

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

ŠILUMOS ENERGETIKA IR TECHNOLOGIJOS – 2014

Konferencijos pranešimų medžiaga



kauno
technologijos
universitetas



Kauno technologijos
universitetas
Konferencija, 2014 m.
sausio 31 d.

Kaunas * Lietuvos energetikos institutas * 2014

Tarptautinis mokslinis komitetas

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

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

prof. Eleonora Epik, Kijevo technikos universitetas (Ukraina)

prof. Jonas Gyls, Kauno technologijos universitetas (Lietuva)

prof. Oleg Martynenko, Baltarusijos mokslų akademijos A.V. Lykovo Šilumos ir masės mainų institutas (Baltarusija)

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 energetikos institutas (Lietuva)

prof. Raymond Viskanta, Purdue universitetas (JAV)

doc. Arvydas Adomavičius, Kauno technologijos universitetas (Lietuva)

dr. Rolandas Urbonas, Lietuvos energetikos institutas (Lietuva)

dr. Vytautas Žiugžda, (Lietuva)

Redakcinė kolegija:

prof. Stasys Šinkūnas (atsakingasis redaktorius)

doc. Arvydas Adomavičius

dr. Vytautas Žiugžda

dr. Rolandas Urbonas

prof. Gintautas Miliauskas

prof. Jonas Gyls

doc. Juozas Gudžinskas

doc. Egidijus Puidas

doc. Kęstutis Buinevičius

*Leidinio straipsnius recenzavo redakcinė kolegija
ir nepriklausomi recenzentai*

© Kauno technologijos universitetas, 2014

© Lietuvos energetikos institutas, 2014

PRATARMĖ

Kaip ir kasmet, žiemos egzaminų sesijai besibaigiant Kauno technologijos universiteto Šilumos ir atomo energetikos katedra kartu su Lietuvos energetikos institutu bei Lietuvos šiluminės technikos inžinierių ir branduolinės energetikos asociacijomis pakvietė mokslininkus, gamybininkus, verslo ir valstybinių institucijų atstovus į tradicinę šilumininkų konferenciją „Šilumos energetika ir technologijos“.

Konferencijos darbas vyko keturiose sekcijose: „Atsinaujinantys energijos šaltiniai ir biosferos apsauga“, „Branduolinė energetika“, „Šilumos ir masės mainai“ ir „Šildymas, šilumos tiekimas ir termifikacija“.

Atsinaujinančių energijos išteklių ir biosferos apsaugos sekcijoje šiais metais daug dėmesio skirta technologiniams aplinkos taršos mažinimo klausimams, naudojant atsinaujinančios energijos išteklius. Dalis pranešimų skirta atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo praktiniams aspektams bei plėtos galimybėms analizuoti. Malonu pažymėti, kad po ilgos pertraukos buvo sulaukta ir kolegų iš Kauno kolegijos pranešimo.

Šiais metais branduolinės energetikos sekcijoje perskaityti 7 pranešimai. Anksčiau konferencijose vyravusią tematiką, susijusią su Ignalinos AE bei RBMK-1500 reaktorių problemomis, šioje konferencijoje keičia pranešimai, kuriuose atspindi naujų branduolinės energetikos sistemų ir įrangos tyrimo klausimai. Pavyzdžiui, LEI doktorantas T. Kaliatka perskaitė įdomų pranešimą apie termobranduolinės sintezės reaktoriaus saugos tyrimus, kurių dalis rezultatų gauta tarptautinėje tyrėjų komandoje, tiriančioje nedidelio trūkio atvejį W7-X įrenginio aušinimo sistemoje. Fukušimos AE 2011 m. įvykusios avarijos atkreipė padidintą dėmesį ne tik į verdančiojo vandens reaktorių saugą, bet ir į panaudoto branduolinio kuro išlaikymo baseinų apsaugą avarijų, kurių metu prarandamas šilumnešis, kilimo galimybę. Konferencijos svečiai iš Maskvos (Rusija) supažindino su Mendelejevo vardo chemikų draugijoje atliekamų sunkiojo vandens gavybos, panaudojant laipsnišką gamtinio vandens šaldymą, tyrimų rezultatais. Konferencijoje didėjantis, lyginant su praėjusiais metais, pranešimų skaičius ir platesnė tematika rodo augantį susidomėjimą branduoline energetika ir jos teikiama galimybėmis.

Šilumos ir masės mainų sekcijos darbe dalyvavo Ukrainos nacionalinio technikos universiteto, Lietuvos energetikos instituto, Kauno kolegijos, Lietuvos valstybinės kainų komisijos ir Kauno technologijos universiteto šilumos ir masės pernašos procesų problematikoje mokslinį darbą dirbantys mokslininkai. Sekcijoje perskaityti visi programoje numatyti septyni moksliniai pranešimai ir papildomas pranešimas „Vandens lašelių fazinių virsmų ciklo skaitinio modeliavimo iteracinės schemos optimizavimo savitumai“ (Monika Maziukienė, KTU). Išskirtinio sekcijos posėdžio dalyvių dėmesio taip pat sulaukė išsamus Adelės Vaidelienės (LEI) pranešimas „Oro burbuliukų ir vandens lašelių susidarymas krintančio vandens srauto zonoje“, atskleidęs ruošiamos ginti disertacijos esmę ir savitumus hidrologinių ir gamtosauginių problemų sandūroje. Roman Neilo pranešime „Eksperimentiniai šilumos ir masės mainų natūralios konvek-

cijos atveju tyrimai“ platesniu aspektu atskleidė ir kitus Kijevo technikos universitete vykdomus mokslinius tyrimus. Šilumos ir masės mainų sekcijos darbas baigėsi įdomia moksline diskusija. Tačiau būtina pastebėti, jog KTU ir LEI jaunieji mokslininkai nėra aktyvūs konferencijos dalyviai ir ne visiškai išnaudoja galimybes savo mokslinei kvalifikacijai ir bendravimui tobulinti.

Konferencijos sekcijoje „Šildymas, šilumos tiekimas ir termofikacija“ buvo perskaityta 10 pranešimų. Tarp jų – probleminiai ir taikomieji, susiję su šių dienų aktualijomis ir skirti apžvelgti Kauno miesto CŠT sistemos būklę, UAB „Fortum Klaipėda“ pirmųjų veiklos metų rezultatus bei nepriklausomų šilumos gamintojų integracijos į miestų šilumos tiekimo tinklus aspektus. Nors visi pranešimai buvo įdomūs, o pranešėjai sulaukė daug klausimų, tačiau į šį rinkinį, deja, pateikti tik keturi straipsniai, visi susiję su moksliniais – tiriamaisiais darbais, atliekamais LEI bei KTU atstovų.

Akivaizdu, kad šilumos tiekimo miestams klausimai ir problemos aktualūs tiek specialistams, tiek ir plačiajai visuomenei, todėl tikimės, kad tradicija šalčiausią žiemos mėnesį susirinkti Šilumos ir atomo energetikos katedroje bus išlaikyta, ir kitoje konferencijoje sulauksime gausnesnio dalyvių skaičiaus, bei aptarsime šilumos energetikos aktualijas, problemas ir šalies energetinio ūkio raidos tendencijas.

Redakcinė kolegija

I. ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI IR BIOSFEROS APSAUGA

Atsinaujančių energijos išteklių darbinių parametrų stebėjimo posistemė

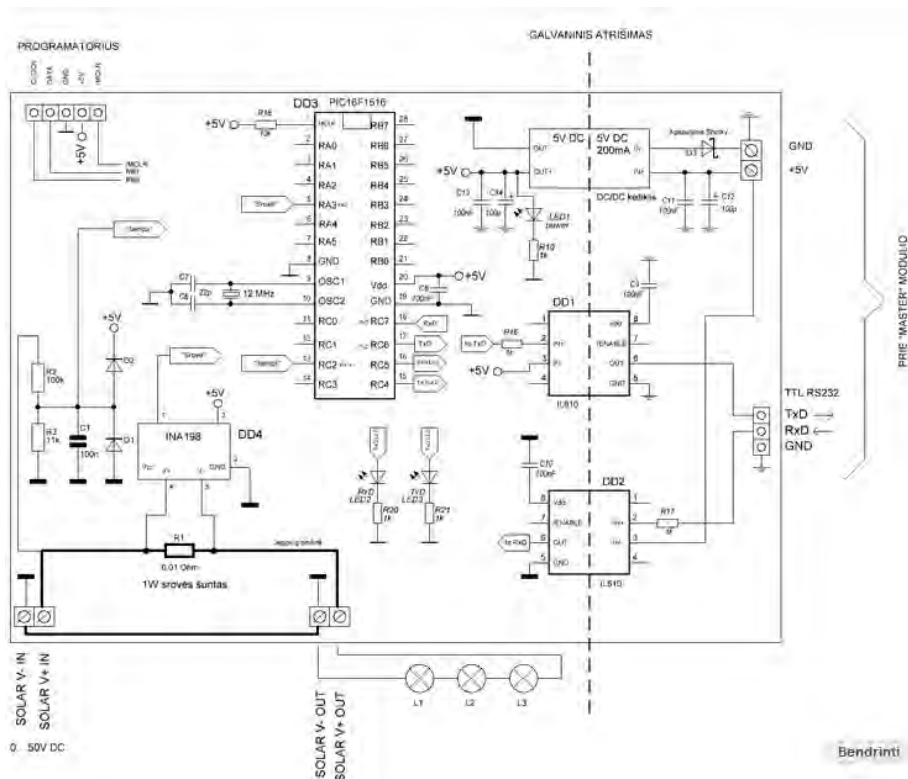
Žydrūnas Kavaliauskas, Rolandas Uscila
Kauno kolegija

Ivadas. Saulės modulis yra fotovoltinių elementų sujungtų į elektros grandinę bei sumontuotų ant laikančiosios konstrukcijos rinkinys. Saulės modulis gali būti naudojamas generuoti ir tiekti elektros energijai komerciniams ir gyvenamiesiems namams. Kiekvienas modulis yra vertinamas pagal savo DC išėjimo galią generuojamą standartinėmis testavimo sąlygomis (STS), elektros galia paprastai svyruoja 100–320 vatų ribose. Vienas saulės modulis gali gaminti tik ribotą energijos kiekį, dauguma įrenginių yra sujungti į modulių visumą. Fotoelementų sistema paprastai naudojama kartu su keitikliais, baterijomis, jungimo laidais ir kt.

Saulės moduliai naudoja šviesos fotonų energiją, gaunamą tiesiogiai veikiant saulės šviesai. Dauguma modulių pagaminti iš kristalinio silicio ląstelių su kadmio teliūrido arba silikono priemaisomis. Ląstelės taip pat turi būti apsaugotos nuo mechaninių pažeidimų ir drėgmės. Norint pasiekti reikiamą galingumą, saulės elementai tarpusavyje yra jungiami nuosekliais ir lygiagrečiais būdais. Kad būtų padidintas saulės modulių efektyvumas, virš jų paviršiaus montuojami šviesos koncentratoriai – lęšių ir veidrodžių sistemos, tai leidžia sumažinti paviršiaus plotą neprarandant efektyvumo. Atsižvelgiant į konstrukciją ir sudėtį fotoelektriniai moduliai gali gaminti elektros energiją naudojant platų saulės spinduliuotės dažnių diapazoną, tačiau paprastai negalima apimti viso saulės šviesos spektro (tiksliau, ultravioletinių, infraraudonųjų spindulių bei išsklaidytos šviesos). Daug didesnį efektyvumą saulės modulių būtų galima gauti jeigu būtų naudojama monochromatinė šviesa. Todėl egzistuoja tokia saulės modulių gamybos koncepcija, leidžianti padalyti šviesą į skirtingo bangos ilgio diapazonus ir nukreipti spindulius į skirtingas ląstelių grupes. Teoriniai skaičiavimai rodo, kad taip galima padidinti efektyvumą iki 50 %. Šiuo metu geriausi naujų komercinių produktų maksimalus efektyvumas yra 21,5 %. Moksliniai tyrimai rodo, kad naudojant aliuminio priemaišas ir taip pailginant šviesos kelią, saulės modulio kristale galima pasiekti saulės fotonų geresnę sugertį, o tai leidžia pagerinti paties modulio darbo efektyvumą. Aliuminio priemaišos leidžia netgi panaudoti ultravioletinius ir infraraudonuosius spindulius generuojant elektros varos jėgą, ko neleido anksčiau naudotos aukso ir sidabro priemaišos. Naudojant aliuminį galima būtų padidinti ne tik saulės modulių efektyvumą, bet ir sumažinti kainą, kadangi aliuminis už naudojamus auksą ir sidabrą yra žymiai pigesnis.

Saulės baterijos parametrų stebėjimo sistema. Saulės panelės įtampa ir srovė, patenkančios į apkrovą, matuojamos mikrovaldikliu ir specialia mikroschema. Informacija RS232 sąsaja siunčiama į kompiuterį. Specialiai tam sukurta aplikacija

Windows operacinei sistemai gauna paketus iš mikrovaldiklio, atkoduoja ir parodo momentines įtampas, srovės ir galios reikšmes, bei atlieka duomenų kaupimą.



1 pav. Saulės baterijos darbinių parametų stebėjimo sistemos elektroninė schema

Saulės panelės įtampą per rezistorių daliklį R2 ir R3 matuoja mikrovaldiklis PIC16F1516. Varžų nominalai parinkti taip, kad įtampa mikrovaldiklio ADC (analoginis-skaitmeninis keitiklis) įėjime neviršytų 5V. Srovė matuojama specializuota mikroschema INA196, kuri skirta įtampai matuoti ant šunto (galingo mažos varžos rezistoriaus). Matuojant įtampos kritimą ant šunto, kurio varža nekinta, galima pagal Omo dėsnį paskaičiuoti per šuntą tekančią srovę. Mikroschema INA196 išėjime išduoda įtampos signalą (0...2,7 V diapazone), proporcingą tekančiai per šuntą srovei. Įtampos signalas matuojamas mikrovaldiklio ADC keitikliu.

Programiškai apskaičiuojama momentinė srovės reikšmė. Po kiekvieno matavimo, kuris vyksta kas 1 sekundę, informacija apie įtampas ir srovės reikšmes perduodama į kompiuterį. Galią apskaičiuoja kompiuterinė aplikacija. Schemoje numa-

tytas visiškai galvaninis atrišimas nuo kompiuterio. Atsiradus trumpam jungimui ar kitam gedimui schemos matavimo dalyje, kompiuteris bus visiškai apsaugotas. Galvaninis maitinimo atrišimas atliekamas per kompaktišką DC/DC keitiklio modulį.

Modulis maitinamas nuo išorinio 5 V DC stabilizuoto maitinimo šaltinio. RS232 sąsajos atskirimas atliekamas mikroschemomis IL610. Šie galvaninio signalų atrišimo įtaisai sukonstruoti Holo jutiklio pagrindu. Vietoje jų galima naudoti klasikinį sprendimą – optronus. Šviesos diodas LED1 indikuoja 5 V maitinimo įtampą. Diodai LED2 ir LED3 mirksi informacijos perdavimo metu. Diodas D3 apsaugo schemą nuo netaisyklingo maitinimo šaltinio įjungimo (atvirkštinis poliškumas). Diodai D1 ir D2 apsaugo mikrovaldiklio analoginį įėjimą nuo viršįtampio saulės panelės įtampos matavimo grandinėje.

Išvados

1. Deginant iškastinį kurą gaunami milžiniški anglies dvideginio kiekiai, dėl kurio vyksta globalus klimato atšilimas. Saulės energija – ekologiška energija.
2. Lietuvoje pastaruoju metu buvo pastebimas susidomėjimas fotoelektros gaminimu, tačiau pasikeitus valdžiai įstatyminė bazė tapo nepalanki.
3. Sukonstruota unikali saulės baterijos parametų stebėjimo posistemė, šiuo metu sėkmingai kaupianti darbinės charakteristikas duomenų bazėje.
4. Konstravimo metu išsiaiškinti pagrindiniai darbinių duomenų elektroninės sistemos darbo principai.

Literatūra

1. Xu Y., Kong X., Zeng Y., Tao S. Xiao X. A modeling method for photovoltaic cells using explicit equations and optimization algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, (59), 2014, pp. 23–28.
2. Azzouzi G., Tazibt W. Improving silicon solar cell efficiency by using the impurity photovoltaic effect. *Energy Procedia*, (41), 2013, pp. 40–49.
3. Peng L., Sun Y., Meng Z. An improved model and parameters extraction for photovoltaic cells using only three state points at standard test condition. *Journal of Power Sources*, (248), 2014, pp. 621–631
4. Shahriar M., Khan P. Esmat farzana impurity photovoltaic effect in multijunction solar cells. *Procedia Technology*, (7), 2013, pp. 166–172.
5. Rabady I. R. Optimized multi-junction photovoltaic solar cells for terrestrial applications. *Solar Energy*, (106), 2014, pp. 72–81.

Renewable energy sources operating parameter monitoring subsystem

Summary

Solar photovoltaic cell module is connected to an electrical circuit and mounted on a supporting structure set. Solar module can be used to generate and supply electricity in commercial and resi-taxable home. Each module is assessed according to its DC output power generated by the standard test conditions (STC) of electric power generally ranges from 100 to 320 W range.

Solar panel voltage and current, putting the load measured by the microcontroller chip and special assistance. Information is sent via RS232 interface to a PC. A specially designed application for Windows operating system receives packets from the microcontroller, decrypts and displays the instantaneous voltage, current and power, and perform data collection.

Kietųjų dalelių susidarymas deginant biokūrą ir jų sugaudymo efektyvumas naudojant elektrostatinį filtrą

Robertas Poškas, Arūnas Sirvydas
Lietuvos energetikos institutas

Ivadas. Biokuras yra gana plačiai naudojamas daugelyje šalių šilumai ir elektros energijai gaminti [1]. Biokuras (mediena, šiaudai, grūdai ir kt.) taip pat yra laikomas atsinaujinančiu energijos šaltiniu [2], darančiu mažiausią poveikį aplinkai, dėl to jo suvartojimas didėja ne tik naujai, bet ir anksčiau pastatytose katilinėse Lietuvoje [3].

Pagrindinė biokuro rūšis Lietuvoje yra mediena, kurios naudojimas pastarąjį dešimtmetį sparčiai augo ir 2012 m. sudarė apie 998 ktne [4]. Pastaruoju metu mediena yra gana populiarius kuras ne tik kai kuriose katilinėse, bet ir namų ūkiuose [3]. Šis kuras laikomas atsinaujinančiu energijos šaltiniu ir pagal tarptautinį susitarimą CO₂, išsiskyręs deginant biokūrą, nėra laikomas šiltnamio efekto sukeliančiomis dujomis [2]. Tačiau vienas pagrindinių trūkumų lyginant biokuro deginimą su kai kurių dujinių ar skystųjų kūrų deginimu yra gana dideli kietųjų dalelių (KD) išmetimai į aplinką. Daugėjant biokūrą deginančių įrenginių (katilinės, privatūs namai), didėja ir KD emisijos. Pavojingiausios yra kietosios dalelės KD10 ($d \leq 10 \mu\text{m}$) ir KD2,5 ($d \leq 2,5 \mu\text{m}$). Šios dalelės yra itin mažos ir gali prasiskverbti į kvėpavimo sistemą. KD2,5 dalelės yra tokios smulkios, jog gali patekti į kraujotakos sistemą ar net vidaus organus. Ilgalais KD poveikis sukelia sveikatos problemų – dažniausiai pneumoniją, kardiovaskulines ligas ar net ankstyvą mirtį [5–7].

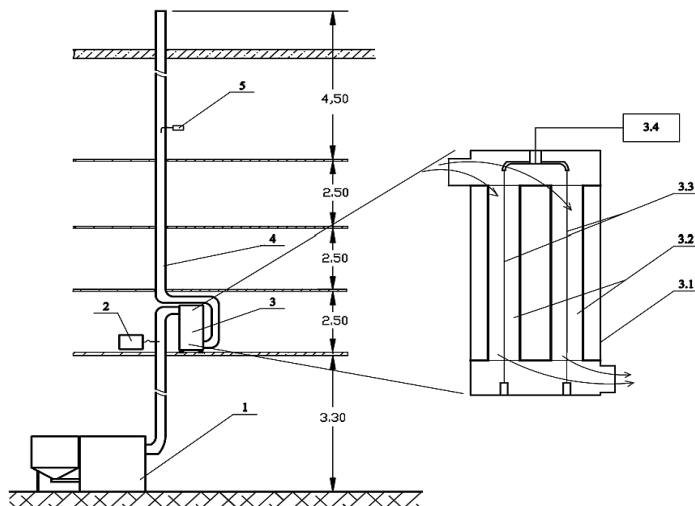
Europos tarybos direktyvoje [8] nurodyta, kad: „Valstybės narės imasi būtinų priemonių užtikrinti, kad KD10 koncentracijos aplinkos ore neviršytų nurodytų ribinių verčių“ bei „Veiksmų planais dėl KD10 parengtais vadovaujantis Direktyvos 96/62/EB 8 straipsniu, ir bendrąja KD10 koncentracijų aplinkos ore mažinimo strategija siekiama sumažinti ir KD2,5 koncentracijas“. Nors ir nėra reikalavimų KD emisijoms iš mažos galios katilų, tačiau tokių katilų vis daugėjant (katilinės, privatūs namai ir pan.), dėl to neišvengiamai gali padidėti ir oro tarša kietosiomis dalelėmis.

Aplinkosaugos problemoms tampant vis aktualesnėmis, reikalavimus pradėta koordinuoti mažųjų katilų įrangai, taip pat ir biomase kūrenamiems katilams [2]. Europos standartizacijos komitetas standartu EN 303-5:2012 [9] nustatė reikalavimus iki 500 kW nominaliosios galios kietu kuru kūrenamiems katilams. Šio standarto tikslas – didinti katilų efektyvumą ir mažinti emisijas (taip pat ir kietųjų dalelių).

Pakankamai efektyviai KD galima sugaudyti (nusodinti) elektrostatiniais filtrais (nusodintuvais). Elektrostatiniai filtrai (EF) gana plačiai taikomi didelės galios katilinėse, tačiau retai sutinkami mažos galios katilinėse [10].

Todėl šiame darbe buvo nagrinėtas Lietuvos energetikos institute suprojektuotas ir pagamintas EF, skirtas mažos galios katilams.

Eksperimentinių tyrimų metodika. Eksperimentinis ruožas, naudotas elektrostatinio filtro savybėms tirti, parodytas 1 pav. Dūmai ($\sim 177 \text{ m}^3/\text{h}$), kaip ir kietosios dalelės iš automatinio katilo (50 kW), kuriame deginamos medienos granulės, patenka į EF, kuriame nusodinamos KD ir po to išvalyti dūmai per kaminą ($\varnothing 180 \text{ mm}$) išmetami į aplinką.



1 pav. Eksperimentinio ruožo schema: 1 – kietojo kuro katilas; 2 – dūmų sudėties matuoklis; 3 – elektrostatinis filtras (3.1-korpusas, 3.2-nusodinimo elektrodai, 3.3-išlydžio elektrodai, 3.4-aukštos įtampos šaltinis); 4 – kaminas; 5 – kietųjų dalelių matuoklis

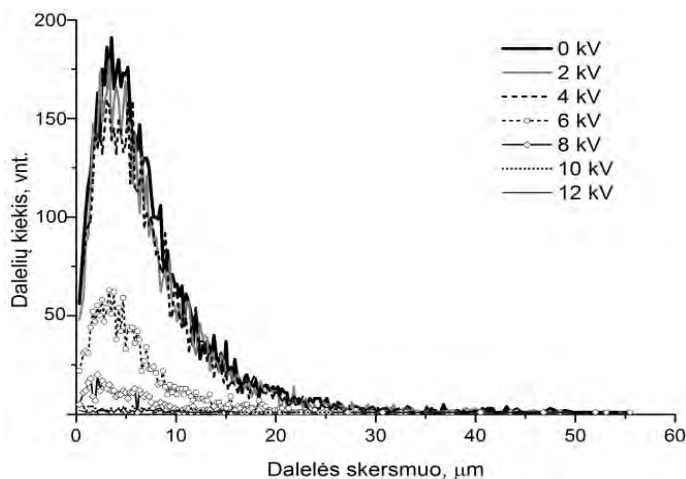
Eksperimentų metu naudotas elektrostatinis filtras suprojektuotas ir pagamintas Lietuvos energetikos institute. Jį sudaro metalinis rėmas, kuriame sumontuoti du nusodinimo ($d = 120 \text{ mm}$, $l \approx 1000 \text{ mm}$) ir du išlydžio elektrodai (išlydžio elektrodams naudota $0,2 \text{ mm}$ skersmens nichromo viela). Išlydžio elektrodai sujungti su aukštos įtampos šaltiniu, kuriuo įtampą galima keisti nuo 0 iki 30 kV .

Išmatavus EF voltamperinę charakteristiką (V/A) pasirodė, kad jai geriausiai galima taikyti modifikuotą Townsend lygtį, kuri dažnai taikoma elektrostatinių filtrų voltamperinėms charakteristikoms aprašyti [11]. Pagal išmatuotą V/A buvo nustatyta, kad įtampa, kuriai esant atsiranda rusenantis išlydis yra lygi 6 kV .

Kietųjų dalelių kiekis dūmuose buvo matuojamas KD matuokliu, galinčiu matuoti kietąsias daleles kurių diametras nuo $0,4 \text{ }\mu\text{m}$ iki $300 \text{ }\mu\text{m}$. KD matuoklio veiki-

mas pagrįstas infraraudonųjų spindulių išsklaidymu. Infraraudonuosius spindulius išsklaido KD judėdamos per matavimo zoną. Kiekviena dalelė judėdama per matavimo zoną generuoja elektrinį impulsą, proporcingą sferinės dalelės diametrui. Jei dalelė yra ne sferinė, tada impulso dydis priklauso nuo to, kaip dalelė yra orientuota matavimo zonoje. Taigi, šiuo įrenginiu yra matuojamas tik vienas dalelės matmuo. KD matavimai buvo atliekami po 2 min.

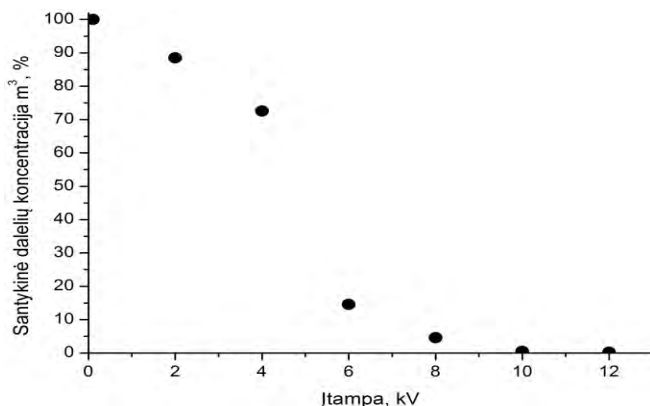
Tyrimų rezultatai. Kietųjų dalelių kiekio pasiskirstymo priklausomumas nuo įtampos ant EF išlydžio elektrodo parodytas 2 pav.



2 pav. Kietųjų dalelių kiekio pasiskirstymo priklausomumas nuo įtampos ant EF elektrodo

Kol įtampa nebuvo prijungta (0 kV), buvo nustatyta, kad dūmuose daugiausia yra dalelių, kurių skersmuo vyrauja nuo 0,4 μm iki $\sim 20 \mu\text{m}$. Daugiausiai vyrauja dalelės, kurių skersmuo yra $\sim 4 \mu\text{m}$. Kai įtampa EF buvo padidinta iki 2 kV ar 4 kV, buvo nustatytas nežymus KD kiekio sumažėjimas. Kai įtampa buvo 6 kV (kaip minėta, tai yra įtampa, kuriai esant ant išlydžio elektrodo jau prasideda rusenantis išlydis) jau pastebėtas gana ženklus KD kiekio sumažėjimas. Tolesnis įtampos didinimas iki 8 ar 10 kV, atskleidžia tą pačią dalelių kiekio mažėjimo tendenciją. Kai įtampa buvo padidinta dar daugiau – iki 12 kV, tai tokio žymaus KD kiekio mažėjimo efekto nebuvo gauta.

KD matuoklis taip pat automatiškai apskaičiuoja ir kietųjų dalelių koncentraciją dūmų kubiniame metre. Apskaičiuotas santykinės dalelių koncentracijos kitimas, atsižvelgiant į EF paduodamą įtampą, parodytas 3 pav.



3 pav. Santykinės kietųjų dalelių koncentracijos kitimas, atsižvelgiant į įtampą, paduodamą į EF

Iš pradžių įtampos padidinimas iki 4 kV leido sumažinti kietųjų dalelių koncentraciją apie 25 % (t. y. KD koncentracija jau siekė apie 75 %). Po to, įtampą padidinus iki 6 kV (iki minimalios įtampos, kuriai esant prasideda išlydis ant EF išlydzio elektrodo) KD koncentracija sumažėjo iki 75 %, palyginus su matavimais, esant nulinei įtampai. Įtampos padidinimas iki 8 kV dalelių koncentraciją dar labiau sumažino (iki ~95 %). Kai įtampa buvo 10 ar 12 kV dalelių koncentracija praktiškai nebekito ir buvo apie 0,3 %. Taigi, EF panaudojimas leido sumažinti KD koncentraciją dūmuose daugiau nei 99 %.

Išvados

1. Minimali įtampa, kuriai esant atsiranda elektrodo rusenantis išlydis yra 6 kV.
2. Didžiausias KD nusodinimo efektyvumo padidėjimas gautas pasiekus EF rusenančiojo išlydzio įtampą (6 kV).
3. Tolesnis įtampos didinimas (iki 12 kV) didesnį KD koncentracijos sumažėjimo neduoda, tačiau, leidžia pasiekti 99 % filtro bendrąjį efektyvumą.

Padėka

Šiuos tyrimus finansavo Lietuvos mokslo taryba pagal projektą ATE-02/2012 BIODKONVERS.

Literatūra

1. Demibras A. Combustion Systems for Biomass Fuel. *Energy Sources*, 2007, 29 (4): P. 303–312.
2. Biokuro naudotojo žinynas. Tallinn University of Technology, 2007. 167 p.
3. Vonžodas T. Pedišius N. Valantinavičius M. Mažos galios biokuro kūrenamų vandens šildymo katilų veikimo parametrų tyrimas. *Energetika*, 2013, 59 (2): P. 93–109.

4. Kuro ir energijos balansas. Lietuvos statistikos departamentas, 2013. 54 p.
5. Zelikoff J.T. Chen L.C. Cohen M.D. Fang K. Gordon T. Li Y. Nadziejko C. Schlesinger R.B. Effects of inhaled ambient particulate matter on pulmonary antimicrobial immune defense. *Inhalation Toxicology*, 2003, 15(2): P. 131–150.
6. de Hartog J.J. Hoek G. Peters A. Timonen K.L. Ibaldo-Mulli A. Brunekreef B. Heinrich J. Tiittanen P. van Wijnen J.H. Kreyling W. Kulmala M. Pekkanen J. Effects of fine and ultrafine particles on cardiorespiratory symptoms in elderly subjects with coronary heart disease: the ULTRA study. *American Journal of Epidemiology*, 2003, 157(7): 613–623.
7. Brunekreef B. Holgate S.T. Air pollution and health. *Lancet*, 360 (9341): 1233–1242.
8. Tarybos direktyva 1999/30/EB 1999 m. balandžio 22 d. dėl sieros dioksido, azoto dioksido, azoto oksidų, kietųjų dalelių ir švino ribinių verčių aplinkos ore.
9. LST EN 303-5:2012. Šildymo katilai. 5 dalis. Rankomis ir automatiškai pakraunami kietojo kuro šildymo katilai, kurių vardinė šiluminė galia iki 500 kW. Terminija, reikalavimai, bandymai ir ženklavimas.
10. Intra P. Limueadphai P. Tippayawong P. Particulate emission reduction from biomass burning in small combustion systems with a multiple tubular electrostatic precipitator. *Particulate Science and Technology*, 2010, 28 (6): 547–565.
11. G.F. Oliveira O.N. Giacometti J.A. Point-to-plane corona: Current-voltage characteristics for positive and negative polarity with evidence of an electronic component. *Journal of Applied Physics*, 1986, 59 (9): P. 3045–3049.

Generation of solid particles in biofuel combustion and their collection efficiency by application of electrostatic precipitator

Summary

Biofuel is used to provide centralized heating and electricity production. In Lithuania, use of biofuel is also currently increasing: it is used not only in industrial areas but is also as a popular type of fuel for small scale household furnaces. The main disadvantage of this type of fuel in comparison to combustion of some gaseous or liquid fuels is rather high emissions of coarse, fine and ultrafine solid particles. Long term exposure to such types of particulate matters causes health problems. Electrostatic precipitation is a very reliable method to control particulate emissions from boilers, incinerators, and other industrial processes.

The results of the experimental investigations of the characteristics of electrostatic precipitator (ESP) designed at Lithuanian Energy Institute are presented in this paper. The application of the ESP is intended for small scale heating appliances. It was shown that the minimum voltage of the corona discharge is equal to 6 kV. At that voltage a total collection efficiency of 77 % was achieved. At the highest tested voltage (12 kV) the total collection efficiency was about 99 %.

Biodegalų ir biodujų gamybos Lietuvoje 1998 – 2013 m. analizė ir ateities prognozės

Juozas Savickas, Marijona Tamašauskienė
Lietuvos energetikos institutas

Straipsnyje pateikta apibendrinta biodujų ir biodegalų gamybos ir vartojimo plėtros Lietuvoje apžvalga bei trumpa patirties analizė.

Biodujų, kaip ir visų atsinaujinančių energijos išteklių (AEI), plėtojimo pradžia Lietuvoje vyko sudėtingai visų pirma dėl to, kad tam nebuvo tinkamos įstatyminės bazės. Tačiau ir priėmus daug AEI palankių ES direktyvų, atitinkamų šalies įstatymų bei norminių dokumentų, skirtų visų rūšių atsinaujinančių energijos išteklių plėtrai skatinti, tiek biodujų, tiek biodegalų plėtra nepalengvėjo. Dėl objektyvių ir subjektyvių priežasčių susidurta ir su daugybe biurokratinių barjerų. Tik mokslo pažangos bei atskirų verslininkų entuziazmo ir atkaklumo dėka, atsinaujinančių energijos išteklių panaudojimo srityje pasiekta gerų praktinių rezultatų.

Ivadas. Nors pirmosios žinios apie biodujas siekia 1630 m., tačiau praktiškam panaudojimui jos pirmą kartą buvo pagamintos tik 1897 m. Didžiosios Britanijos Eksetero miesto nuotekų valymo įmonėje ir panaudotos patalpoms šildyti bei teritorijai apšviesti. Beveik tuo pačiu metu, vos penkiais metais anksčiau (1892 m.), buvo užpatentuotas dyzelinis variklis, skirtas vartoti aliejų (galima sakyti – biodegalus) ar žibala.

Ypač didelio susidomėjimo biodujų gamybos srityje sulaukta dar po 76 metų, 1973 m., dėl energetinės krizės JAV ir didelio naftos kainų šuolio.

