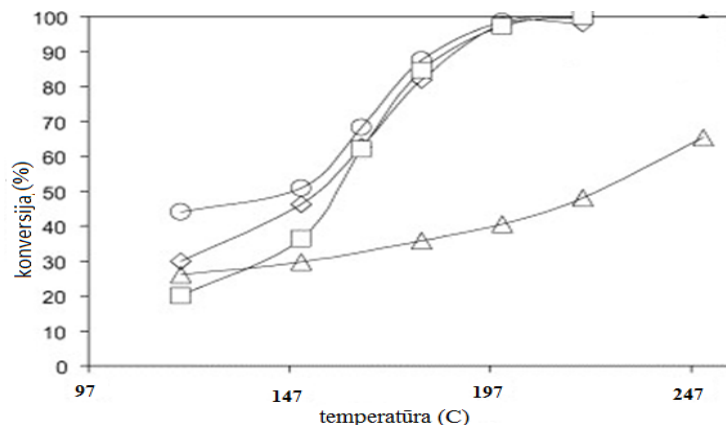
•Anglies reakcija su NO_2



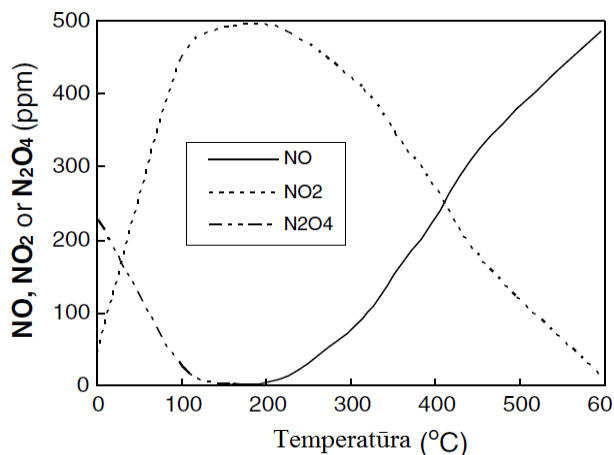
•Anglies reakcija su NO



4 pav. pavaizduota pradinio mišinio, kurio sudėtis yra 500 ppm NO+10% O₂, elgsena prie skirtingų temperatūrų. Esant žemoms temperatūroms, susidaro NO₂ (reakcija su laisvu deguonimi) ir N₂O₄, kur N₂O₄ susidaro dėl NO₂ kondensacijos, kai dvi NO₂ molekulės susijungia į vieną. Didėjant temperatūrai, didėja NO₂. Ties 150 °C pradeda išsiskirti NO, kuris didėjant temperatūrai įsivyrėja mišinyje.

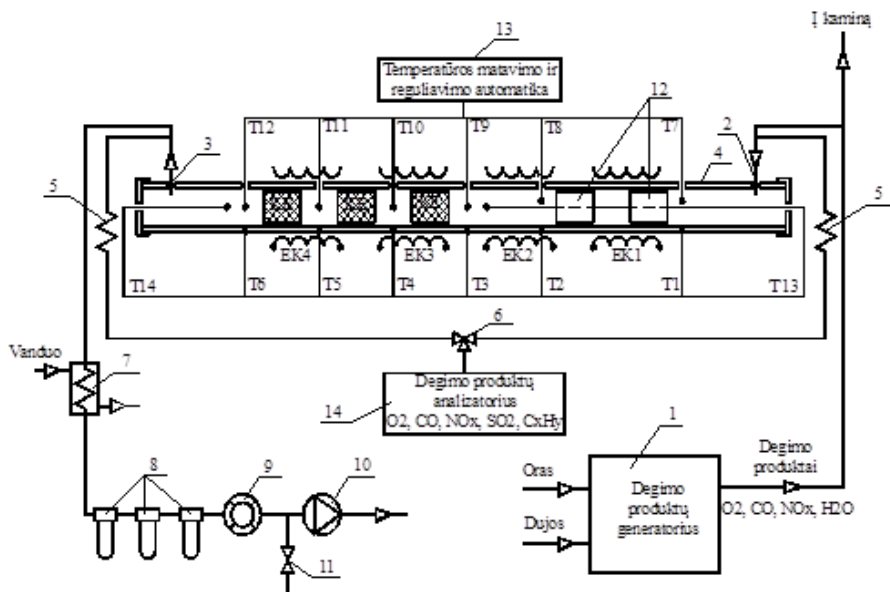


3 pav. NO mažinimo priklausomumas nuo temperatūros [3]. Pradinis į katalizatorių tiekiamų dujų mišinys: 500 ppm NO, 600 ppm NH₃, 3% O₂ ir Ar. (▲) 5 % V/CCM katalizatorius; (○) 5 % V sulfato katalizatorius; (◇) 5 % V sulfato katalizatorius, papildomai paduodama 100 ppm SO₂; (□) 5 % V sulfato katalizatorius, papildomai paduodama 5% garų;



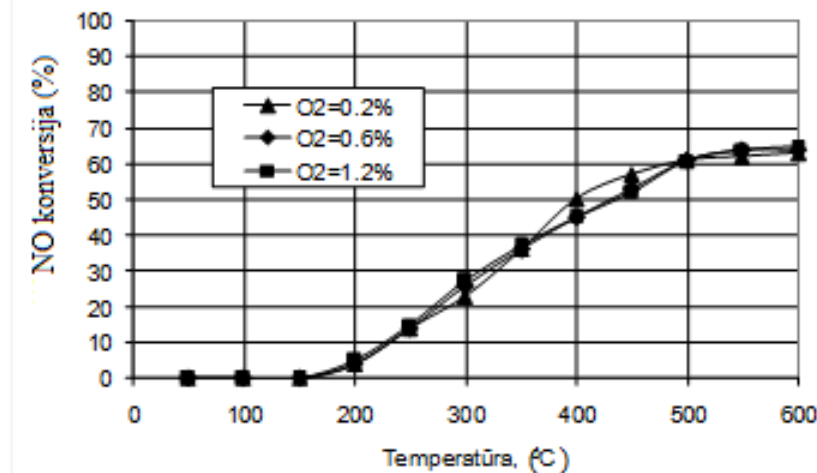
4 pav. NO ir O₂ mišinio ekvilibrinė koncentracija, atsižvelgiant į temperatūrą [4].

Kauno technologijos universiteto eksperimentinis stendas. Kauno technologijos universitete, Šilumos ir atomo energetikos katedroje yra eksperimentinis stendas (5 pav.), kuriame buvo tiriamas katalizatorių (neturinčių tauriųjų metalų) efektyvumas, naudojant realius vandens šildymo katilo degimo produktus. [6] Ankstesnių tyrimų rezultatai parodė, kad daugelis išbandytų katalizatorių, kurie pagaminti iš pigių metalų, efektyviai mažina CO ir NO_x koncentracijas degimo produktuose. Šiame stende buvo išbandytas ir aktyvuotas medžio anglies katalizatorius, kurio veikimas pagrįstas reakcijomis: $O_2 + C \Rightarrow CO + CO_2$ ir $NO + CO \Rightarrow N_2 + CO_2$. Anglis (aktyvuota anglis) yra ekologiška, pigi medžiaga. Todėl ir šio tyrimo idėja – naudojant ekologiškas ir pigias medžiagas išgauti kuo didesnę NO_x redukcijos efektyvumą. Gauti Pirminiai rezultatai daug žadantys – redukcijos efektyvumas siekia 65%.



5 pav. Tyrimų stendo principinė schema [6]. 1 – vandens šildymo katilas; 2 – dūmų įėjimo į bandymų ruožą atvamzdis; 3 – dūmų išėjimo iš bandymų ruožo atvamzdis; 4 – eksperimentinis ruožas; 5 – aušinimo spiralė; 6 – triegis ventilis; 7 – aušintuvas; 8 – filtrai; 9 – dujų skaitiklis; 10 – vakuuminis siurblys; 11 – sklendė; 12 – srauto sumaišymo ir išlyginimo elementai; 13 – temperatūros matavimo ir reguliavimo automatika; 14 – degimo produktų analizatorius; T1 – T14 – termoporų vietos; EK1 – EK4 – elektriniai kaitinimo elementai.

Tyrimų metu gautų rezultatų duomenys – NO_x redukcija, atsižvelgiant į reaktoriaus temperatūros ir deguonies koncentraciją, pavaizduoti 6 pav.



6 pav. Azoto oksidų redukcija aktyvuotos anglies katalizatoriuje. Degimo produktų sudėtis įėjime: CO=4500ppm, NO_x=40ppm, G=2,8l/min [5].

Aktyvuotos anglies katalizatoriuje (6 pav.) deguonies koncentracijos kitimas degimo produktuose neturi akivaizdžios įtakos azoto oksidų redukcijos efektyvumui, kuris siekia 65% ir $T_{50}=360$ °C. Tai daug žadantys rezultatai. Medžio anglies katalizatorius taip pat patrauklus dėl savo ekonominių ir ekologinių aspektų.

Išvados

1. Užsienio eksperimentiniai tyrimai parodė, kad naudojant aktyvuotą anglį + NH₃ ir O₂, prie žemų temperatūrų galime NO sumažinti iki 85 %; naudojant aktyvuotos anglies briketus NO sumažinimas gali siekti ~95 %, jei papildomai naudojamas amoniakas ar sieros rūgštis; naudojant anglimi dengtus monolitus NO galima visai panaikinti, jei papildomai tiekiamos SO₂ dujos, deguonis, garas.
2. KTU pasiūlyta kita NO_x mažinimo priemonė, kuri yra ekologiškesnė ir pigesnė. Atlikus pirminius bandymus nustatyta: a) NO_x redukcija nuo deguonies koncentracijos degimo produktuose nepriklauso, b) NO_x redukcija prie 600 °C sudaro apie 65 %. Eksperimentiniame stende toliau bus atliekami išsamesni tyrimai.

Literatūra

1. Mari'a Jesu's La'zaro, Sonia Ascaso, Sara Pe'rez-Rodri'guez, Juan Carlos Caldero'n, Mari'a Elena Ga'lvez, Mari'a Jesu's Nieto, Rafael Moliner, Alicia Boyano, David Sebastia'n, Cinthia Alegre, Laura Calvillo, Veronica Celorrio. Carbon-based catalysts: Synthesis and applications. International Symposium on Air & Water Pollution Abatement Catalysis (AWPAC) – Catalysis for renewable energy. 2015.
2. M.E. Gilvez, A. Boyano, R. Moliner, M.J. Lizaro. Low-cost carbon-based briquettes for the reduction of NO emissions: Optimal preparation procedure and influence in operating conditions. Instituto de Carboquímica (CSIC), Miguel de Luesma Casti'n, 4, 50018 Zaragoza, Spain. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 88 (2010) 80–90
3. E. Garcí'a-Bordejé', J.L. Pinilla, M.J. La'zaro, R. Moliner. NH₃-SCR of NO at low temperatures over sulphated vanadia on carboncoated monoliths: Effect of H₂O and SO₂ traces in the gas feed. Instituto de Carboquímica (CSIC), Miguel Luesma Casta'n 4, 50015 Zaragoza, Spain. 12 May 2006.
4. B.R. Stanmore, V. Tschamber, J.-F. Brilhac. Oxidation of carbon by NO_x, with particular reference to NO₂ and N₂O. Laboratoire Gestion des Risques et Environnement, Université de Haute Alsace, 25 rue Chemnitz, 68200 Mulhouse, France. 21 May 2007.
5. R. Melkūnas, K. Buinevičius. Deguonies įtaka katalizinei azoto oksidų redukcijai. Konferencijos Šilumos energetika ir technologijos 2008 medžiaga, Kauno technologijos universitetas, sausio 31 – vasario 1, Kaunas.
6. R. Melkūnas, E. Puida, Katalizatorių tyrimų standas, Konferencijos Šilumos energetika ir technologijos 2007 medžiaga, Kauno technologijos universitetas, vasario 1 – 2, Kaunas.

Analysis of NO_x conversion using carbon catalyst

Summary

In this article scientific literature dealing with selective catalytic methods are reviewed. Experiments, and their results are shown here. Kaunas University of Technology, Thermal and Nuclear Energy Department owns an experimental device in which experiments based on the selective catalytic methods are provided. One of the experiments was NO_x reduction using charcoal. Catalysis using charcoal is alternative because of its economic and ecological aspects. Obtained initial experiment results are presented in this article. Preliminary results showed 65 % of NO_x reduction efficiency using charcoal as a catalytic material.

Biodujų ir biodegalų pramonės kūrimo Lietuvoje aspektai

Juozas Savickas, Vladislavas Katinas, Marijona Tamašauskienė
Lietuvos energetikos institutas

Šiame straipsnyje atlikta biodujų ir biodegalų gamybos pramonės kūrimo šalyje analizė, kuri gali būti naudinga darant ilgalaikes šių degalų plėtros prognozes. Tai būtina įvertinti todėl, kad prognozės pasitvirtinta tik esant tam tikroms stabilioms verslo sąlygoms, kurios analizuojamuoju laikotarpiu ne tik mūsų šalyje, bet ir daugelyje ES šalių nuolat kito ir buvo koreguojamos, kas turėjo neigiamos įtakos biodegalų pramonės kūrimo stabilumui ir sukėlė nemažai problemų gamybos srityje bei finansinių nuostolių verslui.

Biodujų pramonės atsiradimą Lietuvoje sąlygojo nuolat griežtėjantys aplinkosauginiai ES direktyvų reikalavimai. Kadangi didžiausiais aplinkos teršėjais šalyje tuo metu buvo kiaulininkystės kompleksuose susidarantys dideli sрутų (organinių nuotekų) bei miestų nuotekų kiekiai, buvo nuspręsta pasinaudoti šių atliekų efektyvaus nukenksminimo metodais – anaerobinio apdorojimo technologijų panaudojimu. Buvo įvertintas atsinaujinančių energijos išteklių techninis potencialas, klimato atšilimą skatinančių dujų emisijos mažinimo galimybės, paviršinių ir gruntinių vandens išteklių teršimas organinėmis atliekomis. Ekonominiu požiūriu naudingų rezultatų pasiekta jau 1994 m. kai įmaišant vietoje pagamintas biodujas į gamtines dujas, jos buvo pradėtos deginti įmonės dujų katilinėje. Praktiniai šių darbų rezultatai, jų analizė bei apibendrinančios išvados buvo skleidžiamos šalies ir už jos ribų vykusiuose renginiuose [1].

Biodujų gamybos įmonėms steigti reikėjo palyginti daug pradinių investicijų, tačiau susidarius palankioms ES direktyvų sąlygoms bei pasinaudojus finansinėmis subsidijomis, gamyba iš žemės ūkio ir maisto pramonės organinių atliekų ir miestų nuotekų dumblo 2003 m. išaugo 25 % ir siekė 3,9 mln. m³ biodujų [2]. Energetine verte šis kiekis atitiko 1,8 tūkst. t.n.ekv. Katilinėse buvo sudeginta 1,5 mln. m³ biodujų, dar 0,5 mln. m³ sunaudota žemės ūkyje ir 1,9 mln. m³ – prekybos ir paslaugų sektoriuose. Veikė 6 biodujų jėgainės, perdirbančios miestų nuotekų dumblą, maisto pramonės atliekas ir gyvulių mėšlą. Dviejose jėgainėse kartu su mėšlu perdirbamos maisto pramonės įmonių atliekos. Visos jėgainės galėjo perdirbti apie 350 tūkst. t. organinių atliekų per metus. Bendra biodujų jėgainių energetinė galia sudarė 16 MW. Šiuo metu, dėka visos eilės biodujų gamybą skatinančių dokumentų, visų šalyje įrengtų biodujų gamybos jėgainių instaliuota galia sudaro: šiluminės galios – 9,481 MW_{šil.} bei elektrinės – 37,297 MW_{el.} [3].

Pasak biodujų gamintojų, „Lietuvoje biodujų gamybai iš viso būtų galima įgyvendinti mažiausiai 200 projektų žemės ūkio, komunalinių paslaugų ir pramonės sektoriuose, kurių bendra elektrinė galia siektų 160 MW – tai leistų pagaminti apie 10 % visos Lietuvoje sunaudojamos elektros energijos“ [4]. Kartu būtų pagamina-

mas panašus kiekis šiluminės energijos, kuri būtų pirmiausiai sunaudojama saaviems technologiniams poreikiams. Beje, labai svarbu pažymėti, kad pagrindinis biodujų jėginių panaudojimo privalumas yra aplinkos apsauga, po to, trumpinti investicijų atsipirkimo laiką, vertinant energetiniu, agrokultūriniu bei socialiniu požiūriais. Pastaruoju metu pasaulinėje praktikoje smarkiai plečiasi biodujų vartojimas degalais transporte bei jų tiekimas į gamtinių dujų tinklus. Tačiau mūsų šalyje, nepaisant išaugusio pagaminamų biodujų kiekio, jo vis tiek nepakanka, kad ekonomiškai apsimokėtų, išvalius nuo pašalinių priemaišų, skatinti jų praktinį panaudojimą biodegalams transporte ar (ir) tiekti į gamtinių dujų tinklus. Be to, Lietuvoje nepavyksta suintensyvinti mažos talpos (iki 20 m³ tūrio) bioreaktorių panaudojimo smulkiuose ūkiuose, kurie galėtų papildomai apsirūpinti šilumine energija – teikiama parama biodujų gamybai skirta stambiems ūkiams, kurie turi galimybę įvykdyti paramos gavėjo reikalaujamas sąlygas.

Biodegalų (biodyzelino ir bioetanolio) gamybos pramonė Lietuvoje, skirtingai nei biodujų, buvo sukurta ir plėtojosi pakankamai sparčiai. Sėkmingai pasinaudojant ES subsidijomis Europos Parlamento ir Tarybos Biodegalų Direktyvos 2003/30/EK bei vėlesnės – 2009/28/EK įpareigojimams vykdyti, verslininkai ėmė milijonines paskolas bankuose, ir taip per palyginti trumpą laiką šalyje buvo pastatytos kelios įvairaus gamybinio pajėgumo biodegalų gamybos įmonės. Kaip ir tikėtasi, buvo sukurtos dešimtys papildomų darbo vietų. Šilutėje pradėjo veikti dehidraduoto bioetanolio gamykla „Biofuture“, Mažeikių rajone – biodyzelino gamykla „Rapsoila“. Per kelerius metus biodegalų gamintojai, sėkmingai pasinaudodami ES parama, investuodami milijonus didino biodegalų gamybos pajėgumus. Tikėdami palankiomis ES prognozėmis, Lietuvos verslininkai sparčiai vystė biodegalų gamybos pramonę, ir netrukus ekologiškesnių degalų jau galėjo pagaminti dvigubai daugiau negu reikalavo ES direktyvos. Išnaudodami vos apie 60 % gamybinių pajėgumų, vietoj reikalaujamų 5 %, galėjo pagaminti daugiau nei 10 % „žaliųjų“ degalų. Didžiausios šalies biodyzelino gamybos įmonės – UAB „Mestilla“ ir UAB „Vaizga“ kasmet buvo pajėgios pagaminti apie 140 tūkst. tonų biodyzelino, o bioetanolį gaminančių įmonių – „Biofuture“ ir „Kurana“ metinis projektinis pajėgumas siekė apie 60 tūkst. tonų dehidraduoto bioetanolio. Be šių įmonių, Lietuvoje veikė dar 5-6 įmonės, tiekiančios rapsų aliejų biodegalų gamybai. Be to, biodegalų pramonės plėtra turėjo teigiamos reikšmės papildomų darbo vietų sukūrimui ir šalies kaime, nes dirvonuojančių žemės plotų sąskaita buvo gerokai išplėsti rapsų ir grūdinių kultūrų, skirtų biodegalams gaminti, pasėlių plotai, kas atitinkamai sąlygojo biodegalų gamybos pramonės veiklą.

Tačiau keičiantis ES politikai, šalies biodegalų pramonė, patirdama didžiulius finansinius nuostolius, iš dalies keitė veiklos pobūdį arba bankrutavo. ES klimato kaitos politikos strategijoje įsipareigota, jau iki 2020-ųjų šiltnamio efektą sukuriančių dujų emisiją sumažinti 30 %, iki 2030-ųjų – 40 % ir iki 2040-ųjų – 60 %. Sumažinus biodegalų gamybos apimtis, šiems tikslams pasiekti ir išvengti finansinių

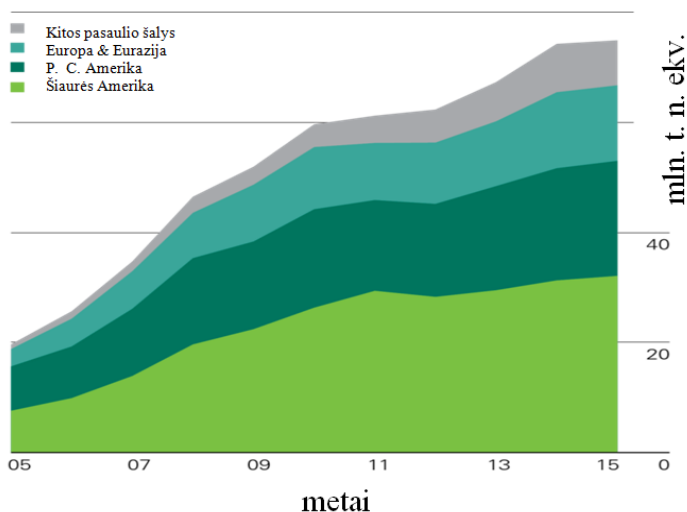
nuostolių, reikia ieškoti kitų priemonių. Esamomis sąlygomis, pirmos kartos biodegalų gamybos pramonė išsėmė racionalias galimybes, ir jos plėtra iki 2020 m. neturi perspektyvų.

1 lentelė. Biodegalų gamybos dinamika (tūkst. t.) [5]

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014*
Biodyzelinas	10,3	24,8	64,6	104,7	89,2	79,9	106,7	117,3	119,7
Bioetanolis	14,3	15,0	17,1	24,5	39,3	20,9	24,3	23,8	15,1

* – analogiški biodegalų kiekiai buvo pagaminti ir 2015 metais

Nepaisant to, kad biodyzelinui gaminti tinkama žaliava gali būti maisto gamybos technologijoje panaudotas augalinis aliejus, pradėjus Lietuvoje gaminti biodyzeliną, jis išimtinai buvo gaminamas iš atsinaujinančių energijos išteklių – praktiškai iš rapsų aliejaus. Buvo teigiama, kad taip pagaminto biodyzelino – riebalų rūgščių metilo esterio (RRME) savybės visiškai atitinka mineralinio dyzelino savybes, ir net kai kuriais požiūriais biodyzelinas yra ekologiškesnis už įprastinį dyzeliną. Be to, literatūros šaltiniuose skleidžiama informacija apie biodegalų privalumus, skatino diegti ir plėsti biodegalų gamybą. Iš pateikto pav. informacijos [6] matosi, kad biodegalų gamyba per pastaruosius 5 metus padidėjo ne procentų dalimis ar procentais, bet beveik 4 kartus. Ypač sparčiai biodegalai plito JAV.

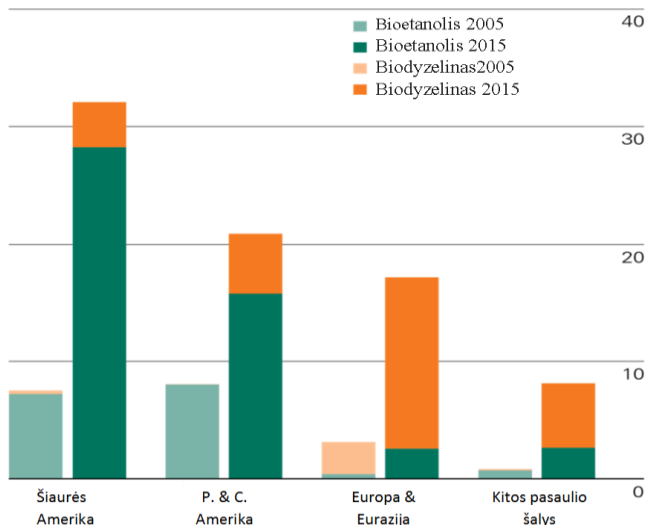


1 pav. Biodegalų gamyba pasaulio regionuose mln. t. n. ekv.

Tačiau apribojus pirmos kartos biodyzelino gamybą, kadangi ir EK pakeitė nuostatas biodegalų gamybos požiūriu – pagal EP ir ET ILUC direktyvą (ES) 2015/1513 (dėl netiesioginio žemės paskirties keitimo), pagal kurią iš planuotų 10 % pirmos kartos biodegalai neturi viršyti 7 %, o likusi dalis (3 %) turės būti kompensuota antros kartos biodegalų sąskaita.

Vertinant daugelio Vakarų Europos šalių ir JAV sukaupą biodegalų gamybos ir vartojimo patirtį, kur parengti ir naudojami biodegalų standartai, jų gamybos ir naudojimo dokumentacija, reikia ir mūsų šalyje visapusiškai įvertinti antros kartos biodegalų gamybos galimybes bei tikslumą. Antros kartos biodegalai – tai sintetiniai degalai iš biomasės (angl. Biomass to Liquid). Skirtingai nuo pirmos kartos biodegalų, jie gaminami ne iš maistui skirtų produktų, todėl galima tikėtis, kad neturės tiesioginės įtakos maisto produktų kainoms. Viena iš eksperimentinių šių degalų gamybos įmonių nuo 1998 m. veikia Vokietijoje. Antros kartos biodyzelino techninis potencialas yra geroai didesnis nei pirmos kartos, nes jis gaminamas iš visos biomasės, o ne tik iš pvz. rapsų sėklų aliejaus. 2012 m. Suomijoje patentuota nauja biodegalų gamybos technologija NEXBTL (angl. Next Generation Biomass to Liquid), pasak „Neste“ informacijos [7], ji skirta kol kas vieninteliam pasaulyje dyzelinui iš biomasės gaminti. NEXBTL dyzelinas pasižymi unikalia molekuline sandara – jis gaminamas hidrinant augalinį aliejų ar gyvulinės kilmės riebalus. O Lietuva tapo pirmąja užsienio rinka, kurioje pradėtas pardavinėti visiems metų laikams skirtas, ir ne mažiau 15 proc. NEXBTL turintis dyzelinas.

Tačiau analizuojant literatūros šaltinių duomenis (2 pav.) nustatyta, kad JAV labiau gaminamas bioetanolis, o Europos šalyse – biodyzelinas [7].



2 pav. Biodegalų gamybos dinamika 2005 ir 2015 m. (mln. t. n. ekv.) [8].

Šį reiškinį reiktų panagrinėti vertinant šiltnamio efektą sukeliančių išmetamųjų dujų kiekį viso degalų būvio ciklo metu. Gal iš tikrųjų transporto priemonės, naudojančios biodyzeliną, į aplinką išmeta daugiau kenksmingų teršalų lyginant su bioetanoliu? Galimai tai sąlygoja ketinimus uždrausti dyzelinius degalus vartojančių automobilių eismą į kai kurių Europos miestų centrus.

Didėjant konkurencijai degalų rinkoje, pasigirsta teiginių, kad vertinant visą gyvavimo ciklą, biodegalais varomi automobiliai aplinką tausoja labiau nei elektros transportas. Be to, biodegalus gaminant iš atliekų ir nereikalingų liekanų, ne tik automobilio išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis sumažėja iki 90 % palyginti su įprastiniu dyzelinu, bet papildomai naudingai utilizuojamos atliekos.

Teigiama, kad naujos kartos dyzelinas, kurio sudėtyje yra ne mažiau 15 % siekianti dalis „Neste“ biodyzelino (senasis pavadinimas – NEXBTL), taip pat padeda tausoti automobilio detales, lemia iki 5 % mažesnes degalų sąnaudas ir iki 4 % didesnę automobilio galią [7].

Išvados

1. Biodujų gamybos iš organinių atliekų Lietuvoje pramonės atsiradimas ir plėtra vyko glaudžiai bendradarbiaujant mokslo ir gamybos institucijoms, todėl skirtingai nuo biodegalų pramonės, biodujų gamybos srityje pasiekta pakanamai gerų rezultatų, kurie turi teigiamos įtakos visais aspektais: tiek aplinkosaugos, tiek techninėse-ekonominėse, tiek agrokultūrinėse bei socialinėse srityse.
2. Biodegalų pramonės kūrimo šalyje spartą ir apimtį sąlygojo ES teisiniai norminiai aktai, įpareigojantys, kad 2010 m. biodegalai sudarytų ne mažiau 5,75 % bendro degalų suvartojimo. Ši užduotis, pasinaudojant ES teikiamomis subsidijomis, buvo nesunkiai įvykdyta. Todėl strateginiuose dokumentuose buvo numatyta toliau didinti biodegalų gamybą atitinkamai: 2020 m. iki 15 %, o 2025 iki 20 % bendro degalų suvartojimo transporte. Tačiau praktinė patirtis parodė, kad biodegalų gamybą teko apriboti iki 10 %, iš kurių pirmos kartos biodegalai sudarytų 7 %, o likusius 3 % turės sudaryti antros kartos biodegalai. Vertinant pirmos kartos biodegalų gamybos aspektus, Lietuvai tai yra naujas iššūkis, kurį, prieš įgyvendinant, būtina daugeliu aspektų įvertinti ir iširti.