Lietuvoje biodujų gamybos idėją praktiškai buvo bandyta realizuoti 1981–1983 m. Lietuvos žemės ūkio (LŽŪ) statybos projektavimo institute organizuotoje spaudos konferencijoje, tačiau tuomet dėl ekonominių sumetimų teigiamų rezultatų pasiekti nepavyko.

Pirmasis bioreaktorius Lietuvoje buvo įrengtas tik 1992 m. Panevėžio spirito ir mielių gamykloje AB „Sema“, skirtas spirito gamybos atliekoms – žlaugtams anaerobiškai apdoroti. Toje jėgainėje gaminamos biodujos buvo deginamos kartu su gamtinėmis dujomis. Pagaminta šiluminė energija įmonei leido sutaupyti apie penktadalį gamtinių dujų – tai sudarė teigiamą ekonominį efektą. Tačiau svarbiausias efektas, pasiektas šiame projekte, buvo ekologinis, nes tuo būdu gerokai (iki 40–60 %) sumažintas žlaugtų kenksmingas poveikis aplinkai. Po septynerių metų (1999 m.) šią idėją buvo nuspręsta panaudoti buvusios ŽŪB „Vyčia“ kiaulininkystės komplekse, kur pradėjo veikti kiaulių mėšlą apdorojanti biodujų jėgainė, o pagamintos biodujos buvo sunaudojamos kogeneraciniame bloke šiluminei ir elektros energijai gaminti. Nors šiuo metu abi šios biodujų jėgainės neveikia, tačiau šių projektų patirtis turėjo svarbios pažintinės praktinės reikšmės ir teigiamos įtakos biodujų pramonės kūrimui Lietuvoje.

Biodujų gamybos plėtojimo aspektai Lietuvoje. Nors praktiškai pirmosios idėjos apie biodujų jėgaines Lietuvoje pasireiškė apie 1980 m., tačiau daugiau kaip po 20 metų (2003 m.) šalyje veikė tik 6 biodujų jėgainės, perdirbančios miestų nuotekų dumblą, maisto pramonės atliekas ir gyvulių mėšlą, kai pvz., Vokietijoje per metus buvo pastatoma 500–800 tokių jėgainių. 2010 m. Vokietijos biodujų jėgainėse pagaminta per 16 mlrd. kWh elektros energijos.

Siekiant įgyti daugiau praktinės patirties, Lietuvoje statomose jėgainėse buvo nuspręsta apdoroti skirtingos rūšies substratus. Dviejose jėgainėse kartu su mėšlu buvo perdirbamos maisto pramonės įmonių atliekos. Visos jėgainės galėjo perdirbti apie 350 tūkst. t organinių atliekų per metus. Bendra biodujų jėgainių energetinė galia siekė apie 16 MW, iš jų generuojama šiluminė galia – 13 MW, o elektrinė galia – 0,5 MW. 2003 m. biodujų gamyba iš žemės ūkio ir maisto pramonės organinių atliekų ir miestų nuotekų dumblo išaugo 25 % ir pasiekė 3,9 mln. m³ biodujų [1]. Energetine verte šis kiekis atitinka 1,8 tūkst. t naftos ekvivalento. Katilinėse buvo sudeginta 1,5 mln. m³ biodujų, dar 0,5 mln. sunaudota žemės ūkyje ir 1,9 mln. – prekyboje ir paslaugose. Taigi, susidarė palankios sąlygos praktiškai įvertinti anaerobinių technologijų panaudojimo galimybes, jų plėtros perspektyvas bei įvairių organinių priedų įtaką santykiniam biodujų gamybos efektyvumui didinti. Tačiau tolesnė biodujų gamybos pramonės plėtra vyko labai netolygiai. Netrukus po paleidimo buvo uždaryta biodujų jėgainė „Lekėčių“ kiaulininkystės komplekse. Kaip rodo patirtis, stabiliausiai dirba biodujų jėgainės, įrengtos miestų nuotekų valymo įmonėse. Tai paaiškinama tuo, kad šiose įmonėse anaerobinis atliekų apdorojimas yra svarbi ir efektyvi nuotekų valymo technologinio proceso dalis.

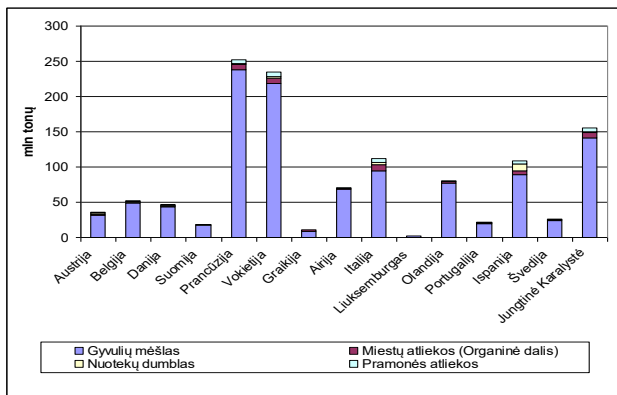
Viena sėkmingiausiai ir nuo 1999 m. stabiliai dirbanti biodujų jėgainė įrengta Utenoje, nuotekų valymo įmonėje UAB „Utenos vandenys“. Apie 2007 m. Panevėžio rajone AB „Aukštaitijos vandenys“ taip pat buvo įrengta biodujų jėgainė, skirta nuotekų dumblo anaerobiniam apdorojimui, gaminant biogas ir deginant jį 330 kW elektrinės galios kogeneraciniame įrenginyje.

Šiuo metu Lietuvoje veikia apie 17 įvairios galios biodujų jėgainių. Spartesnę biodujų jėgainių plėtrą pastaraisiais metais lėmė palankesnė šalies teisinė bazė bei finansinė parama iš ES fondų. Prie to gerokai prisidėjo specializuotų įmonių susikūrimas (pvz., UAB „Manfula“ ir kt.), jų betarpiškas bendradarbiavimas su didesnę patirtį turinčiomis Vakarų Europos šalimis ir pan. Tai lėmė sėkmingą biodujų jėgainių veiklą ir didžiausiose šalies nuotekų valymo įmonėse: Vilniuje instaliuota elektrinė galia – 1 200 kW, Klaipėdoje – 1 011 kW, Šiauliuose – 800 kW. Kauno nuotekų valymo įmonėje pastatyta biodujų jėgainė buvo viena pirmųjų, todėl jos instaliuota elektrinė galia siekia 670 kW. Iš viso Lietuvos vandenvals įmonėse pastatytų biodujų jėgainių elektrinė galia yra apie 5,3 MW. Energijos išteklių biržos „Balt-pool“ duomenimis 2012 m. Lietuvoje vien tik iš vandenvals įmonių biodujų jėgainių į elektros tinklus buvo parduota apie 4,68 GWh elektros energijos [2].

Sprendžiant biodujų gamybos ir vartojimo klausimus galima išvelgti du tarpusavyje susijusius atvejus. Vienu atveju biodujos gaminamos iš gamybos proceso metu įmonėse susidarantių organinių atliekų, siekiant jas nukenksminti; kitu atveju – biodujos gaminamos iš specialiai tuo tikslu auginamos žaliosios biomasės. Pirmuoju atveju prioritetas yra aplinkos apsaugos problemų sprendimas – nukenksminant organines atliekas biodujos yra šalutinis produktas. Kitu atveju prioritetinis tikslas yra energijos gamyba iš organinių medžiagų (nebūtinai atliekų). Šiuo atveju organinės atliekos pakeičiamos biodujų gamybai tinkama augalinės kilmės biomase. Pastaraisiais metais Vakarų Europoje ypač populiarius kukurūzų silosas. Literatūros šaltinių [3] teigimu, iš 1 t kukurūzų siloso galima išgauti iki 200 m³ biodujų, kurių energetinė vertė siekia ~5,5 kWh/m³, o iš 1 t kiaulių mėšlo išgaunama tik apie 25 m³ biodujų, kurių energetinė vertė yra nežymiai mažesnė. Tačiau mūsų šalyje, sekant ES 15-os šalių pavyzdžiu (1 pav.), rekomenduojama plačiau diegti organinių atliekų (konkrečiai – kiaulininkystės kompleksų skysto mėšlo) nukenksminimą, anaerobiškai jį apdorojant bioreaktoriuose. Siekiant sumažinti investicijų atsipirkimo laiką, patartina naudoti papildomus organinius priedus, didinančius biodujų išėigą, kas Lietuvoje mažai praktikuojama. Lietuvos gyvulininkystės ūkis, netolimoje praeityje turėjęs 33 pakankamai didelius kiaulininkystės kompleksus, ateityje siekdamas vėl plėsti kiaulininkystės apimtį, privalės prie kiekvieno komplekso įrengti mėšlo nukenksminimo įrengimus – anaerobinio apdorojimo bioreaktorių, kurie yra viena svarbiausių biodujų jėgainių dalis. Vadovaujantis biodujų gamybos iš žaliosios biomasės koncepcija, biodujų gamybą tektų priskirti energetikos sričiai, nes šiuo atveju į pirmą vietą pagal svarbumą iškeliamą biodujų, kaip energijos ištekliaus, gamybą, nors šios srities pirminė paskirtis buvo orientuota aplinkosaugos problemoms spręsti.

Gaminant biogas ne iš pramonės įmonių veiklos metu susidarantių organinių atliekų, o iš specialiai tuo tikslu auginamų augalinių kultūrų, neišvengiamai susiduriama su papildomais darbais ir išlaidomis. Šiuo atveju atsiranda papildomos išlaidos, susijusios su biomasės auginimu, transportavimu bei apdoroto (degazuoto) substrato sutvarkymu, o tai papildomai padidina gaminamos energijos savikainą.

Biodujų jėgainių svarbiausia paskirtis turi būti aplinkosauginių problemų sprendimas. Kaip matome iš 1 pav. pateiktų duomenų – pagrindinę žaliavą biodujoms gaminti sudaro gyvulių mėšlas, ir palyginti nežymūs kiekiai tenka kitoms organinėms atliekoms.



1 pav. Biodegraduojančios biomasės ištekliai ES-15 šalyse (Europos biomasės asociacija)

Be minėtų dviejų koncepcijų, Lietuvoje sėkmingai įgyvendinta beatliekinė biodegalų, biodujų ir ekologiškų trąšų gamybos technologija. 2009 m. pirmas tokio pobūdžio Europoje projektas realizuotas Pasvalyje, UAB „KURANA“. Tai geros praktikos pavyzdys, jungiantis kelias pramonės šakas:

- Grūdų supirkimas ir malimas;
- Dehidraduoto bioetanolio gamyba;
- Biodujų gamyba iš žlaugtų;
- Elektros ir šiluminės energijos gamyba, deginant biodujas;
- Trąšų gamyba.

Šios įmonės produktas – dehidraduotas etanolis, skirtas biodegalams (bioetanolui) gaminti. Biodujos – kogeneraciniame įrenginyje sunaudojamai elektros energijai ir šilumai gaminti, kuri vartojama saviems poreikiams ir tiekiamą į atitinkamus miesto tinklus. O degazuotas substratas (žlaugtai) panaudojamas ekologiškoms trąšoms gaminti. 2012 m. analogiškas projektas realizuotas Obelių spirito varykloje. Šioje įmonėje taip pat iš grūdinių kultūrų gaminamas bioetanolis ir biodujos.

Biodegalų gamybos ir vartojimo ypatumai. Biodegalų (bioetanolio ir biodyzelinio) gamybos pramonės kūrimas Lietuvoje nuo 1993 m. praėjo ne mažiau sudėtingą raidos kelią nei biodujos. Pirmieji pramoniniai bandymai buvo atlikti UAB „Biostartas“, kuris rapsų metilo esterį (RME), skirtą biodyzelinui gaminti, importavo iš Čekijos. Kuriantis ir stiprėjant teisinei bazei, šalyje radosi vietinių įmonių, kurios ėmėsi biodegalų gamybos. RME pradėta gaminti UAB „Rapsoila“, o dehidraduotą bioetanolį – Šilutėje įsikūrusioje gamykloje „Biofuture“. Metinė bioetanolio gamyba transportui Europoje 2012 m. pabaigoje sudarė 6,5 % suminės automobilių degalų metinės produkcijos. Etanolio gamybos apimtys pasaulyje stabiliai didėjo. 2007 m. Lietuvos Nacionalinėje energetikos strategijoje numatyta, kad 2020 m. biodegalai

turės sudaryti 15 %, o 2025 m. – 20 % viso transporte sunaudojimo degalų kiekio. Todėl siekiant įvykdyti Europos Parlamento ir Tarybos direktyvų rekomendacijas, biodegalų gamybos pajėgumai Lietuvoje 2008–2010 m. sparčiai didėjo. Biodyzelino gamintojų metiniai pajėgumai sudarė 151 tūkst. tonų, bioetanolio 2007–2010 m. planuojami pajėgumai – 376 tūkst. tonų [4]. Tačiau jau 2012 m. Europos Komisija dėl kai kurių ekonominių priežasčių buvo priversta keisti ankstesnių Direktyvų nurodytus tikslus. Planuojama apsiriboti 6 % biodegalų priedais į mineralinius degalus. Lietuvos biodegalų gamintojams, investavusiems į biodegalų gamyklų statybas, dėl sumažėjusio biodegalų poreikio ir rinkų trūkumo, gresia dideli finansiniai sunkumai.

Išvados biodujų ir biodegalų gamybos klausimais. Atsižvelgiant į biodujų gamybos ir vartojimo ypatumus mūsų šalyje [5], siekiant sėkmingiau plėtoti biodujų gamybos pramonę, rekomenduojama biodujų energetiką suskirstyti į pogrupius:

- biodujų gamyba iš organinių atliekų;
- biodujų išgavimas iš sąvartynų;
- biodujų gamyba iš specialiai tam auginamos žaliosios biomasės (kukurūzų silosas ir kt. žolės);
- biodujų gamyba taikant beatliekines technologijas .

Atsižvelgiant į tokių biodujų gamybos suskirstymą, atsiranda galimybė lanksčiau taikyti jų gamybos skatinimo priemones.

Keičiantis ES Tarybos nuostatomis 1-os kartos biodegalų gamybos apimčių mažinimo kryptimi, šalyje nebuvo tinkamai sureaguota, todėl pirmos kartos biodegalų gamybos pajėgumai šalyje gerokai didesni už vartojimui reikalingus kiekius, o gamintojai patiria didelių finansinių nuostolių. Todėl, būtina vyriausybinio lygiu skubiai koordinuoti 2-os ir 3-ios kartos biodegalų gamybos programų kūrimo, bei mokslo-tiriamųjų darbų technologijų tobulinimo finansavimo teisinius klausimus.

Literatūra

1. Kuro ir energijos balansas 2003 m. – Statistikos departamentas prie Lietuvos Respublikos vyriausybės. Vilnius, 2004. 50 p.
2. Biodujų jėgainių ateitis Lietuvos energetikoje – <http://www.structum.lt/bioduj370-j278gaini370-ateitis-lietuvos-energetikoje.html>
3. Algirdas Aleksynas, (ŽŪR). Biodujos iš kukurūzų siloso. Mano ūkis 2005/10 http://eko.laei.lt/index.php?option=com_content&task=view&id=698&Itemid=38.
4. Palijanskas, M. Biodyzelino gamintojai (pajėgumai) - http://www.lsta.lt/files/events/4_palijanskas.
5. Katinas, V.; Savickas, J. Biodegalų gamybos ir vartojimo plėtros Lietuvoje įvertinimas. *Energetika*. 2012. T. 58. Nr. 2.P. 77–85.

Analysis of biofuels and biogas production in 1998–2013 in Lithuania and predictions for the future

Summary

This article provides an overview of the biogas industry development in Lithuania from 1998 to 2013. The increasing role of biogas production, integrated in the other technology, together with other type of production of renewable energy resources are shortly analyzed in this paper. A short summary of biogas and biofuels, such as bioethanol and biodiesel, development experience analysis is presented. Despite the EU Directives and other legal acts and the national normative documents for renewable energy development in Lithuania, practical implementation of legal regulation is uneven. In Lithuania practical implementation actions of biogas production changes were taken without the necessary responsibility and attention. More attention for the production and use of second generation biofuels is required according to the changed specifications of EU Directives which lead to the decrease of biofuel production.

Tvarios energetikos strategijos – Lietuvos regionų plėtros prielaida

Antanas Markevičius, Vygandas Gaigalis, Juozas Savickas
Lietuvos energetikos institutas

Ivadas. Nors Europos Sąjunga yra viena turtingiausių pasaulio šalių grupių, tačiau egzistuoja dideli vidiniai skirtumai tarp regionų pajamų, galimybių ir išsivystymo. ES regioninės politikos, dar vadinamos sanglaudos politika, tikslas yra pagerinti ekonominę regionų gerovę, taip panaikinant regioninius skirtumus. Daugiau nei trečdalis ES biudžeto skiriama šiai politikai įgyvendinti, lėšos iš turtingesnių yra pervedamos skurdesniems regionams.

Argumentas už tokią regioninę politiką yra tai, kad ji yra finansinio solidarumo priemonė ir galinga ekonomikos integravimo jėga, skatinanti restruktūrizuoti atsiliekantįs pramonės šakas ir atgaivinti kaimo vietoves, kuriose mažėja žemės ūkio gamyba. Tuo pačiu ES regioninė politika yra orientuota į regionų gamybos konkurencingumą, ekonomikos augimo skatinimą ir naujų darbo vietų kūrimą. Be to, ši politika susieta su platesniais ateities iššūkiais, tokiais kaip klimato kaita, energijos tiekimo saugumas ir globalizacija.

Naujoje ES strategijoje „Europa 2020“ [1] pabrėžiama energijos vartojimo efektyvumo svarba bei vadinamieji 20/20/20 tikslai, t. y. iki 2020 m. sumažinti šiluminio efektą sukeliančių dujų emisijas (20 %), padidinti atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) vartojimą (20 %) ir sutaupyti iki 20 % energijos. Pagal atnaujintos Nacionalinės energetikos strategijos nuostatas Lietuvai keliamas įpareigojimas – pasiekti, kad 2020 m. AEI dalis galutiniam vartojimui sudarytų ne mažiau 23 %. Maksimaliai išnaudojant AEI potencialą, bendras jų kiekis galėtų padidėti 2,4 karto – nuo 812 tūkst. tne 2007 m. iki 1949 tūkst. tne 2020 m. Reikšmingai (apie 3,5 karto) turėtų padidėti AEI, naudojamų elektrai ir šilumai gaminti. Šilumos kiekis padidės nuo 1,57 TWh (16,2 %) iki 5,16 TWh (70 %).

Labai svarbūs šiame kontekste klausimai yra energetikos decentralizavimas ir klimato kaitos švelninimo politika [2].

Subalansuotos energijos plėtra įgyvendinama politinėmis priemonėmis, kurių imasi centrinė ir vietos valdžia bei jos agentūros. Kiekviena vyriausybė gerai žino valstybės poreikius ir galimybes, tačiau valstybės viduje geriausiai padėti supranta savivaldybių lygio politikai, kurie įtraukdami plėtros diskusijai daugiau vietos gyventojų, palengvina numatytų įgyvendinti priemonių priimtinumą visuomenėje. Politikos įgyvendinimas vietos lygiu suteikia piliečiams daugiau galimybių dalyvauti politiniame gyvenime bei viešajame sprendimų priėmimo procese.

Dėl šių priežasčių, ES principinis reikalavimas kuriant ir įgyvendinant regionų darnios plėtros strategijas yra savivaldybių dalyvavimas ruošimo procese ir pačių savivaldybių sprendimas, kurias energetikos sritis reikia plėtoti jų regione.

Savivaldybėms priskiriama keletas funkcijų, susijusių su darnios energetikos raidos klausimais – tai būsto šildymas ir vandens tiekimas, nuotekų surinkimas ir apdorojimas, komunalinių atliekų tvarkymas, savivaldybės pastatų išlaikymas, vietinės reikšmės kelių ir gatvių tvarkymas ir t. t. Kadangi savivaldybės yra svarbios šilumos ūkio sektoriaus veikloje, jos turi įgaliojimus nustatyti AEI naudojimo apimtį ir didinti energijos vartojimo efektyvumą šiame sektoriuje. Savivaldybės turi įgaliojimus rengti ilgalaikius strateginius plėtros planus bei išsamius ilgalaikius ir trumpalaikius strateginius veiksmo planus.

Be to, savivaldybės gali koreguoti vietinius planus, įtraukdamos naujus darnios energetikos projektus, susijusius su viešųjų pastatų atnaujinimu, plėtojant atliekų surinkimo ir valdymo sistemas, naudojant buitines bei nuotekų valymo atliekas energijai gaminti ir atnaujinant šildymo sistemas. Savivaldybės taip pat turi daug įtakos gerinant kelių infrastruktūrą savo teritorijoje; taip mažinamos šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos. Efektyvus gatvių apšvietimo įgyvendinimas taip pat yra svarbus šaltinis energijai taupyti ir šiltnamio reiškinių sukeliančių dujų emisijoms mažinti vietos lygiu. Taigi, sėkmingas ES naujosios strategijos įgyvendinimas daugiausia priklauso nuo savivaldybių iniciatyvos bei aktyvumo planuojant ateities veiksmus ir priemones regionų darnios plėtros kryptimi.

Savivaldybių darnios plėtros energetikos strategijų ruošimo etapai ir rekomendacijos

Energetikos strategija yra svarbus dokumentas, kurio patikimumas priklauso nuo parengiamojo darbo ir pradinių duomenų kokybės, todėl prieš pradėdant darbą, iškyla šie klausimai, į kuriuos reikia turėti atsakymus:

1. Kodėl būtina sukurti strategiją?
2. Koku tikslu tai daroma?
3. Ar pakanka kompetencijos strategijai kurti?
4. Ar yra kompetetinga komanda?
5. Ar yra pakankamai žinių, norint kontroliuoti strategijos parengimo kokybę?
6. Kur ieškoti reikalingų duomenų?
7. Ar pavyks gauti reikiamų duomenų, kokios rūšies duomenys yra laisvai prieinami?
8. Kurių regiono suinteresuotų šalių nuomonės reikėtų pasiklausti?
9. Kas gali suteikti pagalbą?
10. Ar yra numatytos lėšos strategijai kurti?

Iš pradžių reikia suplanuoti veiksmus bei surinkti duomenis. Pirmiausia reikia peržiūrėti regiono administracijos turimus dokumentus, t. y.:

- plėtros planus, sprendimus, susijusius su energetikos sektoriumi ir anksčiau sukurtas plėtros strategijas, ypač energetikos sektoriaus;
- teisinius dokumentus;
- statistinę informaciją;

- žemėlapius;
- ekonomines analizes;
- informaciją apie žemės naudojimą;
- kitus atitinkamus dokumentus (centralizuoto šildymo sistemų parametrai, galimi AEI ir efektyvaus energijos naudojimo potencialai).

Analizuojant AEI panaudojimo galimybes ir tikslingumą *vadovaujiamasi energetikos sistemos darnios plėtros samprata ir reikalavimais*.

Konceptualiai darnios plėtros sritis skaidoma į tris dedamąsias:

- a) aplinkos darnumą;
- b) ekonominį darnumą;
- c) sociopolitinį darnumą.

Siekiant parengti AEI panaudojimo plėtros programą, reikia aprėpti ir analizuoti visą energijos srautų grandinę, pradedant nuo išteklių ir baigiant atskirų energijos rūšių, gautų iš šių išteklių, panaudojimu visuomenės poreikiams tenkinti, nepaliekant nuošalyje kitų, neatsinaujinančių energijos išteklių naudojimo ir poveikio aplinkai vertinimo, atsižvelgiant į šalies įsipareigojimus ES bei strateginius tikslus, ir siekiant vartotojams patiekti energiją galimai mažiausiomis kainomis.

Todėl reikia nagrinėti kiek galima platesnį išteklių panaudojimo spektrą, nediskriminuojant nei vienos jų rūšies visais galimo panaudojimo ciklo etapais.

Biomasės – pagrindinio atsinaujinančio energijos ištekliaus techninį potencialą atskiroje savivaldybėje apsprendžia savivaldybės disponuojama žemė, kurioje auginamos grūdinės kultūros (javų šiaudai naudojami kaip atliekų produktas), energetiniai augalai (greitai augantys krūmai, rapsai, kukurūzai ir pan.), miškai (malkos, miško kirtimo atliekos) ir tos žemės derlingumas, augalų rotacijos laikas. Dirvonuojanti žemė taip pat gali tiekti biomasę (žolę). Pastebima, kad tarp šių AEI rūšių potencialų yra tarpusavio ryšis: plečiant vienų kultūrų plotus, neišvengiamai mažėja kitoms kultūroms auginti skirti plotai, taip pat ir atitinkamų AEI potencialas.

Ekonominį AEI panaudojimo potencialą apsprendžia AEI auginimo, surinkimo, transportavimo ir kitos technologijos, ypač jų kaštai. Greta AEI auginimo, išgavimo, surinkimo, transportavimo technologijų, reikia ir tokių technologijų, kurios pakeičia AEI formą ir taip užtikrina platesnio, švaresnio ir ekonomiškesnio panaudojimo galimybę.

Kitų AEI susidarymo šaltiniai gali būti atskiroje savivaldybėje esantys gyvulininkystės objektai, nuotekų valymo įrenginiai, pramonės įmonės, išskiriančios organinės kilmės atliekas, komunalinės atliekos. Taip pat kiekvienoje savivaldybėje egzistuoja tokie AEI, kaip saulė, vėjas, hidroenergiya, geoterminė energija ir pan.

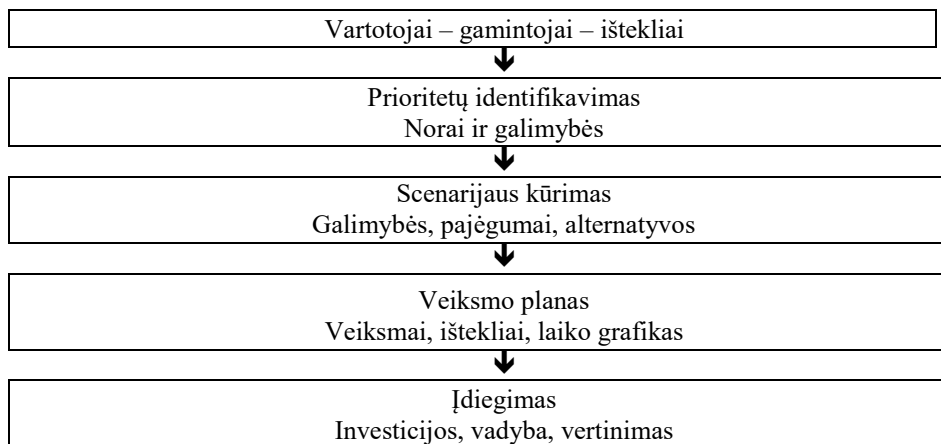
Strategijos ruošimo etapai schematiškai pavaizduoti diagramoje 1 pav.

Gautų duomenų apdorojimas. Surinkus visus tolesniam planavimui reikalingus duomenis, analizuojami rezultatai, įvertinamas išteklių potencialas, parengiamas laiko grafikas ir įvertinamos tendencijos atsakyti į šiuos klausimus:

1. Ar analizės rezultatas atitinka lūkesčius?

2. Ar ateities tikslai yra realūs?
3. Ar atliktas darbas buvo naudingas, ar tai buvo tik pinigų švaistymas?
4. Ar turima pakankamai žmonių/išteklų/žemės/miško/vartotojų ir t. t., kad būtų pasiekti keliami tikslai?
5. Ar tikslai dera su nacionaliniais regioninės plėtros prioritetais?
6. Ar turima pakankamai lėšų numatomiems tikslams pasiekti? Jei ne, tai iš kur bus gaunamos lėšos?
7. Ar strategijos planai dėl regiono ateities sutampa su regiono poreikiais?

Esamos energetinės situacijos analizė



1 pav. Darnios plėtros energetikos strategijos ruošimo etapų diagrama

Regioninės energetikos strategijos planavimas ir prognozė. Prieš pradėdant kurti savo regiono energetikos strategiją, reikia dar kartą kritiškai įvertinti surinktų duomenų rezultatus. Gali būti, kad kai kurios svarbios informacijos dar trūksta arba ji buvo praleista, ar buvo nepaisoma kai kurių bendruomenės narių nuomonės. Ištaisius trūkumus darbas gali būti tęsiamas.

Reikia nuspręsti, kiek užtruks planavimo ir prognozavimo darbai. Svarbu, kad sprendimus palaikytų bendruomenė.

Išvados. Atsakomybė už strategijos įgyvendinimo procesą turi būti pavesta vi- su etatu dirbančiam darbuotojui (ne politikui), pati strategija turėtų būti atnaujinama ir kasmet peržiūrima. Turėtų būti sekami atitinkami strategijos įgyvendinimo rodik- liai (1 lentelė). Jei reikia, veiksmų planas turi būti koreguojamas. Tuo tikslu turėtų būti įtraukti specialistai ir vietos suinteresuotieji subjektai. Atliekant didelio masto investicijas, turi būti svarstomos skirtingos galimybės ir pasiūlymai. Kadangi strate- gija yra susijusi su aplinkos kūrimu ir socialine bendruomenės padėtimi regione,

sprendimus turi priimti tik profesionalai, naudodamiesi naujausia informacija. Įgyvendinant projektus patartina naudotis šiomis rekomendacijomis:

1. Jeigu nėra galimybės investuoti visos sumos iš karto, taikomas „žingsnis po žingsnio“ metodas. Tačiau viskas, kas daroma, turėtų teikti apčiuopiamą naudą.

2. Nepertraukiamai turėtų būti analizuojami paramos schemų pasikeitimai, nes tai gali pasiteisinti gaunant paramą investicijoms.

1 lentelė. Strategijos įgyvendinimo rodikliai

Tipiniai energijos naudojimo efektyvumo rodikliai	Tipiniai AEI rodikliai	Makroindikatoriai (regiono lygiu)
• MWh taupymas/metus; • € taupymas/metus; • t CO₂ sumažinimas per metus; • Efektyvumas (pvz., energijos suvartojimas kWh/m² namų ūkiuose ir t. t.); • Sąnaudų efektyvumas (€ investavimas/kWh taupymas, € investavimas/sumažinimas t CO₂)	• kWh elektros ir šilumos energijos pagaminta per metus; • Įdiegta m² saulės kolektorių; • kW_{el} arba kW_{šil} instaliuotų pajėgumų – vėjas, biomasės katilai; • t CO₂ sumažinta per metus; • Sąnaudų efektyvumas (sumažintas € investavimas /sumažinimas t CO₂)	• Energijos poreikis kWh/BVP (jei įmanoma); • Energijos poreikis kWh/gyventojui; • Pirminės energijos sąnaudos/BVP; • Elektros energijos suvartojimas kWh/gyventojui; • Elektros energijos suvartojimas kWh/BVP; • % energijos dalis pirminės energijos balanse iš AEI regione; • % AEI bendrame elektros suvartojimo balanse regione; • CO₂ emisijų sumažėjimas t vienam gyventojui

Literatūra

1. European Commission, 2010. Communication from the commission: Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. 3.3.2010. *Component Object Model 2010*, 2020.
2. Sperling, K., Hvelplund, F., Vad Mathiesen, B. Centralisation and decentralisation in strategic municipal energy planning in Denmark. *Energy Policy* 39, 2011, P. 1338–1351.

Sustainable energy strategies as a chance for regions' development

Summary

EU regional policy has a role to play in wider challenges for the future, including climate change, energy supply and globalization. Policy implementation at the municipality level allows for greater flexibility to meet local needs in sustainable manner. The whole process of strategy development can be divided into five stages starting with information collection and mapping of the status quo and resulting in a detailed action plan for the implementation of the identified measures.

Vėjo jėgainių generuojamo triukšmo sklaidos tyrimai

Vladislovas Katinas, Mantas Marčiukaitis, Marijona Tamašauskienė
Lietuvos energetikos institutas

Įvadas. Šiuo metu vėjo energetika yra viena sparčiausiai pasaulyje plėtojamų elektros energijos gamybos sričių. 2012 m. pasaulyje bendra įrengtų vėjo jėgainių (VJ) galia buvo lygi 282 275 MW, iš kurių apie 106 040 MW buvo įrengtos ES šalyse [1]. Lietuvoje 2012 m. pabaigoje suminė įrengtų VJ galia sudarė apie 225 MW, o 2013 m. pabaigoje jau pasiekė 274 MW, ir VJ gamino 5,6 % visos šalyje suvartojamos elektros energijos.

Vėjo energetikos plėtra neišvengiamai susijusi su tam tikru neigiamu poveikiu aplinkai, nes veikdamos VJ generuoja akustinį triukšmą. Pasaulio sveikatos organizacija (PSO) rekomenduoja, kad vertinant VJ poveikį aplinkai būtų įvertintas triukšmo dedamųjų poveikis prie žemų ir aukštų dažnių. Žemo dažnio garsai ir infragarsas rezonuoja atskiras žmogaus kūno dalis ir blogina savijautą. Žinoma, kad jau 32 dB(A) triukšmas kai kuriems žmonėms yra stiprus nervinės sistemos dirgiklis, o 40 dB(A) ir didesnis triukšmas jau daugeliui žmonių sukelia stiprų diskomfortą [2, 3]. Dėl veikiančių VJ generuojamo triukšmo įvedami apribojimai jų statyboms arti gyvenamųjų pastatų ar visuomeninių objektų. Literatūros šaltinių analizė rodo, kad tiek mažųjų, tiek didžiųjų VJ generuojamas triukšmas ir jo sklaida yra aktuali mokslinių tyrimų sritis [4, 5].

Vėjo jėgainių akustinio triukšmo tyrimo duomenys rodo, kad jų generuojamą triukšmą galima suskirstyti į du pagrindinius šaltinius: mechaninį ir aerodinaminį triukšmą. Mechaninį triukšmą sukelia judančios dalys kabinos viduje – greičių dėžė, kabinos pasukimo mechanizmas ir kt. Aerodinaminis triukšmas kyla dėl oro srauto pokyčių, įvykstančių aptekant vėjaračio mentes. Tai užmentės kylančios oro srauto turbulencinės pulsacijos, taip pat ant mentės paviršiaus vykstantys oro srauto pasienio sluoksnio tekėjimo pokyčiai ir t. t. [3 – 5]. Be to, susidaro aerodinaminės pulsacijos dėl besisukančių menčių sąveikos su VJ bokšto konstrukciniais elementais. Be aerodinaminio ir mechaninio triukšmo, visada egzistuoja ir aplinkos foninis triukšmas, kurį sukelia vėjo srautai, transporto priemonės, paukščiai, pramonės objektai ir pan. [5, 6]. Foninis aplinkos triukšmas suintensyvėja dieną, o naktį jis sumažėja, tiek dėl mažesnio vėjo greičio, tiek dėl šalutinio poveikio (keliamo transporto, gamyklų, gyvūnijos ir t. t.).

Siekiant išvengti triukšmo žalingo poveikio aplinkai, būtina tiksliai suvokti jo fizikinę kilmę, išnagrinėti sklaidos dėsningumus ir pritaikyti triukšmo mažinimo priemones.

Straipsnyje pateikiami VJ triukšmo emisijos sklaidos natūraliomis sąlygomis tyrimai ir matematinis modeliavimas, siekiant išsiaiškinti triukšmo sklaidos procesus aplinkoje ir nustatyti priemones, leidžiančias sumažinti VJ žalingą poveikį aplinkai.

Tyrimo metodika. VJ akustinis triukšmas apibūdinamas garso slėgio pulsacijų intensyvumo lygiu ir dažniu. Garso slėgio pulsacijų intensyvumo lygis vertinamas decibelais ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L_I = 10 \lg(I/I_0), \quad (1)$$

čia: I – matuojamas garso intensyvumas, W/m^2 ; I_0 – girdimo garso ribinis intensyvumas, ($I_0 = 10^{-12} W/m^2$).

Teoriškai vertinant objekto skleidžiamo triukšmo dydį decibelais, atsižvelgiant į atstumą iki jėgainės bokšto, galime apskaičiuoti pagal formulę [6, 7]:

$$L_{pj} = L_w - 10 \log(2\pi R^2) - \alpha R + L_g, \quad (2)$$

čia: L_{pj} – VJ generuojamo triukšmo lygis decibelais, dB(A); L_w – VJ skleidžiamo ašies lygyje triukšmo intensyvumas; R – atstumas nuo VJ vėjaračio ašies iki matavimo prietaiso; α – atmosferos absorbcijos koeficientas; L_g – triukšmo lygio korekcija dėl garso slėgio pulsacijų atspindžio nuo žemės paviršiaus.

Atmosferos absorbcijos koeficiento α reikšmė priklauso nuo aplinkos temperatūros ir akustinio triukšmo dažnio. Didėjant aplinkos temperatūrai ar triukšmo dažniui, atmosferos akustinio triukšmo slopinimas didėja [5 – 7]. Garso bangos sklidimo greitis priklauso nuo terpės, kuria ji sklinda, savybių ir tuo didesnis, kuo didesnis terpės tankis.

Teoriškai apskaičiuotas triukšmo lygis, atsižvelgiant į atstumą iki VJ, prie skirtingų atmosferos absorbcijos koeficientų reikšmių rodo, kad atmosferos absorbcijos koeficiento α įtaka VJ generuojamo triukšmo lygiui intensyviau pasireiškia, esant didesniai atstumui iki jėgainės. Žemės paviršiaus korekcija L_g jėgainėms, įrengtoms sausumoje, priimama 1,5 dB(A), o jūroje – 3 dB(A) [7]. Tačiau būtina įvertinti ir tai, kad bet kurioje tradicinėje aplinkoje egzistuoja ir aplinkos foninis triukšmas, kurio poveikį, nustatant VJ triukšmą, būtina įvertinti.

Suminis VJ generuojamo (L_{pj}) ir foninio (L_{pA}) triukšmo intensyvumo lygis apskaičiuojamas pagal formulę [3, 6]:

$$L_p = 10 \lg [10^{(0,1 L_{pA})} + 10^{(0,1 L_{pj})}], \quad (3)$$

čia: L_{pA} – foninis aplinkos triukšmas, dB(A); L_{pj} – VJ generuojamas triukšmas, dB(A).

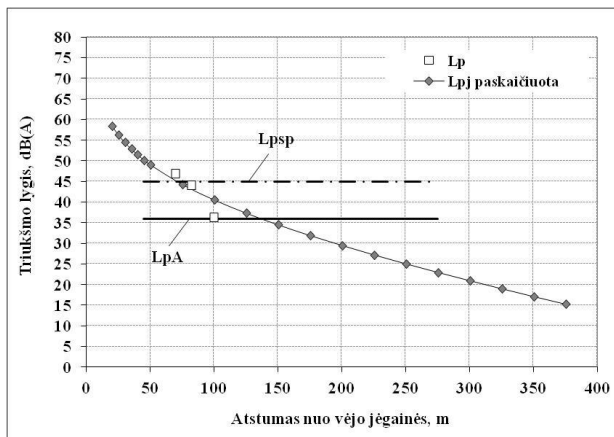
Eksperimentiniai tyrimai atlikti matuojant UAB „Intuva“ Prozariškių VE-1 250 kW galios VJ triukšmą. Enercon E-40 tipo VJ įrengta Kaišiadorių rajone, toliau nuo apgyvendintų teritorijų. Jos bokšto aukštis yra 65 m, o aplinkui išsidėsčiusi žemės ūkio paskirties žemė. Netoli VJ nėra nei didelių medžių, nei krūmų. Tyrimai atlikti esant skirtingiems vėjo greičiams. Triukšmui matuoti panaudotas nešiojamas triukšmo analizatorius 2250 Bruel ir Kjaer. Akustinio triukšmo matavimai atlikti vėjo pūtimo kryptimi, prieš vėjo kryptį ir statmenai vėjo kryptiai, esant skirtingiems

atstumams iki VJ bokšto. Kiekvieno matavimo trukmė tęsėsi apie 5 min. Duomenys, sukaupti analizatoriaus atmintyje, specialia programa buvo perkelti į kompiuterį.

Triukšmo analizatoriumi buvo nustatomi tokie spektro parametrai kartu su spektrine statistika: L_{Xeq} , L_{XFmax} , L_{XSmax} , L_{XFmin} , L_{XSmin} . Čia X yra dažnio svoriniai įverčiai A, B, C ir Z. Spektrinė statistika peržiūrėta kaip L_{XYN} procentinis spektras, kur Y laiko apkrova F ar S, o N vienas iš procentinių parametų.

Tyrimo rezultatai ir jų analizė. Skaičiavimai, atlikti pagal (3) formulę, rodo, kad aplinkos foninio triukšmo L_{pA} įtaką suminiam VJ ir aplinkos generuojamam triukšmui L_p tikslinga įvertinti tik tada, kai šių triukšmų lygiai yra artimi vienas kitam. Kai šių triukšmų lygiai apytiksliai lygūs, tada suminis triukšmas padidėja 3 dB(A), o kai šių triukšmų skirtumas 10 dB(A), tai suminis triukšmo lygis padidėja tik 0,4 dB(A). Tada suminis triukšmo lygis yra beveik lygus triukšmo lygiui, apskaičiuotam pagal (2) formulę.

Pateikti tyrimo duomenys (1 pav.) rodo, kad VJ generuojamo triukšmo intensyvumo lygiui nemažai įtakos turi aplinkos ir meteorologinės sąlygos.

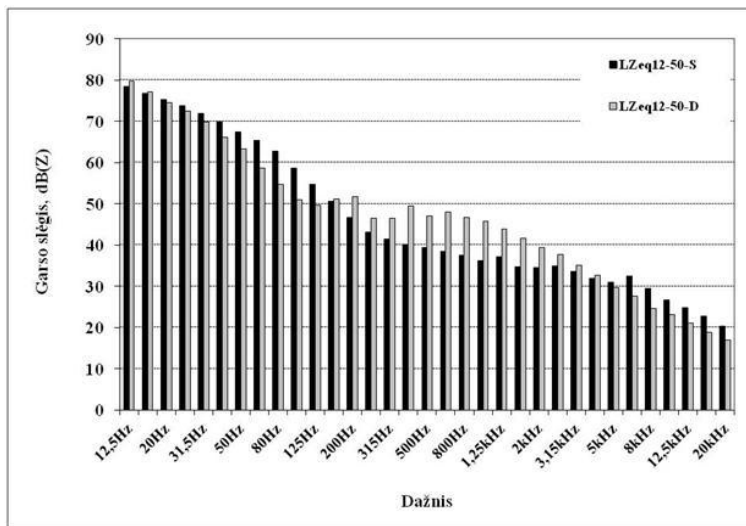


1 pav. Akustinio triukšmo L_p statistinių rodiklių kitimas esant vėjo greičiui ~ 6 m/s VJ ašies aukštyje. L_p – eksperimentiniai duomenys; L_{pj} – teorinio skaičiavimo pagal (2) lygtį duomenys; L_{psp} – higienos normų leistinas maksimalus lygis (45 dB(A)) [8]; L_{pA} – aplinkos foninio triukšmo lygis (36 dB(A)). VJ ašies lygyje generuojamo triukšmo lygis $L_w \approx 96$ dB(A)

VJ generuojamo triukšmo lygis ašies aukštyje esant vėjo greičiui 6 m/s, palyginus su VJ triukšmo lygiu, esant vėjo greičiui 12 m/s, padidėjo nuo 96 dB(A) iki 107 dB(A), o aplinkos foninis triukšmas – iki 53 dB(A). Eksperimentiniai ir teorinio skaičiavimo duomenys (1 pav.) rodo, kad esant 135 m atstumui iki VJ ir 6 m/s vėjo srauto greičiui, aplinkos foninis triukšmo lygis susilygina su VJ generuojamu triukšmo lygiu. Padidėjus vėjo greičiui iki 12 m/s, jau nedideliu atstumu iki VJ

bokšto šių triukšmų intensyvumai tampa lygūs. Matome, kad esant dideliame vėjo greičiui ($v = 12$ m/s) ir nedideliui atstumui iki VJ bokšto, VJ generuojamas triukšmas turi mažai įtakos suminiui triukšmo lygiui, kadangi vyrauja aplinkos foninis triukšmas. Mažėjant vėjo greičiui, mažėja VJ ir aplinkos foninio triukšmo lygiai. Veikiant VJ suminis ekvivalentinis triukšmo lygis 50 m atstumu iki VJ bokšto lygus 55,9 dB(A), o sustabdžius VJ, jis sumažėjo iki 50,3 dB(A). Esant dideliems vėjo srautų greičiams ($v = 12$ m/s), VJ generuojamas triukšmas turi mažai įtakos suminiam ekvivalentiniam triukšmo lygiui.

Taikant greitosios Furje transformacijos algoritmą nustatyta, kad VJ generuojamas triukšmas yra plačiajuostis (2 pav.). VJ akustinis triukšmas generuojamas dažnių diapazone nuo 200 Hz iki 3150 Hz. Tai dažnių diapazonas, kuriame į triukšmą jautriausiai reaguoja žmogaus klausos organai.



2 pav. Akustinio triukšmo spektro dedamųjų kitimas, esant vėjo srauto greičiui 12 m/s ir atstumui iki VJ bokšto $x = 50$ m, kai VJ neveikia (LZeql2-50-S) ir VJ veikiant (LZeql2-50-D).

Didėjant atstumui iki VJ bokšto, akustinio triukšmo lygis mažėja. Veikiant VJ, suminis ekvivalentinis triukšmo lygis 50 m atstumu iki VJ bokšto buvo lygus 55,9 dB(A), o sustabdžius VJ, jis sumažėjo iki 50,3 dB(A). Esant dideliems vėjo srautų greičiams ($v = 12$ m/s), VJ generuojamas triukšmas turi mažai įtakos suminiam ekvivalentiniam triukšmo lygiui, apskaičiuotam pagal (2) lygybę.

Žmogaus klausos riba, esant žemiems dažniams, yra apie 16 Hz. Garsai, kurių dažnis yra žemiau šios ribos, vadinami infragarsu, o garsai, kurių dažnis 20–200 Hz, vadinami žemo dažnio garsais [9]. Žemo dažnio girdimumą apsprendžia garso inten-

syvumas. Pakankamai stiprų garsą žmogus girdi ir esant mažesniems nei 16 Hz dažniams [5]. Infragarso poveikis pasireiškia tik tada, kai jo intensyvumas yra didesnis nei 95 – 100 dB. Oro srovės sukuria stochastinį plačiajuostį garso slėgio pulsacijų spektrą. Dėl besisukančių menčių sąveikos su bokšto konstrukcija atsiranda infragarsas. Ypač tas pastebima triukšmo spektre vėjo pūtimo kryptimi. Žemo dažnio intensyvumas prieš vėjo pūtimo kryptį yra 10 – 30 dB mažesnis nei pavėjui. Pateikti tyrimo duomenys [5] rodo, kad VJ akustinis triukšmas didėja dėl akustinio atspindžio nuo žemės paviršiaus ir aplinkinių statinių, o jo absorbcijai įtakos turi oro tankio, drėgmės, taip pat aplinkinių kraštovaizdžio elementų aerodinaminio aptekėjimo poveikis [10].

Išvados

1. Taikant greitosios Furje transformacijos algoritmą nustatyta, kad VJ generuojamas triukšmas yra plačiajuostis, o atstumui iki VJ didėjant, garso pulsacijų slėgio intensyvumas visose dažnių kitimo ribose tolygiai mažėja. Nedidelis triukšmo spektro intensyvumo pasikeitimas nustatytas tik dažnių kitimo nuo 200 iki 1000 Hz diapazone.
2. Surasta, kad VJ generuojamo triukšmo spektre, palyginus su aplinkos foninio triukšmo spektru, didžiausi pokyčiai įvyksta dažnių diapazone 200–3150 Hz, turinčiam daugiausiai įtakos žmogaus klausos organams. Infragarso, žemo dažnio (20–200 Hz) ir ultra garso dažnių diapazonuose pastebimi tik neesminiai pokyčiai.
3. Pateiktas teorinis modelis gana gerai atitinka išmatuotas triukšmo reikšmes, todėl gali būti taikomas VJ generuojamo triukšmo sklaidai modeliuoti.

Literatūra

1. World Wind Energy Report 2012. World Wind Energy Association WWEA. Bonn 2013, 30 P.
2. Taylor J., Eastwick C., Lawrence C., Wilson R. Noise levels and noise perception from small and micro wind turbines. *Renewable Energy*. 2013, 55, P. 120–127.
3. Van den Berg G. P. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 277, P. 955–970.
4. Moller H., Pedersen C. S. Low-frequency noise from large wind turbines. *Journal Acoustical Society of America*. 2011, 129(6), P. 3727–3744.
5. Rogers T., Omer S. The effect of turbulence on noise emissions from a micro-scale horizontal axis wind turbine. *Renewable Energy*. 2012, 41, P. 180–184.
6. Intern. Standard IEC 61400-11. Wind turbine systems. Part 11: Acoustic noise measurement techniques.
7. Calculation methods in the Danish Statutory Order on wind turbine noise. Inter.prieiga: <http://www.es.aau.dk/?id=1132>

8. Lietuvos higienos norma HN 33:2011. 2011. Triukšmo ribiniai dydžiai gyvenamuosiuose ir visuomeninės paskirties pastatuose bei jų aplinkoje.
9. Lietuvos higienos norma HN 30:2009. Infragarsas ir žemo dažnio garsai: Ribiniai dydžiai gyvenamuose ir visuomeninės paskirties pastatuose.
10. Miljøministeriet (Ministry of the Environment) nr. 1284, 15. December 2011. Bekendtgørelse om støj fra vindmøller (Statutory Order on noise from wind turbines).

Investigation of the wind turbines noise distribution

Summary

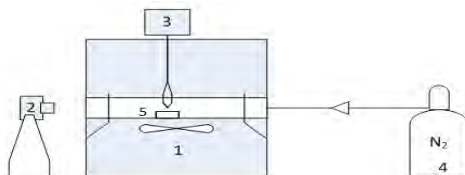
The variation of the regularities of the statistical parameters of wind turbine noise emission is analyzed in the article. The wind turbine noise emission is of broadband range and its level increases as wind velocity increases. The level of the noise decreases with the distance from wind turbines. The investigation shows that the level of the background noise, when wind velocity reaches 12 m/s, becomes equal to wind turbine noise at the distance of 50 meters from the wind turbine. The theoretical model of wind turbine noise emission depending on the distance to the wind turbine was proposed.

Medžio granulės pokyčių tyrimas pirolizės metu

Rolandas Paulauskas, Algis Džiugys, Nerijus Striūgas
Lietuvos energetikos institutas

Ivadas. Didėjant šilumos poreikiui ieškoma būdų, kaip panaudoti ir prastos kokybės biokurą. Vienas būdų yra dujinimo procesas, kurio metu galima gauti aukštesnės kokybės dujinį kurą ir panaudoti jį pramonėje [1]. Dujinimo procesui naudojant granuliuotą kurą, susidaro sąlygos, kurių metu granulės, judėdamos reaktoriuje iš pirolizės zonos į dujinimo zoną, sulimpa ir užkemša reaktorių, dėl ko dujinimo procesas slopinamas. Viena priežasčių, sąlygojančių granulių sulipimą, yra kuro dalelės pokyčiai aukštose temperatūrose, kai kuro dalelė traukiasi dėl jos viduje vykstančių cheminių reakcijų, kurias sukelia aukšta temperatūra. Terminė medžio granulių deformacija lemia kuro judėjimą, maišymąsi bei dujinimo proceso trukmę. Siekiant išsiaiškinti reaktoriaus užsikimšimo priežastį, atliekami pirolizės procesų eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai, kuriais tiriami kuro dalelės pokyčiai aukštose temperatūrose.

Tyrimų metodika. Eksperimentiniai medžio granulės pokyčių tyrimai atlikti elektrinėje krosnelėje sukuriant inertinę aplinką 400–1000 °C temperatūroje. Elektrinę krosnelę ir tiekiamą azotą (8 l/min azoto srautas) įkaitinus iki norimos temperatūros (matuojama K tipo termopora), medienos granulė patalpinama į krosnelės vidurį ir fotoaparatu Canon PowerShot SX30 IS filmuojami granulės pokyčiai dėl terminės deformacijos. Eksperimento schema pateikta 1 paveiksle.



1 pav. Metodo schema: 1 – Reguliuojamos temperatūros krosnelė; 2 – vaizdo kamera; 3 – termoporos blokas; 4 – azotas; 5 – bandinys (medienos granulė)

Prieš ir po eksperimento, bandinys pasveriamas svarstyklėmis ir slankmačiu išmatuojamas granulės skersmuo. Gauti aukštos raiškos (1280×720 taškai) video rezultatai apdorojami vaizdų koregavimo programa „GIMP“ ir granulės skersmuo išmatuotas skaitmenine liniuote, kuri dydį pateikia taškais. Granulės dydis taškais sulyginamas su slankmačiu išmatuotu bandinio diameteru ir proporcijos principu granulės pokyčiai laiko atžvilgiu išreiškiami milimetrais.

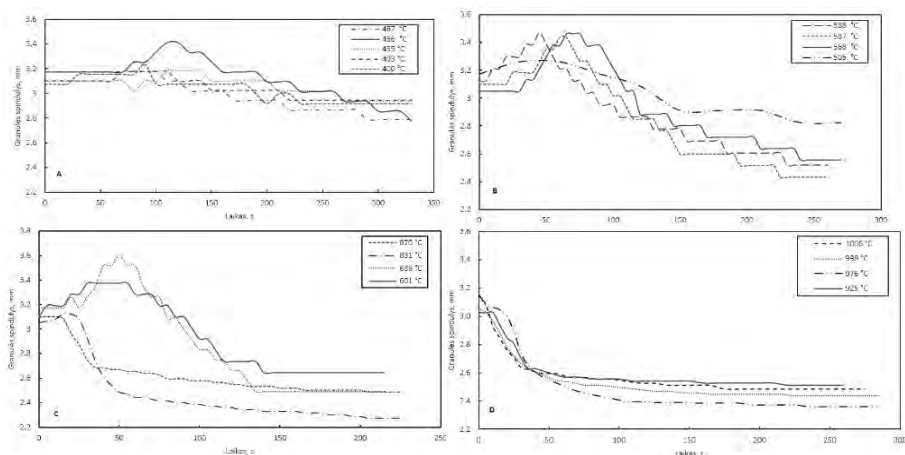
Teoriniai medžio granulės pokyčių tyrimai atlikti taikant [2-5] straipsniuose pateiktą skaitinį modelį, kuriame kuro dalelės pirolizės procesas aprašomas lygtimi:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho_p C_{p,p} \delta r^2} \frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{2}{r} \frac{\lambda}{\rho_p C_{p,p} \delta r^2} \frac{dT}{dr} + \frac{1}{C_{p,p}} \sum_i \left(H_i \frac{d\alpha_i}{dt} \omega_i \right) + \frac{1}{C_{p,p}} \sum_j \left(H_j \frac{dy_j}{dt} \right) \quad (1)$$

C_{pf} – bandinio savitoji šiluma (J/kg·K), C_{pc} – anglies savitoji šiluma (J/kg·K), λ_f – bandinio šilumos laidumo koeficientas (W/m·K), λ_c – anglies šilumos laidumo koeficientas (W/m·K), α_T – masės praradimo faktorius, išreikštas santykiniais vienetais.

Modelyje aprašomas naudoto pirolizės reaktoriaus skersmuo bei ilgis, aplinkos temperatūra, sienelių šiluminis laidumas, juodumo laipsnis, azoto srautas, azoto dujų bei reaktoriaus temperatūra ir granulės skersmuo, masė bei jų kiekis (šiuo atveju viena dalelė). Gauti rezultatai palyginami su eksperimentiniais.

Rezultatai ir jų aptarimas. Gauti rezultatai eksperimentinio tyrimo metu grafiškai pavaizduoti 2 paveiksle.

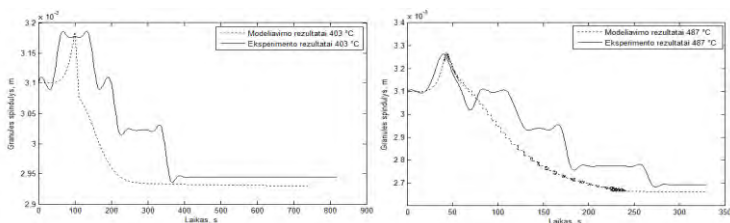


2 pav. Granulės spindulio pokyčiai laiko atžvilgiu: A) 400–500 °C temperatūroje, B) 500–600 °C temperatūroje, C) 600–800 °C temperatūroje, D) 900–1000 °C temperatūroje

Granulės spindulys 400 °C temperatūros aplinkoje padidėja iki 3,1 %, o 460 °C temperatūros aplinkoje granulės spindulio pokyčio augimas siekia net iki 7 %. Šioje temperatūroje dalelės dydis nusistovi per 330 s (žr. 2 A pav.). Vykstant granulės terminės deformacijos pokyčiams 500–600 °C temperatūrų intervale irgi pastebėtas granulės plėtimasis (žr. 2 B pav.). Didėjant temperatūrai iki 570 °C, granulės spindulio padidėjimas siekia 11 % pradinio granulės spindulio. Eksperimento trukmė sumažėja iki 240 s. Atlikus tyrimus 600–700 °C temperatūros intervale matomas iki

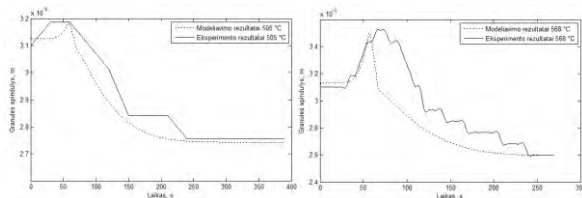
20 % pradinio granulės spindulio augimas (žr. 2 C pav.). Pirolizės temperatūrai esant virš 800°C , ir jai augant, pradinis granulės išsiplėtimas jau mažėja, ir tesiekia iki 10 % pradinio granulės skersmens prie 830°C temperatūros. Eksperimentinių tyrimų rezultatai $900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ temperatūros intervale pavaizduoti 2 D paveiksle. Šiame temperatūros intervale granulės išsiplėtimas nebepastebimas. Praėjus 100 s nuo eksperimento pradžios granulės dydis sumažėja 15–20 %, atsižvelgiant į temperatūrą, o po 100 s granulės pokyčiai nusistovi.

Iš gautų rezultatų matyti, kad granulės skersmens pokyčiai priklauso nuo pirolizės temperatūros bei šilumos pernašos dalelėse. Esant aukštesnei temperatūrai, šilumos srautas iš aplinkos į dalelę yra didesnis, o lakiųjų medžiagų išsiskyrimo mechanizmas kitoks. Manome, kad granulės plėtimasis vyksta dėl per lėto jos įkaitimo, nuo kurio priklauso lakiųjų medžiagų išsiskyrimas iš granulės. Esant žemai pirolizės temperatūrai, dalelei tolydžiai kaistant, vandens garo ir lakiųjų medžiagų junginių slėgis dalelės viduje nepasiekia kritinių verčių, dėl ko vanduo ir lakiosios medžiagos spėja pasišalinti neardydamos paviršiaus. Esant aukštesnei aplinkos temperatūrai, granulė greičiau perkaista ir vanduo bei lakiosios medžiagos nespėja išgaruoti. Todėl vanduo ir lakiosios medžiagos kaupiasi granulės viduje ir netoli paviršiaus sukelia vidinį slėgį, kuris ardo dalelės struktūrą ją išplėsdamas ir atlaisvindamas kelią dujoms pasišalinti. Lakiosioms medžiagoms išgaravus, prasideda granulės susitraukimas. Daroma prielaida, kad kuro sulipimas dujofikatoriuje vyksta dėl kuro išsiplėtimo pirolizės zonoje $400\text{--}800^{\circ}\text{C}$ temperatūrų intervale. Išsiplėtimo reiškinys jau nebepastebimas perkopus 800°C .



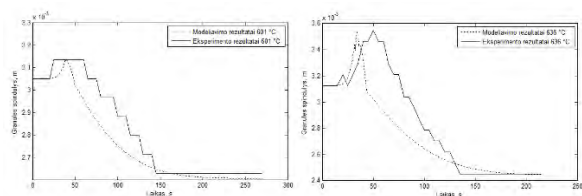
3 pav. Granulės spindulio pokyčių skaitinio modeliavimo rezultatai $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$ temperatūroje

Taikant tyrimų metodikoje aprašytą skaitinį modelį, buvo skaitiškai modeliuoti dalelės pokyčiai pirolizės aplinkoje ir palyginti su eksperimento rezultatais. Skaitinio modeliavimo rezultatai temperatūrų intervale nuo 400 iki 500°C pateikti 3 paveiksle, kuriame matyti, kad teorinis granulės plėtimasis tapatus eksperimentiniam rezultatui, bet skiriasi plėtimosi laikas. Likutinis granulės spindulys gaunamas tik su 5 % skirtumu. Panašūs rezultatai gauti temperatūrų intervale nuo 500 iki 600°C (žr. 4 pav.). Teorinė granulės pokyčių pradžia tapati eksperimentinei, bet skiriasi pokyčių laikas. Nustatytas likutinis granulės spindulys yra lygus eksperimentinio ir teorinio tyrimo metu.



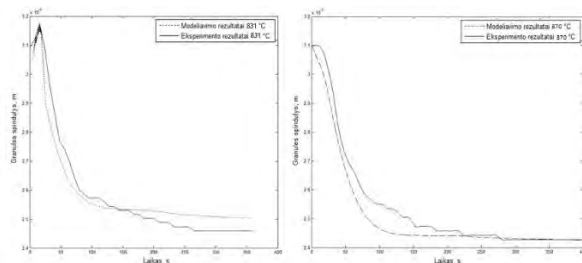
4 pav. Granulės spindulio pokyčių skaitinio modeliavimo rezultatai 500–600 °C temperatūroje

Atliktų teorinių skaičiavimų 600–700 °C temperatūroje rezultatai grafiškai pateikiami 5 paveiksle. Nors susitraukimo pradžia neatitinka eksperimento rezultatų, tačiau teorinis granulės pokyčių pobūdis tapatus eksperimento metu gautiems rezultatams.



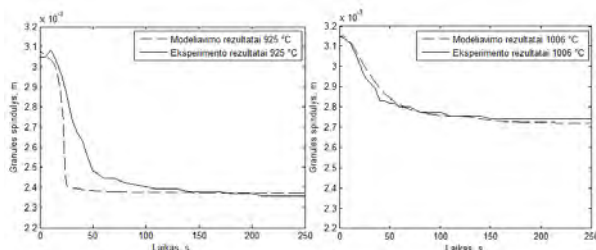
5 pav. Granulės spindulio pokyčių skaitinio modeliavimo rezultatai 600–700 °C temperatūroje

Pagal eksperimentų duomenis modeliuojant dalelės pokyčius virš 800 °C temperatūros (žr. 6 pav.), teorinis granulės pokyčių pobūdis tapatus nustatytiems eksperimento metu. Tačiau teorinis likutinis dalelės spindulys skiriasi apie 5 % nuo eksperimentinių rezultatų. Aukštesnėje temperatūroje (870 °C) modeliuojant granulės pokyčius išsiplėtimas nėra vertinamas (žr. 6 pav.), o gauti rezultatai gerai koreliuoja su eksperimentiniais.



6 pav. Granulės spindulio pokyčių skaitinio modeliavimo rezultatai 800–900 °C temperatūroje

Modeliavimo rezultatai 900–1000 °C temperatūrų intervale pavaizduoti 7 pav. taip pat atitinka eksperimentinius rezultatus.



7 pav. Granulės spindulio pokyčių skaitinio modeliavimo rezultatai 900–1000 °C temperatūroje

Kaip matyti iš rezultatų, granulės pokyčių apskaičiavimas modelyje yra tapatus su išmatuotais eksperimento metu.

Išvados

1. Pirolizės eksperimentinio tyrimo metu nustatyta, kad 300–800 °C aplinkos temperatūros intervale granuliuotos medienos kuro dalelė pradžioje plečiasi, o tik paskui pradeda mažėti. Atsižvelgiant į aplinkos temperatūrą, dalelė išsiplėčia iki 20 %.
2. Dalelės išsiplėtimas lemia pirolizės proceso trukmę, likutinį granulės dydį ir manoma, kad kuro sulipimą dujofikatoriuje.
3. Skaitinio modelio rezultatai gerai koreliuoja su eksperimento aukštesnėje nei 800 °C temperatūroje, ir tik jei išsiplėtimas nėra vertinamas modelyje.
4. Skaitiniame modelyje įvertinus dalelės išsiplėtimą, modeliavimo rezultatai yra artimi eksperimento rezultatams nuo 400 °C iki 800 °C kaitinimo temperatūros. Žemesnėje temperatūroje (< 400 °C) teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai išsiskiria iki 30 %, bet likutiniai granulės dydžiai tapatūs.

Padėka

Tyrimą finansuoja Lietuvos mokslo taryba (sutarties Nr. ATE-02/2012).

Literatūra

1. Gurskienė V., Šlančiauskas A. Medienos anglies likučio dujofikacijos spartinimas didinant CO₂ dujų generavimą. *Energetika* 58, 213–218 P, 2012.

2. Džiugys A., Peters B.J. An approach to simulate the motion of spherical and non-spherical fuel particles in combustion chambers. *Granular Matter* 3, 2001, P. 231–266.
3. Cheung K.Y., Lee K.L., Lam K.L., Chan T.Y., Lee C.W., Hui C.W. Operation Strategy for Multi-stage Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 91(1), 2011, P. 165–182.
4. Cheung K.Y., Lee K.L., Lam K.L., Chan T.Y., Lee C.W., Hui C.W. Modelling Pyrolysis with Dynamic Heating. *Chemical Engineering Science* 66, 2011, P. 6505–6514.
5. Lam, K.L., Oyedun A.O., Hui C.W. Experimental and Modelling Studies on Biomass Pyrolysis. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 20(3), 2012, P. 543–550.

Investigation of wood pellet changes during pyrolysis

Summary

Gasification of wood pellets is confronted with the problem of adhesion of fuel in pyrolysis zone. In order to investigate the cause and regularities of fuel adhesion, experimental and theoretical studies of wood pellets thermal deformations were carried out by measuring thermal deformation of wood pellet in the electrical pyrolysis reactor from 300 to 1000 °C temperature in an inert atmosphere during time.

Saulės ir geoterminės energijos panaudojimo galimybės centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje

Lina Murauskaitė*, Valentinas Klevas**

*Lietuvos energetikos institutas, **Kauno technologijos universitetas

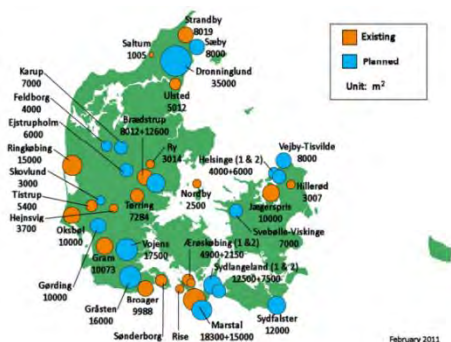
Įvadas. Lietuvoje saulės ir geoterminės energijos potencialui skiriamas neadekvačiai mažas vaidmuo, tačiau užsienio šalių patirtis rodo, kad centralizuoto šilumos tiekimo (CŠT) infrastruktūra yra viena svarbiausių prielaidų platesniam saulės ir geoterminės energijos technologijų panaudojimui plačiu mastu.

Tačiau saulės ir geoterminės energijos technologijų panaudojimui reikia atitinkamų teisinių bei ekonominių prielaidų. Pavyzdžiui, mokslinėse publikacijose pastaruoju metu analizuojamos atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) panaudojimo galimybės CŠT plėtrai konkurencingumo (Aberg ir Henning, 2011) ar naujų įkainojimo strategijų rizikos vertinimo atžvilgiu (Bjorkqvist ir kt., 2010). Nors AEI panaudojimas skatinamas Lietuvos šilumos ūkyje, tačiau vyrauja išankstinė nuomonė, kad saulės ir geoterminės energijos panaudojimas yra ekonomiškai nepatrauklus. Autorių ankstesnis tyrimas rodo, kad ši nuomonė nėra patvirtinta išsamesniais tyrimais (Klevas ir Murauskaitė, 2012). Šiame straipsnyje pateikiami Varėnos miesto CŠT bazėje skaičiuojami saulės kolektorių sistemos bei Gargždų CŠT bazėje geoterminės sistemos ekonominiai rodikliai, kurie leidžia pakoreguoti išvadas dėl jų panaudojimo tikslingumo. Skaičiavimai atlikti Energy PRO modeliavimo programinės įrangos paketu.

Tyrimo tikslas – išanalizuoti CŠT infrastruktūros galimybes panaudoti saulės ir geoterminės energijos technologijas.

Rezultatų aptarimas. Saulės energija yra labai svarbus AEI, tačiau vyrauja išankstinė nuomonė, kad ekonominis saulės energetikos potencialas Lietuvoje labai ribotas dėl brangių technologijų ir netinkamų klimato sąlygų.

Saulės kolektorių technologija Europoje naudojama dar nuo XX a. pabaigos. 2013 m. buvo priskaičiuojama per 100 plataus masto saulės kolektorių sistemų. Daugiausia patirties sukaupusi Danija, kurioje 2013 m. II pusmetį buvo eksploatuojama 40 plataus masto saulės kolektorių sistemų, kurių nominali galia ne mažesnė nei 700 kW. 2010–2012 m. Danijoje įrengta net 18 plataus masto saulės kolektorių sistemų, kurių bendra galia sudaro 120 MW. Dauguma jų veikia kartu su kogeneracinėmis jėgainėmis ir įrengtos be jokių rėmimo priemonių. Europos saulės spinduliuotės žemėlapiai leidžia priimti prielaidas, kad Danijos ir Lietuvos gaunamos saulės energijos kiekis yra panašus, todėl tikslinga analizuoti saulės kolektorių sistemų panaudojimo galimybes CŠT gamybos pusėje.



1 pav. Saulės kolektorių sistemų paplitimas CŠT sistemose Danijoje 2011 m.