Literatūra

1. Savickas J., Sargūnas G. First Lithuanian Biogas Plant: Experience and Problems // Abstracts of 9th European Bioenergy Conference and 1 st European Energy from Biomass Technology Exhibition, 24 – 27 June 1996.- Copenhagen, Denmark, 1996. – P.289.

2. Kuro ir energijos balansas 2003 m. - Statistikos departamentas prie Lietuvos Respublikos vyriausybės. Vilnius, 2004. 50 psl.
3. Interneto prieiga - <http://www.avei.lt/lt/component/energy/?task=map>.
4. Interneto prieiga - <http://lzinios.lt/lzinios/ekonomika/atidaryta-pirmoji-lietuviska-biodujų-jegainė/203590>
5. Interneto prieiga - <https://zum.lrv.lt/lt/veiklos-sritys/zemes-ir-maisto-ukis/bioenergetika/biodegalu-gamyba-lietuvoje>.
6. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy/biofuels-production.html>
7. <https://www.neste.lt/lt/content/degal%C5%B3-kokyb%C4%97-k%C4%85-irkod%C4%97l-kritikuoja-automobili%C5%B3-gamintojai>
8. <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/renewable-energy/biofuels-production.html>

Biogas and biofuels industry development aspects in Lithuania

Summary

After the assessment of experience of biogas industry development in Lithuania, it can be concluded that biogas production technologies were introduced rather efficiently, because this action was realized in collaboration and supporting with local scientists and in obedience to international experience. It can be concluded that there is no lack of experience in the biogas production industry in our country.

Concerning development of liquid biofuels production industry in Lithuania it will be observed that for the sake of strategical mistakes, to be obliged to retreat the production of first generation biofuels makes very negative influence on food industry. Consequently, in the future the second generation biofuel technologies must be introduced more actively.

Saulės šilumos pritekėjimų į pastatus tyrimas

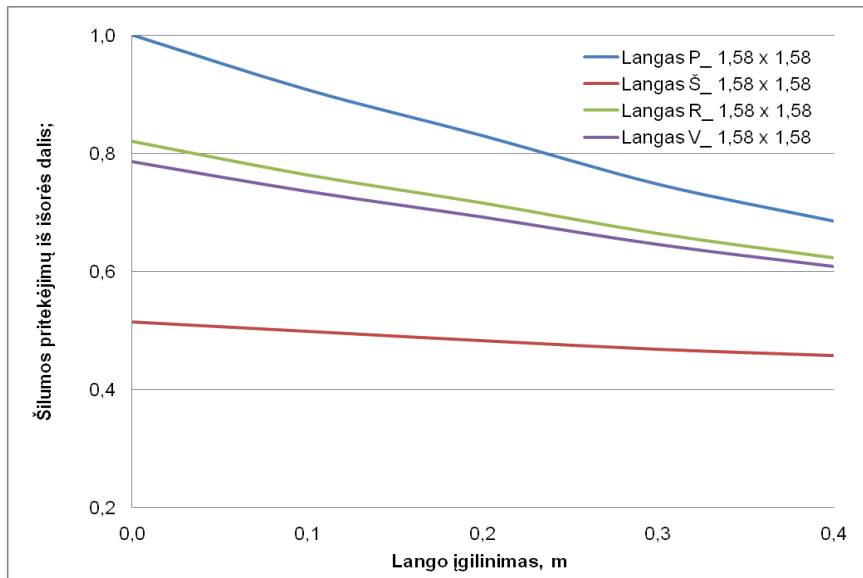
Eugenijus Perednis, Mantas Marčiukaitis
Lietuvos energetikos institutas

Racionaliai suprojektuotame pastate saulė žiemą gali papildomai šildyti, o vasarą jame nereikia eikvoti energijos vėsinimui. Į pastato energinį efektyvumą reikia žiūrėti kompleksiskai, skaičiuoti ne tik energijos praradimus, bet ir pritekėjimus. Nuo 2016-ųjų metų visi naujai statomi pastatai privalo būti ne žemesnės kaip A energinio naudingumo klasės. Tai reiškia, kad jų šildymui ir vėsinimui turi būti naudojamas minimalus energijos kiekis. Tam tikslui pasiekti pastatas turi būti suprojektuotas ir pastatytas taip, kad jame reiktų kuo mažiau energijos, naudojama energija turi būti išgaunama iš atsinaujinančių energijos išteklių. Todėl aukštai energinei klasei labai svarbi yra pastatų orientacija pasaulio šalių atžvilgiu bei skaidrių atitvarų parametrai, kad būtų galima maksimaliai išnaudoti saulės energiją.

Mūsų tyrimų tikslas apskaičiuoti, kokią įtaką saulės energijos pritekėjimams į pastatą turi pastato skaidrių atitvarų įgilinimas nuo sienos išorinės plokštumos į pastato vidų. Tyrimams buvo pasirinkti tokie įgilinimo matmenys: 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 m ir, žinoma, be įgilinimo t. y., langas patalpintas sienos plokštumoje. Atliekant tyrimus nustatėme, kad daugiausia šviesos energijos patenka į pastatą pro langą, kuris yra orientuotas pietų kryptimi. Pro tą langą patenkanti šviesos energija buvo priimta kaip pagrindas, su kuriuo buvo lyginami kiti gauti rezultatai. Atlikta gaminamų stiklo paketų terminių ir optinių savybių apžvalga parodė, kad paketui, turinčiam šilumos perdavimo koeficiento U reikšmę, lygią $1 \text{ W/m}^2\text{K}$, visuminis saulės energijos pralaidumo koeficientas g siekia apie 0,5.

Saulės energijos pritekėjimai skaičiuojami įvertinant pastato skaidrių išorės atitvarų – langų ir stoglangių – stiklo plotus, stiklo paviršiaus įgilinimą nuo sienos paviršiaus, stiklo paketo saulės spindulių pralaidumo charakteristikas, pastato orientaciją pasaulio šalių atžvilgiu, saulės spindulių kritimo kampą, aplinkinio užstatymo ar augmenijos ir paties pastato dalių bei atsikišusių elementų – balkonų, sienučių – metamus šešėlius. Saulės energijos pritekėjimas skaičiuojamas visiems metų laikams, visoms metų dienoms, įvertinant tipinius tos vietovės klimato ir saulėtų dienų ilgamečio stebėjimo duomenis.

Gauti skaičiavimo rezultatai rodo, kad esant vienodiems lango plotams, kuo lango geometrija artimesnė kvadrato formai, tuo mažesnis lango perimetras ir tuo didesnis lango skaidrios dalies plotas. Pateiktų langų, orientuotų į pietinę pusę ir su dviem skirtingais visuminio saulės energijos pralaidumo (g) reikšmėmis skaičiavimo rezultatų lyginimas parodė panašius dėsningumus (1 pav.).



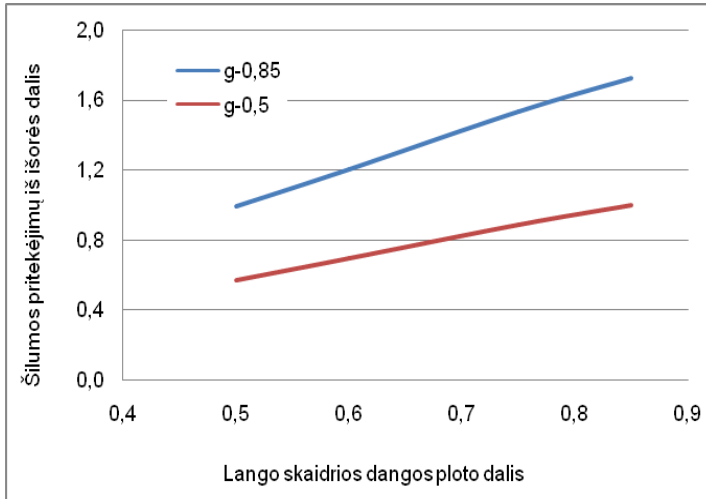
1 pav. Šilumos pritekėjimų per pastato langus, esančius skirtingose pasaulio šalių kryptyse šildymo laikotarpiu, kai visuminis saulės energijos pralaidumo koeficientas $g=0.5$, priklausomumas nuo lango įgilinimo sienoje

Daugiausia šilumos į patalpas patenka per langus iš pietų pusės. Lango įgilinimas sienoje gerokai mažina saulės energijos kiekį, ir esant maksimaliai įgilinimo reikšmei 0,4 m, energijos pokytis siekia 32 %. Kitokia padėtis šiaurinėje sienoje: energijos patekimas per langus sumažėjo 2 kartus lyginant su pietų puse, o energijos pokytis langus įgilinus 0,4 m, siekia vos 6 %.

Rytų ir vakarų pusėse energijos kitimo dėsniumai panašūs. Kai langai įrengti sienos plokštumoje rytų pusėje, energijos patekimas į patalpas 3 % didesnis, nei vakarų, o energijos sumažėjimas esant 0,4 m lango įgilinimui, siekia apie 19 %.

Vienas iš būdų, siekiant didesnio saulės energijos patekimo į patalpas, yra visuminio saulės energijos pralaidumo didinimas. Jis pasiekiamas mažinant stiklų skaičių ir saulės spindulių atspindį. Tyrimams naudojome tokią pat langų geometrinę gamą, o saulės energijos pralaidumo koeficiento vertė siekė 0,85.

Viso lango saulės šilumos ir šviesos pralaidumas daugiausiai priklauso nuo įstatiklinimo charakteristikų, jų įtaka pastato energijos sąnaudoms susijusi su pastato langų orientacija pasaulio šalių atžvilgiu, taip pat ir nuo lango skaidrios dalies ploto. Pasirenkant šilumai nelaidžius, žemomis šilumos laidumo reikšmėmis langus, susiduriama su kita problema – mažėja tokių langų visuminis saulės energijos pralaidumas.



2 pav. Šilumos pritekėjimų per pastato langus šildymo laikotarpiu, esant skirtingiems visuminiams saulės energijos pralaidumo koeficientams (g), priklausomumas nuo lango skaidrios dangos ploto dalies

Šildymo laikotarpiu pateikti skaičiavimo duomenys rodo (2 pav.) šilumos pritekėjimų per pastato langus padidėjimą apie 43 %, kai lango skaidrios dangos dalies plotas ir kai visuminiai saulės energijos pralaidumo koeficientai kinta nuo 0,5 iki 0,85.

Naudodami išorinę apsaugą nuo saulės, išvengiame patalpose šiltnamio efekto, komfortiškas patalpų mikroklimatas turi teigiamos įtakos patalpose esantiems žmonėms. Be to, visi išoriniai langų ir fasadų barjerai kainuoja pigiau nei saulės kontrolės stiklai ar panašios priemonės. Svarbu, kad jos būtų nepamirštos suprojektuoti. Šiuolaikinė energiškai efektyvaus pastato koncepcija praktiškai neišsivaizduojama be išorinių apsaugos nuo saulės spindulių sistemų. Nors ant eksploatuojamų pastatų žaliuzės sumontuoti įmanoma, tačiau, kai sistema integruota į fasado konstrukciją, ir veikia, ir atrodo daug efektyviau. Pagrindinė žaliuzių funkcija ir privalumas – efektyvus šviesos srauto reguliavimas. Žaliuzės yra kompaktiškos, neapsunkina interjero ir neužima daug erdvės, o svarbiausia – nesugeria kvapų, dulkių ir purvo.

Stacionarios žaliuzės neturi manevringumo savybių, bet jų įrengimo kaina yra gerokai mažesnė negu mechaninių. Taip pat, stacionarios žaliuzės išsprendžia patalpų perkaitimo problemą vasarą, netrukdo žiemos metu saulei sušildyti pastatą, o tinkamai suprojektuotos, kartu yra ir labai gražus fasado apdailos elementas. Lietuvoje dažnai naudojamam vidinėje lango pusėje esančios žaliuzės yra visiškai neefektyvios kovojant su perkaitimo problemomis, nes saulės spindulių šiluma jau būna perėjusi pro langą ir yra sudaromas šiltnamio efektas.

Išvados

1. Į pastato energinį efektyvumą reikia žiūrėti kompleksiskai, skaičiuoti ne tik energijos praradimus, bet ir pritekėjimus.
2. Langų įgilinimas pietų sienoje gerokai mažina saulės energijos kiekį, ir esant maksimaliai įgilinimo reikšmei (0,4 m), energijos pokytis siekia 32 %. Kitaip padėtis šiaurinėje sienoje – čia energijos patekimas per langus sumažėja 2 kartus lyginant su pietų puse, o energijos pokytis langus įgilinus 0,4 m, siekia vos 6 %.
3. Naudojant išorinę apsaugą nuo saulės, pasiektas patalpų komfortiškas mikroklimatas turi teigiamos įtakos patalpose esantiems žmonėms, išvengiama patalpose šiltnamio efekto, ir svarbu pažymėti, kad visi išoriniai langų ir fasadų barjerai kainuoja pigiau nei saulės kontrolės stiklai ar panašios priemonės.

Literatūra

1. Statybos techninis reglamentas STR 2.01.02:2016 „Pastatų energinio naudingumo projektavimas ir sertifikavimas“ patvirtintas LR aplinkos ministro 2016 m. lapkričio 11 d. Nr. D1-754, (TAR, 2016-12-01, Nr. 27896)
2. LST EN ISO 10077-1:2006 „Šiluminės langų, durų ir langinių charakteristikos. Šilumos perdavimo koeficiento skaičiavimas. 1 dalis. Bendrieji dalykai (ISO 10077-1:2006)“;

Investigation of solar heat inflow from exterior for the buildings

Summary

In this article the amount of influx of solar thermal energy into a building through windows during a heating season was investigated. The following values were estimated: the value of thermal transmittance coefficient of windows, the value of total solar energy transfer coefficient of glazed areas, the value of air penetration of a respective type of windows and the sunken seat of windows from the wall of outer plane.

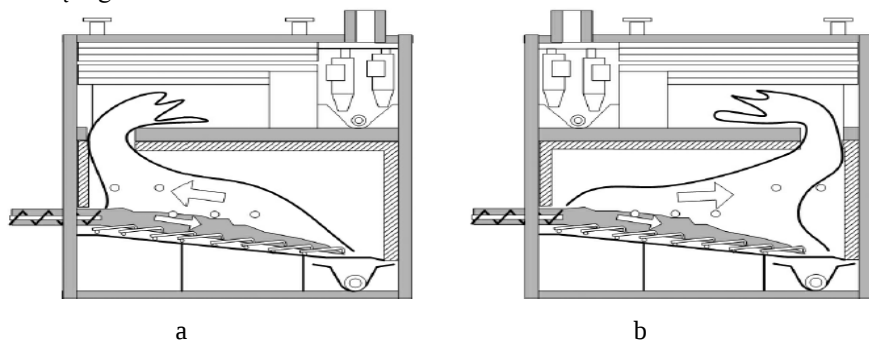
Šiaudų granulėmis kūrenamo pramoninio garo katilo anglies monoksido išmetimų tyrimas

Kęstutis Buinevičius, Gediminas Kabišius
Kauno technologijos universitetas

Šiaudai yra kurui tinkama, plačiai prieinama žemės ūkio žaliava (dažnai atlieka), šilumingumu nenusileidžianti smulkintai medienai. Jų kaina taip pat yra konkurencinga, dėl savo žemės ūkio atliekų prigimties[1]. Šiaudai deginimui gali būti naudojami susukti į rulonus, presuoti arba granuliuoti. Prieš deginimą, šiaudus reikia išskleisti ir susmulkinti. Šiaudų granulės yra lengvai pervežamos ir nesudėtingai transportuojamos tiek pneumo, tiek sraigtiniais transporteriais. Granuliuotų šiaudų tankis yra kelis kartus didesnis nei rulonų, todėl reikia žymiai mažesnės kuro saugyklos. Tačiau tiek smulkintų, tiek granuliuotų šiaudų deginimas yra sudėtingas dėl problemų, susijusių su šiaudų sudėtimi [2–5]:

- žemos pelenų lydymosi temperatūros;
- neefektyvus degimo ir didesnių teršalų išmetimų;
- katilo šildomųjų paviršių užteršimo;
- korozinio aktyvumo.

Kietam kurui deginti skirtų pakurų yra įvairiausių konstrukcijų [6]. Dažniausiai pasitaikantys mažų galių ardyninių pakurų konstrukciniai principai pavaizduoti 1 pav. Drėgnam kurui dažnai taikomas priešsrovinis kuro ir liepsnos srautų organizavimas, kad grįžtantis liepsnos srautas pradžiovintų šviežią, į pakurą patekusį drėgną, kurą. Tuo tarpu sausam kurui dažniau taikomas pasrovinis kuro ir liepsnos srautų organizavimas.

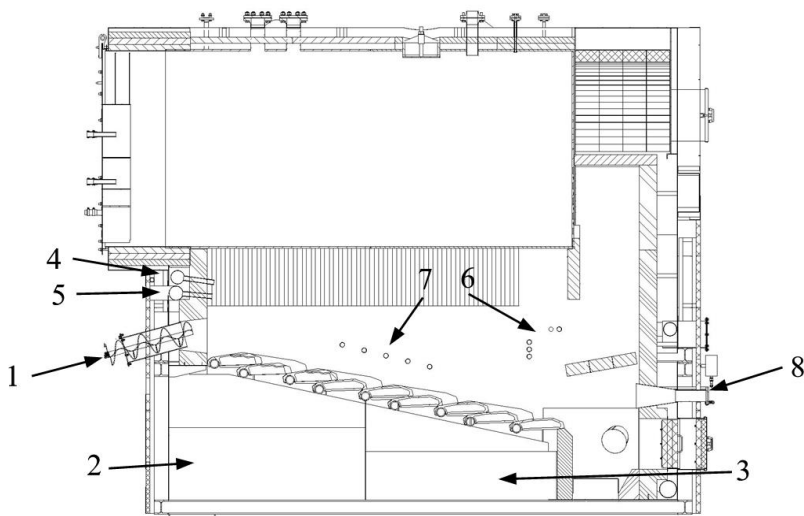


1 pav. Ardyninių pakurų pagrindiniai kuro-liepsnos srautų organizavimo principai [6]. a – priešsrovinis srautų organizavimas, b – pasrovinis srautų organizavimas

Tyrimas atliktas 2MW galios garo katile su judančiu ardynu, skirtu sausam kurui deginti. Kūrykloje kuro ir liepsnos srautai organizuojami pasrovinio būdu. Kūryklos apatinė dalis prie ardyno yra šamotinė, o viršutinė dalis aušinama ekranimais vandens vamzdžiais. Katile naudojamas kuras – šiaudų granulės. Katilo skerspjūvis pavaizduotas 2 pav. Pagrindiniai katilo automatinio valdymo principai:

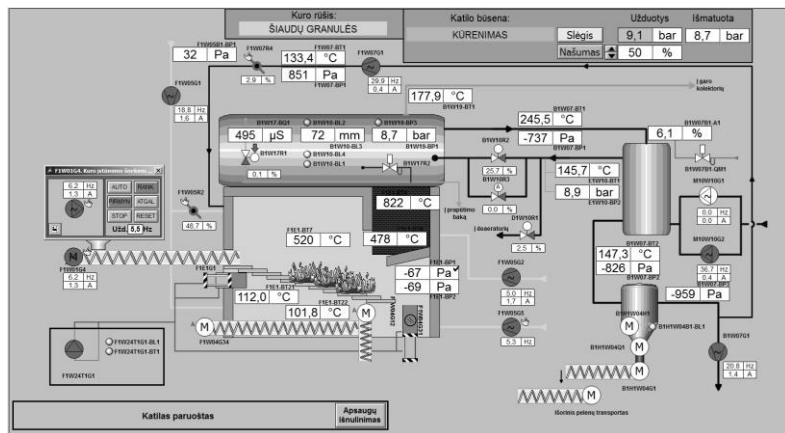
- Katilo galia reguliuojama keičiant į kūryklą paduodamo kuro kiekį, tuo pat metu išlaikant kuro kiekiui proporcingą pirminio oro srautą, kas užtikrina visišką kuro sudegimą, iki kuras pasieks ardyno pabaigą.
- Antrinio oro virš ardyno bendras srautas reguliuojamas taip, kad dūmuose už katilo būtų išlaikoma pastovi deguonies koncentracija.
- Recirkuliuojamų dūmų bendras srautas keičiamas taip, kad degimo produktų temperatūra išėjime iš kūryklos neviršytų nustatytos reikšmės.

Derinimo metu rankinio valdymo užsklandomis galima keisti antrinio oro srautų proporcijas iš pakuros priekio ir šono, recirkuliuojamų dūmų srautų proporcijas iš pakuros priekio ir šono, pirminio oro srautų proporcijas į abi zonas po ardynu bei recirkuliuojamų dūmų srautų proporcijas į abi zonas po ardynu.



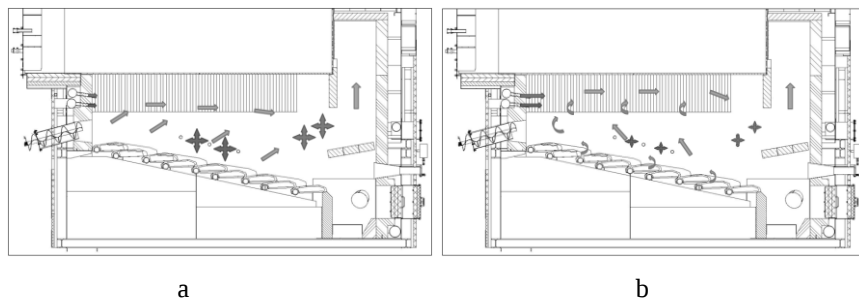
2 pav. Garo katilo, kurui naudojančio šiaudų granulės, schema. 1 – kuro padavimas sraigtiniu transporteriu; 2 – pirminio oro ir recirkuliuojamų dūmų padavimas į pirmą ardyno zoną; 3 – pirminio oro ir recirkuliuojamų dūmų padavimas į antrą ardyno zoną; 4 – antrinio oro tiekimas iš pakuros priekio; 5 – recirkuliuojamų dūmų tiekimas iš pakuros priekio; 6 – antrinio oro tiekimas iš pakuros šono; 7 – recirkuliuojamų dūmų tiekimas iš pakuros šono; 8 – anga pakuros vidui stebėti.

Katilo su pakura valdymo sistemos langas pavaizduotas 3 pav., kur matyti pagrindiniai katilo darbo ir automatiškai valdomos įrangos parametrai. Čia nepavaizduoti rankinio valdymo įrenginiai, pvz., neautomatizuotos orų ar recirkuliuojamų dūmų užsklandos.



3 pav. Katilo valdymo sistemos langas

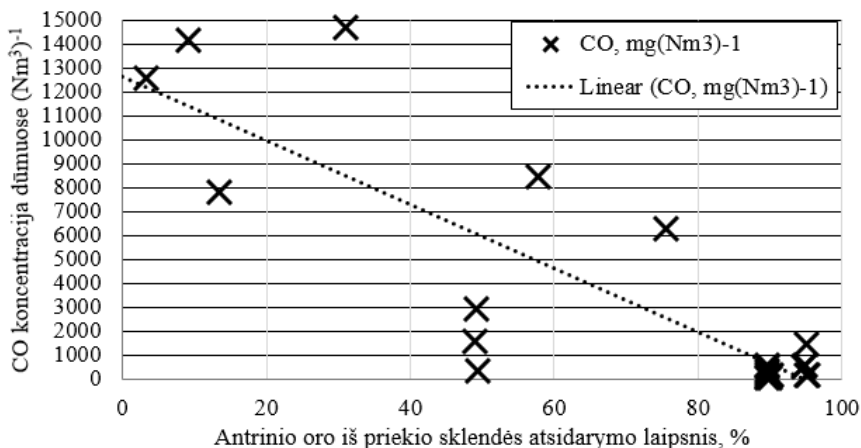
Bandymų metu išbandytos įvairios pakuros nustatymų kombinacijos. Po kiekvieno nustatymų pakeitimo buvo laukiama, kol degimo procesas nusistovės. Tuomet atliekami CO koncentracijos dūmuose už katilo matavimai MULTILYZER NG matavimo prietaisu. Liepsnos vaizdas pakuroje stebimas pro kūryklos galinėje sienoje įrengtą stebėjimo angą.



4 pav. Liepsnos kelias pakuros skerspjūvyje. a – kai oro ir recirkuliuojamų dūmų daugiau tiekama iš pakuros šonų, b – kai oro ir recirkuliuojamų dūmų daugiau tiekama iš pakuros priekio

Bandymų metu pastebėta, kad antrinio oro ir dūmų recirkuliacijos srautų didinimas iš pakuros priekio turi daug įtakos liepsnos keliui erdvėje virš ardyno. Šis

pasikeitimas pavaizduotas 4 pav. Padidinus srautus iš pakuros priekio, liepsna virš ardymo pakeičia savo pradinę tekėjimo kryptį, sudarydama iš dalies priešsrovinį kuro ir liepsnos tekėjimą. Esant tokiai liepsnos kelio trajektorijai, prailgėja degimo produktų išbuvimo laikas aukštoje temperatūroje, liepsna anksčiau gauna didesnį oro kiekį. Toks srautų pasikeitimas pagerina degimo produktų susimaišymą su oru.



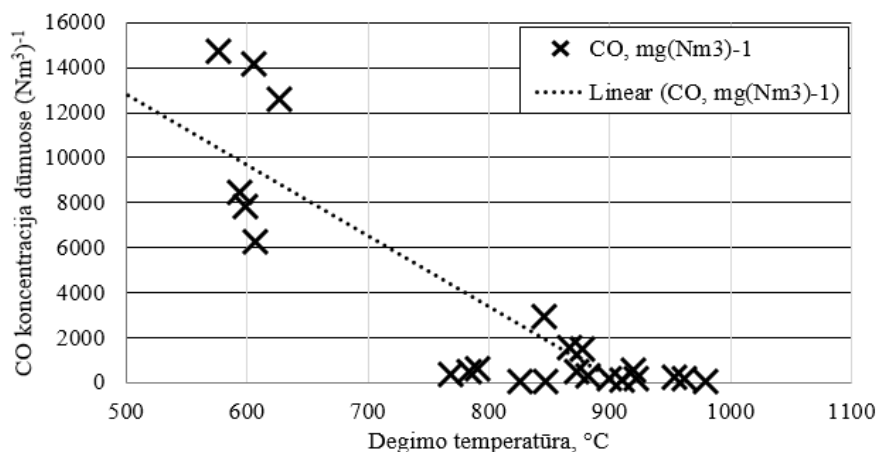
5 pav. CO koncentracijos priklausomumas nuo antrinio oro iš pakuros priekio atsidarymo laipsnio, skirtingais darbo režimais (nustatymais).

Atlikta bandymo metu valdymo sistemos sukauptų duomenų ir atliktų matavimų analizė parodė, kad didžiausios įtakos CO išmetimams turėjo antrinio oro iš pakuros priekio sklendės atsidarymo laipsnis (5 pav.) ir degimo temperatūra pakuroje (6 pav.). Antrinio oro iš pakuros priekio atsidarymo laipsnio įtaką CO sudegimui galima paaiškinti tuo, kad ji yra proporcinga oro srautui pakuros priekyje, kuris prailgina liepsnos kelią ir pagerina srautų susimaišymą, todėl pagerėja degimo sąlygos. Degimo temperatūros įtaka CO sudegimui taip pat yra žinoma [2], todėl natūralu, kad didėjant šiai temperatūrai, mažėja CO išmetimai. Tačiau degimo temperatūros didinimas šiaudų granules kūrenančioje pakuroje sukelia papildomų problemų:

- intensyvėja kuro ir pelenų lydymasis ant ardymo, dėl ko pasidaro sunku suvaldyti kuro sluoksnio degimo procesą, dėl nevienodo pirminio oro pasiskirstymo per susilydžiusius luitus tampa sunku išlaikyti deguonies perteklių dūmuose ir auga nesudegusios anglies kiekis pelenuose;
- ant katilo kaitinamųjų paviršių sparčiau limpa šarminių metalų druskos, dėl ko ima žymiai sparčiau augti katilo aerodinaminis pasipriešinimas ir katilą gali tekti priverstinai stabdyti valymui [7].

Todėl, norint kiek įmanoma sumažinti šiuos neigiamus efektus, reikia degimo temperatūrą palaikyti kiek įmanoma mažesnę, o pablogėjusį CO sudegimą kom-

pensuoti perskirstant orų ir recirkuliuojamų dūmų proporcijas taip, kad būtų išgaunamas šio tyrimo metu stebėtas liepsnos kelio pasikeitimas į ilgesnį.



6 pav. CO koncentracijos priklausomumas nuo degimo temperatūros pakuroje, skirtingais darbo režimais (nustatymais).