Saulės kolektorių sistemų įrengimo skaičiavimai Varėnos miesto CŠT bazėje. Skaičiavimams priimamos šios prielaidos: šilumos paklausa Varėnos mieste 42 300 MWh, apskaičiuota kaip Varėnos miestui patiektas šilumos kiekis 2012 m. Šilumos akumuliacija 1070 m³ prilyginamas CŠT vamzdynų vidiniam tūriui. Apskaičiuoti 20 metų vidutiniai Varėnos miesto lauko temperatūros ir 20 metų vidutiniai Varėnos miesto saulės spindulių duomenys. Įvertinta vidutinė 2013 sausio – liepos mėn. šilumos kaina (suminė vienanarė nediferencijuota šilumos kaina be PVM), kuri sudaro 19,81 ct/kWh (be PVM). Vadovaujantis atliktais tyrimais Danijoje, skaičiavimams pasitelkta 20 metų saulės kolektorių sistemos gyvavimo trukmė. Palūkanų norma 5 proc. vertinta pagal Lietuvos banko statistiką 2012 m. liepą – 2013 m. birželį. Infliacijos tempai vadovaujami Europos centrinio banko vidutinės trukmės infliacijos prognozėmis 2013 m. II ketvirčiui. Investicijos finansuojamos skolintu kapitalu, ilgalaikės paskolos trukmė 15 metų. Paskolos terminas pasirinktas pagal saulės kolektorių pagaminamą šilumos kiekį ir apskaičiuotą šilumos kainą, kad šilumos gamybos šaltinis ne tik dengtų paskolos ir palūkanų kaštus, bet ir būtų nuostolingas Varėnos miesto šilumos tinklų įmonei. Sąnaudos saulės kolektorių sistemai aptarnauti 3,45 Lt/MWh vertintos pagal panašaus dydžio saulės kolektorių laukus Danijoje.

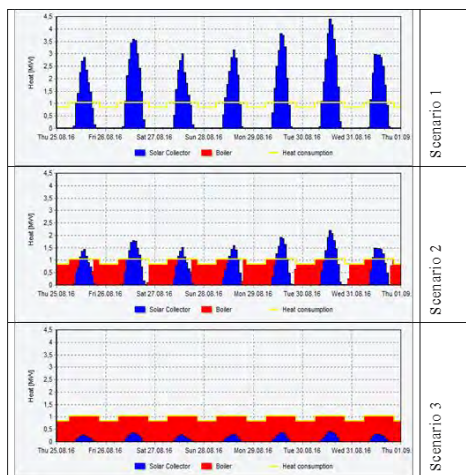
Suformuoti trys pagrindiniai scenarijai.

Scenarijus Nr. 1 – visas vasaros šilumos poreikis patenkinamas saulės kolektoriais. Tam reikalingas „f-EASY (SDH)“ skaičiuokle apskaičiuotas 10 000 m² saulės kolektorių plotas, kurio investicijos preliminarai vertinamos 8,9 mln. Lt (be PVM).

Scenarijus Nr. 2 – pusę vasaros šilumos poreikio patenkinama saulės kolektoriais. Tam reikalingas perpus mažesnis saulės kolektorių plotas, 5 000 m². Investicijos, perskaičiuotos pagal saulės kolektorius Lietuvoje siūlančių įmonių pasiūlymus, preliminarai vertinamos 5 mln. Lt (be PVM).

Scenarijus Nr. 3 – saulės kolektoriai statomi tik ant UAB „Varėnos šiluma“ turimų pastatų stogų, esančių centrinės katilinės teritorijoje. Saulės kolektorių plotas

1000 m². Investicijos, perskaičiuotos pagal saulės kolektorius Lietuvoje siūlančių įmonių įkainius, preliminarai vertinamos 1,5 mln. Lt. (be PVM).



2 pav. Saulės kolektorių šilumos gamyba 3 skirtingais scenarijais

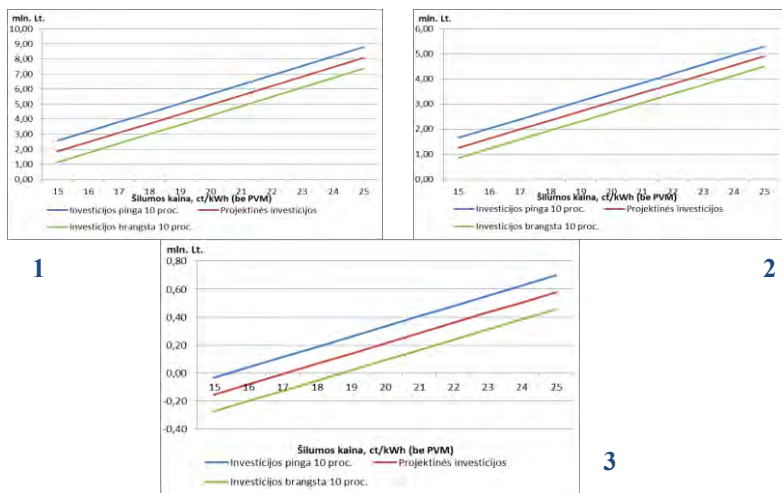
Saulės kolektoriais pagaminamos šilumos metinis kiekis vertinamas skirtingais scenarijais:

- Scenarijus Nr. 1: 4,13 tūkst. MWh (9,8 % metinio kiekio);
- Scenarijus Nr. 2: 2,42 tūkst. MWh (5,8 % metinio kiekio);
- Scenarijus Nr. 3: 0,48 tūkst. MWh (1,2 % metinio kiekio).

Teoriškai formuojama galimybė gauti subsidiją iš Lietuvos aplinkos apsaugos investicijų fondo (LAAIF) saulės kolektorių investicijoms centralizuotos šilumos gamybos sektoriuje. Prasidėjus naujam finansavimo laikotarpiui, iš LAAIF galima tikėtis iki 30 proc. paramos didelėms saulės kolektorių sistemoms, prijungtoms prie CŠT tinklo.

1 lentelė. Finansiniai rodikliai, jei būtų gauta 30 proc. subsidija saulės kolektorių sistemos investicijoms

Finansiniai rodikliai		
Scenarijus Nr. 1	Paprastasis atsipirkimo laikas	10 metų ir 6 mėnesiai
	Grynoji dabartinė vertė	4,96 mln. litų
	Vidinė gražos norma	13,5 proc.
Scenarijus Nr. 2	Paprastasis atsipirkimo laikas	10 metų ir 4 mėnesiai
	Grynoji dabartinė vertė	3,08 mln. litų
	Vidinė gražos norma	14,3 proc.
Scenarijus Nr. 3	Paprastasis atsipirkimo laikas	16 metų ir 3 mėnesiai
	Grynoji dabartinė vertė	0,21 mln. litų
	Vidinė gražos norma	7,2 proc.



3 pav. Grynosios dabartinės vertės dinamika atsižvelgiant į šilumos kainas 3 scenarijais, jei būtų gauta 30 proc. subsidija saulės kolektorių investicijoms

Gauti ekonominiai rodikliai ir finansinio jautrumo analizė rodo, kad saulės kolektorių sistemos gali būti ekonomiškai patraukli investicija tuose Lietuvos miesteliuose, kuriuose šilumos kaina yra aukštesnė nei vidutinė.

Saulės kolektorių sistemos naudojimo privalumai:

- Neišmetamos šiltnamio efektą sukeliančios dujos, kietosios dalelės;
- Nedideli eksploataciniai kaštai, kurie nepriklauso nuo kuro kainų rinkoje;
- Sutaupytas kuras (gamtinės dujos ir/ar mediena).

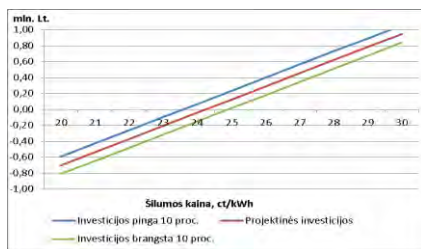
Gargždų miesto CŠT bazėje geoterminės sistemos įrengimo ekonominiai skaičiavimai. Nagrinėti scenarijai – geoterminio šildymo galimybių analizė Gargždų katilinei Nr. 6.

2 lentelė. Finansiniai rodikliai geoterminės sistemos investicijoms bazinio scenarijaus ir 30 proc. subsidijos scenarijaus atvejais

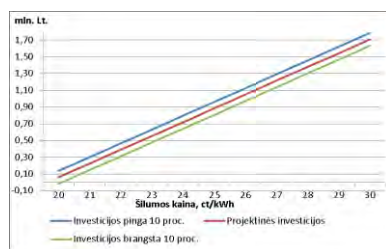
Finansiniai rodikliai		
Bazinis scenarijus	Paprastasis atsipirkimo laikas	16 metų ir 2 mėnesiai
	Grynoji dabartinė vertė	0,126 mln. litų
	Vidinė grąžos norma	8,0 proc.
Subsidijos scenarijus	Paprastasis atsipirkimo laikas	7 metai ir 3 mėnesiai
	Grynoji dabartinė vertė	0,88 mln. litų
	Vidinė grąžos norma	21,7 proc.

Skaiciuotos šilumos siurblio, kurio galia 300 kW, investicijos vidutiniškai sudaro 1,1 mln. Lt. Skaiciavimams taikytos prielaidos: šilumos paklausa 1740 MWh

yra Gargždų miesto katilinės Nr. 6 patiekto šilumos kiekio 2009–2011 m. vidurkis. Apskaičiuoti 5 metų vidutiniai Gargždų miesto lauko temperatūrų duomenys. Įvertinta vidutinė parduodamos šilumos kaina 25,64 ct/kWh, vidutinė perkamos elektros kaina 40 ct/kWh. Pasitelkta 20 metų geoterminės sistemos gyvavimo trukmė. Palūkanų norma 6 proc. vertinta pagal Lietuvos banko statistiką 2012 m. lapkritį – 2013 m. spalį. Infliacijos tempai vadovaujasi Europos centrinio banko vidutinės trukmės infliacijos prognozėmis 2013 m. III ketvirčiui. Investicijos finansuojamos skolintu kapitalu, ilgalaikės paskolos trukmė 15 metų. Šnaudos geoterminei sistemai aptarnauti vidutiniškai sudaro 20 Lt/MWh.



a) šilumos siurblių bazinis scenarijus



b) 30 proc. subsidija investicijoms

4 pav. Jautrumo analizė šilumos kainai, jei būtų gauta 30 proc. subsidija šilumos siurbliams, kurie gamina šilumą centralizuotos šilumos gamybos pusėje.

Atlikta jautrumo analizė ir gauti ekonominiai rodikliai rodo, kad gaunant 30 proc. subsidiją šilumos siurblių investicijoms, geoterminės energijos panaudojimas yra ekonomiškai prasmingas. Atsiperkamumas juo didesnis, juo aukštesnė šilumos kaina konkrečiuose miestuose ir žemesnė perkamos ar savoms reikmėms pasigaminamos elektros energijos kaina.

Išvados

1. Teikiant subsidijas investicijoms tiek saulės, tiek geoterminės energijos technologijos gali būti naudojamos CŠT sistemoje kaip ekonomiškai patrauklios alternatyvos.
2. Gauti ekonominiai rodikliai ir finansinio jautrumo analizė rodo, kad saulės kolektorių sistemos karštam vandeniui gaminti variantai svarstyti ir gali būti ekonomiškai patrauklūs tuose Lietuvos miesteliuose, kuriuose šilumos kaina yra aukštesnė nei vidutinė.
3. Technologinės plėtros scenarijai turėtų būti formuojami kaip papildančių vienas kitą, o ne konkuruojančių tarpusavyje jėgainių, naudojančių dujas, biokurą, saulės bei geoterminę energiją, kompleksai.

Padėka. Tyrimą remia Lietuvos mokslo taryba (IEP 2012).

Literatūra

1. Aberg M. and Henning D. Optimisation of a Swedish District Heating System with Reduced Heat Demand due to Energy Efficiency Measures in Residential Buildings. *Energy Policy*. Vol. 39, No. 12, 2011, P. 7839–7852.
2. Klevas V. and Murauskaitė L. New Role of District Heating as Infrastructure for Increasing the Use of Renewable Energy Sources. *The 2nd World sustainability forum*. November 1–30, 2012. (www.wsforum.org)
3. Björkqvist O., Idefeldt J. and Larsson A. Risk Assessment of New Pricing Strategies in the District Heating Market: A Case Study at Sundsvall Energi AB. *Energy Policy*. Vol. 38, No. 5, 2010, P. 2171–2178.

Possibilities to use solar and geothermal energy in district heating system

Summary

Projections of utilization of renewable energy sources give unreasonable excessive role for biofuels. Meanwhile, the usage of a huge potential of solar and geothermal energy is significantly too small. The possibilities to use solar collectors and heat pumps on the supply side in district heating system were analysed. Renewable energy development in district heating requires large investments; however the use of renewable resources for the generation of district heating would let to diversify the fuel and energy sources. Subsidies for investments of solar and geothermal energy technologies would let to use them in district heating system as economically attractive alternatives.

NO_x koncentracijų skaičiavimų metodika azoto turinčiam kurui

Titas Sereika*, Kęstutis Buinevičius**

*Kauno technologijos universitetas, ** Kauno technologijos universitetas

Deginant medžiagas su įvairias azoto kiekiais pagal masę, buvo pastebėta, jog, esant skirtingiems kiekiais azoto medžiagose, susidaro neproporcingi azoto oksidų kiekiai. Todėl siekiant nustatyti azoto oksidų susidarymo priklausomumus nuo medžiagų azoto kiekio, atlikti konversijos koeficiento reikšmės skaičiavimai [1].

$$K_N = \frac{(V_d + (\alpha - 1) \cdot V_{oro}) \cdot C_{NOx}}{328,6 \cdot N_K}, \quad (1)$$

čia: K_N – kure esančio azoto konversijos faktorius, proc.; α – oro pertekliaus koeficientas degimo produktuose; C_{NOx} – azoto oksidų koncentracija degimo produktuose, mg/m³; N_K – azoto dalis kure, proc.; 328,6 – perskaičiavimo koeficientas; V_{oro} – degimui reikalingas teorinis oro kiekis, m³/kg; V_d – teorinis degimo produktų tūris, m³/kg;

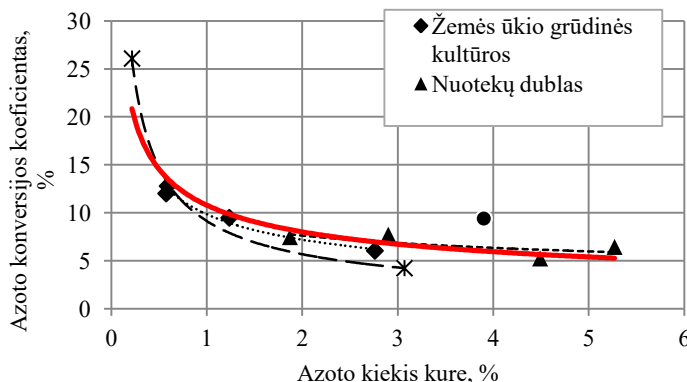
Konversijos koeficientai apskaičiuoti sugrupavus tiriamąsias medžiagas pagal jų prigimtį ir apskaičiuoti konversijos koeficientai. 1. lentelėje pateikiami sugrupuoti medžiagų teoriniai sauso oro ir sausų dūmų kiekiai.

1 lentelė. Tiriamų medžiagų apskaičiuoti teoriniai sauso oro ir sausų dūmų kiekiai, bei konversijos koeficientai

Kuras	Azotas, %	Ž. šilumingumas, kJ/kg	V _{oro} (m ³ /kg)	V _d (m ³ /kg)	K _N , %
Žemės ūkio grūdinės kultūros					
Grikių lukštai	0,574	15912	4,29	4,95	13,25
Rapsų grūdų atliekos	2,76	19245	5,13	5,78	3,63
Kukurūzų stiebų gran.	0,59	15617	4,21	4,88	14,04
Kukurūzų miltų gran.	1,235	14934	4,04	4,71	8,88
Nuotekų dumblas					
Stab. nuotekų dumblo	5,27	15647	4,22	4,88	1,90
Dumblas po metantanko	4,49	13890	3,77	4,44	1,92
Dumblas ir pjuvenos (25:75 proc.)	1,87	17048	4,57	5,23	4,60
Dumblas ir pjuvenos (50:50 proc.)	2,9	15995	4,31	4,97	3,16
Paukščių kraikas					
Paukščių kraikas ir medienos gran.	0,217	16333	4,39	5,05	20,54
Paukščių kraikas ir mėšlo mišinys	3,07	12541	3,43	4,11	1,90
Baldinės medienos atliekos					
Drožlių plokštės atliekos	3,9	17130	4,59	5,25	3,60

Pastebime, kai azoto kiekis kure 2 %, tuomet į azoto oksidus pereina apie 5 % kuro azoto, bet jei azoto kiekis kure nesiekia 0,5 procento, tuomet jo perėjimas į azoto oksidus keturis kartus didesnis ir siekia iki 20 %.

Sugrupavus tiriamąsias medžiagas į keturias rūšis pagal kuro prigimtį, sudaryti grafiniai priklausomumai, pavaizduoti 1 paveiksle.



1 pav. Azoto konversijos koeficiento priklausomumas nuo azoto kiekio tirtose kuro rūšyse

Iš grafiko matoma, jog kreivės apytiksliai galima aprašyti lygtimi:

$$K_N = A \cdot N_K^n; \quad (2)$$

Gauti trys skirtingi koeficientai (A) pagal kuro rūšis bei skirtingi laipsnio rodikliai (n). Koeficientai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Konversijos lygties koeficientų reikšmės atsižvelgiant į kuro prigimtį

Tiriama kuro rūšis	Koeficiento reikšmė (A)	Laipsnio rodiklis (n)
Žemės ūkio grūdinės kultūros	9,8473	0,548
Nuotekų dumblas	9,1717	0,735
Naminių paukščių kraikas	9,1442	0,314
Visos tirtos kuro rūšys bendrai	10,794	0,570

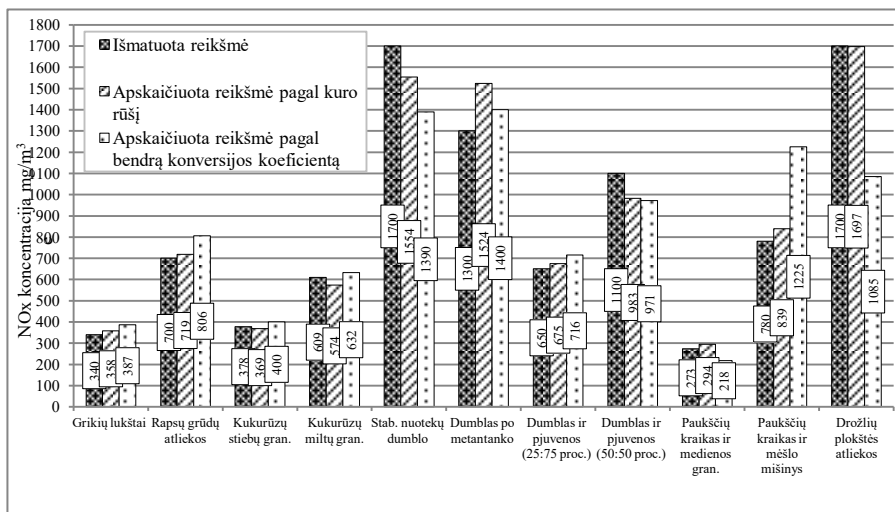
Apskaičiavus azoto konversijos koeficientus tiriamoms medžiagoms, sudaryta formulė teorinėms azoto oksidų, susidarantių iš kure esančio azoto, koncentracijoms dūmuose apskaičiuoti:

$$C_{NOx} = \frac{328,6 \cdot K_N \cdot N_K}{V_{oro}^t \cdot (\alpha - 1) + V_d} \quad (3)$$

Į šią formulę (3) įtraukus teorines sauso oro ir sausų dūmų tūrių formules [2] bei normatyvinį biokuro oro pertekliaus koeficientą 1,4, gaunama apibendrinta formulė, kuria apskaičiuojama azoto oksidų koncentracijų norma:

$$C_{NOx} = \frac{K_N \cdot N_K}{1,07155 \cdot 10^{-6} \cdot Q_z + 3,261932 \cdot 10^{-3}} \quad (4)$$

Taikant aukščiau aprašytą formulę (4), apskaičiuojamos teorinės teršalų koncentracijos ir palyginamos su faktinėmis, kurios buvo išmatuotos deginant tiriamąsias medžiagas. Gauti rezultatai atvaizduoti diagrama, pateikti 2 paveiksle.



2 pav. Išmatuotų ir apskaičiuotų teršalų koncentracijų palyginimas esant oro pertekliaus koeficientui 1,4

Skaičiuojant NOx koncentracijas pagal bendrą konversijos lygtį, gautos didelės paklaidos, kurios siekia 57 proc. Todėl prieita išvada, jog grupuojant tiriamas medžiagas pagal jų prigimtį ir azoto kiekį jose, galima išvesti azoto konversijos koeficientus pagal kuriuos, įmanoma tiksliau apskaičiuoti susidarantių degimo proceso metu azoto oksidų koncentracijų reikšmes nei taikant bendrą azoto konversijos koeficientą.

Išvados

1. Nustatyta, kad kuro azoto konversija į azoto oksidus įvairių rūšių kurui (griekių lukštams, kukurūzų miltų granulėms, kukurūzų stiebų granulėms, stabilizuoto nuotekų dumblo granulėms, dumblo ir pjuvenų mišiniams, paukščių kraikai ir jo mišiniams, baldinės medienos atliekos), gali būti apytikriai aprašoma funkcija (2).
2. Atliktų tyrimų pagrindu sukurta formulė azoto oksidų, susidarantių iš kure esančio azoto, koncentracijoms degimo produktuose, apskaičiuoti (5).
3. Eksperimentinių ir skaičiavimo duomenų palyginimas rodo, kad formulė leidžia apskaičiuoti NOx koncentraciją $2,38 \pm 17,23$ % tikslumu, atsižvel-

giant į kuro rūšį, ir gali būti taikoma projektuojant biokurą naudojančias katilines, NOx emisijoms prognozuoti, bei įvertinti NOx mažinimo priemonių įrengimo būtinybę.

Literatūra

1. Buinevičius, K., Plečkaitienė, R., Norinkevičiūtė, R., Černiauskas, E. Kure esančio azoto perėjimo į NOx tyrimai. *Aplinkos apsaugos inžinerija*. 2011. P. 58–63.
2. Plečkaitienė, R., Buinevičius, K. „The factors which have influence on nitrogen conversion formation. *Environmental Engineering: selected papers of the 8th international conference*, May 19-20, Vilnius, Lithuania: Vol. 1, Environmental Protection/ Edited by D. Cygas and K. D. Froehner, ISSN 2029-7092 online/ISSN 2029-7106 print, 2011. P. 263–269.

The methodology for calculating the NOx concentration from fuel nitrogen

Summary

In the paper examination of buckwheat husks, corn stalks and corn flour granules, sewage sludge, industrial wood waste, was assessed air pollution by burning high nitrogen containing fuel and mixtures thereof is presented. Experiments have demonstrated that the higher the nitrogen compounds present in the fuel, the lower nitrogen goes into nitrogen oxides.

Ūkininko sodybos energetinio aprūpinimo analizė

Monika Maziukienė, Algimantas Balčius
Kauno technologijos universitetas

Įvadas. Nuolat brangstant energetiniams ištekliams, pasaulyje vykstant ekonominėms krizėms, apsirūpinimo šilumine energija klausimas tampa vienas svarbiausių, kurį tenka spręsti ne tik įvairioms organizacijoms, bet ir kiekvienam individui gyventojui.

Lietuva turi galimybių panaudoti visas atsinaujinančių energijos išteklių rūšis. Svarbiausi – saulės, geoterminės, vėjo, biomasės ir hidroenergijos energijos ištekliai.

Tyrimo objektu buvo pasirinkta ūkininko sodyba esanti Jurbarko rajone, Zubrickų kaime. Buvo siekiama išanalizuoti trijų atsinaujinančių energijos išteklių (AEI) – saulės energijos, šilumos siurblio imančio energiją iš grunto ir hidroenergijos pritaikymą joje.

Tyrimo metodika. *Saulės energijos panaudojimas karštam vandeniui ruošti.* Saulės energija gali būti panaudojama sodyboje karštam vandeniui ruošti. Svarbu įvertinti kokioje vietovėje yra ši sodyba bei joje gyvenantį žmonių skaičių, kad būtų optimizuotas karšto vandens gaminimas panaudojant saulės energiją.

Šilumos kiekis, reikalingas karštam vandeniui pašildyti, apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$Q = Mc\Delta T, \quad (1)$$

čia: M – vandens kiekis asmeniui per parą (l/parą), ΔT – temperatūros pokytis $^{\circ}\text{C}$, c – vandens specifinė šiluma ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$);

Tuomet minimalus projektuojamo kolektoriaus plotas apskaičiuojamas pagal išraišką (2), įvertinus maksimalų saulėtų valandų skaičių per mėnesį.

$$F = \frac{Q}{E_{\max} \cdot \eta}, \quad (2)$$

čia: F – kolektoriaus plotas m^2 , $E_{\max}$ – maksimalus saulėtų valandų skaičius per mėnesį, η – kolektoriaus naudingumo koeficientas.

Šilumos siurbliui instaliuoti labai svarbu tinkamas grunto žemės kolektoriaus parinkimas. Šilumos siurblio šaltinio našumas, pagal kurį parenkamas grunto šilumokaitis apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$Q_0 = Q_{KD} - P_{\xi S}, \quad (3)$$

čia: Q_{KD} – šilumos siurblio šildymo našumas, kW; $P_{\xi S}$ – šilumos siurblio imama galia, kW.

Šilumos siurblio imama galia nustatoma pagal namo šiluminius poreikius. Nustatyta, kad namo šiluminiai poreikiai, įvertinus šilumos nuostolius pro atitvaras siekia iki 12 kW per mėnesį.

Tuomet horizontalus žemės plotas, reikalingas kolektoriui įrengti, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$F_E = \frac{Q_o}{q_E}, \text{ m}^2, \quad (4)$$

čia: q_E – savitasis šilumos srautas iš 1 m², kuris priklauso nuo grunto rūšies ir drėgnumo.

1 lentelė. Skirtingų grunto rūšių savitasis šilumos srautas iš m²

Grunto tipas	$q_E, \text{ W/m}^2$
Sausas smėlėtas	10–15
Drėgnas smėlėtas	15–20
Sausas molėtas	20–25
Drėgnas molėtas	25–30
Gruntas, per kurį teka gruntinis vanduo	30–35

Analogiškai vertikaliam zondo ilgiui apskaičiuoti:

$$F_z = \frac{Q_o}{q_E}, \text{ m.}, \quad (5)$$

čia: q_E – savitasis šilumos srautas iš 1 m gylio, kuris priklauso nuo grunto rūšies ir drėgnumo.

2 lentelė. Skirtingų grunto rūšių savitasis šilumos srautas iš 1 m gylio

Grunto tipas	$q_E, \text{ W/m}^2$
Žvyras, smėlis (sausas)	20
Žvyras, smėlis (drėgnas)	55
Molis, priemolis (drėgnas)	30
Kalkakmenis	45
Smiltainis	55

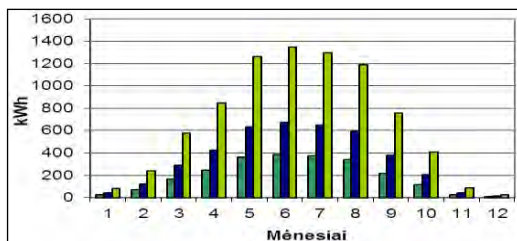
Hidroenergetikos plėtrą labiausiai lemia topografinės ir hidrologinės sąlygos. Atlikta išsami efektyvių hidroenergijos požiūriu Lietuvos upių ruožų studija [1]. Pateikta, kad pro sodybą tekančios Mituvos upė yra tinkama hidroenergijai plėtoti. Šaltinio duomenimis efektyvus upės ilgio ruožas 21 km. Žinyuose pateikiami duomenys, jog Mituvos upės debitas minimaliu atveju siekia 2,95 m³/s, o maksimaliu – 5,4 m³/s. Šios upės mažiausias greitis yra 0,2 m/s, o didžiausias – 0,4 m/s. Žinant

šiuos pagrindinius dydžius, galima apskaičiuoti kinetinę energiją bei energiją kilovatvalandėmis minimaliu ir maksimaliu upės greičio ir debito atžvilgiu:

$$P_k = \frac{\rho Q v^2}{2} = \frac{1000 Q v^2}{2} = 0,5 Q v^2 (kW). \quad (6)$$

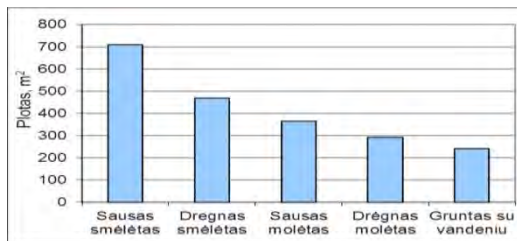
Rezultatai ir jų aptarimas. Atlikus skaičiavimus gauta, kad tiriamojoje sodyboje, gyvenant penkių asmenų šeimai minimalus saulės kolektorių plotas – 3,0 m² nėra pakankamas karštam vandeniui ruošti. Norint užtikrinti tokios šeimos poreikius karštam vandeniui gauti, buvo pasirinkti standartiniai didesnio ploto saulės kolektoriai 5,5 m² bei 10,4 m².

Iš duomenų pateiktų paveiksle 1 matoma, kad net ir pasirinkus didesnio ploto saulės kolektorius vien tik saulės energijos nepakanka karštam vandeniui ruošti. Būtina naudoti papildomą kurą – malkas, dujas, granules. Tokiu atveju įdiegiama kombinuota saulės kolektoriaus – katilo sistema.



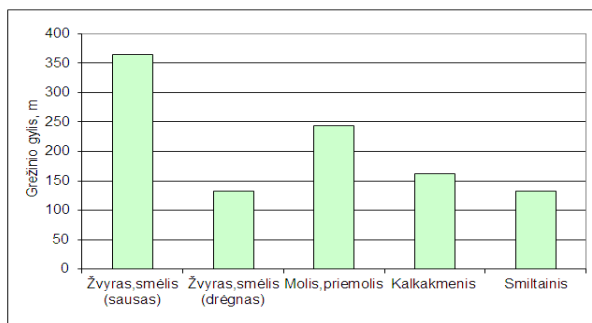
1 pav. Pagaminamas energijos kiekis esant skirtingiems kolektorių plotams karštam vandeniui ruošti: ■ – 3,0 m², ■ – 5,5 m², ■ – 10,4 m²

Norint tinkamai parinkti šilumos siurblių, būtina atsižvelgti į, gruntiniam šilumokačiui išvedžioti reikalingą plotą, nustatomą pagal grunto tipą. Tiriamojoje sodyboje gruntas yra drėgnas, molėtas. Sodybos šiluminius poreikius tenkintų toks šilumos siurblys, kurio kolektorius grunte būtų paklojamas 300 m² plote.



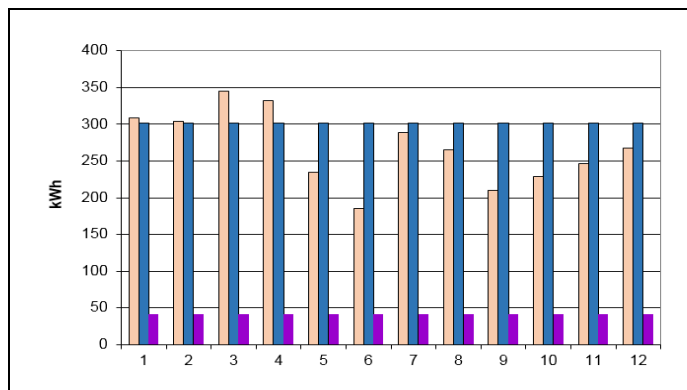
2 pav. Gruntinio šilumokačio ploto parinkimo priklausomumas nuo grunto tipo

Jeigu montuojamas vertikalus zondas, šilumos srautas iš 1 m grunto taip pat priklauso nuo grunto tipo. Todėl šilumos siurbliui, kuris tenkintų šiluminius namo poreikius reikia gręžinio, kurio bendras gylis siektų iki 250 m. Gręžiniai dažniausiai įrengiami iki 100 m gylio, todėl galima įrengti kelis panašaus gylio gręžinius (4×60 m).



3 pav. Vertikalaus gręžinio zondo parinkimo priklausomumas nuo grunto tipo

3 pav. pateikiami ūkininko sodyboje suvartojami energijos kiekiai. Šalia nurodoma, kiek elektros energijos galima būtų pagaminti sodyboje pritaikius hidroenergią maksimaliu bei minimaliu upės tėkmės greičio ir debito atžvilgiais. Matoma, kad idealiu atveju, turint pastovų maksimalų tėkmės greitį ir debitą, sodybos elektros poreikiai būtų visiškai tenkinami.



4 pav. Pagaminamas minimalus ir maksimalus energijos kiekis hidroelektrinėje:

■ – sodyboje suvartojamas elektros energijos kiekis (kWh); ■ – teorinis maksimalus energijos kiekis pagaminamas hidroelektrinėje (kWh); ■ – minimalus pagaminamas energijos kiekis

Darbo metu buvo siekiama ištirti atskiros sodybos galimybes apsirūpinti energija pritaikius AEI. Saulės kolektoriai ir gruntinė energija – palankus sprendimas įvairios geografinės vietovės atžvilgiu. Tačiau hidroenergijos plėtojimas labai priklauso nuo šalia esančių vandens telkinių. Būtina įvertinti upės maksimalų ir minimalų debitą, siekiant ištirti, ar toliau plėtoti hidroenergiją yra ekonomiška.

Išvados

1. Vien tik saulės energijos nepakanka karštam vandeniui ruošti. Būtina vartoti papildomus energijos išteklius.
2. Hidroenergijos panaudojimas sodyboje sėkmingas tuo atveju, jeigu upės debitas ir greitis yra maksimalių reikšmių.
3. Šilumos siurblio gruntiniam kolektoriui įrengti svarbi charakteristika – savitasis šilumos srautas, kuris priklauso nuo grunto tipo.

Literatūra

1. Jablonskis, J.; Tomkevičienė, A. Lietuvos mažosios hidroenergetikos plėtros galimybės, LEI, 2004.
2. Respublikinės statybos normos RSN 156-94 „Statybinė klimatologija“, patvirtintos Lietuvos Respublikos statybos ir urbanistikos ministro 1994 m. kovo 18 d. įsakymu Nr. 76 (Žin., 1994, Nr. 24-394).

Analysis of farm energy supply

Summary

Constantly increasing prices of energy resources in the world during economic crisis, supply of thermal energy issue becomes one of the most important. Not only a variety of organizations, but also individual person deal with. In many places Lithuania has an opportunity to use all types of renewable energy sources. In this article solar energy, selection of ground heat exchanger and use of hydropower were analyzed.