Išvados

1. Šiaudų granulės, nors deginimo sąlygoms kaprizinga, bet ekonomiškai patraukli kuro rūšis, kuri gali būti sėkmingai naudojama tam tinkamuose pramoniniuose katiluose [8,9]
2. Atlikti bandymai patvirtino, kad CO išmetimai mažėja, didinant degimo temperatūrą ir liepsnos kelią bei išbuvimo laiką pakuroje.
3. Liepsnos kelio suvaldymas biokuro pakuroje, panaudojant kryptingus dujų srautus, yra perspektyvus būdas degimo efektyvumui didinti, todėl jo galimybės verta nagrinėti išsamiau.

Literatūra

1. Obernberger I, Thek G. The pellet handbook: The production and thermal utilisation of biomass pellets. Earthscan Ltd. 2010.
2. Petterson E, Nordin A, Ohman M. Effect of temperature and residence time on emissions of CO, THC, tars and NOx during pellet combustion. Proceedings of Nordic Seminar on Thermochemical conversion of biofuels. 1996.
3. Werther J, Saenger M, Hartge E-U, Ogada T, Siagi Z. Combustion of agricultural residues. Fuel Energy Abstr 2000; 41: 308.

4. Van Der Lans RP, Pedersen LT, Jensen A, Glarborg P, Dam-Johansen K. Modelling and experiments of straw combustion in a grate furnace. *Biomass and Bioenergy* 2000; 19: 199–208.
5. Obernberger I, Thek G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and Bioenergy* 2004; 27: 653–69.
6. Loo S Van, Koppejan J. The Handbook of Biomass Combustion and Co – firing. The effects of brief mindfulness intervention on acute pain experience: An examination of individual difference. 2008.
7. Blander M, Pelton AD. The inorganic chemistry of the combustion of wheat straw. *Biomass and Bioenergy* 1997; 12: 295–8.
8. Öhman M, Nordin A, Hedman H, Jirjis R. Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures for prevention. *Biomass and Bioenergy* 2004; 27: 597–605.
9. Davidsson KO, Åmand LE, Steenari BM, Elled AL, Eskilsson D, Leckner B. Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler. *Chem Eng Sci* 2008; 63: 5314–29.

CO emission tests from straw pellet industrial steam boiler

Summary

Tests with various settings were conducted on industrial straw pellet 2MW heat capacity steam boiler. It was observed that only secondary air rearrangement and combustion temperature had significant impact on measured CO emissions. While increased combustion temperature is an effective way to decrease CO emissions, it can increase risk of other problems related to straw combustion e.g. sintering, slagging, fouling and corrosion. On the other hand, flame path change above the grates was observed as secondary air flows were rearranged. Changed path and increased residence time of the flame resulted in decreased CO emissions, which can be used to compensate lower combustion temperature.

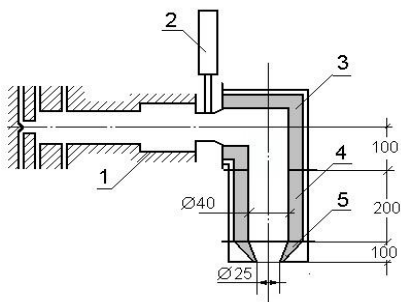
Naftos produktais užteršto grunto apdorojimas taikant plazminę technologiją

Rolandas Uscila, Vilma Snapkauskienė, Romualdas Kėželis, Mindaugas Aikas
Lietuvos energetikos institutas

Įvadas. Lietuvos aplinkos apsaugos agentūros duomenimis, užterštas gruntas yra lygiavertė problema, lyginant su kitais taršos šaltiniais Lietuvoje [1]. Šalyje yra apie 12 tūkst. „istorinės taršos“ teritorijų, kuriose absoliučią daugumą tvarkytino grunto sudaro užterštas naftos produktais [2]. Dešimtadalis šių teritorijų gali kelti ypač didelį pavojų aplinkai ir žmogaus sveikatai. Todėl itin svarbu tokio pobūdžio teritorijas valyti likviduojant taršą naftos produktais. Aplinkos ministerijai priklausanči viešojo įstaiga „Grunto valymo technologijos“ (GVT) yra viena žinomiausių ir didžiausių Lietuvoje valančių naftą, jos produktais ir kitomis cheminėmis medžiagomis užterštą gruntą, dumblą bei vandenį. Dauguma valomo grunto išvaloma biologiniais *ex situ* metodais, pagrįstais minkroorganizmų, bakterijų ir augalų naudojimu teršalų destrukcijai [3]. Tai reiškia papildomą deguonies ir maisto medžiagų padavimą į valomąją terpę, kartu palaikant atitinkamą temperatūrą ir pH. Be to, tai ilgai trunkantis procesas, reikalinga didelė teritorija valymo aikštei įrengti, valymo rezultatai daug priklauso nuo aplinkos sąlygų, technologija gali būti neaktyvi esant labai didelėms teršalų koncentracijoms, gali būti reikalinga lakiųjų organinių junginių surinkimo sistema bei brangūs grunto purentuvai – aeratoriai. Todėl GVT nuolat ieško naujų aplinkosaugos problemų sprendimo būdų. Viena iš tikslų kaip tik siekiame šiame darbe – atlikti naftos produktais užteršto grunto apdorojimo bandomuosius tyrimus plazmos sraute, įvertinant plazminės technologijos tinkamumą angliavandenilių skaidymui. Ši technologija yra draugiška aplinkai ir Lietuvoje bandoma kaip naujovė gruntui valyti *ex situ*. Literatūroje [4] greta visų taikytinų grunto valymo metodų, paminėta ir plazminė pirolizė, tačiau ji taikoma sudėtingos konstrukcijos *in situ* metodu.

Tyrimų metodika. Naftos produktais užterštas gruntas prieš eksperimentus buvo džiovinamas kambario temperatūroje ir sijojamas, kad būtų užtikrintas žaliavos birumas ir tolygus tiekimas į plazmocheminį įrenginį, skirtą medžiagoms pluoštinti (1 pav.). Pradiniai darbo parametrai pasirinkti vadovaujantis patirtimi, kuomet laboratorijoje buvo lydomos ir pluoštinamos panašios sudėties mineralinės medžiagos [5]. Formuojant pluoštą iš grunto, kaip plazmą sudarančios dujos naudojamas oras. Paruošti mėginiai sliekinio dozatoriumi tiekiami į plazmocheminį reaktorių, kur vyksta toksinių medžiagų skaidymas ir kiti cheminiai bei fiziniai virsmai. Mėginių apdorojimo plazmos sraute metu matuojama proceso temperatūra, oro, pagalbinių dujų, vandens bei žaliavos srautai, taip pat fiksuojami plazmos generatoriaus darbo parametrai. Pasiiekus geriausią rezultatą ir užfiksavus optimalius grunto apdorojimo parametrus, kieti likutiniai produktai – pluoštas ir lydalas, surenkami mineraloginių, morfologinių ir sudėties pokyčių analizei, kuri buvo

atlikta skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM), energijos dispersiniu spektroskopu (EDS), rentgeno spindulių difraktometru (XRD) ir termogravimetru (TG). GVT savo iniciatyva atliko naftos produktų pokyčių analizę.



1 pav. Eksperimentinio reaktoriaus konstrukcinė schema. 1 – plazmotronas; 2 – dozatorius; 3 – aušinama sekcija su 90° posūkiu; 4 – aušinama sekcija su ZrO₂ įkloja; 5 – siaurėjanti išteklėjimo sekcija.

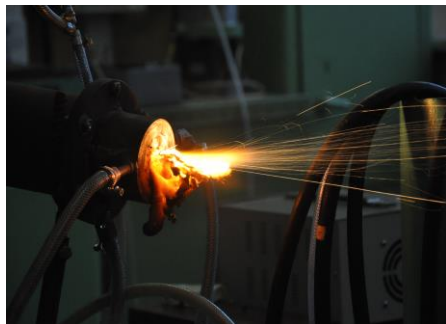
Rezultatų aptarimas. Pradinė naftos produktų koncentracija pristatytuose grunto mėginiuose nustatyta 74 g/kg. Palyginti, per vieną vegetacinį laikotarpį mikroorganizmai apdoroja 10 g/kg.

1 lentelė. Grunto pluoštinimo techninės sąlygos

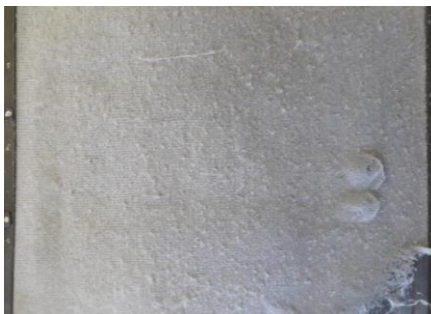
Plazmotrono darbo parametrai		Plazmotrono konstrukcija	Rezultatas
Srovė Įtampa Galia Temperatūra Srauto greitis Macho skaičius	100–180 A 380–400 V 50–70 kW 1750–2300 K 170–300 m/s 0,19–0,31	Srauto išteklėjimo angos skersmuo 25 mm	Nesipluoštino
Srovė Įtampa Galia Temperatūra Srauto greitis Macho skaičius	170 A 440 V 73 kW 2200 K 1210 m/s 1,30	Srauto išteklėjimo angos skersmuo 12 mm	Pluošto išeiga iki 95 proc.

Vertinant grunto pluoštinimo galimybes, iš pradžių buvo pasirinktas reaktorius su 25 mm skersmens srauto išteklėjimo anga. Keičiant plazmos generatoriaus darbo parametrus (1 lentelė), buvo stebimas pluošto ir lydalo formavimosi intensyvumas. Gruntas lydėsi, visais atvejais susidarant kietos stikliškos struktūros įvairios formos ir dydžio lydalo dariniais (2 pav.), o pluoštas pradėjo formuotis tik padidinus srauto greitį (1 lentelės 2 dalis, 3 pav.). Tam reikėjo sumažinti srauto išteklėjimo iš plazmocheminio reaktoriaus angos skersmenį iki 12 mm. Didesnė plazmos srauto kinetinė energija lemia geresnę gaunamo pluošto kokybę ir didesnę

išeigą. Išteikėjimo iš reaktoriaus zonoje pasiekiamas viršgarsinis srauto greitis, fiksuojamos smūginės bangos – Macho diskai.

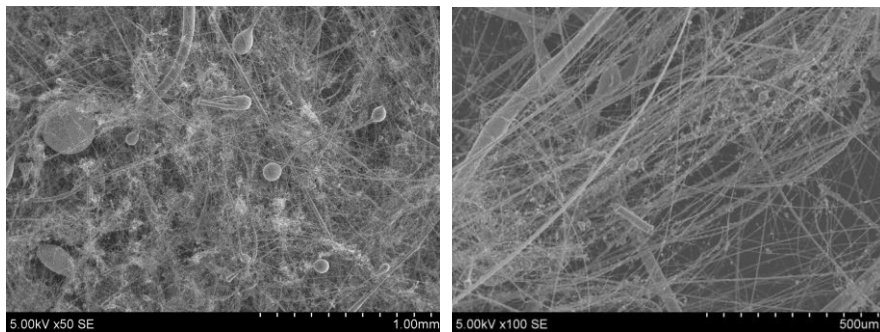


2 pav. Plazmocheminis reaktorius darbo metu, kai ištekėjimo anga 25 mm, ir susidaręs produktas – lydalas



3 pav. Plazmocheminis reaktorius darbo metu, kai ištekėjimo anga 12 mm, ir susidaręs produktas – pluoštas ant surinkimo sieto

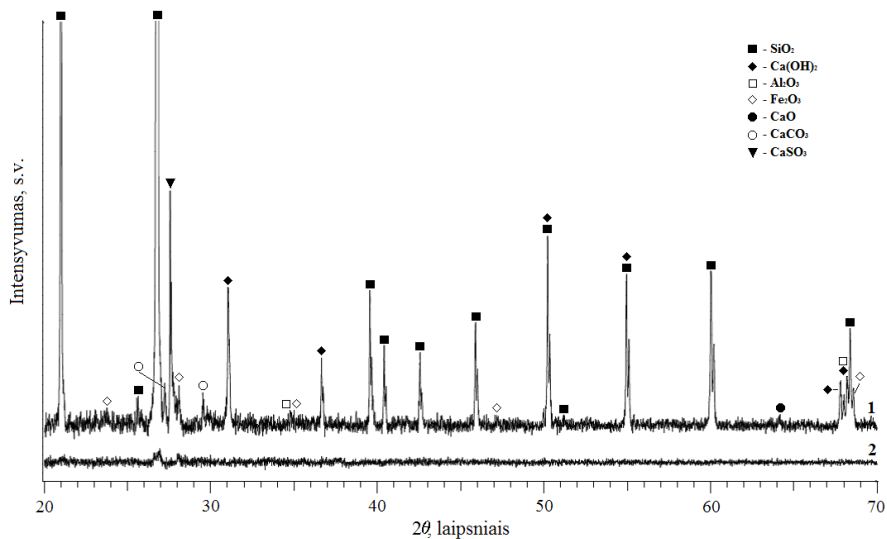
Analizuojant skenuojančiu elektroniniu mikroskopu užfiksuotus pluošto morfologinius vaizdus (4 pav.) matyti, kad suformuoto pluošto skaidulos yra įvairaus ilgio ir storio (5–20 μm), o jo tūris vietomis „užterštas“ tik apsilydžiusiomis grunto pradinio mėginio dalelėmis. Grunto pluoštas yra „sunkus“ ne vien dėl jame pasiskirsčiusių į pluoštą nesuformuotų lydalo granulių, kurios lengvai mechaniškai gali būti atskirtos nuo pluošto, bet ir dėl pluošto faktūros. Tęsiant pradėtus darbus, būtų siekiama optimizuoti pluoštinimo procesą, kad gauti švaresnį produktą.



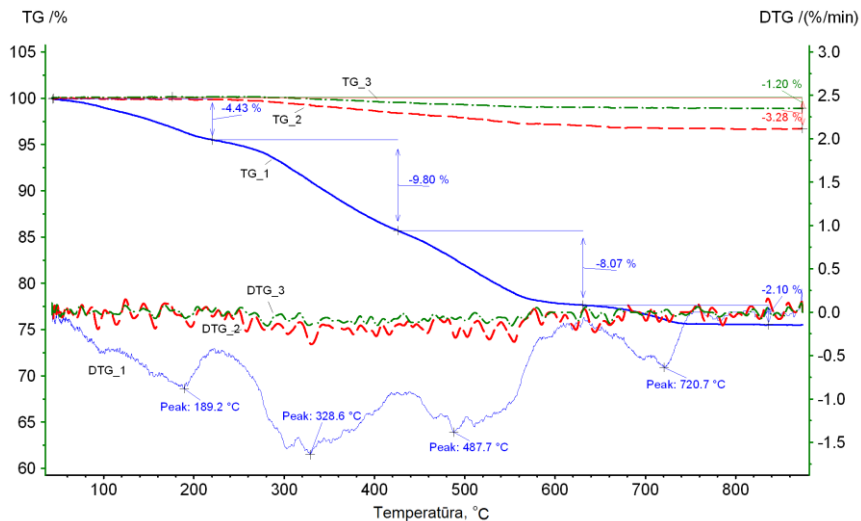
4 pav. Pluošto iš grunto užteršto naftos produktais vaizdai gauti SEM.

Analizuojant grunto XRD matoma, kad pradinės medžiagos struktūra yra kristalinė su vyraujančiais Si ir Al oksidais bei Ca hidroksidu (5 pav.). Veikiamas aukšta temperatūra ir dėl didelio plazmos srauto greičio labai greitai ataušdamas, gruntas virsta lydalų ir/ar pluoštu, turinčiais amorfinę struktūrą (dar vadinami didelio klampumo skysčiais). Tokioje medžiagoje atomai yra skirtingų dydžių. Klampumas neleidžia atomams pakankamai judėti, kad sudarytų tvarkingą būvį. Medžiagos struktūra taip pat sukelia labai mažą susitraukimą aušinimo metu ir didelį pasipriešinimą plastinei deformacijai. Dėl šių savybių lydalas yra atsparus dėvėjimuisi ir nebijo korozijos. Amorfinių medžiagų šiluminis laidumas yra mažesnis nei kristalinių.

Norint įsitikinti, ar visi naftos produktai išdegę ir ar jų neliko galutiniuose produktuose, buvo atlikta pradinio grunto (mėlyna kreivė), pluošto (raudona kreivė) ir lydalo (žalia kreivė) termogravimetrijos (TG) ir diferencinės termogravimetrijos (DTG) analizė (6 pav.). Matome, kad pluošto ir lydalo masės nuostoliai iki 900 °C santykinai nežymūs. Tuo tarpu pradinio grunto mėginio DTG kreivėje stebimi keturi pagrindiniai svorio mažėjimo etapai. Pirmasis iš jų (pikas 198,2 °C) siejamas su grunto absorbuotos drėgmės ir jame esančio vandens garavimu. Svoris mažėja palaipsniui, nėra staigus jo kritimo. Antrasis ir trečiasis svorio mažėjimo etapai siejami su LOJ (lakiųjų organinių medžiagų) išsiskyrimu, kuris nustatomas pagal būdingą masės nuostolį temperatūrų diapazone 200–600 °C. Aukštesnėje temperatūroje (pikas 720 °C) galimai dega organinė grunto dalis, t. y. humusas. Kad visi naftos produktai konvertuojami į kitus produktus patvirtina ir GVT atliktos galutinių produktų – pluošto ir lydalo, analizės rezultatai, kurie rodo, kad naftos produktų kiekis medžiagose yra mažesnis už 0,089 g/kg grunto. Diferencinės skenuojančios kalorimetrijos (DSK) fazinių virsmų kreivė charakterizuoja egzoterminį procesą, o tai įrodo, kad naftos produktai užterštame grunte gali pasitarnauti energijos šaltiniu. Tai patvirtina svarstymus, kodėl gruntas su naftos produktais pluoštinasi žymiai lengviau nei neužterštas.



5 pav. Grunto (1) ir pluošto (2) rentgeno spindulių difraktograma



6 pav. Pradinės ir galutinių medžiagų termogramos. Aplinka – oras, temperatūros kėlimo greitis 20 °C/min. Bandinio masė 8,65 mg

Išvados

Atlikus pirminius bandomuosius tyrimus, inicijuotus VšĮ „Grunto valymo technologijos“ užsakymu, gauti teigiami rezultatai. Įsitikinta, kad atmosferinio slėgio nepusiausvriosios oro plazmos aplinkoje galima ne tik suskaidyti grunte esančius naftos produktus, bet ir gauti antrinį produktą – mineralinį pluoštą ir stiklišką lydalą, tikėtina tinkamą konstrukciniams elementams, apdailai, filtrams, katalizatoriams, priešgaisrinei apsaugai, kelių mišiniams ir pan. Naftos produktai šiuo atveju reaktoriuje tarnauja kaip papildomas energijos šaltinis.

Pasitelkus plazmines technologijas, ne problema būtų ir labai stipriai (200–300 g/kg) naftos produktais užterštas gruntas. Be to, iš užteršto grunto atskirtus naftos produktus būtų galima naudoti kaip papildomą energijos šaltinį, taupant elektros energiją procesui vykdyti.

Literatūra

1. Aplinkos būklė 2014. Tik faktai. Aplinkos apsaugos agentūra. Vilnius, 2014
2. Radienė R., Kadūnas K. Užterštų teritorijų poveikio vertinimo 2008–2015 m. rezultatai. Lietuvos geologijos tarnyba prie Aplinkos ministerijos.
3. Januševičiūtė D., Marcinonis A., Janulevičius S., Meištininkas R., Samosionokas J. Cheminėmis medžiagomis užteršto grunto ir požeminio vandens valymo metodai. Vilnius, 2015.
4. Survey of Soil Remediation Technology. UNIDO, 2008.
5. Valinčius V., Snapkauskienė V., Kėželis R., Valinčiūtė V., Mečius V. Preparation of insulating refractory materials by plasma spray technology. High temperature material processes. ISSN 1093-3611. 2006. Vol. 10, Iss. 3, p. 365-378.

Thermal plasma technology for the treatment of petroleum hydrocarbons contaminated soil

Summary

The purpose of this paper was to investigate thermal plasma suitability for treatment of soils contaminated by petroleum hydrocarbons. The technical feasibility of plasma vitrification and fiber synthesis technology has been demonstrated. The analysis indicates that thermal plasma is a promising alternative to conventional biological processes. The main advantage of plasma treatment of waste lies in the short process time and added value of potentially reusable by-products and the end product.

Review of numerical simulation requirements for cyclone separator using unstructured mesh

Simas Klenauskis*

*UAB „Enerstena“

Renewable energy technology is essential for achieving less carbon emissions. Biomass is a key renewable energy source, but it is often affected by the emissions of particulates and other pollutants in the waste gas.

One of technologies to deal with solid particles are cyclone separators. Cyclone separators are still developed and new designs are presented till this day even it has been used for more than 100 years. Cyclone separators are relatively simple to fabricate, requires low cost to operate and has a good adaptability to extremely harsh conditions. Main disadvantage – low separation efficiency for smaller particles than $< 5 \mu\text{m}$.

For performance of cyclone geometry can be used one of more of four main approaches:

1. Analytical methods (mathematical models) which can be classified into:
 - a) theoretical and semi-empirical models
 - b) statistical models
2. Experimental measurements
3. Computational fluid dynamics (CFD) simulations
4. Artificial neural networks (ANN) approach [1]

This study main subject is CFD - reverse flow cyclones/hydrocyclones with unstructured mesh. Thousands of articles are published for CFD cyclone separator models and most of them were created using only structured mesh. Also most of models used only Stairmand or similar type of cyclones, which couldn't handle much more complex geometries. Structured mesh requires experts and has limitations with more complex geometries.

Unstructured, automatically generated mesh type requires less effort and is much more suitable for engineers. Also it allows easier to create much more complex, newer and novel geometries, for example Fig. 1, different vortex finders, rectifying vanes, ect. Main disadvantages are high RAM requirement and longer computation time. Not many examples are published on cyclone separator simulation with unstructured mesh, so it is usually unknown how much computational resources will be needed.

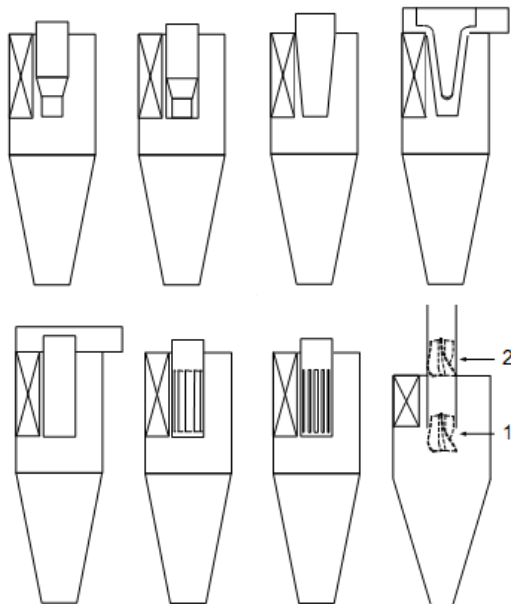


Fig 1. Different vortex finder geometries [2].

Table 1 summarizes 3 articles which have unstructured mesh type models. The first two articles have simplifications in their models, which donot reproduce all main fluid dynamics: 2010 D.W. Stephens - rod in the middle of cyclone and not fully valid results with experiments for axial velocity; 2010 K. Ropelato – poor result agreement when inlet velocity increases after 15 m/s. In 2015 Y. Kosaki presents an article in which he simulates cyclone separator without any simplifications, using unstructured mesh and has good agreement with experimental data. This article presents a methodology which hasn't been presented earlier. Using this article we are planning to assemble a computer to simulate new design cyclone separators. Unfortunately, authors didn't present what computational resources had been required to execute this simulation.

Table 2 represents similar models with structured and unstructured meshes. Calculation time and RAM are only predicted by a mesh size. Unstructured type model requires higher computational resources. The main objective would be to get processors as powerful as possible ,and get much more than 64 GB of RAM.

Table 1. Summary of articles with unstructured meshes.

Author [Reference]	D.W. Stephens [3]	K. Ropelato [4]	Y. Kosaki [5]
Publication year	2010	2010	2015
Mesh size, mln.	2,8	1,35	22,27
Separator height, m		1,22	1,682
Separator diameter, m	0,075	0,305	0,385
Separator	Hydrocyclone with rod	Cyclone	Cyclone
Program	Ansys CFX 11	Ansys CFX	Cradle SCRYU/Tetra
Initialization	k- ϵ , then k- ω SST with curvature correction		k- ω SST
Model	RSM	RSM	LES-WALLE
Inlet velocity, m/s		25	35
Validation. Comparison with experimental results.	Tangential velocity had good agreement. Axial velocities differs in lower parts of conical cyclone section	When inlet velocity is low results are in good agreement with experimental data. When inlet velocity is 15 m/s and higher it gets poor matching	Good agreement with experimental data.

Table 2. Comparison of similar models, but with different meshes.

	Structured	Unstructured
Author [Reference]	S.K. Shukla	Y. Kosaki
Publication year	2013	2015
Mesh size, mln.	$\sim 0,39$ (or 0,494336 nodes)	22,27
Separator height, m		1,682
Separator diameter, m	0,29	0,385
Separator	Cyclone	Cyclone
Program	Fluent 6.3.26	Cradle SCRYU/Tetra
Initialization		k- ω SST
Model	RSM/LES	LES-WALLE
Inlet velocity, m/s	20,18	35
Processor	Core 2 Duo 2,8 GHz	
RAM	2 GB	≈ 64 GB (prediction by mesh size)
Calculation time, hours	120 h – RSTM, 60 h LES	
Calculation time, days	5 d – RSTM, 2,5 d - LES	≈ 30 d – LES (prediction by mesh size)

Conclusions

Minimum requirements for approximate guiding were set for model of cyclone separator, using unstructured mesh and with inlet velocity 35 m/s and less. Requirements for model: program with LES or RSM model, mesh with at least 22 million elements (size dependent on conditions), minimum 64 GB of RAM and processor as powerful as possible, because with Core 2 Duo 2,8 GHz calculation could take more than 30 days.

References

1. Elsayed, Khairy, and Chris Lacor. Analysis and optimisation of cyclone separators geometry using RANS and LES methodologies. *Turbulence and Interactions*. Springer Berlin Heidelberg. 65-74, 2014.
2. Hoffman, Alex C., et al. *Gas cyclones and swirl tubes*. Vol. 56. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
3. Stephens, D. W., and Krishna Mohanaram. "Turbulence model analysis of flow inside a hydrocyclone." *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal* 10.5-6: 366-373, 2010.
4. Ropelato, K., C. E. Fontes, and J. M. Fusco. "On CFD practices for cyclone simulation." *7th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2010)*. Tampa, FL USA. 2010.
5. Kosaki, Yuhei, et al. Investigation on dust collection and particle classification performance of cyclones by airflow control for design of cyclones. *Powder Technology* 277: 22-35, 2015.

Ciklonų skaitinių tyrimų literatūros apžvalga su nestruktūriniu tinkleliu

Santrauka

Peržvelgus skaitinių tyrimų straipsnius ciklonų ir hidrociklonų tematika, kuriuose naudojamas nestruktūrinis tinklelis, buvo rastas tik vienas, paskelbtas 2015 metais, kuriame modeliuojami visi ciklone vykstantys procesai ir nesupaprastinamos ciklono kraštinės sąlygos. Nestruktūrinis tinklelis yra parankus dėl lengvo ciklono konstrukcijos pakeitimo, kai naudojamas automatinis tinklelio generavimas. Šioje apžvalgoje nustatyti apytiksliai reikalavimai, reikalingi sumodeliuoti cikloną naudojant nestruktūrinį tinklelį, kai įtekėjimo greitis 35 m/s ir mažesnis. Tinklelis – 22 mln. elementų (dydis priklauso nuo sąlygų), mažiausiai 64 GB RAM, kuo galingesnis procesorius ir programa, turinti RSM arba LES skaičiavimo modelį.

Kuro NO_x emisijų mažinimo eksperimentiniai tyrimai deginant baldų gamybos pramonės atliekų granules

Adolfas Jančauskas
UAB „Enerstena“

Medienos drožlių plokščių gamybos metu naudojamos įvairios cheminės medžiagos – rišikliai, klijai, dažai ir kt. Šiose medžiagose yra junginių, nebūdingų įprastai medienai, todėl šių gamybinių liekanų degimo metu gali susidaryti emisijos, viršijančios taršos normas, nurodytas „Išmetamų teršalų iš kurų deginančių įrenginių normos“ LAND 43-2013. Pagrindinis taršos faktorius, deginant baldų gamybos pramonės atliekų granules, yra azoto oksidai, susidarantys dėl didesnių azoto kiekių šiose liekanose.