II. BRANDUOLINĖ ENERGETIKA

W7-X įrenginio termohidraulinė analizė nedidelio trūkio aušinimo sistemoje atveju

Tadas Kaliatka

Lietuvos energetikos institutas

Ivadas. Šiuo metu pasaulyje lengvųjų branduolių susijungimo metu išsiskirianti energija – termobranduolinės sintezės energija laikoma viena potencialiausių ateities energijos rūšių. Lengvųjų branduolių susijungimo reakcijų metu gaunamas gerokai didesnis energijos kiekis nei branduolių skilimo metu. 1 kg vandenilio virstant heliu, išskiria ~10 kartų daugiau energijos negu dalijantis 1 kg urano 235. Branduolių skilimo ir sintezės reakcijos atrastos labai panašiu laiku, tačiau sintezės reakcijomis pagrįsti įrenginiai vis dar yra tik eksperimentiniai. Taip yra todėl, kad norint pasiekti efektyvų termobranduolinės sintezės energijos panaudojimą energetikoje, dar reikia išspręsti nemažai fizikos ir inžinerijos problemų. Pagrindinė iš jų - kaip ilgą laiką išlaikyti stabilią aukštos temperatūros ($T > 10^8\text{K}$) plazmą vakuuminiame inde. Baigiamo statyti eksperimentinio termobranduolinės sintezės įrenginio W7-X [1] vienas tikslų kaip tik yra parodyti, kad stelaratoriaus tipo įrenginiai gali būti naudojami siekiant išlaikyti stabilią ir nenutrūkstamą plazmos būseną ne trumpiau kaip pusę valandos.

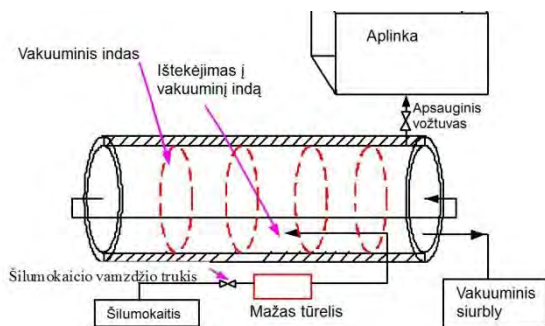
W7-X termobranduolinės sintezės įrenginyje energija (plazmos pavidalu) sukurama vakuuminiame inde. Plazma supermagnetais išlaikoma vakuuminio indo centrinėje dalyje. Termobranduolinės sintezės įrenginiuose gauta energija (šiluma) nuo vakuuminio indo sienelių nuvedama aušinimo sistema. Jos pažeidimo atveju į žemo slėgio vakuuminį indą patektų karštas aukšto slėgio vanduo. Tai laikoma pavojingiausia termobranduolinės sintezės įrenginio avarija [2], jos metu vakuuminiame inde galimas staigus slėgio šuolis, kuris lemtų indo vientisumo pažeidimą. Slėgio šuolis vakuuminiame inde visų pirma priklauso nuo įtekančio vandens kiekio ir jo parametrų. Šiame darbe yra analizuojamas vandens iš aušinimo sistemos patekimo į vakuuminį indą pro nedidelį trūkį atvejis.

Darbo tikslas. RELAP5 programų paketu išnagrinėti W7-X įrenginio aušinimo sistemos vamzdžio dalinį trūkį. Nustatyti kokio dydžio trūkis dar nebūtų pavojingas įrenginio vakuuminiam indui ir apsauginis vožtuvas išliktų neatidarytas.

W7-X įrenginio modelis. RELAP5 programų paketas [3] skirtas analizuoti termohidraulinius procesus. Šiuo paketu, atsižvelgiant į W7-X įrenginio projektuotojų pateiktas schemas [1, 2], sudarytas įrenginio aušinimo sistemos ir vakuuminio indo modelis. Šiame darbe atliekama W7-X įrenginio termohidraulinė analizė nedidelio trūkio aušinimo sistemoje atveju, kai įrenginys yra įkaitinimo („Backing“) režime.

Aušinimo sistemos pradinės sąlygos: vandens temperatūra $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, vandens tankis 907 kg/m^3 , srautas $177\text{ m}^3/\text{h}$, slėgis 10 bar. Sudėtinga stelaratoriaus vakuumi-

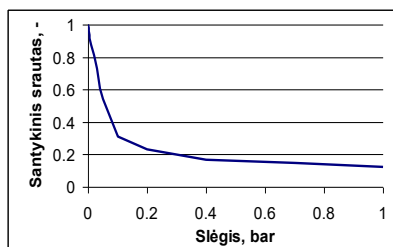
nio indo geometrija RELAP5 p. p. modelyje buvo supaprastinta. Vakuuminis indas sumodeliuotas kaip 6,8 m. ilgio ir 2,016 m. diametro vamzdis, sudalytas į 5 segmentus, o galai sujungti (1 pav.). Modeliuojamo vakuuminio indo paviršiaus plotas ir masė atitinka projektinius duomenis [2]. Atskirai sumodeliuotas mažas, 0,125 m³, tūrelis. Įvykus šilumokaicio vamzdžio trūkiui, šilumnešis pirmiausia įteka į mažą tūrelį, o iš jo į modeliuojamą vakuuminį indą. RELAP5 p. p. turi apribojimus, todėl modelyje slėgis vakuuiniame inde priimamas lygus 0,007 bar (realiame įrenginyje gilus vakuumas). Vakuuminio indo vidinių sienelių plotas 215 m², storis 0,017 m. Sienelės įkaitintos iki 160 °C.



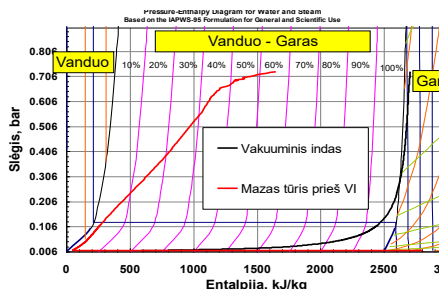
1 pav. Įrenginio W7-X vakuuminio indo modelis

Iš aušinimo sistemos pro pažeistą šilumokaitį šilumnešius patekus į vakuuminį indą, slėgis jame pradeda kilti. Vakuuminis indas nėra atsparus dideliui slėgiui. Tam, kad padidėjęs slėgis nesuardytų vakuuminio indo yra įrengtas apsauginis membraninis vožtuvas. Šis vožtuvas atsidaro kada slėgis vakuuiniame inde pasiekia 1,1 bar slėgį. Atidarius šį vožtuvą garas, susidaręs vakuuiniame inde, išleidžiamas į aplinką ir slėgis vakuuiniame inde turi nukristi iki atmosferinio. Prie vakuuminio indo yra prijungtas vakuuminis siurblys (1 pav.). Šis siurblys taip pat gali būti panaudotas užtikrinant vakuumą vakuuiniame inde, bei gali būti įjungiamas esant nedideliui trūkiui aušinimo sistemoje.

W7-X įrenginyje naudojamo vakuuminio siurblio maksimalus galingumas 240 m³/h, tačiau galingumas priklauso nuo slėgio vakuuiniame inde (2 pav.). Vakuuminio siurblio tūrinis našumas krenta, slėgiui kylant vakuuiniame inde. Tačiau masinis siurblio našumas priklauso nuo oro-garo mišinio tankio vakuuiniame inde. Mažėjant slėgiui vakuuiniame inde oro-garo mišinio tankis taip pat mažėja, kartu sumažėja ir siurblio masinis srautas.



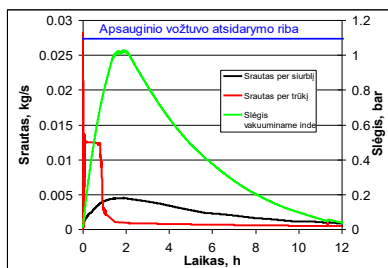
2 pav. Santykinio srauto pro vakuuminį siurblių priklausomumas nuo slėgio vakuuminiame inde



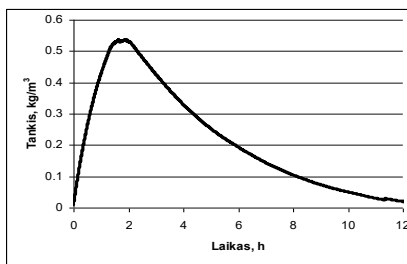
3 pav. h - p diagrama, nedidelio trūkio W7-X įrenginio aušinimo sistemoje skaičiavimo rezultatai

Modeliuojant nedidelį trūkį W7-X įrenginio aušinimo sistemoje buvo įvertinta, kad oro-garo mišinio vakuuminiame inde tankis kinta (apskaičiuojamas RELAP5 p.p.) ir vakuuminis siurblys maksimalią galią pasiekia per 5 s.

Skaičiavimo rezultatai. Sumodeliuotas 1 mm² ploto trūkis. 3 pav. pavaizduota h - p diagrama, šioje diagramoje atsižvelgiant į apskaičiuotas entalpijos ir slėgio reikšmes vakuuminiame inde ir mažame tūryje buvo atidėtos kreivės. Prieš vandeniui iš aušinimo sistemos patenkant į vakuuminį indą jame yra 700 Pa slėgio ir 160 °C tem. oras. Vanduo išteka pirmiausia į mažą tūrį, iš jo į vakuuminį indą ir staigiai garuoja, gaunamas vandens-garo mišinys. Į vakuuminį indą patekęs vandens-garo mišinys vėliau pereina į garą, o mažame tūryje mišinys sausėja.



4 pav. Srautas per trūkį ir vakuuminį siurblių, bei slėgis vakuuminiame inde



4 pav. Tankis vakuuminiame inde

Įtekėjus (~0,028 kg/s) vandeniui iš aušinimo sistemos į vakuuminį indą, slėgis jame kyla. Pasiekus 200 Pa, duodamas signalas stabdyti cirkuliacinį siurblių, užverti aušinimo sistemos įtekėjime esančias automatines sklendes ir paleisti vakuuminį siurblių. Užverus automatines sklendes, srautas per trūkį sumažėja (~0,013 kg/s). Vėliau (~1 val. po trūkio) srautas per trūkį dar sumažėja (~ $8 \cdot 10^{-4}$ kg/s), nes ištuštėja viršutiniai šilumokaičiai, ir dėl slėgio skirtumo vanduo išteka į vakuuminį indą iš

žemiau esančių šilumokaičių. Įvykio pradžioje oro-garo mišinio tankis vakuuminiame inde mažas, tačiau kylant slėgiui didėja ir tankis (4 pav.). Tankis turi tiesioginės įtakos masiniam srautui pro vakuuminį siurblių; kuo didesnis tankis – tuo didesnis masinis srautas. Nors kylant slėgiui vakuuminiame inde vakuuminio siurblio tūrinis našumas mažėja (2 pav.), tačiau didėja tankis (tankiai skiriasi ~100 k. lyginant 0,007 ir maksimalų 1,02 bar slėgį). Jei srautas per siurblių didesnis nei per trūkį, susikaupęs oro-garo mišinys išsiurbiamas ir slėgis vakuuminiame inde krenta.

Išvados

Naudojant RELAP5 programinį paketą atlikta W7-X įrenginio termohidraulinė analizė nedidelio trūkio aušinimo sistemoje atveju. Pagal skaičiavimo rezultatus, įvertinus vakuuminiame inde esančio oro-garo tankio kitimą ir vakuuminio siurblio našumo charakteristikas, nustatyta, kad apsauginis vožtuvas neatsidaro, jei aušinimo sistemos dalinis trūkis ne didesnis nei 1 mm².

Literatūra

1. Hans-Stephan Bosch and the Wendelstein 7-X Team, Wendelstein 7-X, Overview and Status of Construction, a Max-Planck Institut für Plasmaphysik, Branch Institute, Greifswald, Euratom-IPP Association, D-17491 Greifswald, Germany, 2006.
2. Naujoks, D. Initial and Boundary Conditions, Max-Planck Institut für Plasmaphysik, 1-NBF-T0008.0, Greifswald, Germany, 2008.
3. Fletcher, C.D. et. al., “RELAP5/MOD3 code manual user’s guidelines”, Report NUREG/CR-5535, Idaho National Engineering Lab, 1992.

Thermal-hydraulic analysis of W7-X facility in case of small break in cooling system

Summary

Nuclear fusion has the potential to cover a major part of mankind's energy needs under the conditions of ever-increasing population and energy consumption. W7-X is a fusion experimental facility under construction in Germany. The model of W7-X cooling system and vacuum vessel was developed using RELAP5 code. In this article the numerical analysis of partial break of cooling system is presented. During this event, water ingress in vacuum vessel and rises pressure in it. In 1.1 bar pressure safety valve opens and active air/steam mixture releases from vacuum vessel to environment. Calculation results showed that safety valve does not open when the partial break of cooling system is smaller than 1 mm².

Ignalinos AE pastato V1 sistemų išmontavimo alternatyvų neapibrėžtumo analizė

Gintautas Poškas

Kauno technologijos universitetas, Lietuvos energetikos institutas

Įvadas. Ignalinos atominė elektrinė (IAE) 2009 m. gruodžio 31 d. visiškai sustabdė elektros energijos gamybą, ir eksploatacijos nutraukimo procesas tapo pagrindine elektrinės veikla. IAE eksploataavimo nutraukimo procesas apima ir 1-ojo bei 2-ojo RBMK-1500 reaktorių blokų ir jų pagalbinių pastatų nebenaudojamų sistemų įrangos išmontavimą.

Vienas iš pirmojo reaktoriaus bloko pagalbinių sistemų pastatų yra pastatas V1. Tai pakankamai didelis pastatas (tūris ~ 50800 m³), kuriame yra 9 aukštai ir daugiau nei 250 patalpų/kambarių. Šiame pastate sumontuota dalis reaktoriaus pagalbinių sistemų (dalis reaktoriaus dujų kontūro, dujų išmetimų valymo sistema, įvairūs ventiliacijos sistemų komponentai ir kt.), kurios, pradėjus vykdyti IAE eksploatacijos nutraukimo projektus, turės būti išmontuotos. Išmontavimo darbai suskirstyti trimis etapais [1], nes ne visas pastate V1 esančias sistemas galima išmontuoti iš karto. Kai kurios sistemos yra vis dar reikalingos ne tik viso pirmojo bloko saugai užtikrinti, bet ir bus reikalingos išmontavimo ir deaktyvavimo darbų saugai užtikrinti.

Planuojant šių sistemų įrangos išmontavimą, nagrinėjama keletas skirtingų alternatyvų, iš kurių parinkti tinkamiausią dažnai nepakanka alternatyvas lyginti tik vienu aspektu (pvz.: finansiniu). Galutinė kompleksinio projekto baigtis priklauso nuo daugelio kriterijų ir gauta geriausia vieno ar kelių kriterijų reikšmė nereiškia, kad ta alternatyva geriausia, nes kitų kriterijų reikšmės gali būti blogesnės. Sėkmingam alternatyvų parinkimui tikslinga atsižvelgti į įvairius kiekybinius bei kokybinius kriterijus kompleksiskai. Daugiakriteriniam alternatyvų palyginimui gerai tinka daugiakriteriniai sprendimų priėmimo metodai. Taip pat analizuojant daugiakriterinius sprendimus svarbus uždavinys yra ir jautrumo analizė, kurią atliekant siekiama įvertinti, kaip pasikeis galutinis sprendimo rezultatas dėl pradinių duomenų neapibrėžtumo, ir kurie veiksniai (kriterijai) labiausiai lemia rezultato neapibrėžtumą.

Metodika. Duomenų apie pastato V1 įrenginių komponentų fizines ir radiologines charakteristikas, išsidėstymą pastate ir kt. analizės pagrindu buvo suformuotos dvi išmontavimo alternatyvos: A1 – kai atliekama išmontuotų komponentų deaktyvacija (kur tai tikslinga) ir A2 – kai išmontuotų komponentų deaktyvacija neatliekama, o po išmontavimo jie iškart vežami į atitinkamas atliekų saugojimo ar šalinimo vietas [2]. Alternatyvoms analizuoti taikytas vienas iš daugiakriterinės analizės (angl. Multiple Criteria Decision Analysis – MCDA) metodų AHP (angl. Analytic Hierarchy Process) [2]. Pirminiai duomenys apdoroti bei kiekybinių kriterijų reikšmės skirtingoms išmontavimo alternatyvoms apskaičiuotos taikant LEI Branduoli-

nės inžinerijos problemų laboratorijoje sukurta kompiuterinę programą DECRAD [4]. Kriterijų reikšmingumas ir alternatyvos kokybinių kriterijų atžvilgiu įvertinti branduolinės energetikos ekspertų. Kiekybinių kriterijų neapibrėžtumo įtaka alternatyvų santykinę reikšmę įvertinta tikimybinio metodu. Šiame darbe įvesties parametrams apibrėžtos tikimybinių skirstinio funkcijos ir jų charakteristikos, iš jų Monte Karlo metodu sudaryta kiekvieno kiekybinio kriterijaus reikšmių statistinė imtis, atliktas alternatyvų vertinimas naudojant sudarytus kiekybinių kriterijų reikšmių rinkinius ir atlikta rezultato charakteristikų analizė. Reikšmingiausiems kiekybiiniams kriterijams nustatyti taikytos regresinė ir koreliacinė analizės. Parametrų reikšmingumo matais naudoti standartizuoti regresijos koeficientai (SRK) ir palyginimui Pirsono koreliacijos koeficientai (PKK).

Deterministinės analizės rezultatai [2]. Visa įrenginių, kuriuos reikia išmontuoti, masė sudaro ~1283 tonas. 1 ir 2 etapo metu išmontuojamų įrenginių masė sudaro atitinkamai apie 47 % ir 34 % nuo visos V1 pastate esančios įrenginių masės. Neužterštos įrangos masė 3 etapo metu sudaro beveik penktadalį visos išmontuojamos masės, t. y. 19 %. Toliau analizuojami 1 ir 2 etapai, nes 3 etapas susijęs su pastato V1 griovimo projektu ir toliau nebus analizuojamas.

1 etape didžiausią dalį (50 %) sudaro plienas ir nerūdijantis plienas, atitinkamai 38 % ir 22 %. Likusieji komponentai sudaryti iš betono, anglies ir kitų medžiagų. Plienas ir nerūdijantis plienas 2 etape taip pat sudaro didžiąją dalį įrenginių komponentų (78 %). Mišrios medžiagos sudaro 12 %, kitos medžiagos – 10 %.

Pastato V1 komponentų analizė parodė, kad 1 etapo metu 59,9 % išmontuojamų komponentų priklauso A klasės atliekoms, 40 % – 0 klasės ir 0,1 % – B klasės (4.5 pav.). 2 etapo atveju nustatytas labai panašus pasiskirstymas: 62 % – A klasės, 37 % – 0 klasės ir 1 % – B ir F užterštumo klasės komponentai (4.6 pav.).

Alternatyvos A1 1 etapo metu, susidarančių pirminių nebevaldomų (0 klasės) atliekų srauto masė yra beveik du kartus didesnė lyginant su mase alternatyvos A2 atveju, atitinkamai 79 % ir 40 %. Labai mažo aktyvumo trumpaamžių radioaktyviųjų (A klasės) atliekų srauto masė sudaro 6 % ir 45 % nuo bendros atliekų masės atitinkamai, alternatyvos A1 ir A2 atveju;

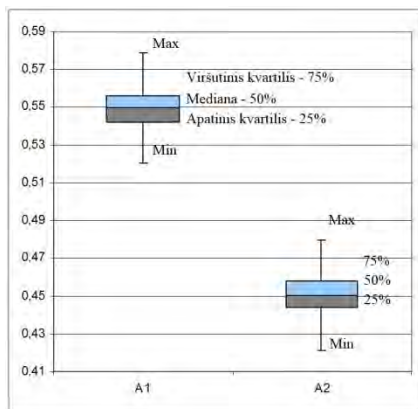
Alternatyvos A1 2 etapo metu 0 klasės atliekų srauto masė taip pat beveik du kartus didesnė nei alternatyvos A2 atveju, atitinkamai 98 % ir 37 %. A klasės atliekų srauto masė sudaro 1 % ir 62 % bendros atliekų masės, atitinkamai alternatyvoms A1 ir A2.

A klasės antrinių atliekų, siunčiamų į LMAA atliekyną, masė nuo bendros A klasės antrinių atliekų masės alternatyvos A2 atveju, yra apie keturis kartus mažesnė (t. y. sudaro tik apie 25 %), palyginus su nustatyta alternatyvos A1 atveju. Rezultatai taip pat parodė, kad alternatyvos A2 atveju, B klasės antrinių atliekų masė (t. y. atliekų, siunčiamų į B3 kompleksą) nuo visos B klasės antrinių atliekų masės palyginti alternatyva A1 yra beveik du kartus mažesnė. Abiejų alternatyvų atveju darbų trukmė, investicijos ir bendros išlaidos skiriasi nežymiai (< 10 %).

Deterministinės alternatyvų analizės metu atlikti skaičiavimai parodė, kad alternatyva A1 (deaktyvacija atliekama) gavo didesnę santykinę reikšmę nei alternatyva A2 (deaktyvacija neatliekama), atitinkamai 0,55 ir 0,45 [5].

Padaryta išvada, kad pagal gautus rezultatus alternatyva A1 yra laikoma tinkamesne, palyginus su alternatyva A2 (atsižvelgus į kiekybinius ir kokybinius kriterijus), todėl ją rekomenduojama pasirinkti įrenginiams išmontuoti iš IAE pastato V1, kai susidaro labai mažo aktyvumo atliekos.

Tikimybinės analizės rezultatai. Kaip minėta, šiame darbe tikimybinio būdu buvo įvertintas nagrinėtų išmontavimo alternatyvų santykinų reikšmių neapibrėžtumas, kuriam įtakos gali turėti kiekybinių kriterijų neapibrėžtumas. Kaip matyti iš 1 pav., tiek alternatyvos A1, tiek alternatyvos A2 atveju santykinė reikšmė dėl kiekybinių kriterijų reikšmių neapibrėžtumo kinta nedidelėse ribose ($\sim \pm 5\%$). Atsižvelgus į santykinų reikšmių kitimo ribas alternatyvų rangavimas nepasikeistų.

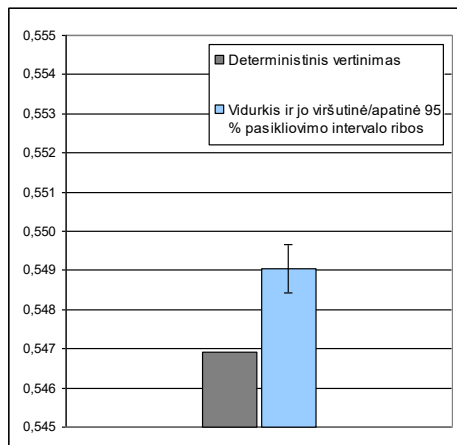


1 pav. Išmontavimo alternatyvų santykinų reikšmių neapibrėžtumo analizės rezultatai (mažiausia ir didžiausia vertės, bei kvartilai)

2 pav. pateiktas geresnės alternatyvos (A1) statistinis vidurkis ir jo 95 % pasiklojimo intervalo ribos. Kaip matyti iš pateiktų rezultatų, tikimybinio vertinimo metu nustatytas reikšmės vidurkis nuo deterministinio vertinimo metu nustatytojo skiriasi labai nežymiai.

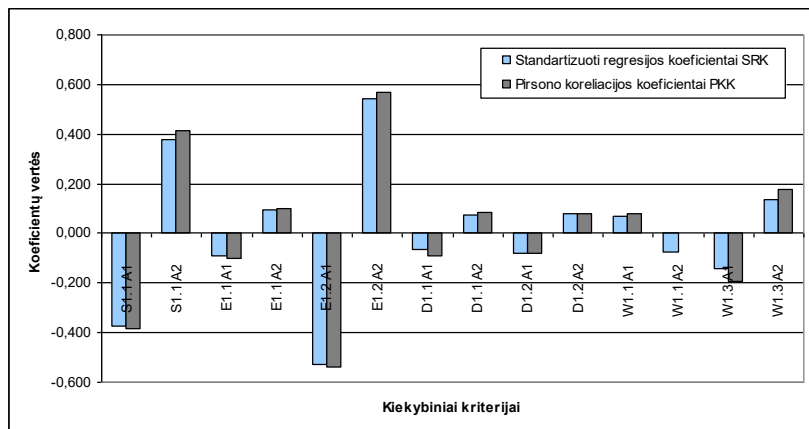
Siekiant nustatyti, kurie kiekybiniai kriterijai turi didžiausią įtaką (svorį) alternatyvų santykinėms reikšmėms, buvo atlikta kiekybinių kriterijų reikšmingumo analizė. Reikšmingų kriterijų matu pasirinkti standartizuoti regresijos koeficientai (SRK), ir palyginimui – Pirsono koreliacijos koeficientai (PKK) (3 pav.).

Analizė parodė, kad regresijos lygties determinacijos koeficientas R^2 yra didelis ($> 0,9$). Tai rodo, kad priklausomumas tarp rezultato ir kiekybinių kriterijų pradinių reikšmių yra stipriai tiesinis, todėl tikslinga taikyti standartizuotus regresijos koeficientus.



2 pav. Alternatyvos A1 santykinės reikšmės deterministinio ir tikimybinio vertinimo (vidurkis ir jo pasikliovimo intervalo ribos) rezultatų palyginimas

Kaip matyti 3 pav., didžiausią įtaką (svorį) analizuojamam rezultatui (alternatyvos A1 santykinė reikšmė) turi tiek alternatyvos A1 kriterijus E1.2 (bendros išlaidos), tiek alternatyvos A2 tas pats kriterijus E1.2. Pagal savo absoliučią vertę abu šie kriterijai yra vienodai reikšmingi, tačiau alternatyvos A1 kriterijus E1.2 turi neigiamą ryšį su alternatyvos A1 santybine reikšme, t. y. didėjant kriterijui (didėjant išlaidoms) nagrinėjama alternatyva A1 praranda reikšmingumą alternatyvos A2 naudai, o didėjant alternatyvos A2 atveju patiriamoms išlaidoms (kriterijus E1.2), padidėja nagrinėjamosios alternatyvos A1 reikšmingumas. Pagal gautus rezultatus alternatyvos A1 santykinė reikšmė svarbūs ir kriterijai susiję su radiologine darbuotojų sauga (kriterijus S1.1) kiekvienos iš nagrinėtų alternatyvų atveju. Alternatyvos A1 santykinės reikšmės ir šios alternatyvos atveju galimos darbuotojų apšvitos ryšys neigiamas, rodantis, kad didėjant šiam kriterijui mažėja nagrinėjamos alternatyvos reikšmingumas ir palankesnė tampa antroji alternatyva. Alternatyvos A2 atveju gauti analogiški rezultatai, išskyrus tai, kad neigiamas ryšys yra tarp alternatyvos A2 santykinės reikšmės ir šios alternatyvos kriterijaus E1.2 bei S1.1. Apibendrinant galima teigti, kad nagrinėtų dviejų išmontavimo alternatyvų santykinės reikšmės neapibrėžtumui didžiausios įtakos turi su radiologine sauga ir bendromis išlaidoms susiję duomenys (kriterijai). Reikšmingiausi kriterijai nustatyti tie patys, tiek pagal standartizuotus regresijos koeficientus, tiek ir pagal Pirsono koreliacijos koeficientus.



3 pav. Tikimybinės jautrumo analizės rezultatai

Išvados

Atlikus įrenginių komponentų išmontavimo alternatyvų neapibrėžtumo analizę IAE pastate V1 1 ir 2 etapų metu galima padaryti tokias išvadas:

1. Dėl kiekybinių kriterijų neapibrėžtumo tikimybinio būdu įvertintu išmontavimo alternatyvų santykinė reikšmė kinta nedidelėse ribose ($\sim \pm 5\%$), todėl alternatyvų rangavimas dėl šio neapibrėžtumo nesikeičia.
2. Tikimybinė jautrumo analizė parodė, kad alternatyvų santykinė reikšmė didžiausios įtakos turi bendrų projekto išlaidų ir radiologinės darbuotojų saugos neapibrėžtumas.

Literatūra

1. Ignalinos AE V1 bloko įrangos dezaktyvavimas ir išmontavimas. Poveikio aplinkai vertinimo ataskaita. Babcock Nuclear Limited, LEI, 2010.
2. Sirvydas A., Poškas G., Šimonis A., Poškas P. Daugiakriterinės analizės metodo taikymas parenkant Ignalinos AE V1 pastato įrengimų išmontavimo būdą. 1. Kiekybinių kriterijų vertinimas. *Energetika*. ISSN 0235-7208. 2011. T. 57, Nr. 4, P. 195–206.
3. Saaty T. L. Fundamentals of Decision-Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh, PA, USA: RWS Publications, 2000. 478 p. ISBN 0-9620317-6-3.
4. The Software DECRAD. Validation Report, TA-14-13.10. LEI, Nuclear engineering laboratory, 2010.
5. Poškas G., Poškas P., Sirvydas A., Šimonis A. Daugiakriterinės analizės metodo taikymas parenkant Ignalinos AE V1 pastato įrengimų išmontavimo būdą.

2. Daugiakriterinė analizės metodika ir jos taikymo rezultatai. *Energetika*. ISSN 0235-7208. 2012. T. 58, Nr. 2, P. 86–96.

Uncertainty analysis of dismantling alternatives in building V1 at Ignalina NPP

Summary

After situation analysis in Building V1 at Ignalina NPP and collection of the primary information related to the components' physical and radiological characteristics, location and other data, two alternatives for radwaste management during dismantling were formulated and evaluated: the first, when the decontamination of dismantled components is performed (where it is reasonable) and the second one, when no decontamination of dismantled components is performed and after dismantling the components are routed to appropriate waste storage or disposal sites. To select the preferable alternative, MCDA method – AHP (Analytic Hierarchy Process) was applied. Hierarchical list of decision criteria, necessary for assessment of alternatives performance, were formulated. Qualitative decision criteria were evaluated using expert judgment. Quantitative decision criteria for these alternatives were analyzed using software DECRA, which was developed at Lithuanian Energy Institute Nuclear Engineering Laboratory. The uncertainties of quantitative criterion impact to the alternatives relative weight have been evaluated using probabilistic method. To determine most significant quantitative criteria the correlation and regression analysis were applied. The results have shown that the first alternative (decontamination is performed) is better than the second one (no decontamination is performed).

RBMK-1500 reaktoriaus valdymo strypo kanalo aušinimo putų srautu modeliavimas

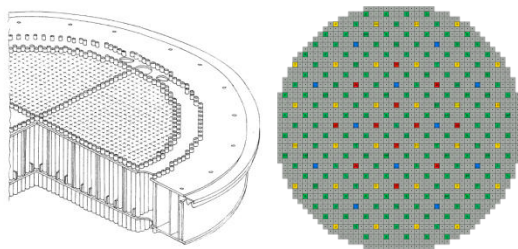
Marius Trepulis

Kauno technologijos universitetas

Tekančio putų srauto šilumos mainai priverstinės konvekcijos atveju, nors ir esant laminariniam tekėjimui, yra komplikuotas procesas, kurį sunku aprašyti analitiškai. Patikimiausias tokios problemos sprendimo būdas yra skaitmeninis modelis, patvirtintas eksperimentu. Eksperimentiškai tirtas vertikalaus cilindro formos vamzdžio vidinio paviršiaus šilumos atidavimas į viršų nukreiptam pereinamojo- turbulentinio režimo putų srautui. Skaitiniam modeliavimui naudotas ANSYS CFX programinis paketas. Eksperimentiškai nustatytas šilumos atidavimo koeficiento priklausomumas nuo putų srauto greičio bei dujųingumo.

Šio darbo tikslas yra naudojantis gautu patvirtintu putų skaitmeniniu modeliu patikrinti galimybę RBMK-1500 branduolinio reaktoriaus valdymo strypų kanalus aušinti putomis. Nors visi tokio tipo reaktoriai (sumontuoti Ignalinos AE) jau uždaryti, tačiau yra dar 11 veikiančių panašios konstrukcijos reaktorių.

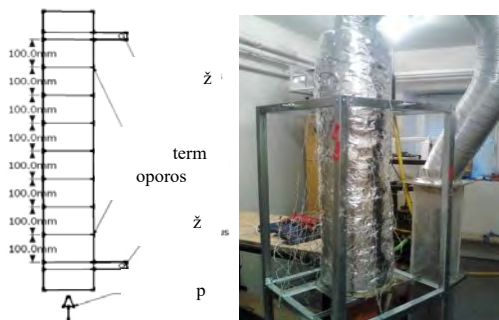
RBMK-1500 reaktoriaus. RBMK-1500 reaktoriai, kurie anksčiau veikė Ignalinos AE aikštelėje, yra daugiakanaliai verdančiojo vandens branduoliniai reaktoriai su grafito lėtikliu. Tokio reaktoriaus aktyviąją zoną sudaro 2488 grafito kolonos, kuriose vertikaliai išgręžtos angos [1]. Šios angos naudojamos kuro kanalams, valdymo strypų kanalams ir dar keletui instrumentų, susijusių su reaktoriaus aktyviąja zona. Maždaug 95 % energijos išskiriama kuro rinklėse, o likę 5 % grafito kolonose neutronų lėėjimo ir gama spindulių absorbcijos metu. Specifiška RBMK reaktoriaus savybė yra ta, kad valdymo strypams naudojami atskiri kanalai, nesusiję su kuro strypų kanalais. Kanaluose su valdymo strypais slėgis yra visada artimas atmosferiniam.



1. pav. RBMK-1500 reaktoriaus aktyvioji zona ir valdymo strypų kanalų (CPS) išsidėstymas

CPS (valdymo strypų) kanalų aušinimas turi nepriklausomą vandens kontūrą su atskirais siurbliais ir šilumokaičiais. Vykstant aušinimo procesui, vanduo patenka į kanalą apie 40 °C, o ištekdamas pasiekia apie 70 °C temperatūrą. Reaktoriaus veikimo metu, neatsižvelgiant į valdymo strypo padėtį, kanalo vidus būna užpildytas vandeniu. Tačiau po Černobylio AE avarijos, užpildymas vandeniu buvo pakeistas į aušinimą vandens plėvele. Tai leidžia, avarijos atveju, valdymo strypui greičiau judėti kanalu. Dar viena alternatyva vandens plėvelei galėtų būti valdymo kanalo aušinimas putomis. Lengvai ardoma putų struktūra taip pat galėtų užtikrinti laisvą strypo judėjimą kanale.

Eksperimentas. 2 pav. pavaizduotas eksperimentinio įrenginio išilginis skerspjūvis. Pati skaičiavimo metodika labai panaši į jau taikytą [2], kai buvo tyrinėjami šilumos mainai mini kanaluose, tik šiame darbe yra naudojamas vienas kanalas ir jis šildomas tiesiogiai naudojant elektros srovę.



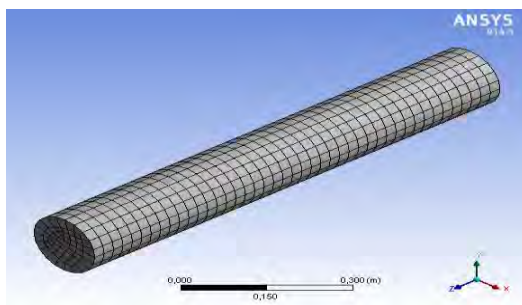
2 pav. Eksperimentinio įrenginio išilginis skerspjūvis ir eksperimentinis įrenginys

Cilindro formos kanalas vertikaliajoje padėtyje [3] kaitinamas transformatoriumi, kurio kabeliai prie kaitinamo cilindro pritvirtinti variniais žiedais. Siekiant užtikrinti tolygų cilindro kaitimą, žiedai buvo prilituoti. Pats cilindras padarytas iš nerūdijančio plieno 0,5 mm skardos, o aktyvus kaitinamo paviršiaus ilgis sudarė 80 cm. Visas cilindro išorinis paviršius buvo padengtas akmens vata. Pagal putų tekėjimo užimamą perimetrą, kanalas yra 15 cm hidraulinio diametro.