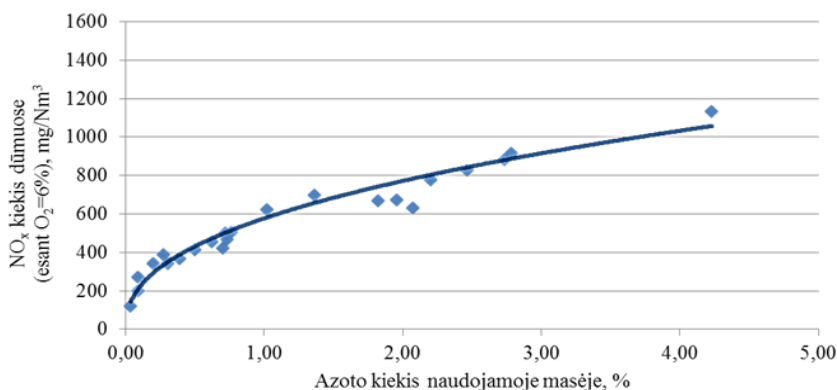
Azoto oksidai (NO_x) yra įvairūs azoto ir deguonies junginiai. Praktikoje priimta matuoti dažniausiai susidarantių junginių NO ir NO₂ sumą ir ją vadinti azoto oksidais. Kuro degimo metu susidarancio azoto monoksido (NO) dalis yra pati didžiausia. Jo kiekis, lyginant nuo bendros NO ir NO₂ masės, perkopia 90 %. Kuro degimo reakcijos metu azoto šaltiniai yra kuras ir oras. Azotas kure yra laisvos formos ir surištas įvairiuose junginiuose. Kuro degimo metu surištas azotas praranda molekulinį ryšį ir tampa taip pat laisvu azotu. Oras degimo reakcijos metu naudojamas kaip deguonies šaltinis, tačiau oro sudėtyje yra 78 % tūrio azoto. Bendrą NO_x dydį sudaro trijų rūšių NO_x šaltiniai, susidarantys skirtingų procesų metu:

- 1) Kuro NO_x.
- 2) Terminiai NO_x (Zeldovičiaus mechanizmas).
- 3) Greitieji NO_x (Fenimoro mechanizmas).

Atsižvelgiant į azoto būseną ir aplinką, kurioje vyksta reakcija, gali vyrauti vienas, keli arba visi išvardyti NO_x susidarymo mechanizmai. Esant įprastoms biokuro degimo sąlygoms ir priemonėms, terminiai ir greitieji NO_x formavimosi mechanizmai yra nereikšmingi, todėl toliau nebus aprašyti.

Kuro azoto oksidai formuojasi išskirtinai tik iš kure esancio azoto. Įvertinta, kad deginant kietąjį kurą jie gali sudaryti net 80 % visų azoto oksidų degimo proceso metu. Visų organinių kietojo kuro rūšių sudėtyje yra azoto. Atlikus daugkartinius daug azoto turinčių kuro rūšių tyrimus, buvo rastas ryšys tarp suminio azoto kiekio kure ir NO_x koncentracijos dūmuose. Kuo N dalis naudojamojoje kuro masėje yra didesnė, tuo didesnę NO_x koncentraciją dūmuose galima prognozuoti (1 pav.).

Vykstant degimui, kure esantis azotas pasiskirsto į du šaltinius – lakiosiose medžiagose esantį azotą ir nepilnai sudegusioje anglyje esantį azotą. Lakiosiose medžiagose esančių junginių sudėtis labiausiai priklauso nuo kuro struktūros ir reakcijos aplinkos temperatūros. Biomasės lengvieji azoto junginiai gali būti išlaisvinti tiesiogiai iš kietosios masės.



1 pav. Kuro NO_x koncentracijų priklausomumas nuo suminio azoto kiekio kuro naudojamojoje masėje, netaikant NO_x mažinimo priemonių

NO_x mažinimo metodai susideda iš daugybės kompleksinių priemonių. Azoto oksidų mažinimo priemonės skirstomos į dvi grupes: pirmines ir antrines NO_x koncentracijų mažinimo priemones [1]. Pirminiai azoto oksidų koncentracijų mažinimo metodai pasitelkia prevencines NO_x mažinimo priemones. Jų veikimo principas pagrįstas azoto oksidų koncentracijos mažinimu jų formavimosi etapo metu. NO_x koncentracijos mažinamos pasitelkiant iš anksto numatytą kūryklos konstrukciją: oro/kuro tiekimo vieta, pirminio/antrinio oro kiekis, kuro sudėtis. Šių priemonių taikymas katilo eksploatavimo metu nereikalauja reikšmingų energetinių ir finansinių resursų lyginant su brangiomis selektyvaus katalitinio ir nekatalitinio NO_x redukavimo technologijomis, todėl šiame darbe tirti metodai yra susiję tik su pirminėmis NO_x mažinimo priemonėmis.

Įvairiuose moksliniuose šaltiniuose atkreipiamas dėmesys į oro pertekliaus įtaką azoto oksidų koncentracijoms [2, 3, 4]. Esant mažam deguonies pertekliui, kai α yra lygus nuo 0,9 iki 1,0, galima pasiekti labai gerų rezultatų mažinant NO_x koncentracijas. Kai deguonies kiekis, skirtas degimui yra lygus teoriniam reikalingam palaikyti degimui kiekiui, dėl nepakankamos sudegimo kokybės generuojasi tam tikras kiekis anglies monoksido (CO). Esant pakankamai aukštai temperatūrai, susimaišymui ir išlaikymo laikui, įvyksta konversija tarp CO ir NO_x. Anglies monoksidas redukuoja degimo metu susidariusias azoto oksidų koncentracijas. Esant deguonies pertekliui didesniau už 1,0, anglies monoksido koncentracija mažėja, tačiau azoto oksidų koncentracija didėja. Taip vyksta rinkimasis tarp dviejų toksogenų (CO ir NO_x). Kadangi literatūroje [5] yra pabrėžiama NO_x didesnė žala nei CO, esant galimybei, renkamasi modifikuoti degimą, tiekiant orą su trūkumu.

Dūmų recirkuliacija redukuoja NO_x tuo pačiu principu – temperatūros mažinimu. Tiekiant recirkuliacinius dūmus atgal į kūryklą, yra sumažinamas deguonies

kiekis ir atšaldomas fakelas, tačiau išlaikomas tas pats dujų tūris. Dėl deguonies trūkumo sumažėja degimo temperatūra, todėl kūrykloje generuojami nepilno degimo produktai $CxHy$, CO kurie skatina azoto oksidų redukcines reakcijas.

Sumažinus tiekiamo oro temperatūrą, dėl mažesnės dujų mišinio šiluminės energijos sumažėja liepsnos temperatūra. Esant žemesnei temperatūrai, mažėja terminių azoto oksidų kiekis, nepaisant to, kad menka jų dalis suminiuose NOX.

Baldų gamybos pramonės atliekų granules pagamintos iš medienos drožlių plokščių (MDP), apdailintos medžio drožlių plokštės (AMDP) IR kitų gamybos metu susidarančių atliekų mišinio. Sumažinus liekanų frakcijos dydį (< 1 mm), jos granuluotos į 8 mm diametro granules.

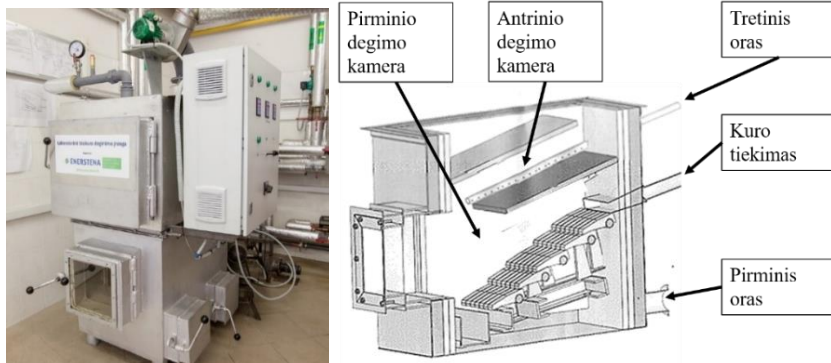
Pagal UAB „Enerstena“ atliktus kuro fizinius tyrimus (tyrimų protokolas Nr. TP16-03-013) nustatyta, kad baldų gamybos liekanos pasižymi aukštu žemutiniu šilumingumu (1 lentelė). Toks šilumingumas būdingas lapuočių – spygliuočių medienos granulėms. Aukštą žemutinį šilumingumą lemia ypač mažas visuminės drėgmės kiekis, kuris siekia 4,9 %. Granulėse taip pat nustatytas mažas pelenų kiekis sausojoje masėje.

1 lentelė. Baldų gamybos liekanų granulių fizinės ir cheminės savybės

Parametrai, matavimo vienetai	Tyrimo metodai	Rezultatai
Sauso kuro viršutinis izochorinis šilumingumas, kJ/kg	LST EN 14918	19900
Sauso kuro apatinis izobarinis šilumingumas, kJ/kg	LST EN 14918	18590
Drėgno kuro apatinis šilumingumas, kJ/kg	LST EN 14918	17560
Visuminės drėgmės kiekis, %	LST EN 14774	4,9
Pelenų kiekis sausoje kuro masėje, %	LST EN 14775	1,0
Bendras azoto kiekis natūralioje medžiagoje, %	LST EN 16948	3,14

Pagal bandinio elementinės sudėties tyrimus, atliktus Lietuvos agrarinių ir miškų mokslų centro agrocheminių tyrimų laboratorijoje (tyrimų protokolas Nr. K 230), nustatytas bendras azoto kiekis granulėse buvo 3,14 %. Esant tokiam N kiekiui liekanose, galima prognozuoti padidintas azoto oksidų (NO_x) koncentracijas, susidarančias iš kure esančio azoto.

Ekspperimentiniai tyrimai atlikti Kauno Technologijos Universiteto Šilumos ir atomo energetikos katedroje, kuro degimo laboratorijoje. Bandymams naudotas kieto kuro, 50 kW šiluminės galios biokuro katilo modelis (3 pav.). Tyrimų stende sumontuoti visi pagrindiniai technologiniai elementai, leidžiantys imituoti biokuro/medienos kuro pramoninio katilo su judinamu ardynu veikimą. Valdymo skydu galima atskirai reguliuoti pirminio ir antrinio oro tiekimą, nustatyti ir automatiškai palaikyti trauką kūrykloje, reguliuoti ardyno judėjimo greitį ir kuro tiekimą.



3 pav. Judančio ardyno kieto kuro bandymų stendas (kairėje) ir stendo kūryklos šoninis pjūvis (dešinėje)

Sraigtinis maitintuvas tiekia kurą į kūryklą. Kuras patenka į degimo zoną, ant laiptuoto, mechanškai judinamo ardyno. Šioje zonoje vyksta degimo procesas. Ardynas sudarytas iš judamų ir nejudamų, laiptuotai žemyn sudėtų ardelių eilių. Kas antra ardelių eilė judėdama stumia į priekį kuro sluoksnį. Tarp ardyno ardelių yra ertmės, skirtos pirminio oro tekėjimui. Pirminio oro kiekis nustatytas toks, kad užtektų palaikyti ant ardyno esančio kuro degimą, ir kad jo metu vyktų dalinė kuro gazifikacija.

Kuras ir jame esanti vandens dalis sušyla. Šilimo metu kure esantis vanduo garuoja. Dėl ypač didelės vandens specifinės garavimo šilumos, sunaudojama dalis šiluminės energijos. Šio etapo metu vyksta intensyvus kuro džiūvimas. Kito etapo metu vykdoma gazifikacija. Susidariusios lakiosios medžiagos juda į tretinio oro tiekimo zoną (antrinis oras tyrimų metu nebuvo tiekiamas), kurioje vyksta galutinis degimo produktų sudeginimas. Prasideda lakiųjų medžiagų išsiskyrimas, vyksta degimas. Paskutinio etapo metu baigiamas anglies (kokso) degimas. Jo degimas vyksta laiptuotojo ardyno pabaigoje prie pelenų susidarymo zonos. Kai anglis sudega, ardyno pabaigoje lieka neorganinė, nedeGIOji kuro masė – pelenai. Toliau veikiami ardyno judėjimo, jie slenka į kūryklos apačioje esantį pelenų šalinimo bunkerį.

Bandymų metu buvo registruojamas šildymo sistemos slėgis, iš katilo išeinančio ir grįžtančio vandens temperatūra ir kiti parametrai.

Azoto oksidų koncentracijoms matuoti naudojamas dūmų sudėties analizatorius „Multilyzer NG“. Dūmų sudėties analizatorius matuoja NO_x , CO , SO_2 , O_2 ir temperatūras. Paruoštos dujos tiekiamos į tris, dažniausiai nuosekliai sujungtus, skirtingus elektrocheminius jutiklius. Visi matavimai atliekami nusistovėjus katilo šiluminiams parametrams.

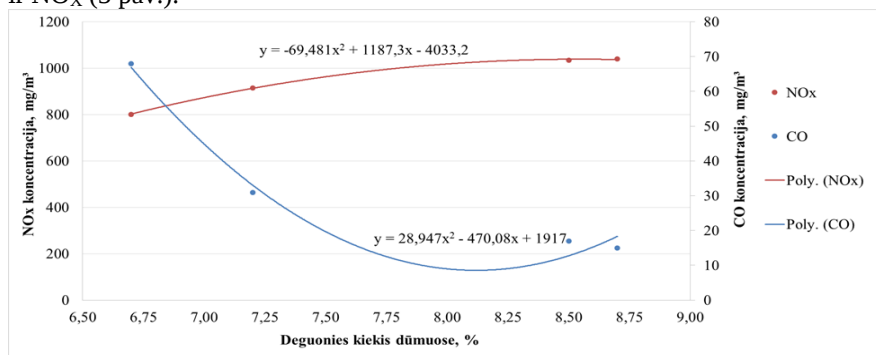
Oro debitui nustatyti naudojamas propelerinis anemometras „MiniAir 20“. Jis skirtas preciziškam dujų srauto greičiui matuoti. Eksperimentų metu buvo matuo-

jami I-inio, II-inio oro ir, kai buvo taikyta, recirkuliacinių dūmų srautai. Nustačius oro arba dūmų srautų greičius, apskaičiuojamas kanalu pratekantis dujų srautas. Pagal apskaičiuotus debitus reguliuojami pirminio ir antrinio oro kiekiai.

Bandymų stende nustatomi pirminio ir antrinio oro, traukos, ardymo judėjimo ir kuro tiekimo sraigto nustatymai, skirti katilui užkaitinti. Katilas įšildomas įprastiniu medienos granuliu kuru, o pasiekus nusistovėjusį šiluminį režimą, kuras pakeičiamas bandomuoju kuru. Valdymo skydo parametrai koreguojami atsižvelgiant į tiriamojo kuro frakcijos ir tankio skirtumus lyginant su medienos granulėmis.

Katilo darbo metu suderinami šie parametrai: kuro kiekis, oro pertekliaus koeficientas, katilo galia, pirminio/tretinio oro santykis ir kt. Tyrimo metu matuota temperatūra kūrykloje, įvertinant terminių azoto oksidų (NO_x) susidarymo galimybę. Palaikyta pastovi katilo šiluminė galia. Šiluminė galia matuojama šilumos kiekio skaitikliu „Kamstrup-metro A/S multical II“.

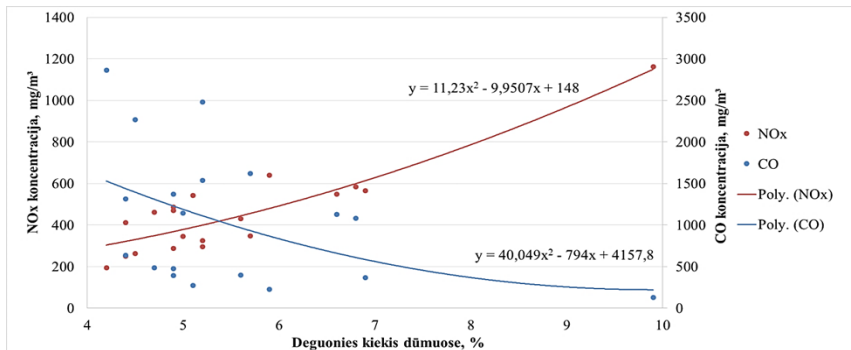
Eksperimento pradžioje buvo tiekiamas pakankamas pirminio ir antrinio oro kiekis visiškam kuro sudeginimui. Eksperimento metu buvo išlaikoma 34,0 – 38,3 kW katilo galia. Tyrimo rezultatai parodė atvirkštinį priklausomumą tarp CO ir NO_x (3 pav.).



3 pav. NO_x priklausomumas nuo CO, tiekiant pirminį ir antrinį orą

Degunies kiekis dūmuose buvo didinamas nuo 6,7 % iki 8,7 %. Nustatyta, kad išvystytas efektyviausias degimo procesas – pasiekta mažiausia CO koncentracija, esant degunies kiekiui dūmuose 8 %, tačiau esant šiam O_2 kiekiui, NO_x koncentracija pasiekia maksimumą ir siekia 1000 mg/m^3 .

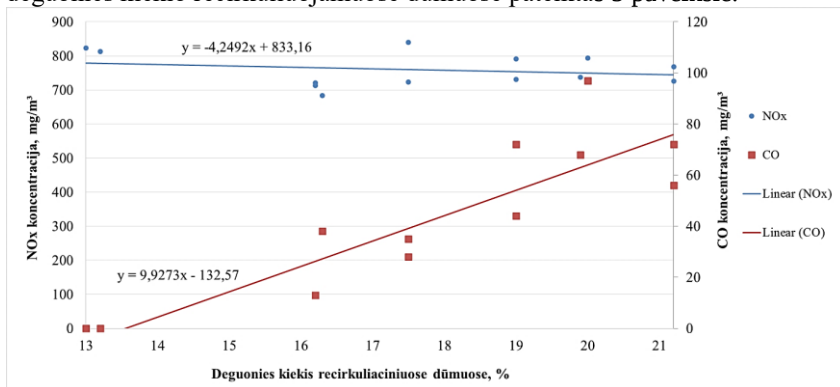
Iš 3 paveikslėlyje pateikto grafiko matome, kad anglies monoksido kiekis yra nepakankamas žymiam kuro azoto oksidų mažinimui. Nuspręsta netiekti antrinio oro, o reikiamą oro kiekį tiekti tik per ardymo pirminio oro tiekimo ertmes. Netiekiant oro į antrinę degimo zoną, prailginamas reakcijos laikas. Tarp anglies monoksido ir azoto oksidų vyksta konkuruojančios reakcijos – azoto oksidų konversija į N_2 , degunis naudojamas CO oksidavimui į CO_2 . Eksperimento rezultatai pateikiami grafiškai (4 pav.).



4 pav. NO_x priklausomumas nuo CO tiekiant tik I-inį orą

Deguonies koncentracija išeinančiuose dūmuose buvo keičiama nuo 4 % iki 10 %. Esant mažam deguonies pertekliui, kai deguonies kiekis dūmuose yra 4 %, kūryklos viduje, pirminėje degimo zonoje, generuojasi labai dideli CO kiekiai, siekiantys 2900 mg/m^3 . Esant tokiai koncentracijai, NO_x sumažėjo iki 200 mg/m^3 . Toliau mažinant anglies monoksido kiekį, didinant oro tiekimą, azoto oksidų koncentracija didėja, kol pasiekia koncentraciją, būdingą įprasto deginimo metu.

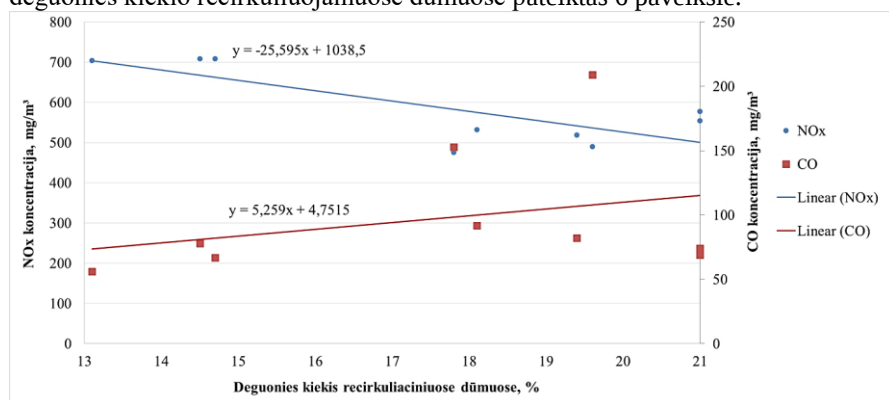
Antroji NO_x mažinimo priemonė buvo recirkuliacinių dūmų tiekimas į pirmio oro tiekimo kanalą. Recirkuliaciniuose dūmuose esančio deguonies kiekis buvo reguliuojamas maišant tam tikrą kiekį aplinkos oro su karšto vandens ruošimo dujinio katilo degimo produktais. Recirkuliacinių dūmų koncentracija nustatyta dūmų analizatoriumi „Multilyzer NG“, matuojant O_2 koncentraciją oro-recirkuliacinių dūmų mišinyje. Azoto oksidų koncentracijos priklausomumas nuo deguonies kiekio recirkuliuojamuose dūmuose pateiktas 5 paveiksle.



5 pav. 1NO_x koncentracijų priklausomumas nuo deguonies koncentracijos pirmiame ore

Mažinant deguonies kiekį tiekiamame pirminiame ore nuo 21 % iki 13 %, nebuvo pastebėta žymi įtaka NO_x koncentracijai. Tiekiant didesnę dalį recirkuliacinių dūmų, azoto oksidų koncentracija nežymiai padidėja. Kuro NO_x susidarymui degimo temperatūra neturi bent kiek ženklesnės įtakos, o deguonies koncentracija degimo zonoje, kai visas degimui reikalingas oras tiekiamas per ardyną, bet kuriuo atveju yra daug didesnė už stochiometrinį kuro oro santykį. Lokaliai, kuro degimo sluoksnyje, oro perteklius yra daug didesnis už 1, nes tik dalis oro yra sunaudojama degimui kuro sluoksnyje. Didesnė oro dalis sunaudojama dujinių gazifikacijos produktų degimui viršardyninėje degimo zonoje.

Sekančio tyrimo metu buvo pasirinkta tiekti recirkuliacinius dūmus į antrinio oro tiekimo kanalus. Recirkuliacinių dujų mišinio sudarymo mechanizmas buvo paliktas toks pat, kaip ir pastarojo eksperimento metu. Recirkuliacinių dūmų mišinys buvo tiekiamas į antrinio oro siurbį. Iš šio siurblio, sklende buvo reguliuojamas recirkuliacinių dūmų srautas. Azoto oksidų koncentracijų priklausomumas nuo deguonies kiekio recirkuliuojamuose dūmuose pateiktas 6 paveiksle.



6 pav. NO_x koncentracijų priklausomumas nuo deguonies koncentracijos antriniame ore

Mažinant deguonies kiekį antriniame ore iki 13 %, padidino NO_x koncentraciją nuo 500–700 mg/m^3 . Recirkuliacinių dūmų tiekimas į antrinę degimo zoną neturi įtakos NO_x koncentracijų mažinimui.

Išvados

1. Didžiausios įtakos NO_x koncentracijų mažinimui turi didelių CO kiekių generavimas kūrykloje. Esant anglies monoksido koncentracijai 2860 mg/m^3 , gautas NO_x mažinimo efektyvumas siekia 85 %, tačiau tokia CO koncentracija viršija LAND 43-2013 direktyvoje nurodytas anglies monoksido normas esamiems ir naujiems kietąjį kurą deginantiems įrenginiams. Vis dėlto, šis me-

todas nuo 2017 m. liepos 1 d. yra itin parankus įsigaliojus vidutinių kurą deginančių įrenginių (VKDĮ) direktyvai 2013/0442, kurioje numatyta visiškai neriboti anglies monoksido koncentracijos išmetamuose dūmuose.

2. Recirkuliacinių dūmų tiekimas atskirais atvejais į pirminę ir antrinę degimo zonas turėjo nedidelės įtakos NO_x koncentracijų redukcijai. Didesnį efektyvumą pasiekė recirkuliacinių dūmų tiekimas į antrinę degimo zoną, kuomet deguonies kiekis buvo 18 %, tačiau NO_x koncentracijų mažinimo efektyvumas nebuvo didesnis nei 16 %.

Literatūra

1. APLINKOS APSAUGOS AGENTŪRA. Taršos integruota prevencija ir kontrolė (TIPK), Informacinio dokumento apie geriausius prieinamus gamybos būdus (GPGB) dideliems kurą deginantiems įrenginiams anotacija. 2005
2. HOUSHFAR, Ehsan; LØVÅS, Terese; SKREIBERG, Øyvind. Experimental investigation on NO_x reduction by primary measures in biomass combustion: Straw, peat, sewage sludge, forest residues and wood pellets. *Energies*, 2012, 5.2: 270-290.
3. GLARBORG, Peter; JENSEN, A. D.; JOHNSON, Jan Erik. Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2003, 29.2: 89-113.
4. BAUKAL JR, Charles E. Oxygen-enhanced combustion. CRC press, 2010.
5. Švenčianas P. Biosferos apsauga šiluminėje energetikoje. Kauno technologijos universiteto senato patvirtintas vadovėlis šiluminės energetikos specialybės studentams. 1994.

Experimental investigation of fuel NO_x decreasing during combustion of furniture manufacturing waste pellets

Summary

In methodology of this research work you can find information about measuring equipment, working principles and characteristics that were used during the experiments. A combustion plant used in the experiment is described widely. For the experimental inquiry a research object – furniture manufacturing waste pellets with high quantities of nitrogen was chosen. During experimental investigation primary NO_x reduction methods were exercised. Experimental research results are plotted by graphs. These results are described and analysed.

2 ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI

Garų kondensacijos potencialo įvertinimas esant dvifaziui tekėjimui horizontaliame stačiakampiniame kanale

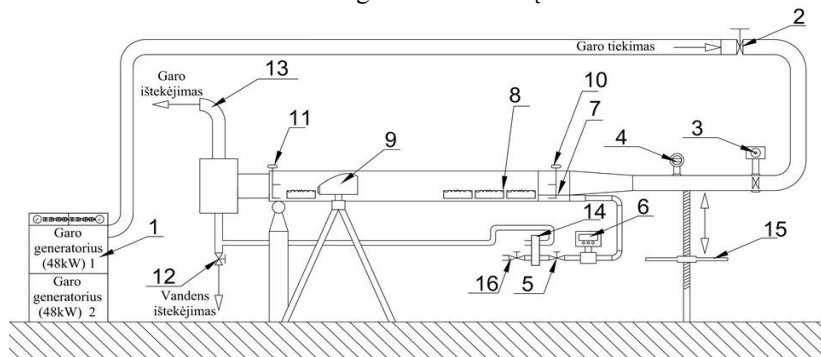
Darius Laurinavičius
Lietuvos energetikos institutas

Įvadas. Eksploatuojant chemijos, elektronikos ir energetikos pramonės objektus, daugelyje jų yra naudojamos skystosios ar dujinės tokiosios terpės. Paprastai tai būna dujų ir skysčio fazių tekėjimai – garas/vanduo, oras/vanduo. Įvykus šilumnešio praradimo avarijai branduoliniuose įrenginiuose ir esant avariniam rektoriaus aušinimui, garas tam tikrose jo vietose tiesiogiai kontaktuoja su šaltu vandeniu. Aušinimo sistemoje atsiranda dvifazis tekėjimas, kuris, atsižvelgiant į slėgio sąlygas, gali būti tiek vienkryptis tiek priešpriešinis. Nagrinėjant dvifazio tekėjimo ypatumus, reikia įvertinti skirtingus tekėjimo režimus bei kanalų, vamzdžių geometrines savybes [1]. Dėl šių veiksnių gali skirtis dvifazio srauto tekėjimo sąlygos, tuomet kinta garo kondensacijos intensyvumas, kuriam kintant keičiasi ir pats tekėjimas. Šis teigiamas sąryšis sukelia vietinio slėgio pokyčius, padidėja hidraulinių smūgių tikimybė, dėl kurių gali įvykti šiluminių ar branduolinių elektrinių aušinimo vamzdžių trūkiai. Garo kondensacijos intensyvumas priklauso nuo šilumos nuvedimo efektyvumo nuo tarpfazinio paviršiaus į vandens gilumą. Todėl labai svarbu suprasti kondensacijos metu vykstančių reiškingų sąryšių vandenyje. Norint juos geriau suprasti, yra atliekami eksperimentiniai tyrimai bei skaičiavimai specialiomis kompiuterinėmis programomis. Tačiau pastarosios programos dėl eksperimentinių duomenų trūkumo neleidžia pilnai išanalizuoti garo kondensacijos ir šilumos nuvedimo nuo tarpfazinio paviršiaus dėsningumų. Tokių reiškingų modeliavimas galimas tik esant labai tiksliai apibrėžtoms sąlygoms, turint pakankamai eksperimentinių duomenų.

Šiame darbe buvo pamatuoti vandens temperatūros laukai tekant vienkryptiui dvifaziui srautui horizontaliame stačiakampiniame kanale. Pagal gautas vertes paskaičiuotas garo kondensacijos potencialas esant skirtingiems vandens ir garo įtekėjimo greičiams į kanalą. Rezultatai parodė, jog padidinus tiekiamo vandens greitį du kartus, garo kondensacijos potencialo vertės padidėja nuo 2 iki 50 kartų. Padidinus tiekiamo garo greitį nuo 6 iki 12 m/s, garo kondensacijos potencialo vertė sumažėjo iki 13 kartų.