Putų įėjimo ir išėjimo temperatūros matuojamos naudojant E tipo termoporas. Siekiant išmatuoti kaitinamo cilindro sienelės temperatūras atskiruose skerspjūviuose, prie paviršiaus buvo prilituotos tokios pat E tipo termoporos. Kiekvienas ašinis skerspjūvis buvo matuojamas keturiomis termoporomis, kurių vidurkis taikytas skaičiavimams kaip tikroji temperatūra. Kiekvieno ašinio skerspjūvio termoporų paklaida visiems eksperimentams skyrėsi ne daugiau ± 0.2 °C. Temperatūra matuota septyniuose skerspjūviuose, pradedant nuo įėjimo 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm, 60 cm ir 70 cm atstumais. Kaip minėta Warrier et al. (2002) tyrime [2], yra

neįmanoma pamatuoti fluído temperatūros tiesiogiai. Termoporos liedsamos kaitinamą sienelę, rodo aukštesnę temperatūrą, nei yra iš tikrųjų. Todėl tyrime fluído temperatūra apskaičiuojama taikant energijos balanso lygtį atskiram skerspjūviui. Visų termoporų parodymai fiksuojami 1 s intervalu su Picotech TC 08 duomenų kaupimo įrenginiu ir perduodami į kompiuterį.

Ekspimento skaitmeninis modelis naudojantis ANSYS CFX. Baigtinių tūrių metodas, tai toks skaičiavimo metodas, kai išreiškiamos ir įvertinamos dalinės diferencialinės lygtys algebrinių lygčių pavidalu [4]. Panašiai kaip ir baigtinių skirtumų ar baigtinių elementų metode, baigtinių tūrių metode reikšmės yra gaunamos geometrijos tinklelio atskirose vietose. „Baigtinių tūrių“ – reiškia maža apimtimi aplink kiekvieną geometrijos tinklelio mazgo tašką. Kitas baigtinių tūrių metodo privalumas yra tai, kad jį lengva suformuluoti nestruktūriniam geometrijos tinkleliui, kaip pavaizduota 3 pav. Šis metodas taikomas daugelyje programinių paketų, skirtų modeliuoti skysčių dinamiką.



3 pav. Skaitinei analizei atlikti suformuotas geometrijos tinklelis

Šiame darbe pasirinktas sprendimo priartėjimo būdas, kai formuojamas dvifazis srautas. Putos yra aprašomos kaip terpė sudaryta iš atskirų fazių, tirpalo ir oro mišinio.

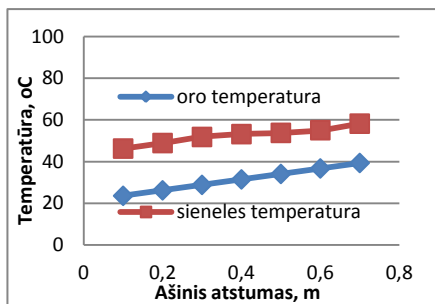
Gauti skaitmeninio modeliavimo rezultatai pavaizduoti 4, 5 paveikslėliuose. Kadangi eksperimentinio stendo tinkamumas patikrintas naudojant orą, tai pirmiausiai buvo parengtas skaitinis modelis atvejui, kai kaitinamas kanalas aušinamas oro srautu. Modeliavimo rezultatai pateikti 4b pav. Nesunku pastebėti, kad oro temperatūra kinta ne tikrai išilgai kanalo, bet ir yra skirtinga įvairiose skerspjūvio vietose. Siekiant apskaičiuoti vidutinę teorinę iš kanalo ištekančio oro temperatūrą, būtina žinoti šilumos nuostolius į aplinką. Nuostoliai randami iš energijos balanso lygties:

$$q_{kanalo} = m_{oro} \times c_{p,oro} (T_{oro,ištekėjimo} - T_{oro,įtekėjimo}) \quad (1)$$

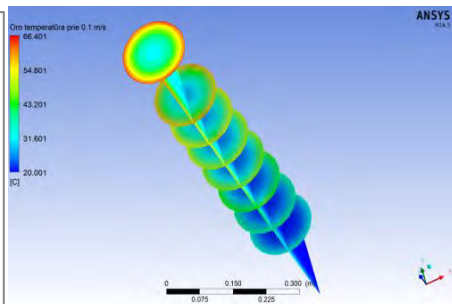
$$q_{nuostoliai} = q_{bendra} - q_{kanalo} \quad (2)$$

Eksperimento (4a pav.) ir modeliavimo (4a pav.) oro srauto išėjimo iš kanalo vidutinės temperatūros vertės skiriasi ne daugiau 3 °C (46 °C ir 43 °C), kas atitinka mažesnę nei 7 % nuokrypį, todėl galima teigti, kad, modeliuojant putų srautą, rezultatų patikimumas turėtų būti taip pat geras.

Kadangi kanalo sienelės temperatūra kinta išilgai srauto (4a pav.), tai pradinėmis modeliavimo sąlygomis naudota ne sienelės temperatūra, o kanalo paviršiaus plotui tenkantis šilumos srautas.



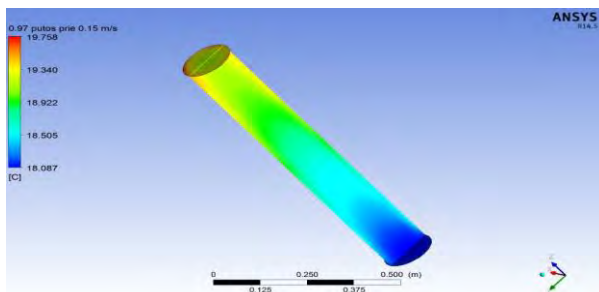
a)



b)

4 pav. Oro temperatūros kitimas išilgai kanalo: a) eksperimento metu; b) modeliuojant

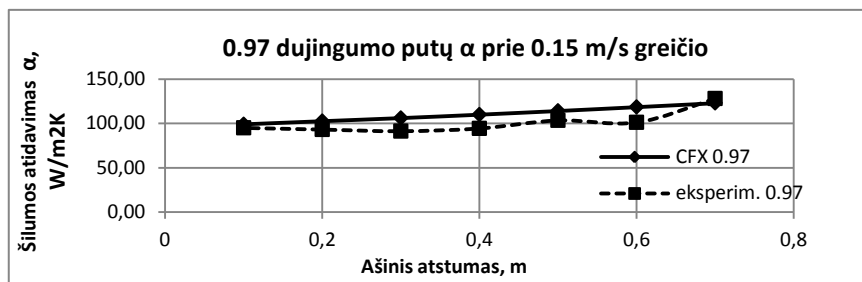
Išitiktinus skaitinio modeliavimo rezultatų patikimumu tuo atveju, kai kanalas aušinamas oru, buvo sudarytas putų, kurių tūrinis debitinis dujingumas 0.97, srauto temperatūros kitimo, atsižvelgiant į srauto greitį, skaitinis modelis. Modeliavimo rezultatai pateikti 5 pav. Grafinė medžiaga rodo, kad putų srauto temperatūros profilis kinta išilgai kaitinamo kanalo.



5 pav. Putų temperatūros kitimas išilgai kanalo (putų srauto greitis 0,15 m/s)

Be to, temperatūros kitimo profilis priklauso nuo putų srauto greičio. Kadangi eksperimentinio stendo ilgio ir skersmens santykis yra sąlyginai mažas ($80/15 = 5,33$), tai galima teigti, kad nusistovėjęs temperatūrinis režimas pasiekiamas tikrai eksperimentinio kanalo gale tuo atveju, kai putų srauto greitis siekia 0,2 m/s.

Eksperimento ir modeliavimo rezultatų palyginimas. Šilumos atidavimo koeficiento ašiniuose skerspjuvčiuose didėjimą (6 pav.), tostant nuo putų iškėlimo į kanalą vietos, galima paaiškinti tuo, kad putos, aušindamos kaitinamą paviršių ir kildamos į viršų, šyla. Sumažėjęs temperatūrų skirtumas tarp kanalo sienelės ir putų turi tiesioginės įtakos šilumos atidavimo koeficiento didėjimui.



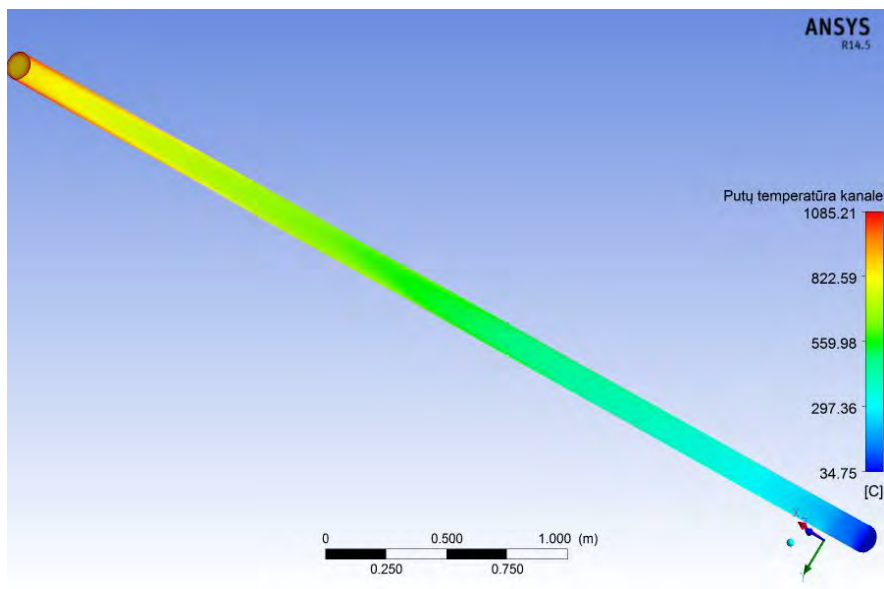
6 pav. Vidutinio putų šilumos atidavimo koeficiento kitimas išilgai kanalo ašiniuose skerspjuvčiuose

Eksperimentinių ir modeliavimo rezultatų skirtumą galima paaiškinti tuo, kad modeliuojant priimama, jog kaitinamas cilindrinis paviršius yra vienodos pastovios temperatūros. Tačiau eksperimentai parodė, kad ši temperatūra priklauso nuo srauto greičio, be to, kinta išilgai putų kanalo (pavyzdžiui, esant 0,15 m/s greičiui, temperatūros nuokrypis atskiruose skerspjuvčiuose siekė 0,6 °C). Taip pat tenka pastebėti, kad eksperimentiškai nustatytas ašinių skerspjuvių vidutinis šilumos atidavimo koeficientas, kuris randamas aritmetiniu vidurkiu iš 4 termoporų, yra apie 10 W/(m²K) mažesnis už gautą skaitiniame modelyje, nes modelyje nebuvo vertinamas tirpalo drenavimasis iš putų. Kaip matyti iš ankstesnių darbų [5], tirpalo drenavimasis iš putų didina tikrąjį putų dujingumą. Tirpalo drenažas didina putų dujingumą, todėl prastėja aušinimo sąlygos, šilumos atidavimo koeficientas krinta, didėja temperatūrų skirtumas tarp sienelės ir putų. Skaitiniame modelyje įvertinus drenažo procesą modeliavimo rezultatai priartėtų prie eksperimentinių rezultatų.

Putų tekėjimo parametrų radimas valdymo strypo (CPS) kanale naudojantis skaitmeniniu modeliu. Duomenys modeliavimui buvo naudojami priimant, kad RBMK 1500 reaktoriaus išskiriama galia yra 4000 MW. Reaktoriaus šerdis sudaryta iš 2488 grafito kolonų, iš kurių 211 yra su valdymo strypais. Vidutiniškai

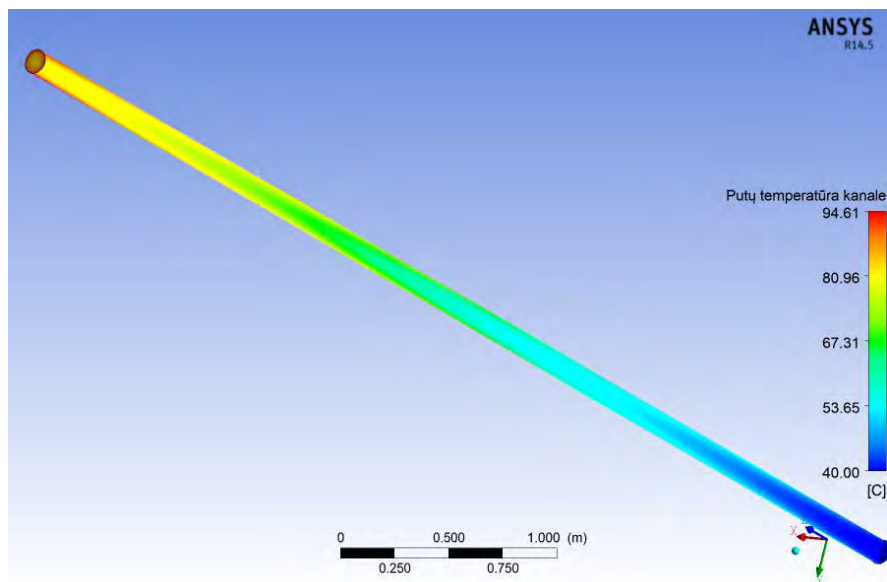
5 % iš visos reaktoriaus generuojamos šilumos yra išskiriama grafito kolonose. Skaičiavimuose priimama, kad vienai grafito kolonai tada tenka apie 80 kW šilumos. Valdymo kanalas grafito kolonoje yra 7 m ilgio ir 114 mm skersmens. Bendras kanalo sienelės plotas $2,50572 \text{ m}^2$.

7 pav. pavaizduotas su CFX programiniu paketu gautas temperatūros profilis kanale. Pirmiausia modeliavimui taikyti tokie patys putų dujingumo ir greičio parametrai, kaip ir eksperimente [3]. Pradinėmis sąlygomis užduota 20°C putų įėjimo temperatūra ir 0.3 m/s greitis. Kaip matyti pav., vidutinė išėjimo putų temperatūra pasiekia $923,9^\circ\text{C}$, tai reiškia, jog esant tokiai temperatūrai putų struktūra yra suirus. Dėl mažo putų greičio ir didelio šilumos srauto tenkančio kanalui, putų vidutinė temperatūra įėjimo į kanalą vietoje iš karto pasiekia $42,73^\circ\text{C}$, nors pradinėmis sąlygomis užduodama 20°C . Iš gautų rezultatų galima teigti, jog eksperimentiškai tirtų putų greičiai ir dujingumai netinka naudoti RBMK valdymo strypo kanalui aušinti.



7 pav. 0,96 dujingumo putų temperatūros profilis RBMK valdymo kanale esant 0,3 m/s greičiui

Toliau (8 pav.) buvo padidintas putų tekėjimo greitis ir įėjimo temperatūra pakelta iki 40°C . Nes realiomis sąlygomis valdymo strypo kanalo vandens įėjimo temperatūra yra apie 40°C , o išėjimo apie 70°C . Putų dujingumas paliktas toks pats – 0,96. Programiniu paketu gauta įėjimo į kanalą vidutinė temperatūra tik truputį viršijo užsiduotą ir buvo $40,75^\circ\text{C}$.



8 pav. 0,96 dujingumo putų temperatūros profilis RBMK valdymo kanale esant 1 m/s greičiui

Išėjimo iš kanalo didžiausia temperatūra prie sienelės kraštų neviršija 100 °C, o vidutinė viso skerspjūvio pasiekia 87,38 °C, todėl galima teigti, jog putų struktūra išlieka nesuirusi ir toks valdymo strypo kanalo aušinimas yra galimas.

Išvados

1. Programiniu paketu ANSYS CFX 14.5 sudarytas dvifazio makro putų srauto bei vertikalios cilindrinio kanalo vidinės sienelės šilumos atidavimo kanalu aukštyn tekančiam putų srautui skaitinis modelis. Modeliavimo metu nustatyta putų srauto temperatūra bei šilumos atidavimo koeficiento vertės gerai atitiko eksperimentinio tyrimo rezultatus, todėl galima teigti, kad šis programinis paketas yra tinkamas modeliuoti putų srautą bei cilindrinio paviršiaus šilumos atidavimą putų srautui.
2. Putų pritaikymas RBMK-1500 valdymo strypų kanalų aušinimui yra galimas, tačiau reikia didesnių putų srauto greičių arba reikia naudoti mažesnio dujingumo putas nei tas, su kuriomis buvo atliekami eksperimentiniai tyrimai.
3. Modeliuojant didelio dujingumo putas, geriausias modeliavimo rezultatų atitikimas su eksperimentu gautas tuo atveju, kai skaitmeniniame modelyje putos aprašomos kaip niutoninis, dvifazis nehomogeninis srautas.

Literatūra

1. Almenas K., Kaliatka A., and Ušpuras E., Ignalina RBMK-1500. A Source Book, Extended and Updated Version, Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Lithuania, 1998.
2. Warrier G.R., Dhir V.K., Momda L.A. Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels. *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 2002, Nr. 26, P. 53–64.
3. Trepulis M., Macro foam convective heat transfer in vertical cylindrical tube, *CYSENI 2013*, May 29-31, Kaunas, Lithuania ISSN 1822-7554
4. Leveque, R.J., Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems. Cambridge University, 2002. TORO, E.F., 1999. The Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics.
5. Gyllys M. Pasvirusio plokščio paviršiaus aušinimas dvifaziu putų srautu. *Energetika*. 2012. T. 58. Nr. 4. P. 219–230

Numerical simulation of foam flow through RBMK-1500 Control and protection channel

Summary

The foam flow phenomenon on the forced convection, even with laminar flow, is complex and hard to develop analytically. Only key to the problem is experimental results and numerical solution. Heat transfer coefficient 'h' is very important parameter because it determines the rate of heat transfer. This paper uses two methods to determine this parameter, experiment and CFD simulation. Experiment was made for transient-turbulent convective heat transfer of macro foam in vertical cylindrical tube. CFD simulation in CFX was made and the experimental results have proven to be very useful for the validation of CFD calculations of foam flow through a heated cylindrical tube

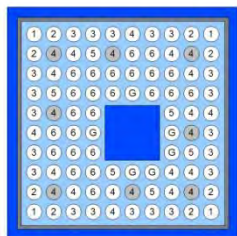
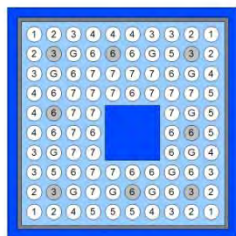
After the numerical simulation proved the experimental results, RBMK-1500 control and protection channel cooling with macro foam was modeled.

Doplerio reaktyvumo koeficiento tyrimas inovatyvioje BWR kuro rinklėje

Andrius Slavickas, Raimondas Pabarčius
Lietuvos energetikos institutas

Panaudoto branduolinio kuro (PBK) tvarkymas yra vienas branduolinės energetikos iššūkių. PBK kiekiui sumažinti vienas būdų yra kuro įsodrinimo daliosiomis medžiagomis padidinimas. Kitas būdas yra PBK perdirdimas, išskiriant Pu izotopus, ir jų pakartotinis naudojimas aktyvioje zonoje mišrių oksidų (MOX) kuro pavidalu. PBK perdirdimas ir pakartotinis naudojimas aktyviojoje zonoje yra paplitusi praktika, todėl šiame darbe tirtos šiuolaikinės ir inovatyvios kuro rinklės, buvo įkrautos ne tik vien urano, bet ir MOX kuru.

Doplerio, arba kuro temperatūrinis, reaktyvumo koeficientas (DRK) apibrėžia reaktyvumo pokytį, tenkantį vienetiniam kuro temperatūros pokyčiui. Kadangi, reaktyvumo ir galios atsakas į kuro temperatūros pokyčius yra staigus, tai analizuojant branduolinio kuro rinkles, DRK yra svarbi neutroninė – fizikinė charakteristika, įvertinanti reaktoriaus savireguliaciją. Šio darbo tikslas – DRK tyrimas inovatyvioje BWR tipo reaktoriaus kuro rinklėje išdegant kurui.



Kiekis	Įsodrinimas ^{235}U
1	4
2	8
3	12
4	10
5	8
6	19
7	19

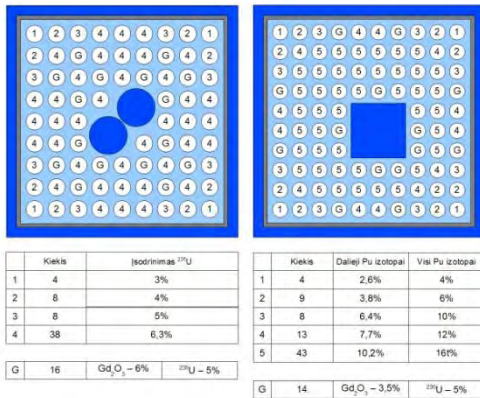
G	6	Gd ₂ O ₃ – 3%	^{235}U – 4%
---	---	-------------------------------------	-----------------------

Kiekis	Dalies Pu izotopai	Visi Pu izotopai
1	4	1,6%
2	8	2,3%
3	20	3,1%
4	23	4,0%
5	6	4,5%
6	24	6,3%

G	6	Gd ₂ O ₃ – 1,5%	^{235}U – 3,95%
---	---	---------------------------------------	--------------------------

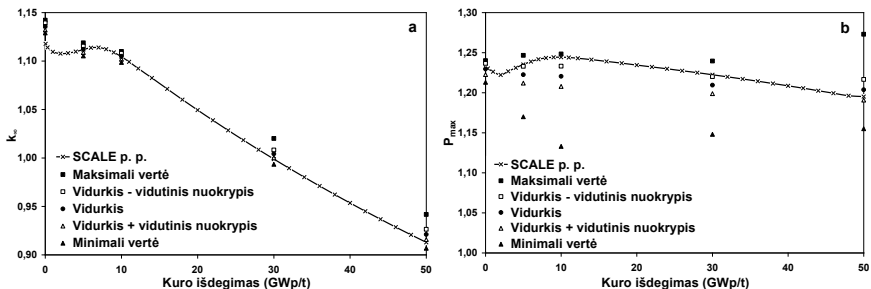
1 pav. Šiuolaikinės BWR kuro rinklės, pakrautos urano (dešinėje) ir MOX (kairėje) kuru, skerspjūviai

Doplerio reaktyvumo koeficientas inovatyviai BWR kuro rinklei buvo tyrinėtas lyginant koeficiento vertes su vertėmis, apskaičiuotomis šiuolaikinei BWR kuro rinklei. Šiuolaikinės BWR kuro rinklės (kompanijos „Areva“ gaminamos ATRIUM-10 rinklės), pakrautos urano ir MOX kuru, skerspjūviai pateikti 1 pav. Rinklės su urano kuru vidutinis įsodrinimas U-235 izotopu yra 3,7 %, maksimalus kuro celės įsodrinimas ne didesnis ~5 %. MOX kuro rinklės įsodrinimas daliaisiais Pu izotopais parinktas toks, kad rinklės reaktyvumas ir atidirbusios rinklės išdegimas (50 GWp/t) būtų tolygūs rinklei, pakrautai urano kuru. Rinklės su MOX kuru vidutinis įsodrinimas daliaisiais Pu izotopais yra ~4,2 %.



2 pav. Inovatyvios BWR kuro rinklės, pakrautos urano (dešinėje) ir MOX (kairėje) kuru, skerspjūviai

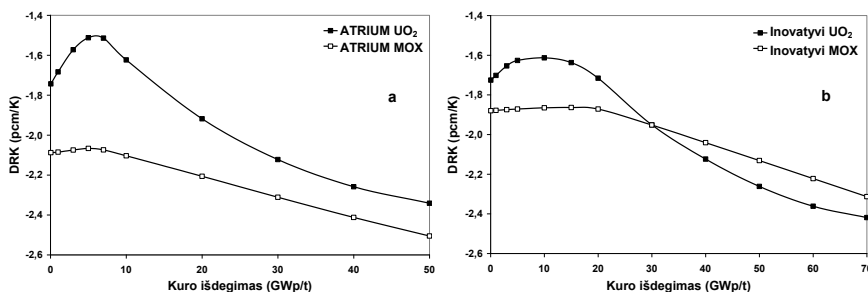
busios kuro rinklės išdegimas yra didesnis – 70 GWp/t, palyginus su 50 GWp/t šiuolaikinėse rinklėse.



3 pav. Neutronų daugėjimo koeficiento k_{∞} (a) ir galios pasiskirstymo faktoriaus $P_{\max}$ (b) verčių palyginimas su palyginamųjų skaičiavimų rezultatais

Šiame tyrime naudotos metodikos ir SCALE programų paketo tinkamumas neutroninei – fizikinei charakteristikų analizei buvo patikrinti palyginus gautas neutronines – fizikines charakteristikas su palyginamųjų skaičiavimų rezultatais. Palyginamųjų skaičiavimų [3] metu buvo analizuojamos ATRIUM-10 rinklės su MOX kuru neutroninės – fizikinės charakteristikos. Neutronų daugėjimo koeficiento k_{∞} ir galios pasiskirstymo faktoriaus $P_{\max}$ verčių palyginimas pateiktas 3 pav. Rezultatai, gauti taikant SCALE programų paketą, patenka tarp palyginamųjų skaičiavimų da-

lyvių rezultatų, todėl buvo nuspręsta, kad metodika taikyta ATRIUM-10 rinklei su MOX kuru, yra taikytina ir kitų rinklių tyrimams.



4 pav. DRK verčių kitimas išdegant šiuolaikinėms (a) ir inovatyvioms (b) BWR kuro rinklėms, pakrautoms urano ir MOX kuru

Šiame darbe DRK buvo apskaičiuotas įvertinant reaktyvumo skirtumą kuro temperatūrai pakitus nuo 900 K iki 1800 K, t. y. kuro temperatūrai padidėjus nuo vidutinės kuro tabletės temperatūros iki apvalkalo lydimosi temperatūros. DRK vertė apskaičiuota pagal formulę:

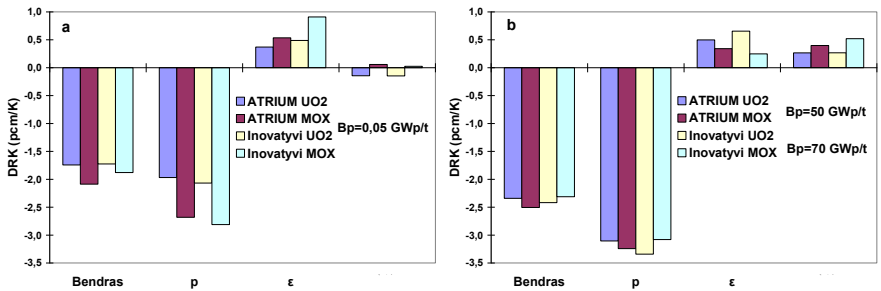
$$\alpha_{DRK} = \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \cdot 10^{-5}. \quad (1)$$

DRK verčių kitimas išdegant inovatyvioms ir šiuolaikinėms BWR kuro rinklėms, pakrautoms urano ir MOX kuru, pateiktas 4 pav. DRK vertės kuro išdegimo intervalo pradžioje didėja, kai likusiame intervale – mažėja. Toks DRK kitimo pobūdis gali būti paaiškintas išdegančio sugėriklio gadoliniu, kurio stiprios absorbcinės savybės pasireiškia būtent intervalo pradžioje, įtaka. DRK vertės apskaičiuotos išdegimo intervalo pradžioje rinklėms, pakrautoms MOX kuru yra didesnės, nei vertės apskaičiuotos rinklėms, pakrautoms urano kuru. Urano ir MOX kuru pakrautoms rinklėms išdegant, DRK mažėjimo sparta skirtinga.

Siekiant paaiškinti šiuos skirtumus (urano/MOX kuro, šiuolaikinių/inovatyvių rinklių) buvo atliktas DRK išskaidymas į atskiras sudedamąsias dalis. Pritaikius neutronų daugėjimo koeficiento išraišką (2) DRK galime apskaičiuoti pagal (3) išraišką, kuri įvertina kiekvieno dauginamojo indėlį bendram Doplerio efektui. Šiuo tyrimo metu neutronų padaugėjimo dėl šiluminių neutronų įtakos koeficientas (η) ir šiluminio panaudojimo koeficientas (f) buvo sujungti į vieną dauginamąjį, kuris nusako kiek naujų neutronų yra generuojama iš vieno šiluminio neutrono.

$$k_{\infty} = \varepsilon \cdot p \cdot \eta \cdot f \quad (2)$$

$$\alpha_{DRK} = \frac{\partial \rho}{\partial T} = \frac{1}{k_{\infty} \cdot \epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial T} + \frac{1}{k_{\infty} \cdot p} \cdot \frac{\partial p}{\partial T} + \frac{1}{k_{\infty} \cdot \eta \cdot f} \cdot \frac{\partial \eta \cdot f}{\partial T}. \quad (3)$$



5 pav. DRK išskaidymas kuro išdegimo pradžioje (a) ir pabaigoje (b)

DRK verčių išskaidymas į atskiras sudedamąsias vertes pateiktas 5 pav. Iš pateikto paveikslėlio matyti, kad reaktyvumo sumažėjimas padidėjus temperatūrai daugiausia yra nulemtas tikimybės išvengti rezonansinio pagavimo sumažėjimo (p). Šio 4 dauginamųjų formulės nario sumažėjimas, padidėjus temperatūrai, paaiškinamas Doplerio efektu, t. y. padidėjus kuro temperatūrai dėl paplatėjusių rezonansinių skerspjūvių padidėja neutronų sugėrimas, todėl mažiau neutronų yra sulėtinama iki šiluminių neutronų energijos lygio. Padidėjęs sparčiojo dalijimosi faktorius (ε) tik nežymiai atsveria padidėjusį rezonansinį sugėrimą. Sparčiojo dalijimosi faktorius išauga, nes padidėjus rezonansiniam neutronų sugėrimui, sumažėja šiluminių neutronų ir jų įtaka dalijimosi reakcijoms, todėl atitinkamai išauga dalijimosi reakcijų, kurias inicijuoja greitieji neutronai, dalis.

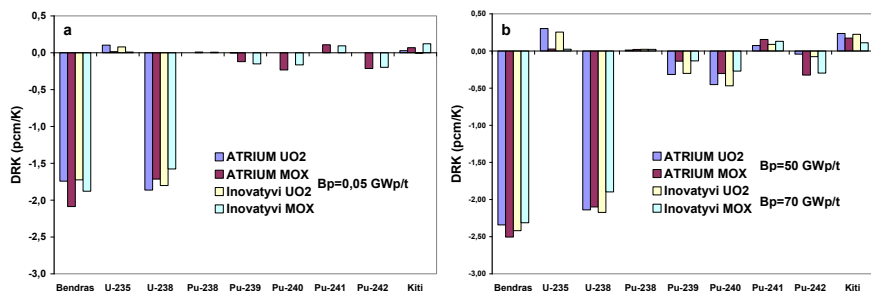
Didesnėms absoliučioms DRK vėrtėms rinklėse su MOX kuru įtakos turi didesnis tikimybės išvengti rezonansinio pagavimo sumažėjimas, padidėjus kuro temperatūrai. Doplerio efektas atidirbusiose rinklėse (5b pav.) yra didesnis nei šviežioje rinklėse (5a. pav.), šį DRK sumažėjimą išdegant kurui nulemia p dedamosios padidėjimas.

Taip pat DRK vėrtės buvo išskaidytos į atskiras sudedamąsias pagal kuro izotopinę sudėtį. Šiuo atveju neutronų daugėjimo faktorius išreiškiamas per neutronų susidarymo ir neutronų absorbcijos dažnius, įvertintus atskiriems nuklidams (4). Kiekvieno sudedamojo izotopo kure įtaką bendram Doplerio efektui galima įvertinti pagal (5) išraišką.

$$k_{\infty} = \frac{\sum P_i}{\sum A_i}. \quad (4)$$

$$\alpha_{DRK} = \frac{\partial p}{\partial T} = \sum \frac{\partial \left(\frac{-A_i}{\sum P_i} \right)}{\partial T} = \sum \frac{\partial \left(\frac{-a_i}{k_\infty} \right)}{\partial T}, \quad (5)$$

čia: P_i ir A_i neutronų susidarymo ir neutronų absorbcijos dažniai, atitinkamai, įvertinti atskiram nuklidui i , o a_i – santykinė neutronų absorbcija nuklidui i .



6 pav. DRK išskaidymas į atskiras sudedamąsias vertes atskiriems nuklidams kuro išdegimo pradžioje (a) ir pabaigoje (b)

DRK verčių išskaidymas į atskiras sudedamąsias vertes atskiriems nuklidams pateiktas 6 pav. BWR kuro rinklėse tiek su urano, tiek su MOX kuru, U-238 nuklidas turi didžiausios įtakos DRK, nulemdamas neigiamą Doplerio efektą. Rinklėse su MOX kuru U-238 įtaka mažesnė, kadangi dėl didesnio skiliųjų medžiagų įsodrinimo, U-238 nuklidų koncentracija MOX kure yra mažesnė. Atitinkamai inovatyviose rinklėse U-238 nuklidų daroma įtaka Doplerio efektui yra mažesnė nei ATRIUM rinklėse, kadangi inovatyviose rinklėse U-238 nuklidų koncentracija yra mažesnė dėl didesnio skiliųjų medžiagų įsodrinimo. Bendras Doplerio efektas rinklėse su MOX kuru yra didesnis, nes prie U-238 rezonansinių pikų egzistuoja pildomi pikai, atsirandantys dėl Pu-240 ir Pu-242 nuklidų įėjimo į kuro sudėtį.

Absoliučių DRK verčių didėjimas išdegant kuro rinklei, paaiškinamas padidėjusiomis vertėmis U-238 ir Pu izotopams. Šis aiškinimas ypač taikytinas rinklėms su urano kuru, kadangi jame naujų nuklidų su rezonansiniais pikais generavimas vyksta sparčiau nei tų nuklidų virtimas izotopinėje grandinėje kitais nuklidais. MOX kure egzistuojantys Pu izotopai yra verčiami į kitus Pu izotopus, todėl kuro rinklei su MOX kuru išdegant, Doplerio reaktyvumo koeficientas kinta mažiau žymiai nei išdegant rinklei su urano kuru.

Išvados

Šiame darbe atliktas DRK tyrimas inovatyvioje BWR kuro rinklėje pakrautoje urano ir MOX kuru. DRK vertės apskaičiuotos inovatyvioje BWR kuro rinklėje,

palygintos su vertėmis, gautomis šiuolaikinei BWR kuro rinklei. Siekiant paaiškinti DRK verčių kitimą išdegant kurui bei skirtumus tarp urano ir MOX kuro, bei tarp šiuolaikinių ir inovatyvių BWR kuro rinklių, buvo atliktas DRK išskaidymas į atskiras sudedamąsias dalis. Šio tyrimo metu taikytas DRK išskaidymas į atskiras sudedamąsias dalis tapo naudingu įrankiu, siekiant kiekybiškai paaiškinti DRK verčių skirtumus bei kitimą kuro rinklei išdegant. Išskaidymas į atskiras sudedamąsias dalis taip pat gali būti taikomas ir kitoms neutroninėms – fizikinėms charakteristikoms, kaip garo reaktyvumo koeficientas ar valdymo strypų efektyvumas.