Metodika. Siekiant nustatyti garo kondensacijos potencialo vertes, esant skirtingiems vandens ir garo tekėjimo režimams horizontaliame stačiakampiniame kanale 1000 x 100 x 20 mm (1 pav.) tekant vienkryptiui dvifaziui srautui buvo išmatuoti vandens temperatūros profiliai. Kanalas pagamintas iš 10 mm storio nerūdijančio plieno, kurio vienoje sienelėje, skirtingais atstumais (166, 312, 458,

932 mm) nuo kanalo pradžios, ties vandens sluoksnio lygiu buvo sumontuoti 4 (100 x 25 x 2 mm) metalo keramikos ($MgAl_2O_4$) langeliai, pro kuriuos ir buvo matuojama vandens temperatūra. Vandens sluoksnio aukštis kanale – 25 mm, o garo – 75 mm. Vandens lygis kanale, atsižvelgiant į tekėjimo režimą, buvo palai- komas naudojant užtvarą kanalo gale bei keičiant kanalo posvyrio kampą (1 pav. 15). Tiekiamo vandens temperatūra į kanalą buvo 25 °C, garo – 105-110 °C. Tyri- mo metu vanduo į kanalą buvo tiekiamas esant 0,014 ir 0,028 m/s, o garo 6, 8, 10, 12 m/s greičiams. Garas prieš patekdamas į kanalą pratekėjo pro mažų vamzdelių pluštą – „korį“, kurio dėka srautas (tėkmė) buvo stabilizuojamas. Vandens tempe- ratūros laukų matavimai buvo atliekami naudojant infraraudonųjų spindulių ka- merą SC-5000. Šis termografijos metodas leido pamatuoti vandens temperatūros laukus su labai didele skiriamąja geba (25 taškai/1mm²), tačiau tik 30 μm vandens gylyje dėl didelio (0,98) vandens emisijos koeficiento 3-5 μm infraraudonųjų spin- dulių diapazone. Matavimai buvo atliekami 30 s, 50 kadry per sekunde dažniu. Vienam matavimui iš viso buvo gauta 1500 kadry. Duomenis buvo vidurkinami.

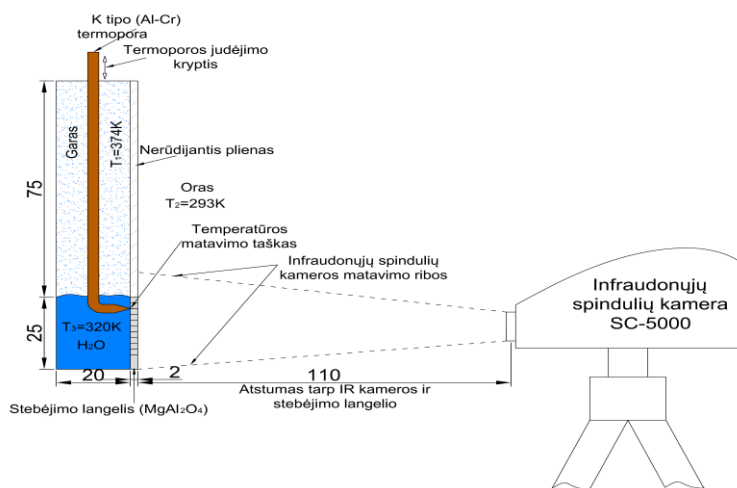


1 pav. Eksperimentinis stendas. 1 – garo generatoriai (288 kW), 2 – tiekiamo garo rutulinė sklendė, 3 – garo srauto valdymo sklendė, 4 – garo srauto matuoklis, 5 – vandens srauto valdymo sklendė, 6 – vandens srauto matuoklis, 7 – korys, 8 – Spinel IR optinis stebėjimo langas, 9 – infraraudonųjų spindulių (IR) kamera SC-5000, 10, 11 – K tipo termoporos, 12 – vandens pertekliaus šalinimo anga, 13 – garo išteklėjimo anga, 14 – šilumokaitis, 15 – kanalo posvyrio kampo reguliavimo įtaisas, 16 – šilumokaičio aušinimo sklendė

Siekiant įsitikinti matavimo tikslumu atlikti patikrinamieji matavimai, kurių metu buvo matuojama temperatūra prie kanalo sienelės naudojant termoporą ir IR kamerą (2 pav.). Gauti rezultatai parodė, kad dėl stačiakampio kanalo sienelės ir metalo keramikos langelio įtakos, kurie turi aukšto šilumos laidumo koeficientą, šiluma gana lengvai nutekėjo nuo garo zonos į vandenį. Ties garo ir vandens tarpfaziniu paviršiumi temperatūros matavimo paklaidos siekė iki 2-3 °C, o žemesniuose vandens sluoksniuose apie 1 °C. Termoporos matavimo paklaida apie 1 °C.

Siekiant matavimo tikslumo, svarbu užtikrinti, kad kiekvieno tekėjimo režimo metu kraštinės matavimo sąlygos būtų kiek įmanoma vienodesnės. Tuo tikslu eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami tokia seka:

1. Nustatomas tiekiamo vandens ir garo greitis bei pradinė temperatūra.
2. Laukiama kol nusistovės sistemos stacionari būsena.
3. Atliekami matavimai ties 4-iais skirtinguose kanalo vietose esančiais langleliais.
4. Toliau nustatomas naujas vandens ir (ar) garo greitis ir matavimai kartojami.



2 pav. Vandens temperatūros matavimas naudojant termoporą ir infraraudonųjų spindulių kamerą

Besikondensuojančiame dvifaziame tekėjime atsipalaiduojanti fazinio virsmo šiluma šildo tekančią vandenį. Tekėjimo kondensacijos potencialui įvertinti panaudotas Jakob'o skaičius Ja [2], kuris buvo modifikuotas į Ja^* (1). Jis parodo kokią dalį garo srauto gali sukondensuoti ir nuvesti šaltesnis vanduo. Garo kondensacijos potencialas tiesiogiai priklauso nuo pratekančio vandens temperatūros. Modifikuotas Ja^* kriterijus skaičiuojamas:

$$Ja^* = \frac{\dot{m}_f \cdot c_{p,f} (T_s - T_f)}{\dot{m}_g \cdot h_{fg}} \quad (1)$$

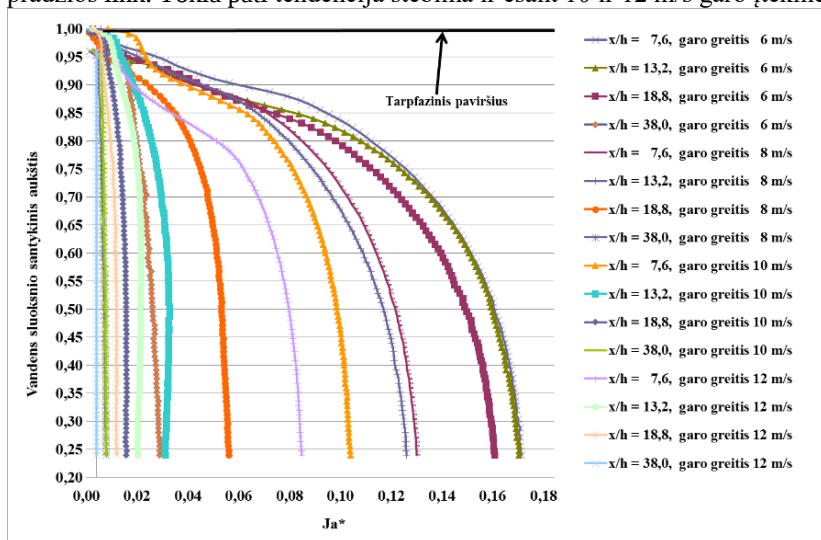
čia: $\dot{m}_f$ – vandens masinis srautas [kg/s], $c_{p,f}$ – vandens specifinė šiluma [$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$], T_s – sotinimo temperatūra [K], T_f – lokali vandens temperatūra [K], $\dot{m}_g$ – garo masinis srautas [kg/s], h_{fg} – garo entalpija [kJ/kg].

Ja^* skaitiklis nusako kiek kondensacijos metu vanduo gali sugerti šilumos, o vardiklis kiek iš viso šilumos išsiskiria garo kondensacijos metu.

Rezultatai. Ties skirtingais kanalo skerspjūviais išmatuotų temperatūros profilių lyginimas tarpusavyje yra sudėtingas dėl duomenų gausos (įvairūs garo/vandens tekėjimo greičių deriniai). Dėsningumai yra sunkiai pastebimi ir interpretuojami. Siekiant palengvinti tiesiogiai išmatuotų duomenų analizę buvo paskaičiuoti išvestiniai parametrai. Vienas tokių parametru modifikuotas Ja^* kriterijus.

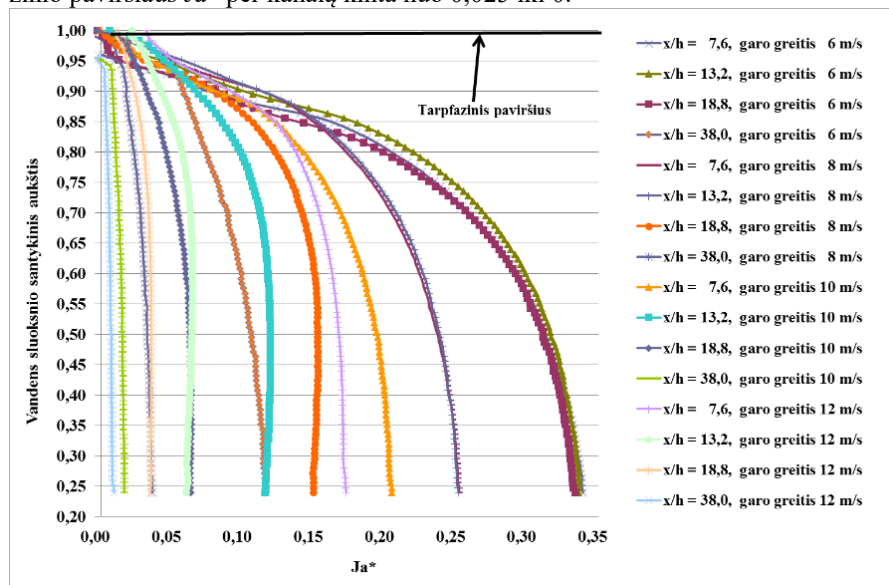
Siekiant tarpusavyje palyginti su skirtingais pradiniais tekėjimo parametrais atliktus eksperimentus buvo paskaičiuotas Ja^* , panaudojant vietinę vandens temperatūrą, išmatuotą IR metodu.

Ja^* didžiausios vertės ($\sim 0,17$) nustatytos kanalo apačioje esant mažiausiam tyrinėtam garo įtekėjimo į kanalą greičiui (3 pav.). Didėjant tiekiamam garo greičiui, garo kondensacijos metu išsiskyrusio šilumos kiekio nuvedimas į vandens tūrį intensyvėja, atitinkamai mažėja ir Ja^* vertės. Kadangi Ja^* vertės koreliuoja su išmatuotais vandens temperatūros profiliais, todėl esant 6 m/s garo įtekmei ties pirmiais trimis stebėjimo langeliais ($x/h = 7,6, 13,2, 18,8$), Ja^* profiliai skiriasi labai nežymiai. Šiuo atveju šiluma nuo tarpfazinio paviršiaus daugiausia nuvedama laidumu, konvekcija nevyksta. Tačiau kanalo pabaigoje $x/h = 38,0$ Ja^* vertės labai (~ 6 kartus) sumažėja. Taigi, vandens tekėjimo režimas iš laminarinio perėjo į turbulentinį. Esant 8 m/s garo įtekmei, laminarinis tekėjimas išliko ties dviem pirmiais langeliais iki $x/h = 13,2$. Tai yra turbulentinio tekėjimo pradžia pasislunko kanalo pradžios link. Tokia pati tendencija stebima ir esant 10 ir 12 m/s garo įtekmei.



3 pav. Ja^* vertės kaita kanale, esant skirtingam garo įtekmei greičiui, kai vandens įtekme buvo 0,014 m/s, 25°C

Padidinus garo įtekmės greitį, sumažėja Ja^* dėl padidėjusios vandens temperatūros. Kanalo gale ties $x/h = 38,0$ Ja^* sumažėja iki 0. Kondensacijos potencialo didžiausia vertė labiausiai sumažėja kanalo gale ($x/h = 38,0$), kai garo įtekmės greitis sumažėja nuo 10 iki 12 m/s (22,3 kartus nuo 0,076 iki 0,0034). Prie tarpfazinio paviršiaus Ja^* per kanalą kinta nuo 0,025 iki 0.



4 pav. Ja^* vertės kaita kanale, esant skirtingam garo įtekmės greičiui, kai vandens įtekmė buvo 0,028 m/s, 25°C

Padidinus tiekiamo vandens greitį nuo 0,014 (3 pav.) iki 0,028 m/s (4 pav.), maksimali garo kondensacijos potencialo vertė ($x/h = 38,0$) padidėjo 50 kartų (kai garo greitis 12 m/s). Ties tarpfaziniu paviršiumi Ja^* per kanalą sumažėjo nuo 0,04 iki 0. Daugelyje kitų atvejų Ja^* profilių kitimo tendencija 4 pav. išliko tokia pat kaip 3 pav., tik dėl dvigubai padidėjusio vandens greičio dvigubai išaugo Ja^* vertės.

Išvados

Atlikus garo kondensacijos potencialo įvertinimą, esant stratifikuotam dvifaziam besikondensuojančiam vienakrypčiam tekėjimui uždaramame stačiakampiam kanale panaudojant modifikuotą Ja^* kriterijų, gautos šios išvados:

1. Garo kondensacijos potencialui tiesiogiai įtakos turi tiekiamo vandens debitas. Jį padidinus du kartus (garo greitis pastovus) Ja^* išauga nuo 2 iki 50.

2. Didinant tiekiamo garo greitį (nuo 6 iki 12 m/s), garo kondensacijos potencialas mažėja Ja^* iki 7 kartų, esant 0,014 m/s ir 13 kartų, esant 0,028 m/s vandens įtekėjimo greičiams.
3. Didinant tiekiamo garo greitį, kai vandens greitis yra pastovus, padidinto maišymosi vandens zonos pradžia pasislinko kanalo pradžios link.

Literatūra

1. Bestion D. The difficult challenge of a two-phase CFD modelling for all flow regimes. Nuclear engineering and design. 2014, Vol. 279 p. 116-125
2. Svanholm, K. A study of hydrodynamic instability in natural circulation boiling coolant channels by means of graphical computation, in: Multiphase Transport: Fundamentals, Reactor Safety, Applications. 1987, vol. 3. Ed. by T.N. Veziroglu. Washington DC: Hemisphere, : 1337–1372

Evaluation of steam condensation potential on the two-phase flow at the rectangular horizontal channel

Summary

The aim of this work was to measure temperature fields of water flowing co-current two-phase flow in horizontal rectangular channel. Based on the obtained temperature values the steam condensation potential values (modified Ja^* number) were calculated at different water (0.014 and 0.028 m/s) and the steam inlet velocities (6, 8, 10, 12 m/s) per channel. Results showed that Ja^* increases from 2 to 50 times, when velocity of water has increased twice. Meanwhile, Ja^* decreases up to 13 times, when velocity of steam has increased from 6 to 12 m/s.

Išpurškšto vandens lašelių kondensacinio režimo dėsningumai šalinamų drėgnų biokuro dūmų šilumos utilizavimo technologijose

Monika Maziukienė, Gintautas Miliauskas

Kauno technologijos universitetas

Išvadas. Vandens išpurškimas sutinkamas daugelyje terminių technologijų. Plečiantis biokuro balansui energetikoje susiduriama su šilumos utilizavimo iš šalinamų drėgnų dūmų problema. Ji sprendžiama iš dūmų atgaunant vandens fazinių virsmų šilumą kondensaciniuose ekonomaizeriuose. Juose taip pat pritaikomas vandens išpurškimas: rekuperaciniuose ekonomaizeriuose vanduo išpurškiamas jų viršutinėje sekcijoje gravitacinės kondensatos plėvelės vamzdeliuose hidrodinamai pagerinti, o kontaktinio tipo ekonomaizeriuose vandens garas iš biokuro dūmų iškondensuojamas tiesiog ant vandens lašelių. Pirmuoju atveju, būtina gerai pažinti vandens lašelių garavimo, o antruoju atveju – lašelių paviršiuje vykstančio kondensacijos proceso dėsningumus. Tai pasaulyje plačiai gvildinama "lašo" problematika [1], kuriai išpurškšto vandens atveju išspręsti pritaikoma lašelio fazinių virsmų ciklo, apimančio kondensacinį ir pereinamojo bei pusiausviro garavimo režimus, metodika [2]. Šiame darbe įvertinama vandens lašelio šilumokaitos ir masės mainų kraštinių sąlygų drėgnuose dūmuose įtaka kondensaciniam fazinių virsmų režimui.

Lašelių fazinių virsmų ciklo skaitinio tyrimo metodika. Fazinių virsmų ciklo skaitinio tyrimo metodika grindžiama šilumos srautų lašelio paviršiaus vidinėje (q_{Σ}^-) ir išorinėje (q_{Σ}^+ ir q_f^+) pusėse balanso modeliu:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{\Sigma}^+(\tau) + \bar{q}_{\Sigma}^-(\tau) + \bar{q}_f^+(\tau) &\equiv 0 \rightarrow \\ \rightarrow \bar{q}_c^-(\tau) + \bar{q}_r^-(\tau) + \bar{q}_c^+(\tau) + \bar{q}_r^+(\tau) + \bar{q}_f^+(\tau) &\equiv 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Išraiška (1) aprašomas funkcionalas apibrėžia lašelio paviršiaus temperatūros funkciją $T_R(\tau)$, lašelio fazinių virsmų ciklo režimuose užtikrinančią prie paviršiaus pritekančių ir nutekančių šilumos srautų atitikimą. Radiaciniai šilumos srauto tankiai lašelio paviršiaus pusėse $q_r^+ \cong q_r^-$ apibrėžiami pagal metodiką [3], atsižvelgiančią į vandens optinių spektrinių savybių savitumus. Konvekcija nuo dūmų lašeliui teikiamos šilumos srautas apibrėžiamas pagal Niutono dėsnį, konvekcija į lašelį nuvedamos šilumos srautas aprašomas pagal Furje dėsnį, kondensacijos procese išsiskiriantis arba garavimui reikalingas fazinių virsmų šilumos srauto tankis q_f^+ išreiškiamas garo srauto lašelio paviršiuje tankio m_g^+ ir vandens fazinių virsmų šilumos L sandauga:

$$Nu(\tau) \cdot \lambda_{gd}(\tau) \frac{T_d - T_R(\tau)}{2R(\tau)} \cdot \frac{\ln[1 + B_T(\tau)]}{B_T(\tau)} - \lambda_v(\tau) \cdot k_c^- \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} - m_g^+(\tau) \cdot L(\tau) \equiv 0 \quad (2)$$

Spoldingo šilumos pernešimo parametru B_T atsižvelgiama į Stefano hidrodinaminio srauto įtaką lašelio konvekcinio šildymo intensyvumui. Vandens garo ir dūmų mišinio fizikinės savybės parenkamos pagal "1/3" taisyklę [1]. Garo srautas lašelio paviršiuje kondensaciniame režime laikomas neigiamu, o garavimo režime – teigiamu, o jo tankis apibrėžiamas pagal [3] aptartą analitinį modelį. Temperatūros lauko lašelyje gradientas aprašomas šilumos plitimo pusskaidrėje sferoje laidumu ir spinduliuavimu pagal integralaus tipo analitinį modelį [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \frac{2\pi}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n n \int_0^{\tau} \left[(-1)^n \frac{R}{n\pi} \frac{dT_R}{d\tau} + \frac{1}{R\rho c_p} \int_0^R \left(\sin \frac{n\pi r}{R} - \frac{n\pi r}{R} \cos \frac{n\pi r}{R} \right) q_r dr \right] \exp \left[-d \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau \quad (3),$$

o šilumos pernešimo lašelyje suintensyvėjimas dėl vandens galimos cirkuliacijos įvertinamas efektyviuoju šilumos laidžio parametru k_c^- pagal metodiką [1]. Sferinio lašelio tūrio kitimas dėl vandens plėtimosi ir lašelio paviršiuje susikondensuojančio garo arba išgaruojančio vandens, fazinių virsmų cikle apibrėžiamas išraiška:

$$\frac{1}{3} \frac{d[\rho_v(\tau) R^3(\tau)]}{d\tau} = -R^2(\tau) \cdot m_g^+(\tau). \quad (4)$$

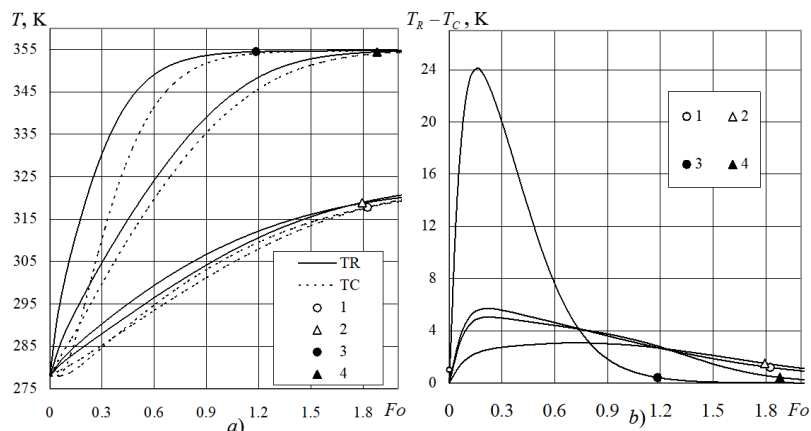
Išraiškų (2-4) sistemos skaitinei schemai sudaryti apibrėžiama ciklo trukmė $\tau \equiv 0 \div \tau_f$ ir įvedama bematė lašelio radialinė koordinatė $\eta = r / R(\tau) \equiv 0 \div 1$. Numatčius I kontrolinių laiko momentų τ_i ir J kontrolinių tarpinių koordinatžių η_j , graduojami laiko ir lašelio koordinatžių tinkleliai, kad $\sum_{i=1}^{I-1} (\tau_{i+1} - \tau_i) = \tau_f$ ir

$$\sum_{j=1}^{J-1} (\eta_{j+1} - \eta_j) = 1. \text{ Kiekvienu laiko momentu, greičiausio nusileidimo momentu}$$

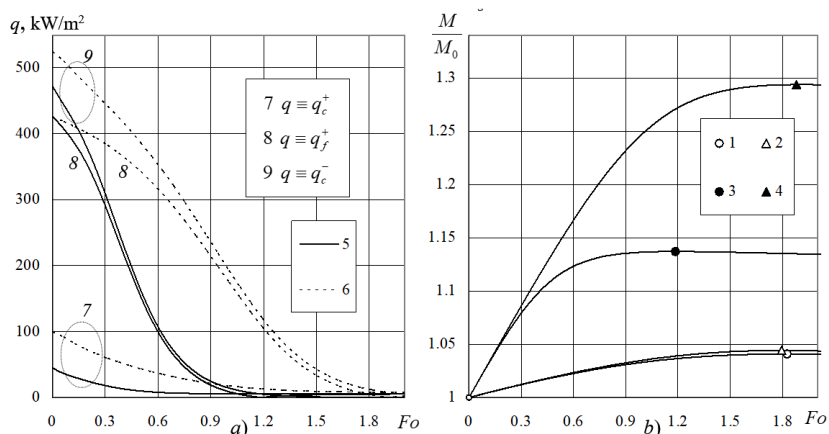
vykdomas iteracinis ciklas, lašelio paviršiaus momentinei temperatūrai $T_{R,i}$ apibrėžti. Teikiamas reikalavimas, jog $T_{R,i}$ temperatūros užtikrintų (2) sąlygos reikavimą aukštesniu nei penkių šimtųjų procento pasikliautinu. Iteracinė skaitinė schema optimizuota pagal metodiką [4].

Tyrimo rezultatai. Sumodeliuotas 278K temperatūros 150 mikrometrų skersmens vandens lašelio fazinių virsmų ciklo kondensacinis režimas 370K temperatūros žemo $\bar{p}_g = 0.1$ ir aukšto ($\bar{p}_g = 0.5$) drėgnumo dūmuose. Dūmų drėgnumas apib-

rėžtas vandens garo ir dalinio slėgio dūmuose p_g , ir dūmų slėgio p_d santykiu $\bar{p}_g = p_g / p$, kai $p = 0.1 \text{ MPa}$. Išorinis šildymas apibrėžtas Reinoldso kriterijumi Re_0 atvejams, kai lašeliai generuojami $Re_0 = 0$ ir $Re_0 = 50$ sąlygomis, o $q_r = 0$. Lašelio terminės būsenos kitimui kondensaciniame režime ryški slydimo ir dūmų drėgnumo įtaka (1 pav.).



1 pav. Šilumos ir masės mainų kraštinių sąlygų įtaka vandens lašelio terminiai būsenai (a) ir neizotermiškumui (b) kondensaciniame fazinių virsmų režime. $Fo = a_0 \cdot \tau / R_0^2$; $\bar{p}_g$: (1, 2) 0.1, (3, 4-6) 0.5; Re_0 : (1, 3) 0, (2, 4) 50.



2 pav. Šilumos srautų lašelio paviršiuje dinamika (a) ir lašelio masės augimas (b) kondensaciniame fazinių virsmų režime. $\bar{p}_g$: (1, 2) 0.1, (3, 4-6) 0.5; Re_0 : (1, 3, 5) 0, (2, 4, 6) 50.

Kondensaciniame režime lašelio paviršius pašyla nuo pradinės T_0 temperatūros iki rasos taško T_n temperatūros (1 pav. a), kurią nurodo šio režimo pabaigą fiksuojantys taškai. Lašelių slydimo intensyvumo įtaka lašelio terminei būsenai ypač išryškėja didesnio drėgnumo dūmuose (1 pav. b): $Re_0 = 0$ šilumokaitos atveju stebimas 24 K siekiantis neizotermiškumo pikas, dėl $Re_0 = 50$ sąlygomis slystantčiame lašelyje kylančios vandens priverstinės cirkuliacijos sumažėja iki 6 K. Tai sudaro prielaidas sulėtėti lašelio paviršinių sluoksnių šilimo tempui ir juntamai išaugti kondensacinio režimo trukmei (1 pav.). Kondensaciniame režime šilumos srautai slopsta (2 pav. a), o lašelio tūris ir masė išauga. Aukšto drėgnumo dūmuose slystantis lašelis gali pasunkėti net 30 procentų (2 pav. b).

Apibendrinimas

Drėgnuose dūmuose išpurkšto vandens lašelių fazinių virsmų ciklo kondensacinį režimą stipriai lemia šilumokaitos ir masės mainų kraštinės sąlygos. Pernašos procesų dėsningumams esminės įtakos turi dūmų drėgnumas ir lašelio slydimo dūmuose intensyvumas. Į tai būtina atsižvelgti optimizuojant dūmų šilumos utilizavimo technologijas.

Literatūra

1. Abramzon B., Sirignano W.A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1989, V. 32, p. 1605–1618.
2. Miliauskas G., Maziukienė M., Ramanauskas V. Modeling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas: 3. Energy and thermal states analysis of slipping droplet in a humid air flow. 2015, V. 21 (5), p. 377-383.
3. Miliauskas G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2001, V. 44, p. 785-798.
4. Miliauskas G., Adomavičius A., Maziukienė M. Modelling of water droplets heat and mass transfer in the course of phase transitions. I: Phase transitions cycle peculiarities and iterative scheme of numerical research control and optimization. 2016, V. 21 (1), p. 135-151.

Sudėtinių šilumos ir masės pernašos procesų biokuro terminėse technologijose apibrėžimo poreikis ir savitumai

Gintautas Miliuskas*, Virginijus Ramanauskas**,

* Kauno technologijos universitetas, ** UAB „Enerstena“

Žmonijos vystymasis yra tiesiogiai susijęs su augančiu energijos vartojimu praktinėje veikloje ir buityje. Dėl iškastinio kuro ribotų išteklių juo grindžiamas energijos gamybos technologijas siekiama įmanomai pakeisti atsinaujinančių energijos išteklių technologijomis. Jau tradiciniu galima vadinti hidroenergijos, vėjo ir saulės energijos panaudojimą. Tačiau šių šaltinių sezoniskumas ir nepastovumas reikalauja nemažo energijos atsargų užtikrinančių lankstesnių energijos gamybos technologijų lygiagretaus plėtojimo. Pastaruoju metu pasaulio energetikoje šiluminės energijos gamyboje vis plačiau pritaikomos biokuro deginimo technologijos. Ši tendencija ryški ir Lietuvos energetikoje, kai atvežtinis iškastinis kuras katilinėse šiluminei energijai generuoti pakeičiamas vietiniu biokuru – dažniausia medienos drožlėmis.

Rekonstruojant esamas katilines ar statant naujas biokuro katilines reikia kompleksiskai įvertinti ir suderinti ekonominius bei gamtosauginius aspektus. Ekonominis biokuro technologijų plėtojimą skatinantis faktorius susijęs su pagaminamos šiluminės energijos savikainos sumažėjimu ir prielaidų papildomoms darbo vietoms regionuose susikurti sudarymu, augant biokuro gavybos, apdorojimo ir tiekimo sistemų vystymo poreikiui. Gamtosauginis aspektas reikalauja užtikrinti kiek galima mažesnę aplinkos taršą su šalinamomis biokuro technologijų atliekomis: žemo šiluminio potencialo technologiniu vandeniu ir atidirbusiais biokuro deginimo produktais. Efektyvių gamtosauginių priemonių įdiegimas reikalauja juntamų finansinių investicijų, todėl biokuro potencialo išnaudojimas privalo būti grindžiamas naujomis pažangiomis biokuro technologijomis. Jų efektyvumą galima užtikrinti tik giliai pažinus šilumos ir masės pernašą grindžiamus sudėtinius technologinius procesus, juos kompleksiskai įvertinus ir optimizavus jų vyksmo kraštines sąlygas. Problemos sprendimą apsunkina tai, jog reikia tarpusavyje susieti ir kompleksiskai įvertinti pernašos procesus biokuro ir oro tiekimo į kūryklą sistemose, pačioje kūrykloje, degimo produktų šilumą išnaudojančiose ir juos šalinančiose sistemose, kuriose galimos įvairios savitos šalinamų dūmų kokybės gerinimo ir šiluminio potencialo išnaudojimo technologijos.

Šilumos ir masės pernašos procesai atskirose biokuro technologijose vyksta labai plačiame kraštinių sąlygų, ypač temperatūrinio aspektu, diapazone, todėl norimui rezultatui pasiekti reikalingi platūs kombinuoti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai. Atraminiais turėtų būti analitiniais ir skaitiniais metodais grindžiami teoriniai tyrimai, kurių rezultatų patikimumą privalu kontroliuoti selektyviais, analogiškose kraštinėse sąlygose atliktais tyrimais eksperimentiniuose stenduose. Pra-

diniame etape tyrimuose pageidautina išskirti santykinai savarankiškai analizuotinas biokuro technologines sistemas, išryškinti joms būdingus pernašos procesus, apibrėžti būdingas jų vyksmų kraštines sąlygas ir iškelti tyrimams konkrečius uždavinius. Pagal atskirų sistemų tyrimo rezultatų apibendrinimus ir išryškintus sudėtinių pernašos procesų sąveikos dėsningumus antrajame etape jau galima apibrėžti kompleksinio įvertinimo gaires ir spręsti atskirų sistemų technologinio suderinamumo ir procesų optimalaus organizavimo problemą ekonominių ir gamtos sauginių faktorių suderinamumo kontekste. Šiame darbe aptarsime biokuro degimo produktų sudėties ir jų entalpijos kitimo apibrėžimo aspektus bei sudėtinių pernašos procesų sąveikos specifiką vandens įpurškimo į juos kontekste.

Biokure sukauptos potencinės energijos konversija į šiluminę energiją įvyksta degųjų medžiagų (daugiausia anglies, vandenilio ir sieros) egzoterminių cheminių reakcijų metu kūrykloje išsiskiriant šilumai. Biokuro degimo procese susidaro degimo produktai, kurie yra dujų ir kietų dalelių aukštos temperatūros heterogeninis mišinys. Jo sudėtį pagal masę apibrėžia biokuro dūmų ir kietų dalelių masinė koncentracija:

$$\bar{g}_{dp} = \bar{g}_{d,dp} + \bar{g}_{kd,dp} \quad (1)$$

čia: $\bar{g}_{dp} = 1$ – biokuro degimo produktų heterogeninio mišinio bendroji vienetinė masinė koncentracija; $\bar{g}_{d,dp} = G_d / G_{dp}$ – dūmų masinė koncentracija biokuro degimo produktuose, kg/kg_{dp} ; $\bar{g}_{kd,dp} = G_{kd} / G_{dp}$ – kietų dalelių masinė koncentracija biokuro degimo produktuose, $\text{kg}_{kd}/\text{kg}_{dp}$; G_d – dūmų masinis srautas, kg/s ; G_{kd} – dūmų nešamų kietų dalelių masinis srautas, kg/s ; G_{dp} – biokuro degimo produktų masinis srautas, kg/s . Susidarančių degimo produktų masinį srautą apibrėžia į kūryklą tiekiamo biokuro ir oro bei galimai įpurškiamo vandens (ar jo garo) srautai G_{bk} , G_o ir G_v atitinkamai:

$$G_{dp} = G_{bk} + G_o + G_v \quad (2)$$

Biokuro degimo produktų tūrinį srautą $V_{dp} = G_{dp} / \rho_{dp}$, m^3/s apibrėžia dūmų ir kietų dalelių heterogeninio mišinio tankis:

$$V_{dp} = G_{dp} / \rho_{dp}, \quad \rho_{dp} = \bar{v}_{d,dp} \rho_d + \bar{v}_{kd,dp} \rho_{kd} \quad (3)$$

kuriam apibrėžti reikia žinoti dūmų ir kietų dalelių tūrinę koncentraciją biokuro degimo produktuose $\bar{v}_{d,dp}$, $\text{m}_d^3 / \text{m}_{dp}^3$ ir $\bar{v}_{kd,dp}$, $\text{m}_{kd}^3 / \text{m}_{dp}^3$ atitinkamai.

Savo ruožtu, biokuro dūmus sudaro sausų-nesikondensuojančių dujų ir vandens garo mišinys. Kokybiškam degimo procesui užtikrinti, į kūryklą tiekiamas perteklinis oras, todėl sausų dujų mišinyje dūmuose yra deguonies (O_2), azotas (N_2)

atsiranda su oru pateiktą azotą kiek papildant kure esančiu azotu, taip pat įeina degimo produktai – anglies dvideginis (CO_2) bei sieros oksidas (SO_2), ir dar gali būti nevisiško sudegimo produkto – anglies monoksido (CO). Tai nesikondensuojančios dujos. Kondensuotis galintis vandens garas biokuro dūmuose susidaro degant kure esančiam vandeniliui bei atsiranda išgaruojant į kūryklą tiekiamame ore ir kure esančiai drėgmei. Papildomai degimo produktai gali sudrėkti, į kūryklą įpurškiant vandens ar jo garo fakelo liepsnai reguliuoti. Kūrykloje išpurkšto vandens šilumokaitos ir fazinių virsmų procesai vyksta aukštoje temperatūroje, jų intensyvumas didelis, todėl vandens lašeliai sparčiai šyla ir visiškai išgaruodami padidina iš kūryklos ištekančių dūmų drėgnumą. Dūmų, kaip dujų mišinio, sudėtį apibrėžia sausų dūmų ir vandens garo masinės dalys:

$$\bar{g}_d = \bar{g}_{sd} + \bar{g}_g. \quad (4)$$

čia: $\bar{g}_d = 1$ – biokuro dūmų dujų mišinio bendroji vienetinė masinė koncentracija; $\bar{g}_{sd} = G_{sd} / G_d$ – sausų dūmų masinė koncentracija dūmų dujų mišinyje, $\text{kg}_{sd} / \text{kg}_d$; $\bar{g}_g = G_g / G_d$ – vandens garų masinė koncentracija dūmų dujų mišinyje, $\text{kg}_g / \text{kg}_d$. Tiesiogiai apibrėžti biokuro dūmų sudėtį gana sudėtinga. Todėl tradiciškai degimo procese susidarančių dūmų dujų mišinio tūris ir jį sudarančių sandų tūriai apibrėžiami normalinių sąlygų ($p = 101325 \text{ Pa}$ ir $T = 273.15 \text{ K}$) atvejui. Tuomet atitinkamo i -ojo dūmų dujų mišinio sando $V_{i,ns}$ tūrio santykiu su dūmų $V_{d,ns}$ tūriu apibrėžiama dūmų dujų mišinio tūrinė (molinė) sudėtis, o po to ir masinė sudėtis:

$$\bar{v}_i = \frac{V_{i,ns}}{V_{d,ns}}; \sum_i \bar{v}_i = 1; \bar{g}_i = \bar{v}_i \frac{\mu_i}{\mu_d}; \mu_d = \sum_{(i)} \mu_i \cdot \bar{v}_i; \sum_i \bar{g}_i = 1. \quad (5)$$

Kadangi dūmų dujų mišinio sudėtį apibrėžiančias tūrines dalis galima išreikšti ir atitinkamų mišinio i sandų dalinių slėgių ir mišinio slėgio santykiu $\bar{p}_i = p_i / p_d \equiv \bar{v}_i$, todėl kartu galima apibrėžti labai svarbų parametą – vandens garo dalinį slėgį drėgnų biokuro dūmų dujų mišinyje:

$$p_g = \bar{v}_g p_d. \quad (6)$$

Biokuro degimo produktų šiluminis potencialas apibrėžiamas jų entalpijos h_{dp} , J/kg_{dp} verte. Pastarąją apibrėžia dūmų ir kietosios frakcijos-pelenų entalpijos $h_{d,dp}$, J/kg_{dp} ir $h_{kd,dp}$, J/kg_{dp} atitinkamai:

$$h_{dp} = h_{d,dp} + h_{kd,dp} = \bar{g}_{d,dp} h_d + \bar{g}_{kd,dp} h_{kd}. \quad (7)$$

Dūmų entalpiją sudaro jų temperatūros ir savitosios šilumos sandauga apibrėžiama dūmų fizinė entalpija $h_{d,fiz}$, taip pat vandens garo masinės dalies dūmų dujų mišinyje ir garo fazinių virsmų šilumos L , J/kg sandauga, apibrėžta dūmuose esančio vandens garo fazinių virsmų entalpija $h_{d,fv}$, todėl:

$$h_{dp} = \bar{g}_{d,dp}(h_{d,fiz} + h_{d,fv}) + \bar{g}_{kd,dp}h_{kd} = \bar{g}_{d,dp}(c_{p,d}T_d + \bar{g}_g L) + \bar{g}_{kd,dp}c_{p,kd}T_d. \quad (8)$$

Išraiškoje (8) kietų dalelių fazinių virsmų galimybė paneigta ir kietų dalelių temperatūra prilyginta dūmų temperatūrai.

Centralizuoto šilumos tiekimo sistemų atveju biokuro katilinėse degimo produktų šiluma tradiciškai išnaudojama termofikaciniam vandeniui šildyti. Aišku, biokuro technologijų pritaikomumas yra žymiai platesnis. Neatsižvelgiant į biokuro degimo produktų šilumą išnaudojančią technologiją, biokuro degimo produktų srauto terminę būseną galima apibrėžti jų vidutinės entalpijos kitimą aprašančia diferencialia energijos lygtimi:

$$\frac{d[\rho_{dp}(\tau)h_{dp}(\tau)]}{d\tau} = q_{sal,isk}(\tau) - q_{nuo}(\tau) - q_{sal,sug}(\tau). \quad (9)$$

Išraiškoje (9): dešinės pusės pirmasis $q_{sal,isk}$, W/m_{dp}^3 narys įvertina šilumą generuojančių energijos šaltinių kūrykloje intensyvumą, kurį apibrėžia biokuro degimo metu vykstančios egzoterminės reakcijos; antrasis q_{nuo} , W/m_{dp}^3 narys įvertina šilumos nuostolių pro kietas sienelės įtaką degimo produktų entalpijai ir jį apibrėžia degimo produktų šilumokaitos su apiplaunamais kietais paviršiais procesas; trečiasis $q_{sal,sug}$, W/m_{dp}^3 narys įvertina degimo produktuose esančių vidinių šilumą sugeriančių šaltinių įtaką ir jį gali apibrėžti įpurkšto vandens lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų procesai. Šių aptartų q įtaka biokuro degimo produktų entalpijos kitimui yra savita ir labai priklauso nuo analizuojamo technologinio proceso savitumų. Kūrykloje daugiausiai įtakos turi vykstantis degimo procesas, dėl kurio degimo produktų entalpija auga. Termofikacinio vandens pašildymo kūrykloje atveju antrasis šilumos nuostolių narys apibrėžia šilumos perdavimo nuo karštų biokuro produktų intensyvumą ekraniniais vamzdžiais tekančiam vandeniui. Dūmų šilumą išnaudojant įprastiniuose šilumokaičiuose, dūmai ataušinami iki 100-200 °C temperatūros, kuri yra aukštesnė už rasos taško temperatūrą, apibrėžiamą vandens garo daliniu slėgiu: $T_{rt} = T_{sot}(p_g)$. Į šalinimo sistemą nukreipiamų dūmų drėgnumas dažniausia būna dar nesumažintas, ir juose esančio vandens garo fazinių virsmų šiluminis potencialas dar yra neišnaudotas. Be to, šalinamų dūmų pa-

kankamai reikšminga yra ir fizinė entalpijos dedamoji. Todėl verta numatyti papildomas technologijas šilumai iš šalinamų dūmų atgauti ir biokuro katilinės šiluminiui efektyvumui padidinti. Šiluma iš šalinamų biokuro drėgnų dūmų utilizuojama kondensaciniuose ekonomaizeriuose, kurie dažniausiai konstruojami kontaktinio arba rekuperacinio šilumokaičio pagrindu. Abiejais atvejais kondensacinių ekonomaizerių technologijose plačiai pritaikomas vandens išpurškimas.

Kontaktinio tipo kondensaciniai ekonomaizeriai veikia dviejų vandens kontūrų principu. Pirmajame kontūre vėsus vanduo tiesiog įpurškiamas į šalinamų biokuro degimo produktų srautą jiems ataušinti ir drėgmei iš dūmų ant šylančių lašelių paviršiaus iškondensuoti. Dažniausiai horizontaliame šilumokaityje vanduo išpurškiamas tam tikru kampu prieš šalinamų biokuro degimo produktų srautą taip, kad ant priešingos sienelės (ar jos dalies) vandens lašeliai nusėstų dar nepašilę iki rasos taško temperatūros. Tai būtina efektyviam kondensacijos procesui lašelių paviršiuje vykti ir galimam lašelių garavimo režimui išvengti. Organizuojant daugiapakopį vandens išpurškimą atsižvelgiama į tai, jog dūmams sausėjant, rasos taško temperatūra mažėja ir kondensacinis fazinių virsmų režimas išpurškto vandens lašelių paviršiuje trumpėja. Surenkamo vandens srauto išaugimą apibrėžia lašelių paviršiuje išsiskyręs kondensato srautas, kuris priklauso nuo šalinamų dūmų drėgnumo ir jų išsausinimo laipsnio. Surinktas vandens ir kondensato srautas plokšteliniame šilumokaityje pašildo antrojo kontūro termofikacinį vandenį, ataušta ir vėl išpurškiamas kontaktiniame kondensaciniame ekonomaizeryje. Šiose šalinamų biokuro degimo produktų šilumos utilizavimo technologijose opus yra pirmojo kontūro vandens užteršimo klausimas, kuris iššaukia labai nepatogią eksploatacinio aspektu plokštelinio šilumokaičio galimo užsiteršimo problemą.

Rekuperacinio tipo ekonomaizeriuose drėgmė iš dūmų iškondensuojama spalvotų metalų pagrindu pagamintame vertikaliniame šilumokaityje, kai degimo produktai teka vamzdeliais, o vanduo purškiamas virš vamzdelių retinės kondensato plėvelės ir degimo produktų srauto hidrodinamikai pagerinti. Tokį priešingą įprastiniams šilumokaičiams, kuriuose didesnės erdvės aparato dalimi įprastai teka mažesnio tankio fluidas, fluidų srautų tekėjimo atvejį apibrėžia siekis išvengti rekuperacinio šilumokaičio užsiteršimo problemos: biokuro degimo produktus nukreipus į didesnio tūrio erdvę tarp vamzdelių, jų greitis sumažėtų ir kietų sienelių paviršių užteršimo galimybė išaugtų, o išvalyti eksploatacijos eigoje galimai susikauptančius drėgnų šlamų sluoksnius būtų keblu. Šalinamų biokuro degimo produktų srautą nukreipus į ribotą vamzdelių vidaus erdvę, teršalams susikaupti vamzdeliuose sąlygos yra daug nepalankesnės, kadangi jų vidinių paviršių tekanti gravitacinė išpurškto vandens ir išsiskyrusio kondensato pagrindu susidariusi gravitacinė plėvelė yra intensyviai dinamiškai kontaktuoja su heterogeniniu dūmų, vandens lašelių ir pelenų dalelių srautu. Šiuo atveju termofikacinis vanduo pašyla tekėdamas erdvėje tarp vamzdelių, o užterštas vandens ir kondensato srautas susikaupia šilumokaičio apatinėje dalyje, apdorojamas specifinėje valymo sistemoje ir reika-

linga jo dalis vėl tiekama išpurkšti virš retinės. Ši šalinamų biokuro produktų šilumos utilizavimo technologija patogi eksploatuoti, tačiau gana imli finansinėms investicijoms. Kaip spręstiną papildomą problemą, galima išvelgti pakankamai sunkiai apibrėžiamas optimalias rekuperacinio kondensacinio ekonomaizerio eksploatacines darbo sąlygas, kadangi galimai deginamo biokuro parametrų kaitai įvertinti, tenka projektuoti šilumokaitį darbui nepalankiausių sąlygų atvejui. Tai daugiausia susiję su šilumos ir masės procesų intensyvumo vamzdeliuose apibrėžimo komplikuoatumu dėl sunkiai prognozuojamos sudėtinių pernašos procesų heterogeninėje vandens ir kondensato gravitacinės plėvelės ir vamzdeliu tekančių vandens lašeliais ir pelenais užterštų biokuro dūmų sistemoje. Šiuo atveju vyksta labai sudėtinga tarpusavio sąveika tarp hidroaerodinaminių, šilumokaitos ir fazinių virsmų pernašos sudėtinių procesų. Apibrėžti šios sąveikos intensyvumą eksperimentiškai realiomis sąlygomis praktiškai nerealų, o skaitiškai modeliuojant iškyla eilės prielaidų poreikis, kurių įtakos įvertinimas modeliavimo rezultatams yra keblus.

Taigi, rekuperacinio tipo kondensaciniu ekonomaizeriu grindžiamos šalinamų biokuro degimo produktų šilumos utilizavimo technologijos optimizavimas yra tiesiogiai susijęs su šios technologijos patobulinimu. Prielaidas tam sudarytų šalinamų biokuro degimo produktų kokybės reguliavimo technologijos įvedimas, prieš juos nukreipiant į kondensacinį ekonomaizerį. Pagrindinė šios papildomos technologijos užduotis būtų – kiek įmanoma gilesnis biokuro degimo produktų išvalymas ir norimų parametrų temperatūros ir drėgnumo atžvilgiu į kondensacinį ekonomaizerį nukreipiamiems dūmams užtikrinimas. Tai sudarytų prielaidas projektuoti rekuperacinio tipo kondensacinį ekonomaizerį jo optimalių geometrinių-finansinių ir eksploatacinių parametrų atvejui. Galima spėti, jog analogiška šalinamų biokuro degimo produktų kokybės reguliavimo technologija pasiteisintų ir kontaktinio tipo kondensacinių ekonomaizerių technologijose. Prisiminus, jog vandens išpurškimu dar galima pridėkinti į kūryklą tiekiamą orą, kontroliuoti biokuro deginimo procesą kūrykloje bei numatant galimybę išvalyti dūmus nuo kietų dalelių ir reguliuoti į kondensacinį ekonomaizerį tiekiamų dūmų parametrus, išryškėja ir $q_{sal,sug}$ nario svarba energijos (9) lygtyje. Šio nario įtaka tiesiogiai siejama su vandens įpurškimo įvertinančiu parametru, kuris apibrėžiamas įpurškiamo vandens srauto santykiu su tekančių biokuro degimo produktų srautu ir vadinamas santykinio vandens srautu:

$$\overline{G}_v = \frac{G_v}{G_{dp}}. \quad (10)$$

Santykinis vandens srautas apibrėžia įpurškto vandens lašelių koncentraciją degimo produktuose N_v , vnt/ m_{dp}^3 . Kai į degimo produktus vanduo išpurškiamas $\overline{G}_v \rightarrow 0$ sąlygomis, tuomet vandens lašelių koncentracija degimo produktuose yra labai maža ir $q_{sal,sug}$ nario įtaką energijos (9) lygtyje galima paneigti. Kuo santyki-

nis vandens srautas yra didesnis, tuo vandens lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų įtaka biokuro degimo produktų būsenos kitimui yra reikšmingesnė. Drėgnuose dūmuose vandens lašeliai intensyviai šyla, o faziniai virsmai priklausys nuo išpurškiamo vandens temperatūrinio parametro, kuris apibrėžiamas rasos taško temperatūros ir išpurškiamo vandens temperatūros santykiu:

$$\bar{T}_v = \frac{T_{rtv}}{T_{v,0}} \equiv \frac{T_{sot}(p_g)}{T_{v,0}}. \quad (11)$$

Kai temperatūrinio parametras $\bar{T}_v > 1$, tuomet vandens lašelio paviršiuje kondensuos vandens garas ir lašelį šildys šilumokaita teikiamas šilumos srautas kartu su fazinių virsmų procese išsiskiriančios šilumos srautu:

$$q_l = q_\Sigma + q_f. \quad (12)$$

Išraiškoje (12) q , W/m². Lašelio paviršiui pašilus iki rasos taško temperatūros, kondensacijos procesas baigsis ir prasidės paviršinis vandens garavimo procesas. Tuomet lašelio šildymo intensyvumą apibrėš šilumokaitos suminio šilumos srauto ir vandenį garinančio šilumos srauto skirtumas:

$$q_l = q_\Sigma - q_f. \quad (13)$$

Apibrėžiant $q_{sal,sug}$ parametą, tenka atsižvelgti į degimo produktų tūrio vietoje esančius vandens lašelius. Tam reikia žinoti vandens dispergatoriaus dispersinę charakteristiką, kuri apibrėžia išpurškiamo vandens susiskaidymą į skirtingo stambumo lašelių il grupes pagal jų koncentraciją $N_{v,il}$, vnt/m^3_{dp} . Tuomet

$$q_{sal,sug} = 4\pi \sum_{il} N_{v,il} R^2_{il} q_{l,il}. \quad (14)$$

Biokuro dūmų ir išpurškiamo vandens apibrėžtų parametų atveju atskiro vandens lašelio šilumokaitos ir fazinių virsmų procesų matematinis modelis ir jo skaitinio sprendimo iteraciniu būdu metodika išplėtotą [1-3].

Apibendrinimas

Optimaliu režimu dirbančiose biokuro technologijose vandens išpurškimas gali būti pritaikomas keliuose atskiruose technologiniuose įrenginiuose. Siekiant užtikrinti optimalų biokuro sudeginimą ir efektyvų generuojamos šiluminės energijos išnaudojimą, vandens išpurškimo procesai privalo būti tarpusavyje suderinti. Teks atsižvelgti į sudėtinių šilumos ir masės pernašos procesų specifiką galimomis vandens lašelių skirtingų fazinių virsmų režimų skirtingomis sąlygomis. Tai išsiaiškia poreikį gebėti įvertinti platų šilumos ir masės mainų vyksmo kraštinių sąlygų

diapazoną ir apibrėžti sudėtinių pernašos procesų sąveiką sparčiai kintant kraštinėms sąlygoms ir įvykstant fazinių virsmų režimų kaitai. Šilumokaitos ir fazinių virsmų biokuro produktų sraute kraštinės sąlygas apibrėžia ne tik jo parametrai, bet taip pat ryškiai lemia vandens įpurškimo proceso organizavimas. Todėl pagrindiniais kraštinės sąlygas apibrėžiančiais parametrais galima numanyti ne tik degimo produktų srauto tekėjimo greitį, temperatūrą ir drėgnumą, bet ir įpurškiamo vandens srautą, temperatūrą ir lašelių dispersiškumą. Be visa to, dar reikia įvertinti išpurkšto vandens lašelių šilumokaitos sąlygas. Todėl apibrėžiant biokuro degimo produktų ir vandens lašelių heterogeninio srauto būsenos kitimą pagal (8-9) modelį, teks atsižvelgti į visus aptartus sudėtinių šilumos ir masės mainų procesų tarpusavio sąveiką įtakojančius faktorius.

Literatūra

1. G. Miliauskas. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets, *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2001. Vol. 44: 785–798.
2. G. Miliauskas, M. Maziukienė, V. Ramanauskas, Peculiarities of the transit phase transformation regime for water droplets that are slipping in humid gas, *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2016. Vol. 102: 302-314.
3. G. Miliauskas, M. Maziukienė, V. Ramanauskas, E. Puida. The defining factors of the phase transformation regimes of water droplets that are warming in humid gas, *International J. of Heat and Mass Transfer*, 2017.

Sudėtinių šilumos ir masės pernašos procesų biokuro terminėse technologijose apibrėžimo poreikis ir savitumai

Summary

Specifics of biofuel combustion products composition and their enthalpy variation as well as complex pollutant transfer processes modeling was analysed in heat utilisation and disposed biofuel combustion products technologies with water injection.

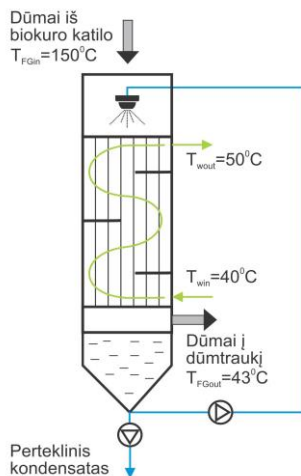
Šilumos balanso biokuro rekuperaciniame kondensaciniame ekonomizaizeryje analizė

Nerijus Rinkevičius*, Gintautas Miliauskas**

*UAB Enerstena, **Kauno technologijos universitetas

Nuo 2003 m., kai Lietuvoje buvo sumontuotas ir pradėtas eksploatuoti pirmasis kondensacinis ekonomizaizeris, o likę biokuro katilai dirbo pagal neefektyvią schemą be kondensacinių ekonomizaizerių, iki šių dienų padėtis kardinaliai pasikeitė. Šiai dienai kondensaciniais ekonomizaizeriais yra aprūpintos tiek seniau pastatytos biokuro katilinės, tiek naujai įrengiamos. Kondensaciniai ekonomizaizeriai, įgalinantys biokuro katiluose nesudeginant papildomo kuro gauti 15-30 % katilo šiluminio naudingumo koeficiento padidėjimą, dėl ekonominių priežasčių ir toliau bus kone privalomi kiekvienam, nedžiovintą biokurą kūrenaciam ateityje statomam katilui.

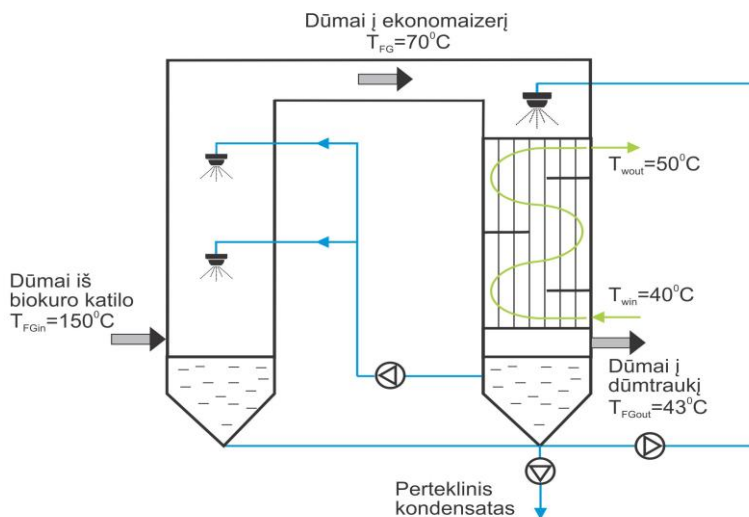
Iš taikomų trijų kondensacinių ekonomizaizerių technologijų: skruberio su įkrova, skruberio be įkrovos ir rekuperatoriaus, pastarasis yra bene labiausiai paplitęs. Rekuperatoriaus tipo kondensacinis ekonomizaizeris – tai vertikalus vienos dūmų eigos vamzdelių pluošto šilumokaitis, kuriame, skirtingai negu kitų technologijų ekonomizaizeriuose, šilumos ir masės pernašos procesai vykdomi tiesiogiai dūmai-vanduo – nenaudojant tarpinių šilumokaičių. Rekuperatoriaus vamzdelių vidumi teka dūmai, priešrove tarpvamzdinė erdvė – šilumnešis, žr. 1 pav.