Literatūra

1. A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, June 2011.
2. DeHart, M. D. Lattice physics capabilities of the SCALE code system using TRITON. *International Conference on the Physics of Reactors*, Vancouver, British Columbia, Canada, 10-14 September 2006.
3. Pecchia, M., Kotev, G., Parisi, C., D'Auria, F. MOX benchmark calculations by deterministic and Monte Carlo codes. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 246, 2012, P. 63–68.
4. Francois, J. L., Martin del Campo, C. Lattice physics codes comparisons for the NEA BWR-MOX benchmark. *International Topical Meeting on Advances in Reactor Physics and Mathematics and Computation into the Next Millennium*, May 7-12, 2000, Pittsburgh, PA, USA.
5. Yamamoto, A., Ikehara, T., Ito, T., Saji, E. Benchmark problem suite for reactor physics study of LWR next generation fuels. *Nuclear Science and Technology*, Vol. 39, 2002, P. 900–912.

The analysis of Doppler reactivity coefficient for innovative BWR fuel assembly

Summary

The analysis of Doppler reactivity coefficient for an innovative BWR fuel assembly loaded with uranium and MOX fuels was performed in this study. Values estimated for the innovative BWR fuel assembly were compared with values estimated for a modern BWR fuel assembly. The decomposition of Doppler reactivity coefficient values to values for separate factors from four factor formula and for separate isotopes were performed for the understanding the differences between uranium and MOX fuels, innovative and modern BWR fuel assemblies. The decomposition analysis appeared to be an extremely useful instrument, which can provide quantitative insights and for other neutronic characteristics analysis.

Получение тяжёлой воды методом последовательного ступенчатого вымораживания природной воды

Александр Каган, Александр Меньшиков, Владимир Буравлев
Московское химическое общество имени Д. И. Менделеева

1. Введение

Как известно, уран–графитовые реакторы в принципе не могут работать на природном уране. Эти реакторы требуют урана, обогащенного по урану–235 хотя бы до 2% [1]. Между тем, энергетические реакторы, работающие на необогащенном природном уране, возможны только с применением тяжело-водного замедлителя нейтронов.

Например, в Канаде и США разработчики ядерных реакторов при решении проблемы о поддержании в реакторе цепной реакции предпочли использовать в качестве замедлителя тяжелую воду [2]. Дело в том, что у тяжелой воды очень низкая степень поглощения нейтронов и очень высокие замедляющие свойства, превышающие аналогичные свойства графита. Вследствие этого, ректоры на тяжелой воде работают на необогащенном топливе, что позволяет не строить сложные и опасные предприятия по обогащению урана. Реактор на тяжелой воде может работать долгие годы на естественном необогащенном уране и давать дешевую энергию. Основным препятствием является большая дороговизна тяжелой воды при ее производстве известными способами.

D₂O широко применяется в канальных реакторах (типа CANDU и др.) с водяным замедлителем, а также и в реакторах типа RBMK [2].

Таким образом, тяжелая вода является критически необходимым продуктом для атомных реакторов, работающих на обычном природном уране.

Следует отметить, что процесс получения тяжелой воды существенно дешевле, чем процесс обогащения самого тяжелого природного элемента – урана. По-видимому, в силу этих причин к 2012 г. в мире уже 9 стран имели собственное производство тяжёлой воды (D₂O).

Согласно опубликованным данным, основными производителями и поставщиками D₂O на мировом рынке являются США, Канада и Индия. Завод по производству тяжелой воды фирмы NORSK-GIDRO довольно давно действует в Норвегии [3, 4].

Что касается потребности тяжелой воды, то, по-видимому, можно прогнозировать рост этой потребности для дальнейшего развития различных средств транспорта (наземных, морских, воздушных и космических). В частности, в последнее время активно обсуждаются проекты создания транспорт-

но-энергетических модулей с ядерной электроракетной двигательной установкой мегаваттного класса [5].

Речь идет о потенциале тяжеловодных реакторов, которые отличаются большей компактностью, меньшим весом и требуют меньше топлива [4, 5]. Известно, например, что количество тяжелой воды, необходимой для осуществления цепной реакции, в 60 раз меньше, чем сверхчистого графита, что в принципе позволяет создавать реакторы меньшего размера при той же мощности [6].

Основные методы производства тяжелой воды описаны в работах [3, 4, 7, 8]. К ним относятся: химический обмен, дистилляция и электролиз. Наиболее простым методом является электролиз воды [7].

Исходными материалами, имеющимися на Земле в достаточном количестве, являются водород, аммиак, метан и вода. Оценка потребностей в сырье для производства 100 т D₂O в год представлена в Таблице 1.

Таблица 1. Потребности в сырье для производства 100 т D₂O в год по данным работы [7]

Сырье	Потребности	Выход D ₂ O
Водород	$116,66 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$	–
Метан	$291,66 \cdot 10^2 \text{ м}^3/\text{ч}$	100
Аммиак	56,708 т/ч	–
Вода	$275 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$	20

Следует, однако, отметить, что все известные методы весьма энергоемки. Так, при осуществлении процесса электролиза расход электроэнергии составляет 125 квт.ч на 1 г производимой тяжёлой воды [8].

Получивший определенное распространение в разных странах сероводородный метод производства тяжелой воды связан с использованием каскада колонного оборудования, в которое загружается большое количество дорогостоящей мелкой насадки размером 5×5 мм [3, 4].

Таким образом, разработка новых энергосберегающих технологий производства D₂O является актуальной задачей.

2. Физические основы процесса

Содержание тяжелой воды, в которой водород замещен на тяжелый изотоп – дейтерий, D₂O в природной воде в среднем составляет 0,0149 % [8].

D₂O отличается от H₂O физическими свойствами, в том числе температурами кипения и перехода в твердую фазу (см. Таблицу 2).

Соотношение температур плавления и испарения, а также вязкостей D₂O и H₂O представлено в Таблице 3 по данным [9].

Данные по теплоте плавления и испарения D₂O и H₂O представлены в Таблице 4 по данным [10].

Таблица 2. Сравнительные характеристики H_2O и D_2O

Параметр	Продукт		Литературный источник
	H_2O	D_2O	
Молекулярный вес	18,016	20,029	[10]
Температура плавления, °C	0	3,82	[9]
Температура кипения, °C	100	101,43	[9]
Плотность жидкости, $кг/м^3$ при $t = 25\text{ }^{\circ}C$	997,06	1.104,37	[8]

Таблица 3. Соотношение температур плавления, испарения и вязкостей D_2O и H_2O

Соотношение параметров	Обозначение	Величина
Температур плавления при $t = 3,82\text{ }^{\circ}C$	t_{D_2O} / t_{H_2O}	0,935
Температур испарения при $p = 0,1\text{ МПа}$	r_{D_2O} / r_{H_2O}	1,038
Вязкостей в жидкой фазе при $t = 5\text{ }^{\circ}C$	μ_{D_2O} / μ_{H_2O}	1,309

Таблица 4. Теплота плавления и испарения

Продукт	Плавление		Испарение	
	Удельная теплота, кал/г	Температура, °C	Удельная теплота, дж/кг	Температура, °C
H_2O	79,67	0	2,497	0
			2,26	100
			2,01	180
D_2O	-	-	2,09	101,4

Физика предлагаемого способа обогащения базируется на использовании явления перехода D_2O в твердую фазу при охлаждении природной воды ниже температуры $T = 3,82\text{ }^{\circ}C$ в интервале температур от $T = 3,82\text{ }^{\circ}C$ до $T = 0\text{ }^{\circ}C$. Базирующаяся на этом явлении основная идея способа получения D_2O заключается в предварительном обогащении природной воды посредством стадий ее последовательного многократного замораживания и таяния, с использованием потенциала природного холода.

Промышленную реализацию предлагаемого способа получения тяжелой воды целесообразно осуществлять вблизи заполярного круга, вблизи от доступного источника воды – полноводной реки в сочетании с работающей там же АЭС. В этом случае, для осуществления фазы замораживания можно использовать природный холод, а для осуществления операции размораживания,

например, тепло, отводимое от атомных реакторов АЭС [11, 12]. Впрочем, использование тепла АЭС не является критически важным для практического осуществления предлагаемого способа. По-видимому, вполне возможно использование тепла, например, от возобновляемых источников энергии, описанных в работах [13-16].

3. Результаты опытной проверки предлагаемого способа предварительного обогащения природной воды

В наших опытах использовали два способа вымораживания:

- 1-й способ. Ступенчатое вымораживание;
- 2-й способ. Непрерывное вымораживание.

Последовательность осуществления ступенчатого способа получения тяжелой воды в наших опытах показана на Рис. 1.

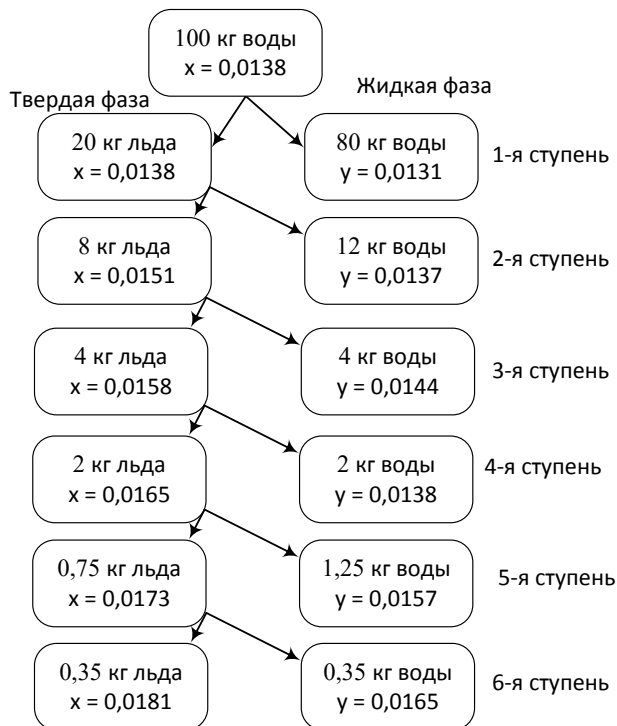


Рис. 1. Последовательность ступенчатого получения тяжелой воды

Коэффициент разделения по известному соотношению [3, 4] равен:

$$a = \frac{x}{(1-x)} : \frac{y}{(1-y)}, \quad (1)$$

здесь: x – мольная доля продукта в твердой фазе; y – мольная доля продукта в жидкой фазе.

В наших опытах $V_{\text{льда}} = V_{\text{воды}}$, а мольный объем равен весовому. На этом основании: $x \ll 1$ и $y \ll 1$.

Таким образом, в нашем случае соотношение (1) будет иметь вид:

$$a = \frac{x}{y}. \quad (2)$$

Схема одной из использованных нами опытных установок показана на Рис. 2. Опытная установка включала емкость 1 с вымораживаемой водой, мешалку 2, змеевик с хладагентом 3, лед 4, баллон с хладагентом 6 (см. Рис. 2). Опыты проводили следующим образом. Исходное количество природной воды с известной концентрацией тяжелого компонента – C_T заливали в емкость 1. Затем начинали охлаждение воды, подавая в сосуд 2 хладагент NH_3 . В процессе вымораживания воды через равные промежутки времени производили анализы оставшейся в ёмкости 1 жидкости на содержание C_T .

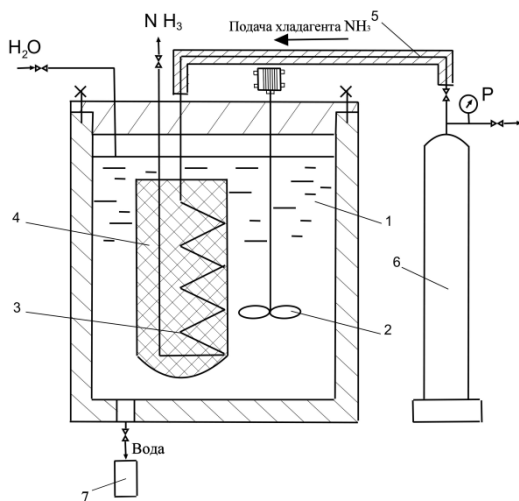


Рис. 2. Схема опытного стенда: 1 – емкость с вымораживаемой водой; 2 – мешалка; 3 – змеевик с хладагентом (NH_3); 4 – шуга (лед); 5 – линия подачи хладагента (NH_3); 6 – баллон с NH_3 ; 7 – мерный бак. Таким об-

разом, в момент времени τ_1 концентрация тяжелого компонента составляла C_{T1} ; $\tau_2 - C_{T2}$; $\tau_n - C_{Tn}$.

Процесс вымораживания воды продолжался до тех пор, пока не выполнялось равенство: $C_{Tn} = C_{Tn-1}$, что указывало на наступление равновесия по тяжелому компоненту. После достижения равновесия, оставшуюся воду из емкости 1 сливали в мерный бак 7 (см. Рис. 2). Образовавшийся в емкости 1 лед растапливали и подвергали масспектральному анализу по методике [3].

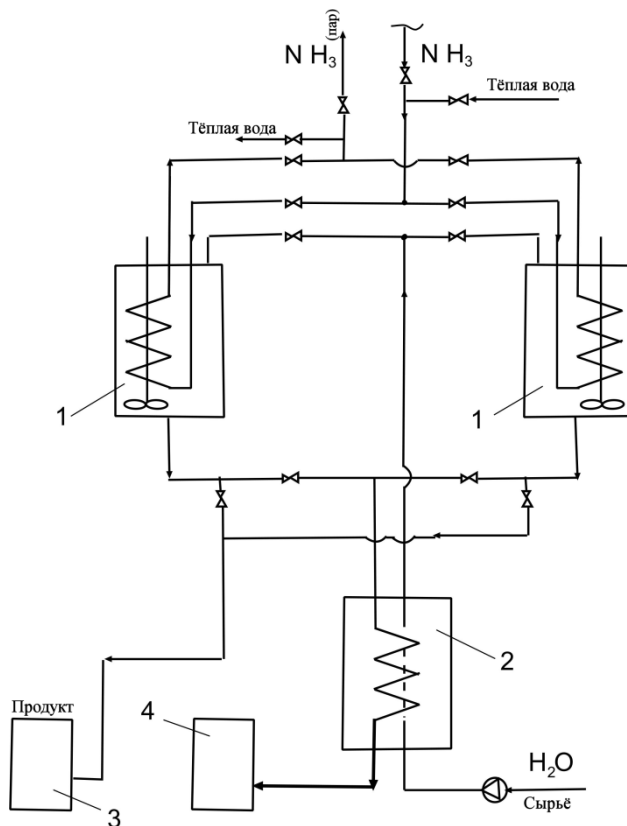


Рис. 3. Принципиальная схема вымораживания: 1 – емкость; 2 – емкость предварительного охлаждения природной воды за счет холода размораживаемого льда в емкостях 1; 3 – продукт; 4 – ёмкость

В результате лабораторных опытов установлено, что при ступенчатом способе вымораживания обогащение на одну ступень составляло 1,04624; обо-

гашение на шесть ступеней составляло 1,26. В этом случае коэффициент разделения равен: $a = \frac{x}{y} = \frac{0,0181}{0,0165} = 1,09696$.

При непрерывном способе вымораживания и исходном количестве воды $G_{\text{H}_2\text{O}} = 750$ кг время вымораживания составляло 4 часа ж количество полученного льда (шуги) составляло $G_{\text{льда}} = 4$ кг.

В проведенных опытах мольная доля продукта в твердой и жидкой фазе – $x = 0,0166$, $y = 0,0144$.

В соответствии с уравнением (2) имеем: $a = \frac{0,0166}{0,0144} = 1,1528$.

4. Возможная схема промышленного производства D_2O методом вымораживания

Возможная принципиальная схема промышленного производства D_2O из речной воды методом вымораживания и последующей ректификации представлена на Рис. 4. В качестве источника холода в данной схеме предлагается использовать природный холод, поскольку место расположения производства предлагается выбирать вблизи Заполярного круга. Источником сырья – природной воды может служить рядом расположенная полноводная река. При осуществлении ступенчатого способа охлаждения для размораживания шуги можно использовать тепло наружного контура реактора АЭС, расположенного рядом с площадкой производства D_2O .

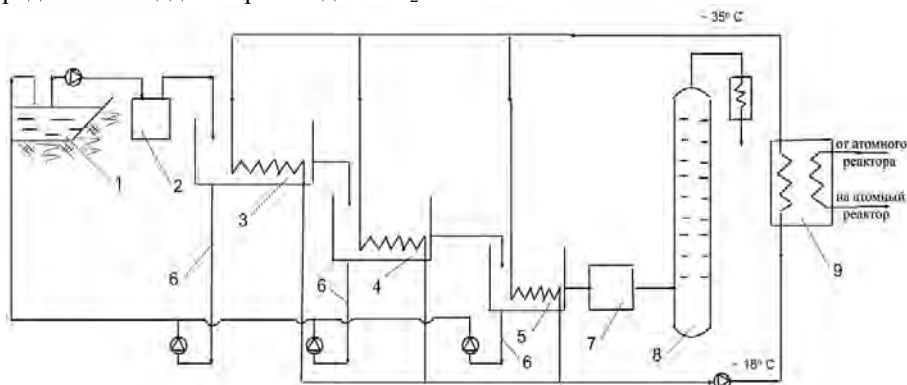


Рис. 4. Принципиальная схема производства D_2O из речной воды методом ступенчатого вымораживания: 1 – русло реки; 2 – предварительная очистка речной воды; 3 – I-я ступень вымораживания; 4 – II-я ступень вымораживания; 5 – III-я ступень вымораживания; 6 – линия слива не

замерзшей воды; 7 – окончательная очистка воды; 8 – ректификационная колонна; 9 – конденсатор реактора АЭС

В этом случае, по-видимому, на данной АЭС можно будет, если это подтвердят тепловые расчеты, отказаться от использования башенных градирен (см. Рис. 5). Все ступени вымораживания могут находиться на открытом пространстве.

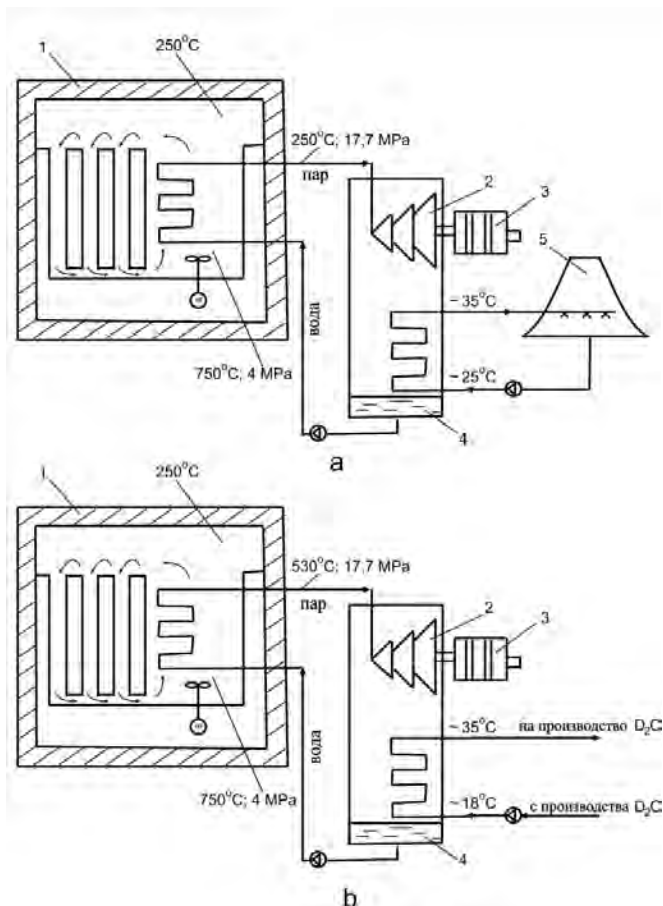


Рис. 5. Принципиальная тепловая схема реактора АЭС: а) стандартная схема; б) схема снабжения горячей водой производства D₂O. 1 – реактор АЭС; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – градирня

5. Выводы

1. Предложен энергосберегающий способ предварительного обогащения природной воды методом последовательного ступенчатого вымораживания воды.
2. Представлены результаты опытной проверки предлагаемого способа обогащения воды в лабораторных условиях.
3. Предложена возможная промышленная схема организации процесса получения тяжёлой воды с использованием естественного холода на территориях вблизи Заполярного круга, рядом с полноводной рекой. В сочетании с рядом расположенной работающей АЭС, наружный тепловой контур которой по предлагаемой схеме может быть использован для осуществления процесса таяния льда.

Литература

1. Горобец Б.С. МИХМ в Атомном проекте СССР. М.: МГУИЭ, 2009. С. 352.
2. Кицис С.И., Герман О.И., Паутов Д.Н. Общая электроэнергетика, Тюмень: ТНГУ, 2009. С. 228.
3. Зельвенский Я.Д. Разделение изотопов низкотемпературной ректификацией. М.: РХТУ. 1998. С. 208.
4. Андреев Б.М. Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике. М.: Изд. АТ, 2000. С. 454.
5. <http://www.vpk-news.ru>, № 33 (399), 24-30 августа 2011.
6. Гельперин Н.И. Структура потоков и эффективность колонных аппаратов химической промышленности. М.: Химия, 1977. С. 360.
7. Аринушкина Л.С., Веселова М.В. Производство тяжелой воды в капиталистических странах. М.: 1971. С. 56.
8. Шемля М., Перье Ж. Разделение изотопов. Перевод с французского. М.: Атомиздат, 1980. С. 168.
9. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. Л.-М.: Госэнергоиздат, 1959. С. 414.
10. Справочник машиностроителя в трех томах. Том 1. Гл. редактор М.А. Саверин. М.: Гос. Научно-техническое изд. Машиностроительной литературы. 1950. С. 354, 364.
11. Rimkevičius S., Ušpuras E. Modelling of Thermal Hydraulic Transient Processes in Nuclear Power Plants: Ignalina Compartments. Begell Hous Inc. New York and Lithuanian Energy Institute, Kaunas, 2007. P. 197.
12. Urbonavičius E., Kaliatka A., Ušpuras E. Accident Management for NPPs with RBMK Reactors. Begell Hous Ins. New York and Lithuanian Energy Institute, Kaunas, 2010. P. 204.
13. Kytra S. Atsinaujinantys energijos šaltiniai. Kaunas: KTU, 2007. P. 140.

14. Безруких П.П., Стребков Д.С. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. С. 264.
15. Katinas V., Tumosa A. The possible usage of wind energy in Lithuania. Energy Agency, Directorate of the Energy Saving Programme. Kaunas, 1996. P. 27.
16. Neimane V., Sauhats A., Vempers G., Tereskina I. Allocating production cost of CHP plant to heat and power //The 4th International Conference on Electrical and Control Technologies. May 7-8, 2009. Kaunas, Lithuania, TECHNOLOGIJA, Kaunas, 2009. P. 200–204.

Heavy water production by sequence of step freeze natural water

Summary

The results of laboratory investigation of natural water enrichment by its consistent freezing are presented. Case of industrial application is suggested on the results of the experiments. For the implementation stage of freezing water are encouraged to use natural cold environment in areas located near the Polar circle near the deep river. In this case, the heat required for melting the ice can be obtained from an external circuit located near plant. The proposed method can potentially provide lower energy costs.

III. ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI

Šiuolaikinių „lašo“ tyrimų įvertinimas binarinio skysčio lašelių garavimo modeliavimo kontekste

Viktorija Sankauskaitė, VKEKK

Gintautas Miliauskas, Kauno technologijos universitetas

Skystojo kuro degimo proceso technologijų įvairovė, poreikis tobulinti įvairius technologinius procesus, įvairioms technologijoms aktualus atmosferoje vykstančių procesų modeliavimas iššaukia lašelio garavimo proceso pažinimo poreikį ir lemia nuolatos augančius mokslinius tyrimus šioje tematikoje. Iš jų svarią vietą užima binarinio ir daugiakomponenčio lašelio garavimo tyrimai, kurių aktualumą lemia kelių komponentų skysčių naudojimas įvairiuose technologiniuose procesuose.

Išpurkšto skysčio degimui esminės įtakos turi lašelių garavimo dinamika, todėl pasaulyje vykdomi platūs lašelių šilumos ir masės mainų tyrimai, žinomi bendru „lašo“ uždavinio pavadinimu. Lašelių garavimo spartą lemia išoriniai faktoriai, susiję su šilumos ir masės kaita tarp lašelių ir jų aplinkos, bei vidiniai faktoriai, susiję su šilumos ir masės pernaša lašeliuose. Todėl lašelių garavimą būtina tirti išorinius ir vidinius faktorius vertinant kompleksiskai, arba priimti supaprastinančias prielaidas. Pavyzdžiui, „efektyvaus laidumo“ modelyje, įvertinant skysčio cirkuliaciją laše, įvedus efektyvųjį šilumos laidumo koeficientą šilumos laidumas pakeistas efektyviuoju šilumos laidumu [1,2]. Siekiant sutrumpinti skaičiavimo laiką, programinės įrangos paketuose taikytinas lašo šilimą įvertinantis patobulintas D^2 taisyklės modelis, pagrįstas elipsiniu lašo skersmens kaitos laike atvaizdavimu, pritaikant parabolinio temperatūros profilio modelį, tačiau esminis šio modelio trūkumas – jame neatsižvelgiama į pernašos procesų sąveiką [3]. Pernašos procesų sąveikai skysčio lašeliuose svarbi spinduliuotės srauto sugėrimo intensyvumo pusskaidriame skystyje įtaka [4]. Spinduliuotės poveikyje pakinta temperatūros lauko lokalusis gradientas neizoterמיškame lašelyje, o pakitęs temperatūros laukas iššaukia spektrinio kompleksinio skysčio lūžio rodiklio pokyčius, dėl kurių pakinta šviesos spindulio sklaidimo laše bei optinių efektų jo paviršiuje sąlygos, taigi, spinduliuotės srautas neturi tiesioginės įtakos lašelio paviršiaus temperatūrai, ši įtaka pasireiškia per pakitusį temperatūros lauko laše gradientą.

Į šilumos ir masės pernašos nestacionariųjų procesų tarpusavio sąveiką šylančiuose skysčio lašeliuose įgalina atsižvelgti „lašo“ tyrimuose vis plačiau taikomi kombinuoto analitinio ir skaitinio tyrimo metodai [4–6]. Šių metodų esmė – nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje skaitinio sprendimo schemos sudaromos ne pirminei netiesinių diferencialinių ir integralinių lygčių sistemai, o jos sprendiniui – netiesinių algebrinių ir integralinių lygčių sistemai. Svarbiausi šio metodo

privalumai – išvengiama neapibrėžtumų, susijusių su laiko ir koordinatės žingsnio pasirinkimu, ir patikima skaitinio tyrimo konvergencijos kontrolė.

Nors gryųjų skysčių lašelių garavimas gana visapusiškai ištirtas, šių tyrimų rezultatų taikymas terminėse technologijose ribotas, kadangi kaip skystas kuras jose dažnai naudojami gryųjų skysčių mišiniai. Šalia kuro degimo procesų tyrimų, lašelių garavimo ir kondensacijos tyrimai vis plačiau naudojami modeliuojant atmosferos teršalų aerozolinių dalelių formavimąsi [7]. Binarinio „lašo“ uždavinys aktualus netgi grynojo skysčio atveju, jeigu jis yra tirpus vandenyje ir išpurškiamas į drėgno oro aplinką [8], kadangi išpurškiamo žemesnės už rasos taško temperatūrą skysčio lašelių paviršiuje kondensuojasi vandens garas, jo fazinių virsmų šiluma intensyvina lašelių garavimą ir kartu vyksta vandens difuzija į jų vidų. Dar sudėtingesni difuziniai procesai gali vykti lašelių paviršiuje besiformuojant ir augant vandens plėvelei.

Daugiakomponenčio skysčio lašelių šilumos ir masės mainams yra ryški komponentų prigimties įtaka, pasireiškianti ne tik dėl skirtingos komponentų virimo temperatūros, bet ir dėl jų skirtingos fazinių virsmų šilumos, lemiančios fazinių virsmų energinį balansą [9–11]. Pakankamai patikimi (atitinkantys eksperimentų rezultatus) binarinio lašelio garavimo tyrimų rezultatai gaunami skaitiniuose tyrimuose taikant Abramzon ir Sirignano teoriją, tačiau specifinę skysčio garo šilumą pakeičiant specifine garų/dujų mišinio šiluma [12].

Siekiant kuo tikslesnės lašelio garavimo dinamikos analizės, būtina įvertinti skysčio fizikinių savybių kitimą kintant lašelio temperatūrai [13]. Lašeliui garuojant aukštesnės temperatūros aplinkoje, tiksliausi energijos ir masės pernašos tyrimo rezultatai gaunami tik įvertinus susidarancius temperatūros ir koncentracijos gradientus [14–16].

Modeliuojant daugiakomponenčio lašelio garavimą grynojo skysčio lašelio garavimo teorijos pagrindu, būtina įvertinti kiekvieno komponento įtaką lašelio garavimo dinamikai bei jų tarpusavio sąveiką. Šis uždavinys gali būti sprendžiamas įvedus komponentų aktyvumo koeficientus [17–19], kurie priklauso nuo skysčio komponentų derinio ir jų koncentracijų mišinyje.

Garuojant daugiakomponenčio skysčio lašeliams temperatūros ir komponentų koncentracijos gradientai iššaukia skysčio savybių kitimą, taip darydami įtaką lašelio garavimo dinamikai [20–22]. Specifinių daugiakomponenčių atveju artimi uždaviniui, kuomet įvertinamas skysčių fizikinių savybių kitimas, modeliavimo rezultatai gaunami taikant vidutinės skysčio mišinio fizikines savybes, tačiau tai galioja tik tam tikrų komponentų, pasižyminčių artima molekuline mase, virimo temperatūra ir garavimo entalpija, atveju [23]. Tiriant garuojančio ir besikondensuojančio neizoterminio skysčio lašelio terminės būsenos kitimą, rastas binarinio skysčio komponentų funkcinis priklausomumas nuo jo temperatūros [24].

Daugiakomponenčio skysčio lašelių garavimo modeliavimas tampa dar sudėtingesniu, įvertinant spinduliuotės sugėrimą lašelyje [25, 26] (paprastai taikomas

efektyviojo laidumo modelis), kadangi šis šilumos pernašos būdas taip pat turi įtakos lašelio šildymo režimui. Kai norima atsižvelgti į pusskaidriame skystyje sugeriamos spinduliuotės poveikį, daugiakomponenčio skysčio lašelių garavimo tyrimas, lyginant su plačiai taikomu efektyvaus laidumo modeliu, tampa dar sudėtingesniu. Todėl daugiakomponenčio lašelio šilimas ir garavimas sudėtingomis jo šildymo sąlygomis, kuomet yra ryškus lašelio apsupties spinduliuotės poveikis, yra ištirtas nepakankamai ir aiškiai matomas šilumos ir masės pernašos procesų sąveikos sisteminių tyrimų poreikis daugiakomponenčio lašelio sudėtinio šildymo atvejais.

Nestacionariųjų procesų sąveiką grynojo skysčio lašeliuose galima įvertinti pagal „lašo“ vidinio uždavinio kombinuoto analitinio ir skaitinio sprendimo metodiką [4, 6]. Tuomet iteracinės tyrimo schemos sudaromos integrodiferencialinės energijos lygties sprendiniui, kuris, šilumai plintant lašelyje spinduliavimu ir laidumu, išreiškiamas netiesinių algebrinių ir integralių lygčių sistema. Daugiakomponenčio skysčio lašelio atveju šią sistemą reikia papildyti skysčio komponentų koncentracijų laukus aprašančiomis integraliomis lygtimis.

Paneigiant skysčio cirkuliaciją, paneigiama ir termodifuzija išpurkšto skysčio lašeliuose. Sąveikaujanti šilumos ir masės pernaša garuojančiame sferiniame binarinio skysčio pusskaidriame lašelyje aprašoma ryškiai netiesinių integralių ir diferencialių lygčių sistema, aprašančia nestacionariuosius temperatūros ir binarinio skysčio komponentų koncentracijų laukus difuzinių masės pernašos ir šilumos pernašos laidumu bei spinduliavimu sąveikaujančių procesų sąlygomis, spektrinės spinduliuotės kitimą pusskaidriame skystyje ir šylančio lašelio tūrio kitimą.

$$\frac{\partial [\rho(r, \tau) \cdot c_p(r, \tau) \cdot T(r, \tau)]}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 \left[\lambda(r, \tau) \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} + q_r(r, \tau) \right] \right\}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial [\rho_L(r, \tau) \cdot Y_{k,L}(r, \tau)]}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \rho_L(r, \tau) \cdot D_{1,2}(r, \tau) \frac{\partial Y_{k,L}(r, \tau)}{\partial r} \right]; \quad (2)$$

$$k \equiv 1, 2$$

$$q_r(s, \tau) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot I_\omega(s, \tau) \cdot d\varphi \cdot d\psi \cdot d\omega; \quad (3)$$

$$\frac{\partial I_\omega(s, \tau)}{\partial s} = \chi_\omega(s, \tau) \cdot [n_\omega^2(s, \tau) \cdot I_{\omega 0}(s, \tau) - I_\omega(s, \tau)]; \quad (4)$$

$$\rho_l(\tau) \frac{\partial R^3(\tau)}{\partial \tau} = R^3(\tau) \frac{\partial \rho_l(\tau)}{\partial \tau} - 3R^2(\tau) \cdot m_v^+(\tau). \quad (5)$$

(1), (3)–(5) lygtimis aprašomas šilumos ir masės pernašos uždavinys gali būti sprendžiamas pasitelkiant kombinuoto analitinio ir skaitinio tyrimo metodą,

išplėtotą [4, 6]. Binarinio skysčio komponentų koncentracijų laukus aprašančiai (2) difuzijos lygtčiai pritaikoma minėtuose darbuose išplėtotą tyrimo metodologija.