1 pav. Kondensacinio rekuperatoriaus veikimo principinė schema

Dėl šilumokaityje vykstančios kondensacijos ir terpės koroziškumo, ekonomizaizerio dalys, esančios sąlytyje su dūmais ir kondensatu, yra gaminamos iš brangių nerūdijančių plienų. Todėl tampa ypač aktualu įsisavinti šilumos ir masės pernašos procesų skaičiavimą/modeliavimą ir ieškoti techninių sprendimų ekonomizaizerio gabaritams mažinti. Vienas tokių sprendimų – skruberio panaudojimas kartu su rekuperatoriumi. Principinė sistemos schema pavaizduota 2 pav. Tokios siste-

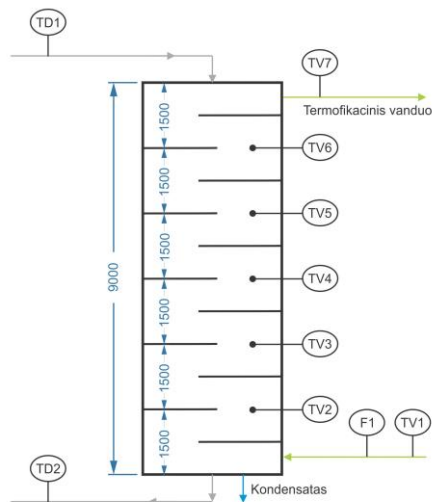
mos idėja yra ta, kad dūmai skruberyje pridrėkinami tų pačių dūmų ataušimo sąskaita iki temperatūros, artimos rasos taško temperatūrai. Tada rekuperatoriuje nebereikia dūmų aušinti – pakanka suprojektuoti tik tokių matmenų šilumokaitį, kurie yra būtini garo kondensacijos procesui įvykti. Iš biokuro katilo dūmai įteka ne tiesiai į rekuperatorių, bet į skruberį, kuris iš esmės yra kondensatu purškama kolona. Šilumos ir masės pernašos procesai joje vyksta dėl tiesioginio kontakto dūmai-įpukšto vandens (dažniai tai būna surinktas kondensatas) lašeliai. Tokiame skruberyje (skirtingai nuo skruberio tipo ekonomaizerių) nesiekama šilumą iš šalinamų dūmų utilizuoti, o tik sudaryti palankesnes sąlygas kondensaciniam procesui rekuperaciniame kondensaciniame ekonomaizeryje. Garuojant lašeliams pakeičiami biokuro dūmų parametrai: dūmai ataušta ir padidėja jų drėgnumas. Dūmai po skruberio pasiekia rekuperatorių ne tik turėdami didesnę vandens garų koncentraciją, bet ir būdami žemesnės temperatūros – taigi, užima mažiau tūrio.



2 pav. Kondensacinio rekuperatoriaus su skruberiu principinė schema

Akiivaizdu, kad praktikoje įgyvendinant tokią schemą, šalinamų dūmų šilumos utilizavimo sistema yra sudėtingesnė dėl papildomo įrenginio – skruberio. Šilumos ir masės mainų skaičiavimo uždavinys taip pat tampa sudėtingesnis (būtina skaičiuoti šilumos ir masės pernašos procesus tiek skruberyje, tiek rekuperatoriuje). Todėl papildomų kaštų atsiradimą būtina pagrįsti tiek ekonomiškai, tiek techniškai. Techniniam kokybiniam pagrindimui siūloma atlikti rekuperatoriaus šilumos balanso analizę atskiriems šilumokaičio sektoriams, siekiant nustatyti kaip šilumokaityje pasiskirsto šilumos gamyba pagal šias dedamąsias: kondensacijos šiluma ir fizinė dūmų aušimo šiluma.

Analizei atlikti buvo surinkti duomenys iš dirbančio rekuperatoriaus tipo kondensacinio ekonomizerio, kurio komplektacija leidžia matuoti šilumnešio (vandens) temperatūrą 7-iose taškuose išilgai šilumokaičio, žr. 3 pav. Taip rekuperatorius suskirstomas į 6 sektorius (pradedant pirmuoju nuo šilumokaičio apačios), kurių kiekvieno ašinis ilgis po 1500 mm.



Matavimai:

TD1 – dūmų temperatūra prieš rekuperatorių;

TD2 – dūmų temperatūra už rekuperatoriaus;

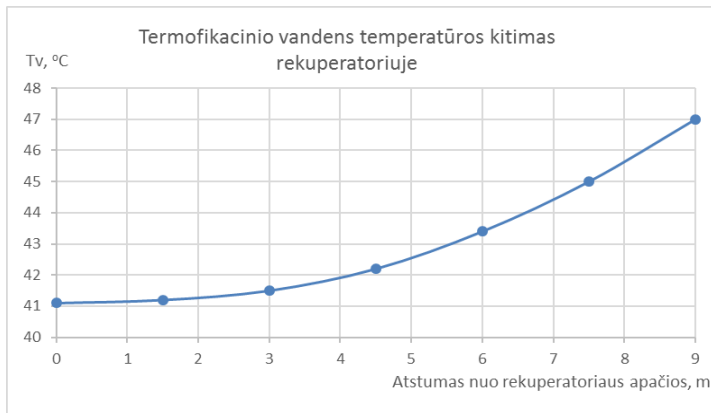
F1 – termofikacinio vandens debitas;

TV1...TV6 – termofikacinio vandens temperatūra prieš atitinkamą sektorių;

TV7 – termofikacinio vandens temperatūra už 6 sektoriaus (už rekuperatoriaus);

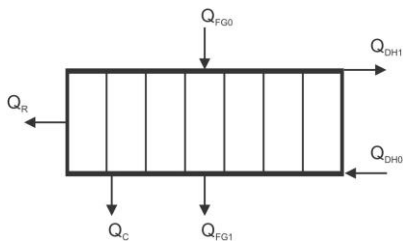
3 pav. Matavimų rekuperatoriuje schema

Pagrindinis matavimų ypatumas yra tas, kad matavimų metu biokuro katilo apkrovimas buvo minimalus, o dūmų temperatūra žema – artima dūmuose esančio vandens garo rasos taško temperatūrai. Todėl, nors analizuotoje schemoje ir nėra skruberio, tačiau procesų vyksmo sąlygos yra tokios, kad skruberio poveikis yra tarsi imituojamas. Matavimai atlikti esant tokiam katilo režimui: katilo apkrovimas – 2,935 MW; katilo naudingumo koeficientas – 92,63 %; naudojamas kuras – medienos skiedra; kuro drėgnumas – 45 %; dūmų temperatūra (po katilo/prieš rekuperatorių) – 84,3°C; dūmų debitas – 2,057 kg/s; rasos taško temperatūra – 59,9°C; dūmų tankis – 1,26 kg/nm³; specifinė dūmų šiluma – 1,0659 kJ/kgK/1,343 kJ/kgnm³; dūmų sudėtis pagal tūrį: N₂ – 63,8 %, H₂O – 19,6 %, CO₂ – 10,6 %, O₂ – 6,0 %; termofikacinio vandens debitas per rekuperatorių – 21,167 kg/s; termofikacinio vandens temperatūra prieš rekuperatorių – 41,1°C. Esant šioms sąlygoms, buvo išmatuotos termofikacinio vandens temperatūros kiekviename sektoriuje. Rezultatai pavaizduoti 4 pav.



4 pav. Termofikacinio vandens temperatūros kitimas rekuperatoriuje

Termofikacinio vandens temperatūros matavimo rezultatai svarbūs tuo, kad net nežinant dūmų temperatūrų kitimo išilgai rekuperatoriaus vamzdelių, galima sudaryti rekuperatoriaus sektoriaus šilumos balansą ir apskaičiuoti jo narius. Balansas schematiškai pavaizduotas 5 pav..



5 pav. Rekuperatoriaus sektoriaus šilumos balansas

Sumuodami įnešamos ir išnešamos šilumos kiekius, pagal 5 pav. schemą sudarome šilumos balanso lygtį rekuperatoriaus sektoriui:

$$Q_{FG0} + Q_{DH0} = Q_{FG1} + Q_{DH1} + Q_C + Q_R \quad (1)$$

Išraiškoje (1): Q_{FG0} – į sektorių su dūmais įnešamas šilumos kiekis; Q_{DH0} – į sektorių su vandeniu įnešamas šilumos kiekis; Q_{FG1} – iš sektoriaus su dūmais išnešamas šilumos kiekis; Q_{DH1} – iš sektoriaus su vandeniu išnešamas šilumos kiekis; Q_C – sektoriuje susidariusio kondensato išnešamas šilumos kiekis; Q_R – šilumos nuostoliai į aplinką;

Rekuperatoriaus atskiro sektoriaus naudinga galia apskaičiuojama, kaip su vandeniu išnešamo ir įnešamo šilumos kiekių skirtumas:

$$Q_E = Q_{DH1} - Q_{DH0} \quad (2)$$

Apskaičiuojamas trūkstamas išraiškos (1) narys Q_{FG1} :

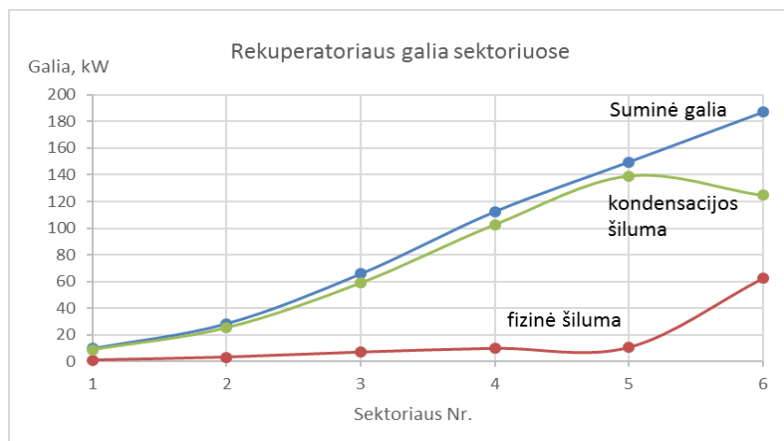
$$Q_{FG1} = Q_{FG0} - Q_E - Q_C - Q_R \quad (3)$$

Iš sektoriaus su dūmais išnešamą šilumos kiekį Q_{FG1} sudaro 2 sudedamosios: fizinė dūmų šiluma ir vandens garų kondensacijos šiluma. Darant prielaidą, kad po sektoriaus išeinantys dūmai yra 100 % santykinio drėgnumo (jeigu tai leidžia pradinis arba įnešamas į sektorių šilumos kiekis Q_{FG0}), iš išraiškos (4) apskaičiuojama iš sektoriaus išeinančių dūmų temperatūra t_1 :

$$Q_{FG1} = F_{FG} c_{pFG} t_1 + F_C r \quad (4)$$

čia: F_{FG} – bendras dūmų debitas, kg/s; c_{pFG} – dūmų specifinė šiluma J/(kg K); F_C – vandens garų kiekis dūmuose už sektoriaus, kg/s; r – slaptoji garavimo šiluma, J/kg.

Taigi, žinant rekuperatoriaus sektoriuje iš dūmų išsiskyrusios šilumos kilmę pagal sudaromąsias (fizinę šilumą ir kondensacijos šilumą), galima nustatyti, kurios šilumokaičio dalys dirba dūmams aušinti, o kurios gauna šilumą vandens garų kondensacijos sąskaita. Aukščiau išdėstytais principais vadovaujantis, sudaryti grafikai 6 pav., leidžiantys vaizdžiau suprasti rekuperatoriuje vykstančius procesus.



6 pav. Rekuperatoriaus galia pagal gautos šilumos kilmę

Apibendrinimas

Biokuro katilų efektyvumui padidinti plačiai naudojama priemonė – kondensaciniai ekonomizeriai, įgalinantys išnaudoti išmetamų dūmų tiek fizinę, tiek kondensacinę šilumą. Vienas labiausiai paplitusių ekonomizerių tipų – vamzdelių

pluošto rekuperatorius – yra gaminamas iš brangių nerūdijančių plienų. Tai diktuoja rekuperatoriuje vykstančio kondensacijos proceso metu susidaranti koroziškai agresyvi terpė. Todėl ekonominiais sumetimais reikia ieškoti techninių sprendimų rekuperatoriaus masei mažinti. Tam siūloma sistemą papildyti kondensatu purškiamu skruberiu, kurio dėka ataušimo dūmai yra pridėkinami, jų tūris sumažėja dėl kritusios dūmų temperatūros. Rekuperatoriaus tokiu atveju pakanka tik garų kondensacijai įvykdyti. Norint išanalizuoti šilumos gamybos pasiskirstymą atskirose rekuperatoriaus, dirbančio su skruberiu, sektoriuose, buvo atlikti matavimai ir sudarytas sektoriaus šilumos balansas. Matavimais nustatyta, kad šilumos gamybos požiūriu efektyviausi yra paskutiniai (vandens judėjimo kryptimi) rekuperatoriaus sektoriai. Kaip ir buvo tikimasi, šilumos balanso analizė parodė, kad paskutiniame sektoriuje didelę gaunamos šilumos dalį sudaro fizinė dūmų ataušimo šiluma, kituose sektoriuose – kondensacijos šiluma. Dūmų aušinimą iki pat rasos taško temperatūros perkėlus iš šilumokaičio į skruberį, šilumokaičio ilgį būtų galima sutrumpinti ta dalimi, kurioje vyksta intensyvus dūmų aušinimas.

Literatūra

1. Geoffrey F. Hewitt HEAT EXCHANGER DESIGN HANDBOOK 1998 (HEDH 1998).
2. Düsseldorf; Springer Reference; 2006; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen; VDI Heat Atlas Second Edition; 1586 psl.; ISBN 978-3-540-77876-9.
3. Effects of water vapor condensation on the convection heat transfer of wet flue gas in a vertical tube Pages 4257-4265 L. Jia, X. F. Peng, Y. Yan, J. D. Sun and X. P. Li

Heat balance analysis of the shell&tube type biomass flue gas condenser

Summary

Flue gas condensers are widespread and very efficient on recovery the biomass boiler flue gas sensible and latent heat. Due to wet condensation processes on the tube walls, the medium becomes highly corrosive. To avoid corrosion of the condenser, it must be manufactured from costly stainless steel grades. This creates the demand to find any technological solution to reduce the size of the heat exchanger. Proposed idea is placing the scrubber prior the flue gases enter the condenser. To verify this idea, measurements were done and the heat balance analysis was made. The analysis has proven the sensible heat of flue gases is recovered in the end part of the exchanger. In other parts the latent heat transfer is dominant. Therefore, by employing the scrubber and making the condenser as the only latent heat exchanger, the downsize of the condenser is possible.

Vandens išpurškimo branduolinių jėgainių apsaugos sistemose pritaikymas ir lašelių pereinamieji pernašos procesai

Edgaras Šmigelskis, Gintautas Miliauskas
Kauno technologijos universitetas

Branduolinėse jėgainėse generuojama elektros energija sudaro reikšmingą dalį pasaulinėje energetikoje. Svarbu tai, jog šios elektros energijos gamybos technologinio proceso, palyginus su elektros energijos gamyba įprastinėse šiluminėse jėgainėse, tiesioginis poveikis aplinkai yra nereikšmingas. Tačiau visuomet išlieka didelis pavojus aplinkos radioaktyviam užteršimui įvykus avarijai atominėje elektrinėje. Kad tai yra realu, patvirtino eilė jau įvykusių avarių atominėse elektrinėse, iš kurių skaudžiausias pasekmes turėjo avarijos Černobylio ir Fukušima jėgainėse. Todėl tolesnis branduolinės energetikos plėtojimas tiesiogiai susijęs su branduolinių technologijų tobulinimu ir jų saugumo stiprinimu. Pavojingą situaciją atominėje elektrinėje gali iššaukti branduolinių reaktorių aušinančio fluido srauto praradimas. Aušinantis fluidas būtinas sunkiųjų branduolių skilimo metu sparčiai išsiskiriančiai šiluminei energijai nuvesti. Šiuo metu, kaip šilumnešis pirminiame kontūre, dažnai naudojamas cirkuliuojantis vanduo. Vanduo PWR suslėgto vandens reaktoriuose ir BWR verdančio vandens reaktoriuose gali būti suslėgtas iki 20 MPa, ir gali pašilti iki 320 °C temperatūros [1, 2]. Šiuolaikinėse atominėse jėgainėse numatytas reaktorių gaubiantis apsauginis kiautas, kaip paskutinė apsaugos pakopa nuo radioaktyviųjų medžiagų pasklidimo atmosferoje, kartu užtikrinantis branduolinio reaktoriaus apsaugą nuo tiesioginio išorinio mechaninio poveikio [3].

Su šilumnešio tiekimo praradimu susijusiose avarijose iš aktyviosios reaktoriaus zonos į apsauginio kiauto atmosferą pasklinda didžiuliai radioaktyvaus vandens garo srautai. Dėl to gali staiga padidėti slėgis kiauto atmosferoje ir pradėti sparčiai augti kiauto temperatūra. Tuomet būtina kuo skubiau imtis priemonių slėgiui ir temperatūrai apsauginio kiauto atmosferoje reguliuoti, kad neviršyti apsauginio kiauto tvarumo projektinių ribų ir išsaugoti jo sandarumą, tuo pačiu apsaugant gamtą nuo radioaktyvaus užteršimo. Tam panaudojamos skirtingos apsaugos sistemos [3], tarp kurių pritaikymą randa ir apsauginio kiauto atmosferos parametrų reguliavimas vandens įpurškimu. Čia svarbu tinkamai apibrėžti vandens išpurškimo sistemos darbo parametrus, kad užtikrinti efektyvią šilumos ir masės kaitą tarp skystos ir dujinės fazių, ir įvykdyti atmosferoje esančio vandens garo spartų išskondicionavimą vandens lašelių paviršiuje. Apibrėžti tarpusavyje sąveikaujančių šilumokaitos ir fazinių virsmų intensyvumą galima tik atlikus jų kompleksinę analizę, kuri reikalauja atskirų pernašos mechanizmų dėsningumų individualaus pažinimo ir kraštinių sąlygų kaitos įtakos išsamaus įvertinimo. Todėl svarbu iš pradžių įvertinti sudėtinių procesų atskirus mechanizmus, išryškinti jų bendruosius dėsningumus, o po to apibrėžti kraštinių vyksmo sąlygų įtaką jų tarpusavio sąveikos in-

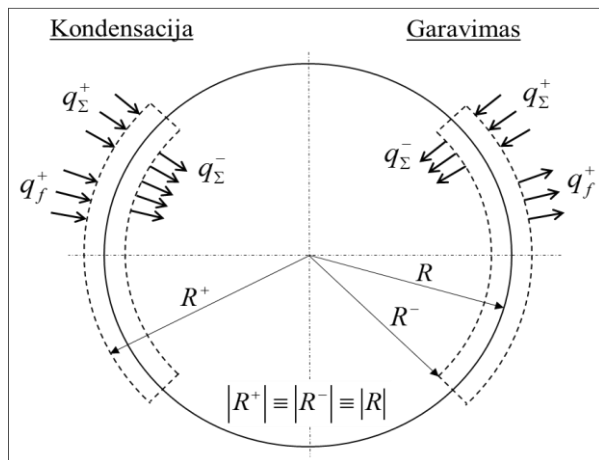
tenisvumui. Vandeni purkštukų sistemoje išpurškiant į kiauato atmosferą, iš pradžių vyksta lašelių srauto susiformavimo etapas, po to stebimas vandens lašelių pereinamųjų šilumokaitos ir fazinių virsmų etapas, kuris pereina į nusistovėjusį pernašos procesų baigiamąjį etapą [4]. Į apsauginio kiauato atmosferą įpurškus vandenį, lašelių srauto susiformavimo etape vyrauja sudėtingi hidrauliniai-hidrodinaminiai procesai, kuriuose lašelių tarpusavio susidūrimų dinamika vaidina svarbų vaidmenį [5-8], nes dėl tarpusavio sąveikos lašeliai gali atsokti vienas nuo kito, susiliesti į vieną, ir po to skaidytis į du arba netgi suskilti į keletą skirtingo dydžio lašelių. Lašelių tarpusavio kontaktų lydintys procesai yra labai svarbūs susiformavusio lašelių srauto parametrams apibrėžti, kadangi apsauginio kiauato vandens išpurškimo sistemoje purkštukų daug ir jie glaudžiai išdėstyti, todėl lašelių susidūrimų tikimybė didelė ir jie intensyvūs. Pereinamųjų šilumokaitos ir fazinių virsmų etapas yra labai svarbus slėgiui ir temperatūrai apsauginio kiauato sistemoje sumažinti, kadangi jame vyksta intensyvi vandens garo kondensacija lašelių paviršiuje ir aplinkos slėgis krenta dėl kondensato ryškiai didesnio tankio. Pereinamajame etape vandens lašeliai intensyviai šildomi dėl jų paviršiuje išsiskiriančio garo fazinių virsmų šilumos ir lašelius šildančio išorinės šilumokaitos šilumos srauto, apibrėžiančio apsauginio kiauato temperatūros kritimą. Lašeliams pašilus iki rasos taško temperatūros, kondensacinis fazinių virsmų režimas jų paviršiuje baigiasi ir prasižieda lašelio vandens garavimo režimas, kuris pereina į pusiausvirą garavimą, kai lašelis pašyla iki ši fazinių virsmų režimą atitinkančios pusiausviro garavimo temperatūros [9-12].

Šiame darbe analizuojamas drėgnų dujų mišinyje išpurškto vandens šylančių lašelių pereinamųjų fazinių virsmų režimas ir pristatomi Edgardo Šmigelskio termoinžinerijos magistro baigiamojo darbo „Vandens įpurškimo pritaikymas atominių stočių apsaugos sistemose ir pernašos procesų modeliavimas“ (Vadovas G. Miliauskas) pagrindiniai rezultatai bei jų apibendrinimai [14]. Modeliuojant vandens lašelių šilumą ir fazinius virsmus atominių jėgainių kiauato atmosferai būdingose kraštinėmis sąlygomis, siekta išgryninti išpurškiamo vandens ir lašelių pradinių parametrų įtaką, todėl numatyta, jog įpurškiamas palyginti nedidelis vandens srautas ir teigta, jog dėl lašelių šilumokaitos ir jų paviršiuje vykstančių fazinių virsmų, procesų dujų mišinio sudėtis ir parametrai nepakinta. Tai leido išgryninti dujų pradinių parametrų įtaką lašelių šilumokaitai ir faziniams virsmams, bei įvertinti pagrindinius lašelio fazinių virsmų režimams įtakos turinčius faktorius.

Vandens lašelio šilimas ir jo paviršiuje vykstantys fazinių virsmų procesai apibrėžti skaitiškai pagal iteraciniais skaičiavimais grindžiamą iteracinę schemą, kuri sudaryta pritaikius šilumos srautų lašelio paviršiuje balanso metodiką, t. y. apibrėžiant lašelio paviršiaus temperatūros laikinę $T_R(\tau)$ funkciją, kuri modeliuojamuose lašelio fazinių virsmų kondensacinio ir garavimo režimuose užtikrintų apskaičiuotųjų prie lašelio paviršiaus pritekančių ir nuo jo nutėkančių šilumos srautų atitikimą:

$$\bar{q}_{\Sigma}^{+}(\tau) + \bar{q}_{\Sigma}^{-}(\tau) + \bar{q}_f^{+}(\tau) \equiv 0. \quad (1)$$

Šilumos srautų laikinėms funkcijoms (1) lygtyje apibrėžti pateikta jų savita geometrinė interpretacija lašelio fazinių virsmų kondensaciniame ir garavimo režimuose (1 pav.), tam išskirtos lašelio paviršiaus išorinė ir vidinė pusės, kurios sąlyginai apibrėžtos sferinio lašelio, atitinkamai R^{+} ir R^{-} spinduliais.

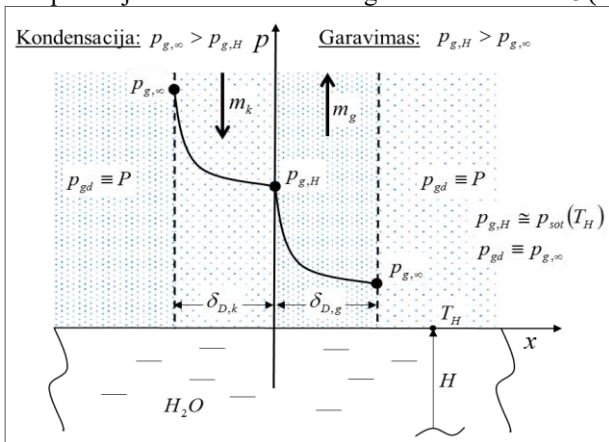


1 pav. Šilumos srautų vandens lašelio paviršiuje geometrinė interpretacija fazinių virsmų kondensaciniame ir garavimo režimuose

Bendruoju sudėtinės šilumokaitos atveju, suminį šilumos srautą lašelio paviršiaus pusėse apibrėžia radiacinis ir konvekcinis sandai: $q_{\Sigma}(\tau) = q_r(\tau) + q_c(\tau)$. Tačiau teigta, jog radiacinio sando indėlis yra nykstamai mažas, todėl lašelio išorinės ir vidinės šilumokaitos intensyvumas apibrėžtas konvekcinės šilumos srauto tankių $q_c^{+}(\tau)$ ir $q_c^{-}(\tau)$ funkcijomis, atitinkamai. Lašelio išorinio konvekcinio šildymo intensyvumą apibrėžia dujų ir lašelio paviršiaus temperatūros skirtumas, lašelio slydimas dujose bei visuomet fazinius virsmus lydintis Stefano hidrodinaminis srautas. Lašelio vidinę šilumokaitą apibrėžia temperatūros lauko gradientas, kuriam svarbi vandens cirkuliacijos lašelyje įtaka. Vandens priverstinę cirkuliaciją dujų sraute slystančiame lašelyje sukelia jo paviršiuje kylančios trinties jėgos. Konvekcinės šilumos q_c^{+} ir q_c^{-} srautams aprašyti, atitinkamai pritaikyti modifikuotas šilumos atidavimo Niutono dėsnis ir modifikuotas šilumos laidumo Furje dėsnis, o jų $q_c^{+}(\tau)$ ir $q_c^{-}(\tau)$ funkcijoms apibrėžti pritaikyta metodika išsamiai atskleista darbe [15]. Fazinių virsmų šilumos srauto tankis išreikštas vandens garo srauto lašelio paviršiuje tankio ir vandens garo fazinių virsmų šilumos sandauga:

$$q_f^+(\tau) = m_g^+(\tau) \cdot L(\tau). \quad (2)$$

Garų srautui geometrinė H charakteristika apibrėžtame kontakto tarp vandens ir dujų paviršiuje aprašyti pateikta fazinių virsmų lašelio paviršiuje geometrinė interpretacija kondensaciniame ir garavimo režimuose (2 pav.).



2 pav. Fazinių virsmų proceso lašelio paviršiuje geometrinė interpretacija kondensaciniame ir garavimo režimuose

Paviršiniuose fazinių virsmų procesuose dalyvaujančio vandens garų srauto varančioji jėga apibrėžiama vandens garų drėgnose dujose ir garų vandens paviršiuje dalinių slėgių skirtumu:

$$\Delta p_g(\tau) = p_{g,d}(\tau) - p_{g,H}(\tau). \quad (3)$$

Susikondensuojančio (garavimo procese išsiskiriančio) garo dalinis slėgis atitinka sočiojo garo prie paviršiaus temperatūros slėgį: $p_{g,H}(\tau) = p_{soč}(T_H)$. Vandens garo slėgis paviršių supančiame δ_D storio difuziniame sluoksnyje kondensaciniame režime išauga iki vandens garų dujose dalinio slėgio, o garavimo režime iki jo sumažėja (2 pav.). Šių slėgių skirtumas iššaukia difuzinį garų srautą, jį sustiprina vandens garų hidrodinaminis srautas, kurio įtaka analitiniame garų srauto modelyje [16] įvertinama Stefano logaritmu:

$$m_g^+(\tau) = \frac{D_{gd}(\tau)\mu_g}{T_H(\tau)\delta_D(\tau)R_\mu} p \ln \frac{p - p_{g,d}(\tau)}{p - p_{g,H}(\tau)}. \quad (4)$$

Čia: m_g^+ – vandens garo srauto tankis, $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$; D_{gd} – vandens garo difuzijos dujose koeficientas, m^2/s ; μ_g – vandens garo molekulinė masė, kg/kmol ; T_H – kontakto tarp skystosios ir dujinės fazių paviršiaus temperatūra, K; δ_D – difuzinio sluoksnio storis, m; R_μ – universali dujų pastovioji, $\text{J}/(\text{kmolK})$; p – dujų mišinio slėgis, Pa; $p_{g,d}$ – vandens garo dalinis slėgis dujų mišinyje, Pa; $p_{g,H}$ – vandens garo dalinis slėgis dujų mišinyje kontakto tarp skystosios ir dujinės fazių paviršiuje, Pa. Modeliuotu vandens lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų atveju, kontakto tarp skystosios ir dujinės fazių paviršiaus temperatūra prilyginta lašelio paviršiaus temperatūrai ($T_H \equiv T_R$), sočiojo garo slėgis lašelio paviršiuje apibrėžtas pagal aukšto pasikliautinumo Gerry koreliaciją [17], difuzinio sluoksnio storis pagal darbo [18] rekomendacijas prilygintas lašelio spinduliui ($\delta_D \equiv R$), o vandens garo dalinis slėgis drėgnose dujose apibrėžtas nekinančia vandens garo tūrine $\bar{p}_g$ dalimi dujų mišinyje, išreiškiama vandens garo dalinio slėgio ir dujų slėgio santykiu:

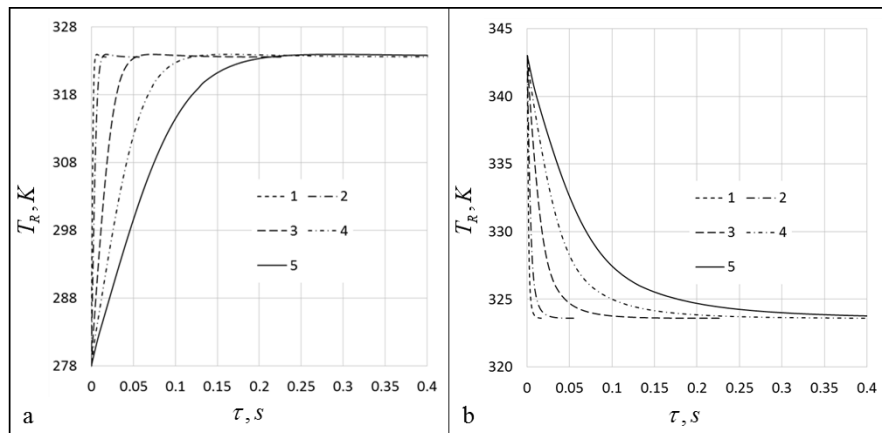
$$\bar{p}_g = p_{g,d,0} / p, \text{ todėl } \bar{p}_g(\tau) = \bar{p}_g \cdot p \cong \text{const.} \quad (5)$$

Šylančio lašelio paviršiaus temperatūros kitimą aprašančios apibrėžtos laikinės $T_R(\tau)$ funkcijos atveju (4), išraiška vienareikšmiškai aprašo vandens garo srauto tankio kitimą kondensaciniame ir garavimo režimuose. Pagal (4) modelį apskaičiuotasis garo srauto tankis kondensaciniame režime yra neigiamo ženklo dydis, o garavimo režime yra teigiamo ženklo dydis. Skaitiniam modeliavimui patogiu, kad garo srauto (4) išraiška fazinius virsmus lašelio paviršiuje griežtai susieja su lašelio paviršiaus temperatūros ir rasos taško temperatūros santykiu, išreikštu $\bar{T}_{rt} \equiv T_{rt} / T_R(\tau)$ parametru, kuris numato kondensaciniam režimui lašelio paviršiuje vykti būtiną $\bar{T}_{rt} > 1$ sąlygą, ir kartu aiškiai apibrėžia fazinių virsmų režimo lašelio paviršiuje kaitos iš kondensacijos į garavimą laiko τ_{ko} momentą, kuriuo lašelio paviršius būna pašilęs iki rasos taško temperatūros, todėl $\bar{T}_{rt}(\tau \equiv \tau_{ko}) = 1$. Garavimo režime $\bar{T}_{rt}(\tau > \tau_{ko}) < 1$. Fazinių virsmų režimų kaitos lašelio paviršiuje momentu garo srautas įgauna nulinę vertę: $m_g^+(\tau \equiv \tau_{ko}) = 0$. Vandens lašelio masės ir tūrio kitimas fazinių virsmų eigoje aprašytas fazinių virsmų lygtimi:

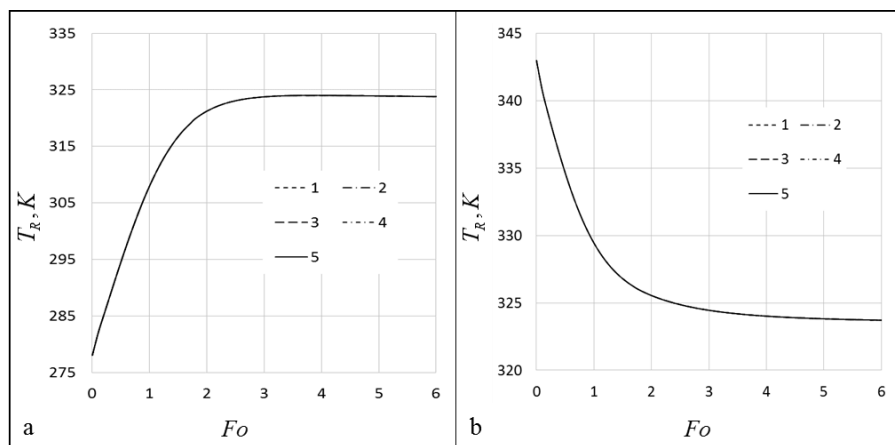
$$\frac{d[4\pi\rho_m(\tau)R^3(\tau)/3]}{d\tau} = -2\pi R^2(\tau)m_g^+(\tau). \quad (6)$$

Vandens tankis šylančiame lašelyje parenkamas pagal jo masės vidutinės temperatūros kitimą aprašančią $T_m(\tau)$ funkciją, kuri apibrėžta pagal [15] metodiką. Skaitiniame vandens lašelių fazinių virsmų apsauginio kiauto atmosferoje tyrimui iškelti uždaviniai: apibrėžti lašelio šilumos ir masės mainų P parametų kitimą aprašančias pagrindines laikines $P(\tau)$ funkcijas, išanalizuoti grafiškai ir apibrėžti parametų kitimo kondensaciniame ir garavimo režimuose dėsningumus. Tyrimui apibrėžtos kraštinės sąlygos [14]: apsauginio kiauto atmosferai atstovauja drėgnas oras, kurio temperatūra $T_d \equiv 373 \div 673$ K ir drėgnumas $\bar{p}_g = 0.1$, kai $p = 0.1$ MPa; įpurškiamas šaltas arba karštas vanduo, kurio temperatūra yra $T_l = 278$ K ir $T_l = 343$ K atitinkamai; vandens lašelių dispersiškumas $2R_0$ yra 30, 50, 100, 150 ir 200 mikrometra i ; lašelių pradinis slydimas apsauginio kiauto atmosferoje apibrėžtas Reinoldso kriterijumi, kai Re_0 yra 10, 20, 50 ir 100. Plačios apimties skaitiniam tyrimui optimizuoti pritaikyta darbe [15] pagrįsta rekomendacija, iš pradžių sumodeliuoti vieno laisvai parinkto $2R_0$ skersmens lašelio šilumą ir fazinius virsmus parametrais Re_0 , T_l , T_d ir $\bar{p}_g$ apibrėžtu kraštinių sąlygų atveju, modeliavimo rezultatus išanalizuoti Furje $Fo = a_0 \cdot \tau / R_0^2$ kriterijumi išreikštoje universalios laiko skalėje, pasirinktais Fo_i momentais apibrėžti parametų santykinius $\bar{P}_i \equiv P_i / P_0$ pokyčius, kurie bus universalūs skirtingo stambumo lašeliams. Tuomet nuo universalios Furje kriterijaus laiko Fo_i skalės, pagal individualius lašeliams a_0 / R_0^2 parametrus paprasta pereiti prie individualių τ_i laikų realaus laiko skalėje norimam lašelių dispersiškumui. Tokio rezultatų apibendrinimo būdo naudą patvirtina lašelių šilumokaitai ir fazinių virsmų parametų $P(\tau)$, $P(Fo)$ ir $\bar{P}(Fo)$ funkcijų grafikų savitumai (1-4 pav.).

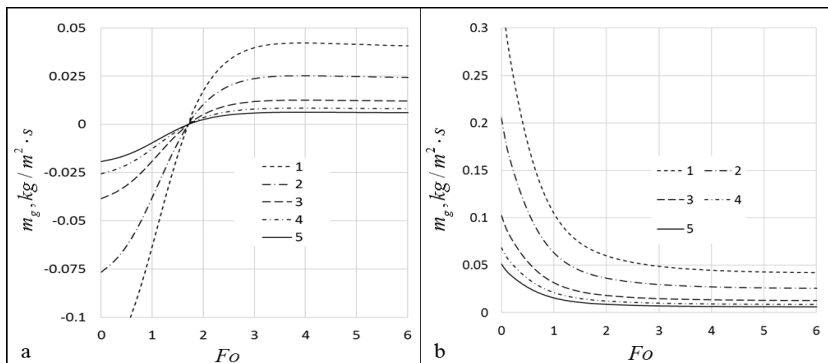
Skirtingo stambumo šalto vandens lašelių pašilimą pereinamųjų fazinių virsmų režime iki pusiausviros garavimo temperatūros apibrėžiančios $T_R(\tau)$ funkcijos, grafikai yra individualūs (1 pav. a). Karšto vandens lašelių ataušimą iki pusiausviros garavimo temperatūros aprašančių $T_R(\tau)$ funkcijų grafikai taip pat yra individualūs (1 pav. b). Funkcijų $T_R(Fo)$ grafikai šalto (2 pav. a) ir karšto (2 pav. b) vandens lašeliams išlieka saviti, tačiau jie abu yra universalūs lašelių dispersiškumo atžvilgiu. Savaiame aišku, jog lašelių dispersiškumui bus nejautrūs ir bematės formos $\bar{T}_R(Fo) = T_R(Fo) / T_{R,0}$ funkcijų grafikai.



1 pav. Šalto (a) ir karšto (b) vandens lašelių paviršiaus temperatūros $T_R(\tau)$ funkcijų grafikų priklausomumas nuo lašelių dispersiškumo. $R_0, \mu\text{m}$: (1) 30, (2) 50, (100), (150), (200); $R_0, \mu\text{m}$ (a) 278, (b) 343; $\text{Re}_0 = 50$.

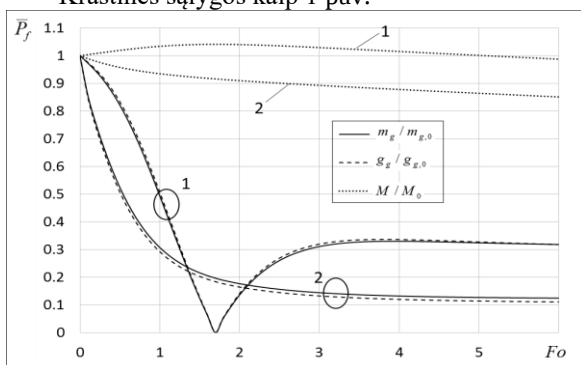


2 pav. Šalto (a) ir karšto (b) vandens lašelių $T_R(Fo)$ funkcijoms universalūs lašelių dispersiškumo atžvilgiu grafikai. Kraštinės sąlygos kaip 1 pav.



3 pav. Garo srauto tankio šalto (a) ir karšto (b) vandens lašelių paviršiuje $m_g(Fo)$ funkcijų priklausomumas nuo lašelių dispersiškumo

Kraštinės sąlygos kaip 1 pav.

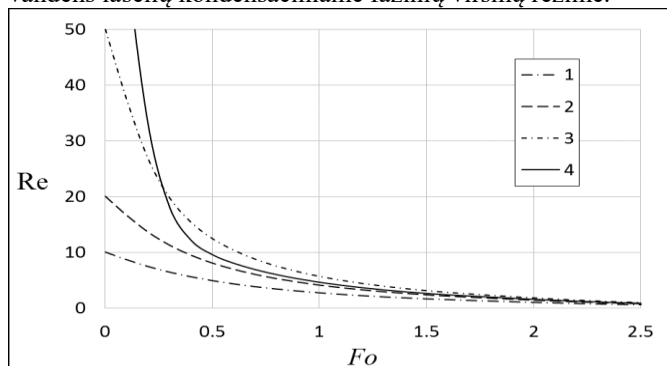


4 pav. Šalto (1) ir karšto (2) vandens lašelių fazinių virsmų pagrindinių parametrų $\bar{P}_f(Fo)$ funkcijoms universalūs lašelių dispersiškumo atžvilgiu grafikai Kraštinės sąlygos kaip ir 1 pav.

Vandens garo srauto tankio lašelio paviršiuje funkcijos $m_g(Fo)$ grafikas yra jautrus lašelių dispersiškumui, todėl galima numanyti, jog visų fazinių virsmų parametrų funkcijų $P(\tau)$ ir $P(Fo)$ grafikai yra jautrūs lašelių dispersiškumui. Tačiau lašelių fazinių virsmų parametrų funkcijų $\bar{m}_g(Fo)$, $\bar{g}_g(Fo)$ ir $\bar{M}(Fo)$ grafikai tiek šalto, tiek ir karšto vandens lašelių dispersiškumui yra nejautrūs (4 pav.). Todėl toliau analizėje pateikiami vandens lašelių įvairių parametrų $\bar{P}(Fo)$ funkcijų grafikai apibūdina platų lašelių dispersiškumo spektrą ir apibrėžia lašelio šildymo

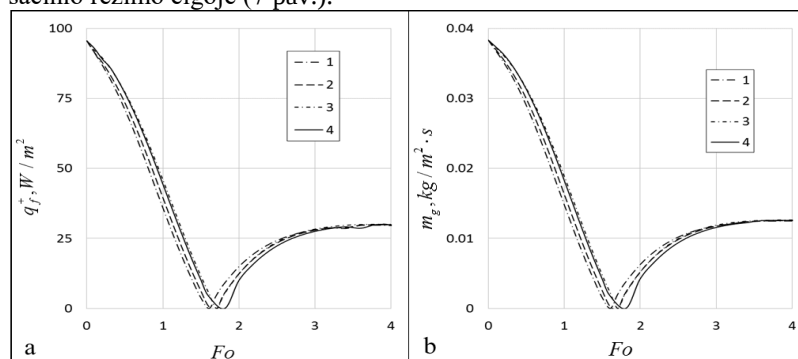
kraštinių sąlygų apsauginio kiauto atmosferoje įtaką vandens lašelių šilumokaitai ir faziniams virsmams.

Trinties jėgų poveikyje lašelio slydimas apsauginio kiauto atmosferoje sparčiai slopsta (5 pav.), todėl pradinio slydimo intensyvumo įtaka ypač ryški šalto vandens lašelių kondensaciniame fazinių virsmų režime.

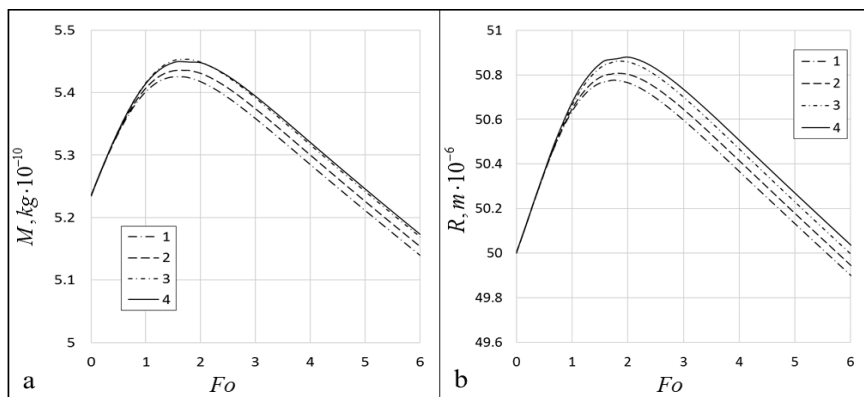


5 pav. Vandens lašelių slydimo dujose spartus silpnėjimas pradinėje pereinamųjų fazinių virsmų režimo stadijoje. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4), 100; $R_0 = 50 \mu\text{m}$, $T_l = 278 \text{ K}$

Šio tyrimo rezultatais patvirtinta darbo [15] išvada, jog spartesnis slydimas iššaukia stipresnę vandens priverstinę cirkuliaciją lašelyje, ir suintensyvėjus šilumos nuvedimui į lašelį, jo vidinių sluoksnių šilimo sparta padidėja, o paviršinių sluoksnių šilimas sulėtėja. Tai sudaro prielaidas padidėti lašelio paviršiaus pašilimo iki rasos taško temperatūros laikui (6 pav.) ir ilgiau lašelio paviršiuje vykti vandens garo kondensacijos procesui bei lašelio masei ir matmeniui labiau išaugti kondensacinio režimo eigoje (7 pav.).

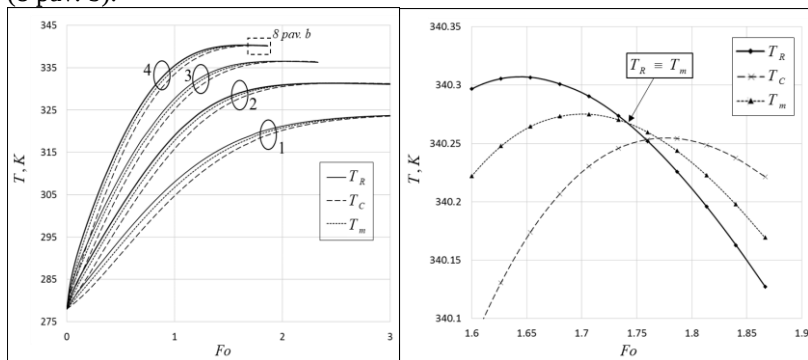


6 pav. Vandens lašelių slydimo dujose įtaka kondensaciniam fazinių virsmų režimui. Kraštinės sąlygos kaip 5 pav.

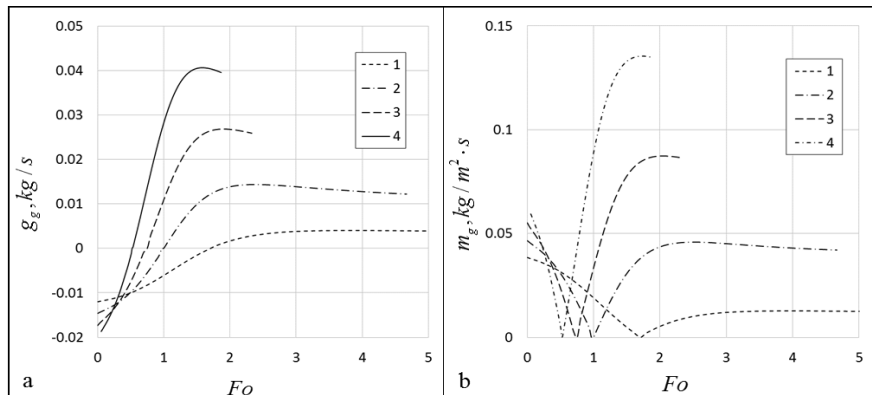


7 pav. Vandens lašelio slydimo dujose įtaka jo masės ir matmens kitimui. Kraštinės sąlygos kaip 5 pav.

Išpurkšto vandens lašelių šilumui (8 pav.) ir jo paviršiuje vykstančių fazinių virsmų spartai (9 pav.) reikšminga apsauginio kiauto temperatūros įtaka. Aukštesnės temperatūros kiauto atmosferoje išpurkšto vandens lašeliai šyla sparčiau ir jų pusiausviro garavimo temperatūra žymiai aukštesnė: 373 K dujų temperatūros atveju lašelių pusiausviro garavimo temperatūra kiek žemesnė už 325 K, o 673 K atmosferoje pusiausviro garavimo temperatūra artima 340 K temperatūrai (8 pav. a). Baigiamojame pereinamojo garavimo stadijoje vandens lašeliai būna maksimaliai pašilę, o prasidėjus pusiausviro garavimo režimui, pradeda aušti (8 pav. b).

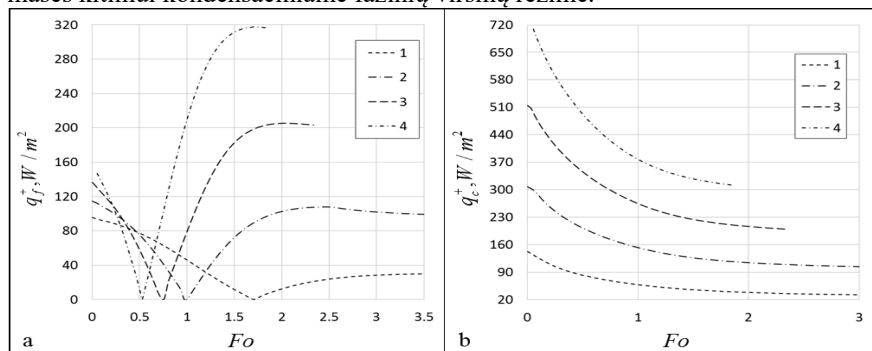


8 pav. Apsauginio kiauto atmosferos temperatūros įtaka vandens lašelių šilumui pereinamųjų fazinių režime (a) ir pereinamojo garavimo baigiamojame bei pusiausviro garavimo pradinėje stadijose (b). $Re_0 = 50$; $T_l = 278$ K ; $R_0 = 50 \mu\text{m}$, T_d , K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4), 673



9 pav. Apsauginio kiauto atmosferos temperatūros įtaka garo srautui (a) ir jo tančiui (b) vandens lašelio paviršiuje. Kraštinės sąlygos kaip 8 pav.

Kylant atmosferos temperatūrai, kondensacinio režimo lašelių paviršiuje trukmė gerokai sutrumpėja (9 pav.). Tai tiesiogiai atsiliepia lašelių išaugimui ir masės kitimui kondensaciniame fazinių virsmų režime.



10 pav. Apsauginio kiauto atmosferos temperatūros įtaka fazinių virsmų šilumos srautui (a) ir lašelį šildančiam konvekcinei šilumos srautui (b). Kraštinės sąlygos kaip 8 pav.

Apibendrinimas

Darbo rezultatai apibendrinti išvadomis [14]:

1. Išpurkšto skysčio lašelių šilumokaitą ir masės mainus nusakančius parametrus P galime rasti, taikant palyginamąjį vertinimą. Terminių P_T parametrų paieškai užtenka realaus laiko skalę pakeisti į Furje kriterijumi išreikštą laiko ska-

- lę. Tačiau energiniams P_q ir fazinių virsmų P_f parametrams vertinti, būtina sudaryti normuotų $\bar{P}(Fo) \equiv P(Fo)/P_0$ parametrų funkcijas.
2. Lašelio slydimo intensyvumas labiausiai paveikia išorinį bei vidinį lašelio šilumos konvekcinį pernešimą. Išorinės konvekcijos šilumos srauto vertės kondensacinio fazinio virsmų režimo pradžios momentu akivaizdžiai išauga prie didesnio lašelio paviršiaus slydimo greičio. Lašelio vidinė konvekcija taip pat labai suintensyvėja dėl intensyvesnės vidinės vandens lašelyje cirkuliacijos, kurią sukelia kylančios trinties jėgos tarp lašelio paviršiaus ir jį aptakančių dujų mišinio. Ilgėjanti kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė ir intensyvesnis garo srautas lašelio paviršiuje iššaukia didesnę lašelio masės bei matmens pokytį.
 3. Dujų mišinio temperatūra daro ryškią įtaką lašelio kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmei. Didėjant dujų mišinio temperatūrai, kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė trumpėja. Todėl lašelio paviršiuje mažėja susikondensuojančio garo kiekis, taip nulemdamas, jog lašelio masės prieaugis kondensacinio fazinių virsmų režimo metu prie aukštesnių temperatūrų mažėja. Mažesnis masės prieaugis ir intensyvesnis lašelio garinimas lemia tai, jog lašelio gyvavimo trukmė sutrumpėja. Dujų mišinio temperatūros įtaka labai stipriai atsispindi ir išorinės konvekcijos šilumos sraute. Kylant dujų mišinio temperatūrai, šilumokaitos varomoji jėga taip pat auga, taip akivaizdžiai suintensyvindama išorinę konvekciją.
 4. Igauta vienišų lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų skaitinio modeliavimo patirtis atveria galimybes skaitiškai ištirti šilumos ir masės mainus lašelių ir drėgnų dujų atominių elektrinių apsauginiuose kiautuose, kai kraštinės sąlygos yra sudėtingesnės ir lašelių pernašos procesai lemia dujų parametrus.

Literatūra

1. Gylis J., Ašmantas L. Atominių elektrinių branduoliniai energetiniai įrenginiai. Kaunas: Technologija. 2011.
2. Reisch F. High Pressure Boiling Water Reactor Neutron flux measurement Control rod Steam Moisture separator Water Recirculation flow Fuel. <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1500_CD_Web/html/pdf/topic5/5S02_F_Reisch.pdf>.
3. International Atomic Energy Agency: Design of reactor containment systems for nuclear power plants. IAEA Safety Standards Series, 2004, Vol. NS-G-1, 117 p.
4. Malet J. et al. Achievements of spray activities in nuclear reactor containments during the last decade. Annals of Nuclear Energy. 2014, Vol. 74, No. C, p. 134–142.

5. Foissac A. et al. Eulerian simulation of interacting PWR sprays including droplet collisions. *Nuclear Technology*, 2013, Vol. 181, No 1, p. 133-143.
6. Menchaca-Rocha et al. Coalescence and fragmentation of colliding mercury drops. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, Vol. 346, p. 291-318.
7. Mashayek F. et al. Coalescence collision of liquid drops. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003, Vol. 46, No. 1, p. 77-89.
8. Brenn G. *Droplet Collision. Handbook of Atomization and Sprays*. Boston, MA: Springer US, 2011. p. 157-181.
9. Porsheron E. et. al. Experimental investigation in the TOSQAN facility of heat and mass transfers in a spray for containment application. *Nuclear Engineering and Design*. 2007. Vol. 237, No. 15-17, p. 1862-1871.
10. Lemaitre P., Porsheron E. Analysis of heat and mass transfers in two-phase flow by coupling optical diagnostic techniques. *Experiments in Fluids*. 2008. Vol. 45, No. 2, p. 187-201.
11. Sirignano W.A. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*. 2. Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 480 p.
12. Heitsch M. et al. Simulation of containment jet flows including condensation. *Nuclear Engineering and Design*. 2010. Vol. 240, No. 9, p. 2176-2184.
13. Miliauskas G., Sabanas V. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49, No. 11-12, p. 1790-1803.
14. Šmigelskis E. Vandens įpurškimo pritaikymas atominių stočių apsaugos sistemose ir pernašos procesų modeliavimas. Termoinžinerijos magistro baigiamasis darbas (Vadovas G. Miliauskas). Kaunas, KTU. 2017, 81 p.
15. Miliauskas G., Maziukienė M., Ramanauskas V. Peculiarities of the transit phase transformations regime for water droplets that are slipping in humid gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 102, p. 302-314.
16. Shorin S. N. *Teploperedacha*. M: Vishaja Shkola, 1964.
17. Vukalovitch M. P., *Thermodynamics properties of water and steam*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1958.
18. Kuzikovskij A. B. Dynamic of spherical particle in powerful optical field. *Izvestiya VUZ*. 1970. No. 5, p. 89-94.

The application of water spray for nuclear power plant safety systems and transit droplets transfer processes

Summary

This article presents an overview of thermal engineering student Edgaras Šmigelskis' master's thesis: Usage of water spray for nuclear power plant safety systems and modelling of transfer processes. Previously unpublished main results and its generalizations (work supervisor G. Miliauskas) [14].

The results of this research confirm the conclusion of the work [15], which states that the more intensive slipping causes the stronger forced water circulation inside a droplet leading to intensified heat transfer abstraction that promotes heat dissipation ratio into central layers. The essential impact of the sprayed water temperature for a transit-phase transformation regime on a droplet surface was estimated along with the nuclear power plant containment atmosphere temperatures significant impact on the duration of a transit-phase transformation regime and a droplet equilibrium evaporation thermal state.

TURINYS

1. ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI IR BIOSFEROS APSAUGA

Rimvydas Ambrulevičius

Įrangos komplektas kietųjų dalelių emisijų matavimui gravimetriniu metodu stacionariuose objektuose EMIOTEST 3114..... 3

Giedrius Gecevičius, Vaidotas Zimnickas

Šilumos polių integravimo į pastatų konstrukcijas tyrimas..... 7

E. Kaliatkienė, K. Buinevičius

NOx mažinimo naudojant anglies kalatalizatorius galimybių analizė 14

Juozas Savickas, Vladislovas Katinas, Marijona Tamašauskienė

Biodujų ir biodegalų pramonės kūrimo Lietuvoje aspektai 20

Eugenijus Perednis, Mantas Marčiukaitis

Saulės šilumos pritekėjimų į pastatus tyrimas 26

Kęstutis Buinevičius, Gediminas Kabišius

Šiaudų granulėmis kūrenamo pramoninio garo katilo anglies monoksido išmetimų tyrimas..... 30

Rolandas Uscila, Vilma Snapkauskienė, Romualdas Kėželis, Mindaugas Aikas

Naftos produktais užteršto grunto apdorojimas taikant plazminę technologiją 36

Simas Klenauskis

Review of numerical simulation requirements for cyclone separator using unstructured mesh..... 42

Adolfas Jančauskas

Kuro NOx emisijų mažinimo eksperimentiniai tyrimai deginant baldų gamybos pramonės atliekų granules 46

2. ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI

Darius Laurinavičius

Garų kondensacijos potencialo įvertinimas esant dvifaziam tekėjimui horizontaliame stačiakampčiame kanale 54

Monika Maziukienė, Gintautas Miliauskas

Išpurkšto vandens lašelių kondensacinio režimo dėsningumai šalinamų drėgnų biokuro dūmų šilumos utilizavimo technologijose 60

Gintautas Miliauskas, Virginijus Ramanauskas

Sudėtinių šilumos ir masės pernašos procesų biokuro terminėse technologijose apibrėžimo poreikis ir savitumai 64

Nerijus Rinkevičius, Gintautas Miliauskas

Šilumos balanso biokuro rekuperaciniame kondensaciniame ekonomizeryje analizė 72

Edgaras Šmigelskis, Gintautas Miliauskas

Vandens išpurškimo branduolinių jėgainių apsaugos sistemose pritaikomumas ir lašelių pereinamieji pernašos procesai 78