Pradinių laiko momentu izotermiško lašelio matmuo žinomas, o skysčio komponentai jo turi susimaišę tolygiai. Numatant lašelio centro atžvilgiu simetriškus šilumos ir masės mainus, kraštinės sąlygos formuluojamos šylančio ir garuojančio lašelio matmens kitimą nusakančios $R(\tau)$ funkcijos ir binarinio skysčio komponentų koncentracijų kitimą lašelio paviršiuje nusakančių $Y_{1,L,R}(\tau)$ ir $Y_{2,L,R}(\tau)$ funkcijų atžvilgiu:

$$\left. \frac{\partial Y_{k,L}(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (6)$$

$$R(\tau) = f_R(\tau); \quad Y_{1,L}(r, \tau) \Big|_{r=R} = Y_{1,L,R}(\tau); \quad Y_{2,L}(r, \tau) \Big|_{r=R} = Y_{2,L,R}(\tau). \quad (7)$$

Komponentų koncentracijų kitimą šylančio ir garuojančio binarinio skysčio lašelio paviršiuje nusakančios $Y_{1,L,R}(\tau)$ ir $Y_{2,L,R}(\tau)$ funkcijos tenkins masės srautų jame balanso sąlygos lygtį [27]:

$$\rho_L(\tau) \cdot D_{1,2}(\tau) \left. \frac{\partial Y_{k,L}(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R^-} - m_v(\tau) \cdot \left[Y_{k,L,R}(\tau) - \frac{m_{v,k}(\tau)}{m_v(\tau)} \right] = 0. \quad (8)$$

Skysčio garo srauto tankį lašelio paviršiuje apsprendžia skysčio prigimtis, lašelio matmuo bei skysčio garo dalinis slėgis prie lašelio ir toli nuo jo. Pagal Šorino-Kuzikovskio modelį garo srauto tankis lašelio paviršiuje aprašomas algebrine lygtimi:

$$m_v(\tau) = \frac{D_{vg}(\tau) \cdot \mu_v}{T_{R,vg}(\tau) \cdot R_\mu \cdot R(\tau)} \left\{ p_{v,R}(\tau) - p_{v,\infty}(\tau) \right. \\ \left. + \frac{\mu_v}{\mu_{vg}(\tau)} \left[p \cdot \ln \frac{p - p_{v,\infty}(\tau)}{p - p_{v,R}(\tau)} - p_{v,R}(\tau) + p_{v,\infty}(\tau) \right] \right\}, \quad (9)$$

įvertinančia Stefano hidrodinaminio srauto poveikį [28,29]. Grynojo skysčio stambių lašelių atveju garo ir dujų mišinio temperatūra prie lašelio yra artima jo paviršiaus temperatūrai $T_{R,vg}(\tau) \equiv T_R(\tau)$, o garo dalinis slėgis lašelio paviršiuje yra artimas šio paviršiaus temperatūrą atitinkančiam sočiojo garo $p_{v,R}(\tau) \equiv p_s[T_R(\tau)]$ slėgiui.

Binarinio lašelio atveju lašelio garavimo dinamikai įtakos turi ne tik kiekvieno skysčio komponento garavimas, bet ir jų tarpusavio sąveika. Ją įvertinti galima įvedus komponentų aktyvumo koeficientus [17, 18]. Siekiant konkretizuoti skysčio

komponentų koncentracijas aprašančias funkcijas, [19] siūloma atsižvelgti į tai, jog skysčio ir skysčio garo pusiausviros sąlygomis kiekvienam komponentui abiejų (garo ir skysčio) fazių fugatyvumas yra vienodas. Skysčio garui taikant idealiųjų dujų dėsnius, kiekvieno skysčio komponento fugatyvumą atspindi jo molinės koncentracijos ir komponentės garo dalinio slėgio dujų mišinyje komponentaugs, papildomai atsižvelgus į binarinio skysčio komponentų aktyvumo koeficientus, kurie priklauso nuo skysčio komponentų derinio ir jų koncentracijų mišinyje.

Šiuo atveju lašelio atveju skysčio komponento garo dalinį slėgį lemia lašelio paviršiaus temperatūra, to komponento molinė $X_{k,L,R}$ koncentracija bei aktyvumo γ_k koeficientas:

$$X_{k,v,R}(\tau) = \gamma_k(\tau) X_{k,L,R}(\tau) \frac{P_{k,v,R,s}(\tau)}{P}. \quad (10)$$

Aktyvumo koeficientas γ_k aprašomas algebrine lygtimi, kurią pirmajam komponentui galima pateikti išraiška:

$$\gamma_{k=1}(\tau) = \frac{1}{X_{1,L,R}(\tau) + A_{12} X_{2,L,R}(\tau)} \times \exp \left\{ X_{2,L,R}(\tau) \left[\frac{A_{12}}{X_{1,L,R}(\tau) + A_{12} X_{2,L,R}(\tau)} - \frac{A_{21}}{X_{2,L,R}(\tau) + A_{21} X_{1,L,R}(\tau)} \right] \right\}. \quad (11)$$

Koeficientai A priklauso nuo binarinio skysčio mišinio komponentų derinio [19].

Pasitelkiant pagabinę funkciją

$$Z_{Y,k}(r, \tau) = r \cdot [Y_{k,L}(r, \tau) - Y_{k,L,R}(\tau)], \quad (12)$$

difuzijos (2) lygtį galima suvesti į Dirichle šilumos laidumo uždavinį su žinoma šaltinio $f_{sr,Y,k}(r, \tau)$ funkcija:

$$\frac{\partial Z_{Y,k}(r, \tau)}{\partial \tau} = a_Y^2 \frac{\partial^2 Z_{Y,k}(r, \tau)}{\partial r^2} + f_{sr,Y,k}(r, \tau) \quad (13)$$

$$Z_{Y,k}(r, 0) = 0; \quad Z_{Y,k}(0, \tau) = 0; \quad Z_{Y,k}(R, \tau) = 0, \quad (14)$$

čia: $Z_{Y,k} \equiv Y_{k,L}$; $a_Y^2 = D_{k,L}$, o šaltinio funkcija $f_{sr,Y,k}$ tenkina sąlygą:

$$f_{sr,Y,k}(r,\tau) = \frac{r}{\rho_L(r,\tau)} \times \left\{ \frac{\partial Y_{k,L}(r,\tau)}{\partial r} \frac{\partial [\rho_L(r,\tau) D_{k,L}(r,\tau)]}{\partial r} - Y_{k,L}(r,\tau) \frac{\partial [\rho_L(r,\tau)]}{\partial \tau} - \rho_L(r,\tau) \frac{\partial Y_{k,L,R}(\tau)}{\partial \tau} \right\}. \quad (15)$$

(13, 14) uždavinio sprendinys išreiškiamas begaline integralių lygčių sistema:

$$Z_{Y,k}(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi r}{R} \int_0^t f_{n,Y,k}(r,\tau) \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi a_{Y,k}}{R} \right)^2 (t-\tau) \right] \cdot d\tau, \quad (16)$$

kurioje begalinės sumos nario $f_{n,Y,k}$ funkcija

$$f_{n,Y,k}(r,t) = \frac{2}{R} \int_0^R f_{sr,Y,k}(r,\tau) \cdot \sin \frac{n\pi r}{R} dr. \quad (17)$$

vienareikšmiškai apibrėžta, kai $f_{sr,Y,k}(r,\tau)$ funkcija determinuota.

Įvertinus gautą $Z_{T,Y,k}$ funkcijos išraišką, gauname skysčio komponentų koncentracijų nestacionariusius laukus jame aprašančią išraišką:

$$Y_{k,L}(r,t) = Y_{k,L,R}(t) + \frac{2}{r} \sum_{n=1}^{\infty} \sin \frac{n\pi r}{R} \int_0^t f_{n,Y,k}(r,\tau) \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi a_Y}{R} \right)^2 (t-\tau) \right] d\tau, \quad (18)$$

kurioje begalinės sumos nario f_n funkcijas apsprendžia šaltinio $f_{sr,Y}$ funkcijos ypatumai:

$$f_{n,Y,k}(r,\tau) = (-1)^n \frac{R}{n\pi} \frac{dY_{k,L,R}(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{R} \int_0^R \frac{r}{\rho_L(r,\tau)} \cdot \sin \frac{n\pi r}{R} \left\{ \frac{\partial Y_{k,L}(r,\tau)}{\partial r} \frac{\partial [\rho_L(r,\tau) D_{k,L}(r,\tau)]}{\partial r} - Y_{k,L}(r,\tau) \frac{\partial [\rho_L(r,\tau)]}{\partial \tau} \right\} dr. \quad (19)$$

Atsižvelgiant į sudarytą nestacionariųjų koncentracijos laukų lašelyje gradientų lygtį, konkretizuojama (10) balanso lygtis:

$$\left. \frac{\partial Y_{k,L}(r,t)}{\partial r} \right|_{r=R} = \frac{2\pi}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} n \cdot (-1)^n \int_0^t f_{n,Y,k}(r,\tau) \cdot \exp \left[- \left(\frac{n\pi a_Y}{R} \right)^2 (t-\tau) \right] d\tau \quad (20)$$

Nestacionariųjų masės plitimą difuzija binarinio skysčio garuojančiuose lašeliuose aprašančią išraišką susiejus su analogiškai sudaryta nestacionariųjų šilumos plitimą laidumu ir spinduliute aprašančia išraiška, ši integralių lygčių sistema gali būti sprendžiama skaitiškai. Tam reikia sudaryti komponentų masinių srautų lašo

paviršiuje balansą aprašančios (10) lygties ir energijos srautų balanso lašo paviršiuje lygties tarpusavyje suderintas iteracinio sprendimo schemas. Numatoma iteracijas vykdyti pagal šylančio ir garuojančio lašelio paviršiaus temperatūrą greičiausio nusileidimo metodu minimizuojant energijos srautų balanso lašelio paviršiuje sąlygos lygtį, o (10) lygtį spręsti lygiagrečiai masės pernašos parametrus lašo paviršiuje nustatant pagal jau parinktą temperatūrą. Šilumos ir masės pernašos parametrai, kuriems apskaičiuoti reikia temperatūros lauko lašelyje, apskaičiuojami pagal anksčiau iteracijoje nustatytą temperatūros lauką lašelyje. Parinktam laiko kitimo intervalui numatoma I tarpinių τ laiko reikšmių ($\tau_i = 0$, kai $i = 1$ ir $\tau_i = \tau_I$, kai $i = I$), lašelyje numatoma J koncentriškų skerspjūvių, kurių padėtį nurodo bematė lašelio $\eta_j = r_j / R$ koordinatė ($\eta_j = 0$, kai $j = 1$ ir $\eta_j = 1$, kai $j = J$).

Pateikta metodika nestacionariajai masės pernašai difuzija garuojančiame binarinio skysčio lašelyje aprašyti sudaro prielaidas parengti kombinuoto analitinio ir skaitinio sąveikaujančios šilumos ir masės pernašos garuojančiame sferiniame binarinio skysčio pusskaidriame lašelyje tyrimo modelį, ir pagal jį atlikti binarinių skysčių mišinių šilumos ir masės pernašos tyrimus.

Išvados

1. Atlikus atliktų tyrimų apžvalgą, aiškiai matomas šilumos ir masės pernašos procesų sąveikos sisteminių tyrimų poreikis daugiakomponenčio lašelio sudėtinio šildymo atvejais.
2. Sudaryta metodika nestacionariajai masės pernašai difuzija garuojančiame binarinio skysčio lašelyje aprašyti, sudaro prielaidas parengti kombinuoto analitinio ir skaitinio sąveikaujančios šilumos ir masės pernašos garuojančiame sferiniame binarinio skysčio pusskaidriame lašelyje tyrimo modelį, ir pagal jį atlikti binarinių skysčių mišinių šilumos ir masės pernašos tyrimus.

Literatūra

1. Abramzon, B., Sirignano, W.A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, Vol. 32, P. 1605-1618.
2. Sazhin, S.S. et al. Transient heating of diesel fuel droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, Vol. 47, No. 14-16, P. 3327-3340.
3. Dombrovsky L.A., Sazhin S.S. A simplified non-isothermal model for drop-let heating and evaporation – *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2003, Vol. 30, No. 6, P. 787-796.
4. Miliauskas, G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, Vol. 44, P. 785-798.

5. Sazhin, S. Modeling of heating, evaporation and ignition of fuel droplets: combined analytical, asymptotic and numerical analysis. *J. of Physics: Conference Series*, 2005, Vol. 22, P. 174–193.
6. G. Miliauskas, Interaction of the transfer processes in semitransparent liquid droplets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46 (2003) P. 4119–4138.
7. Konopka, P. Binary condensation on soluble aerosols: On the activation and growth of the stratospheric aerosol from coupled HNO₃-H₂O uptake. *Journal of Aerosol Science*, 1997, Vol. 28, P. 1411–1424.
8. Law, C.K., Xiong, T.Y., Wang, C.H. Alcohol droplet vaporization in humid air. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1987, Vol. 30, P. 1435–1443.
9. Stengele, J. et al. Experimental and theoretical study of one- and two- component droplet vaporization in a high pressure environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1999, vol. 42, P. 2683–2694.
10. Varanasi, K.K., Clack, H.L., Miller, R.S. On preferential diffusion of binary component liquid droplets evaporating in a two-phase mixing layer. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, Vol. 30, P. 1235–1257.
11. Banerjee, R. Numerical investigation of evaporation of a single etha-nol/iso-octane droplet. *Fuel*, 2013, Vol.107, P. 724–739.
12. Stengele, K. Prommersberger. M. Willmann, S. Wittig, Experimental and theoretical study of one- and two- component droplet vaporization in a high pressure environment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 42 (1999), P. 2683–2694
13. Brereton, G. J. A discrete multicomponent temperature-dependent model for the evaporation of spherical droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, Vol. 60, P. 512–522.
14. Strotos, G., Gavaises, M., Theodorakakos, A., Mergeles, G. Numerical investigation of the evaporation of two-component droplets. *Fuel*, 2011, Vol. 90, P. 1492–1507.
15. Sazhin, S. S., Elwardany, A. E., Sazhina, E. M., Heikal, R. M. A quasi-discrete model for heating and evaporation of complex multicomponent hydrocarbon fuel droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, Vol. 54, p. 4325–4332.
16. Elwardany, A. E., Sazhin, S. S. A quasi-discrete model for droplet heating and evaporation: Application to Diesel and gasoline fuels. *Fuel*, 2012, Vol. 97, P. 685–694.
17. Brenn, G., Deviprasath, L.J., Durst, F, Fink, C. Evaporation of acoustically levitated multi-component liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, Vol. 50, P. 5073–5086.

18. Keller, P. et al. The influence of intra-droplet heat and mass transfer limitations in evaporation of binary hydrocarbon mixtures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, Vol. 67, P. 1191–1207.
19. Hirata M., Ohe S., Nagahama K. Computer Aided Book of Vapour-Liquid Equilibria. Elsevier, New York, 1975.
20. Lage, P.L.C., Hackenberg, C.M., Rangel, R.H. Non-ideal vaporization of dilating binary droplets with variable properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, Vol. 36, P. 3731–3741.
21. Kneer, R. et al. Diffusion controlled evaporation of a multicomponent drop-let: theoretical studies on the importance of the variable liquid properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, Vol. 36, P. 2402–2415.
22. Renksizbulut M., Bussmann, M. Multicomponent droplet evaporation at intermediate Reynolds numbers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1993, Vol. 36, P. 2827–2835.
23. Sazhin, S., et al. Modelling of biodiesel fuel droplet heating and evaporation. *Fuel*, 2014, Vol. 115, P. 559–572.
24. Kuchma, A. E., et al. Size, temperature and composition of a spherical droplet as a function of time at the transient stage of nonisothermal binary condensation or evaporation. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2013, Vol. 432, P. 147–156.
25. Lage, P.L.C., Hackenberg, C.M., Rangel, R.H. Nonideal vaporization of dilating binary droplets with radiation absorption. *Combustion and Flame*, 1995, Vol. 101, P. 36–44.
26. Abramzon, B., Sazhin, S. Convective vaporization of a fuel droplet with thermal radiation absorption. *Fuel*, 2006, Vol. 85, P. 32–46.
27. Klingsporn, M.; Renz, U. Vaporization of a binary unsteady spray at high temperature and high pressure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37 (1994), P. 265–272.
28. Kuzikovskij, A.V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field, *Izv. VUZ Fizika* 5 (1970), P. 89–94.
29. Shorin, S.N. Teploperedacha, Moskva: Vishaja Shkola, 1964.

Evaluation of contemporary “droplet” investigations in the context of binary liquid droplet modelling

Summary

In a review of investigations of heat and mass transfer of binary and multicomponent droplets, the lack of systematic evaluation of unsteady process interaction is highlighted. A methodology of unsteady diffusive mass transfer inside an evaporating binary liquid droplet is proposed.

Experimental investigation heat and mass transfer during natural convection

Roman Neilo

National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute“

Abstract. This paper presents results of experimental work on investigation of heat and mass transfer during natural convection around horizontal cylinder. During heat transfer investigation was validated different methods for estimating heat transfer coefficient. In experiment of smoke visualization was determ fluid flow field and streamlines.

Introduction. Thermal free convection – one of the most common thermal hydraulic phenomena in the world. It occurs everywhere in liquid environments where is non-uniformity of the temperature of individual regions.

Despite a long period of study of heat transfer on the surface of a horizontal cylinder, in the literature there are no definite data as analytical determination of the total intensity of the process [1-5], and many specific issues, such as reference temperature, and other. Moreover, sometimes such data conflict each other (as shown in [4]).

The experimental setup. The experimental area is an aluminum circular tube, Ø 22 mm diameter, a wall thickness of 3 mm, length 380 mm. Electric heater was placed inside tube. At the distance of 175 mm from the end surface, in the thickness of the tube, was placed thermocouple. During experiments tube were horizontally placed and heated with capacisty, which was controlled (Fig. 1).

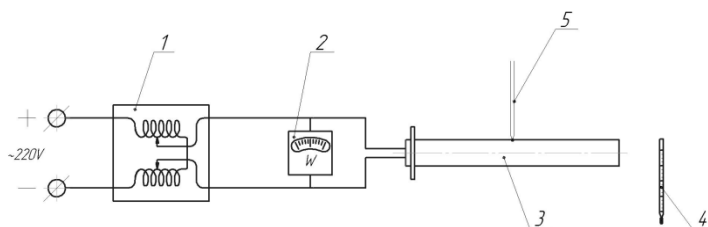


Fig. 1. The experimental setup: 1 – voltage regulator, 2 – wattmeter, 3 – experimental tube, 4 – mercury thermometer, 5 – wall temperature thermocouple.

Analysis of the results. Characteristic equation for estimating heat transfer coefficient during natural convection:

$$Nu = a \cdot Ra^n, \quad (1)$$

where: Ra – Rayleigh number (reference temperature, according to [4], was assumed fluid temperature far from heat transfer surface, reference length – tube diameter); a

and n coefficients which are determined according to the analysis of graphical interpretation experimental results in logarithmic coordinates, and, in general case, depends on the geometry of surface, heat flux direction, heat transfer rate, and so on.

In Fig. 2 presents the results of experimental work, and their comparison with existing methods for determining heat transfer coefficient. From Fig. 2 clearly that most accurately describes the experimental results method which is given in [6].

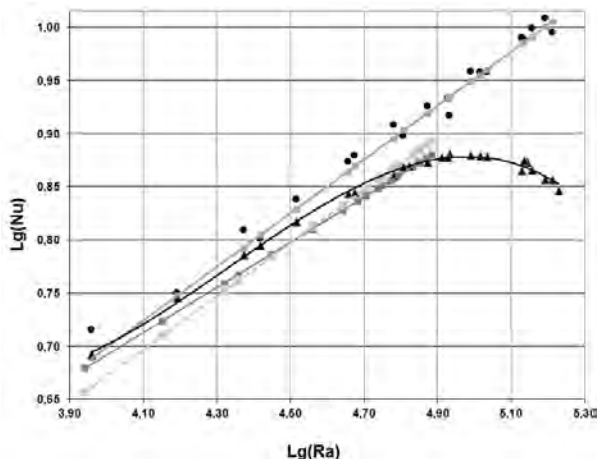


Fig. 2. Comparison of experimental data ($\bullet$) heat transfer ($Lg(Nu)$) opposite the Rayleigh number ($Lg(Ra)$) with calculated by: $\blacksquare$ – [6]; $\square$ – [7]; $\times$ – [8]; $\blacktriangle$ – [9]

Visualization. Visualize any hydrodynamic and thermal phenomena has always been the key to a deeper understanding of the phenomenon, the causes and mechanisms governing investigation process.

Free convection in terms of visualization has several advantages as well as significant limitations that make it impossible to use many traditional methods of visualization. The main shortcomings - sensitivity to any elements in the region of the surface, high inertia, low velocity of the fluid, and so on. Some advantages are: simplicity and relatively low cost of visualization setup [10]. Among the known methods of visualization [11], we used smoke visualization method. The method based on introducing in dynamic field (which exists around heated cylinder) smoke stream that has a laminar structure and moving along an imaginary line (which is opposite to the direction of gravity) with a small own speed. At low smoke flue temperature, the trajectory of the movement will be fully governed to the current lines formed around the heated body. As a result, we can emphasize the relationship dynamic and thermal boundary layers, the existence and thickness of the boundary layer, its laminarity, limits the sustainable existence of the track, and so on. Smoke

stream in the point of contact with the heated tube had a temperature of about 48 °C. The tube surface temperature was about 135 °C.

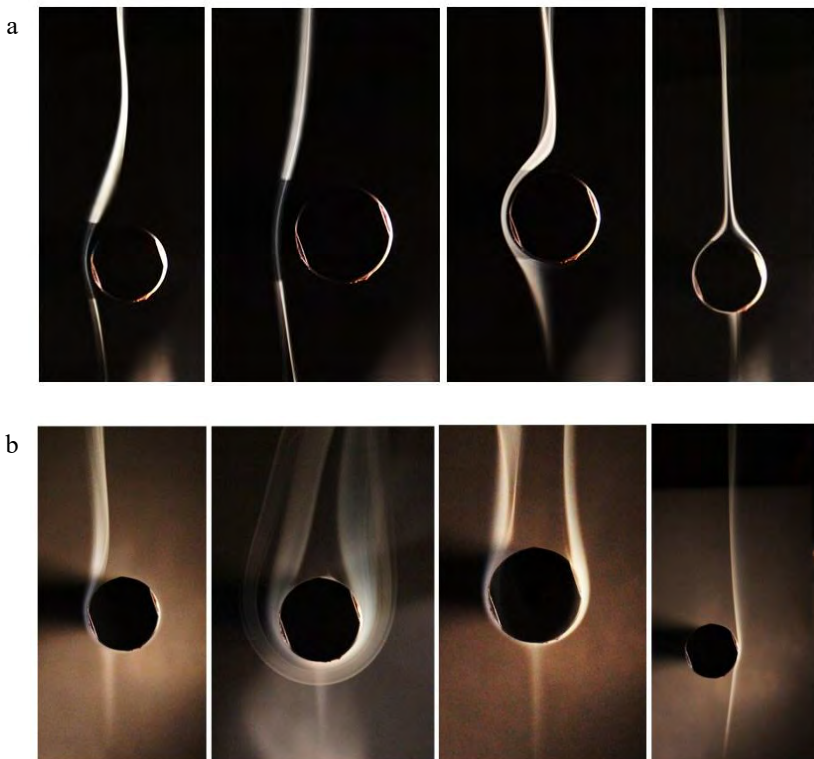


Fig. 3. Results smoke visualization: a – on a hot tube; b – on a cold tube

In Fig. 3a, are showed some results of visualization in heated setup. In Fig. 3b – for non-heated (surface temperature of the pipe was about 18 °C). You can see that streamline in cold experiments, in general, correspond to the lines of least hydraulic resistance. In particular, after passing middle section of pipe smoke stream keeps moving vertically upwards. A completely different picture of the hot cylinder experiments: the trajectories of flow stream is fully governed by flow field, existed around heated cylinder. On large scale image, we can determine the regions in top generatrix of cylinder where fluid velocity closer to zero. According to results of wall temperature measurements, where was the highest temperature, and the lowest heat transfer coefficient.

Conclusions

During experimental work were estimated different methods of calculating heat transfer coefficient, and was determined that the most accuracy can be achieved using method described in [6]. As a result of work devoted to determining of reference temperature, was obtained that fluid temperature far from heat transfer surface should be used [4]. Visualization of dynamic field around a heated cylinder makes it possible to determine the approximate edge of dynamic boundary layer and describe the mechanisms which change heat transfer coefficient around cylinder surface.

BIBLIOGRAPHY

1. Tuz, V. O., Neilo, R. V. Convective heat transfer on external surface of plain tube. *Technology Audit And Production Reserves*. 2013, № 5 (1 (13)), P. 19–23.
2. Chand, J., Dharam, V. Natural convection heat transfer from horizontal cylinders. *Journal of chemical engineering of Japan*. 1979, V. 12, P. 242–247.
3. Atayılmaz, S. Ö., Teke, İ. Experimental and numerical study of the natural convection from a heated horizontal cylinder. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2009, № 36, P. 731–738.
4. Tuz, V. O., Neilo, R. V. Reference temperature determination during natural convection. *Energy: Economics, technology, ecology*. 2013, № 3.
5. Tuz, V. O., Neilo, R. V. Experimental heat transfer investigation on horizontal cylinder during natural convection. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*. 2013, № 6.
6. Isachenko, V. P., Osipova, V. A., Sukomel, A. S. Heat transfer. Moscow, USSR: Energy. 1975, 487 p.
7. Wong, H. Y. Heat transfer for engineers. Longman Group. 1977, 213 p.
8. Tsvetkov, F. F., Grigoriev, B. A. Heat and Mass Transfer. Moscow, Power Engineering Institute. 2005, 550 p.
9. Shklover, G. G., Gusev, S. E. Effect of variable physical properties on heat convection around a horizontal cylinder. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1987, V. 53, Issue 2, P. 902–908.
10. Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. L., Sammakia, B. Buoyancy-induced flows and transport. New York: Hemisphere Publishing corp. 1988, 678 p.
11. Chaplits, A. D., Astapov, A. I. Visualization of Gas Flows Through Internal Channels (experimental researches methods and results). Dnepropetrovsk: NAS of Ukraine and NSA of Ukraine, Institute of the Technical Mechanics. 2007, 210 p.

Plazmos srauto parametrų tyrimai kolorimetriniu zondų

Žydrūnas Kavaliauskas
Lietuvos energetikos institutas

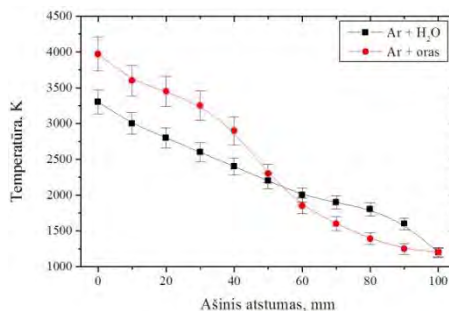
Ivadas. Ištekantių iš plazmotrono dujų srauto greičių ir temperatūrų profilams matuoti buvo naudojamas aušinamas kolorimetrinis zondas. Matavimo metodika pagrįsta šilumos balanso sudarymu atsiurbiant centriniu zondo vamzdeliu dujas ir be atsiurbimo, bei skaičiuojant entalpiją:

$$I_1 = I_2 + \frac{G_{H_2O}}{Gd} c_p (\Delta T_2 - \Delta T_1)$$

Srauto greitis pagal zondo parodymus yra skaičiuojamas pagal formulę:

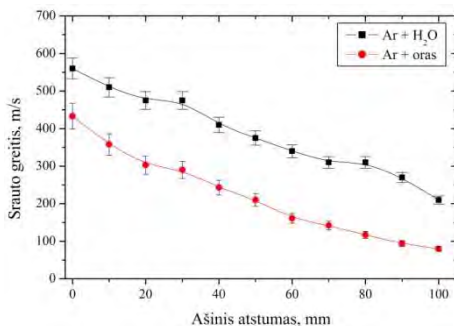
$$W = K \sqrt{\frac{2(p_p - p_{st})}{\rho}}.$$

Kolorimetriniu zondų matavimų rezultatai. Atlikti tyrimai kolorimetriniu zondų rodo, kad esant ašinio atstumo intervalui 0–30 mm dujų mišinio argonas/oras temperatūra apie 500 K yra aukštesnė negu dujų mišinio argonas/vandens garas (1 pav.). Esant ašiniui atstumui 60 mm abiejų dujų mišinių temperatūra susivienodina ir siekia apie 2000 K.



1 pav. Dujų mišinių argonas/oras ir argonas/vandens garas srautų temperatūros priklausomumas nuo ašinio atstumo

Kaip matome iš 2 pav. pateiktų rezultatų, kintant ašiniui atstumui nuo 0 iki 100 mm, dujų mišinio argonas/vandens garas greitis yra apie 100 m/s didesnis negu dujų mišinio argonas oras.



2 pav. Dujų mišinių argonas/oras ir argonas/vandens garas srautų greičio priklausomumas nuo ašinio atstumo

Išvados

1. Plazmos generatoriaus išėjime dujų argonas/vandens garas srauto temperatūra yra mažesnė negu argonas/oras. Tačiau esant nuo išėjimo 54 mm atstumui, abiejų mišinių dujų temperatūros yra vienodos ir siekia apie 2200 K.
2. Dujų mišinio argonas/vandens garas greitis plazmos generatoriaus išėjime apie 100 m/s didesnis negu dujų argonas/oras.

Padėka

Podoktorantūros stažuotė finansuojama pagal Europos Sąjungos struktūrinių fondų įgyvendinamą projektą „Podoktorantūros (post doc) stažuotių įgyvendinimas Lietuvoje“.

Literatūra

1. Tamošiūnas A., Grigaitienė V., Valatkevičius P., Valinčius V. Syngas production from hydrocarbon-containing gas in ambient of water vapor plasma. *Catalysis Today*, 196 (2012), P. 81-8.

Plasma flow parameters of the colorimetric probe

Summary

Calculations leaving the plasmatron gas flow velocity and temperature profiles were used to measure the cooling colorimetric probe. The measurement procedure is based on the heat balance sheet a suction tube gas central probe and without suction.

Katalizinio pluošto formavimas plazmine technologija ir jo savybių tyrimas

Mindaugas Milieška, Romualdas Kėželis, Vitas Valinčius
Lietuvos energetikos institutas

Įvadas. Dėl visuotinio klimato atšilimo bei oro taršos iš pramonės ir energetikos (katilinės, šiluminės elektrinės) objektų bei transporto, tiek Lietuvoje, tiek Europos Sąjungoje vykdomos įvairios aplinkosauginės programos. Pagrindiniais taršos sukėlėjais įvardijamos anglies monoksido (CO), azoto oksidų (NO_x) ir angliavandenilinės (HC) dujos. Siekiant sumažinti šių teršalų emisiją į atmosferą ir taupant energiją, naudojami riboto pritaikymo granuliu arba brangūs, sudaryti iš tauriųjų metalų (platinos), katalizatoriai. [1-2].

Per pastaruosius 20 metų, po truputį buvo pradėti naudoti pluoštiniai katalizatoriai, gaminami anglies arba stiklo medžiagų pagrindu, kurių pritaikymas yra žymiai platesnis. Lanksčios ir ilgos pluošto skaidulos leidžia pagaminti bet kokios geometrinės formos katalizatorius, kas neįmanoma tradiciniams miltelių ar granuliu katalizatoriams, bei juos patalpinti į bet kokios formos išmetamųjų dujų kanalus. Tai taip pat juos leidžia naudoti multifunkciniuose reaktoriuose, kurie apima reakcijas (oksidacija) ir separacijas (filtravimas, adsorbcija). Pluoštiniai katalizatoriai pasižymi mažu medžiagų difuzijos atstumu. Dėl to jie ypač patrauklūs ir skystos fazės medžiagų katalizinėms reakcijoms. Kitais pluoštinių katalizatorių privalumais įvardijami didelis geometrinio paviršiaus plotas, saugus darbas, lengvas darbo masto padidinimas ir kt. [3].

Sukurta ir išplėta plazminė technologija, skirta sudaryti labai smulkų aukšta-temperatūrų pluoštą iš dispersinių keraminių medžiagų [4], kuris pasižymi dideliu paviršiaus plotu, suteikia galimybę šį pluoštą pritaikyti ir heterogeninėje katalizėje. Viena pagrindinių katalizinio pluošto savybių, kaip ir katalizinis aktyvumas, yra atsparumas aukštai temperatūrai [5]. Darbo metu katalizatorių temperatūra siekia 900–1100 °C, todėl jiems gaminti naudojamos aukštomis temperatūroms atsparios medžiagos.

Šiame darbe plazmine technologija suformuojamas ceolitų pluoštinis katalizatorius su ant jo paviršiaus nusodinamomis nebrangiomis kataliziškai aktyviomis vario ar titano oksido dalelėmis ir tiriamas gauto pluošto atsparumas aukštai temperatūrai.

Tyrimų metodika. Eksperimentai buvo vykdomi tiesiasroviu plazmocheminiu reaktoriumi su 80 kW galios plazmos generatoriumi (PG). Plačiau apie reaktorių ir keraminio pluošto formavimo procesą aprašyta [6], o reaktoriaus darbo parametrai pateikti 1 lentelėje. Siekiant, kad eksperimentų metu katalizinės vario (Cu) ir titano oksido (TiO_2) dalelės nusėstų ant formuojamo ceolitų pluošto paviršiaus, jos buvo užpučiamos plazmos srauto išteklėjimo iš reaktoriaus zonoje per papildomai įtaisytą

dispersinių dalelių dozatorių. Visų darbe naudotų dispersinių dalelių dydis neviršijo 60 μm .

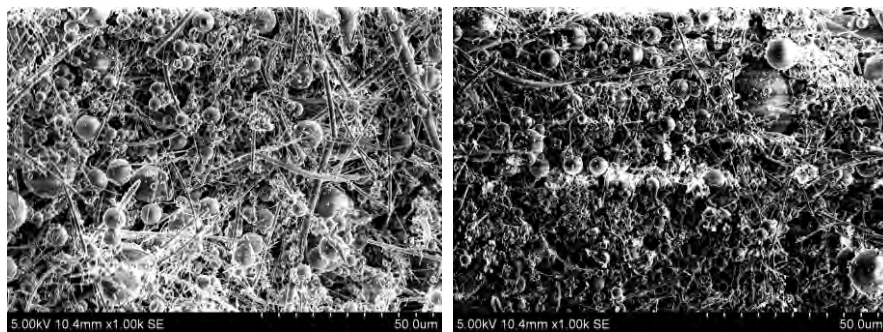
1 lentelė. Plazmocheminio reaktoriaus darbo parametrai

Plazmos generatoriaus galia, kW	80
Oro srautas (G_1), 10^{-3} kg/s	22
Propano dujų srautas (G_p), 10^{-3} kg/s	1,2
Dispersinių dalelių srautas (G_z), 10^{-3} kg/s	1
Ištekanti iš reaktoriaus plazmos srauto temperatūra, K	3100
Ištekanti iš reaktoriaus plazmos srauto greitis, m/s	~1200
Plazmos generatoriaus naudingumas, %	80

Plazmai formuoti ir dispersinėms dalelėms įpūsti į reaktorių buvo naudojamas oro srautas, o propano dujos naudotos suintensyvinti plazmos srauto ir dispersinių dalelių šilumos mainus.

Katalizinio pluošto paviršiaus morfologijos tyrimai atlikti kompanijos JEOL pagamintu JSM-5600 modelio skenuojančiu elektroniniu mikroskopu (SEM). Terminės analizės (termogravimetrijos) tyrimai atlikti naudojant Simultaneous Thermal Analyzer NETZSCH STA 449 F3. Temperatūra analizatoriuje tiriant visus bandinius buvo didinama vienodu 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ tempu nuo 20 $^{\circ}\text{C}$ iki 900 $^{\circ}\text{C}$ oro aplinkoje, platininiuose tigluikuose. XRD metodu buvo nustatyti keraminio pluošto kristalinės fazės pokyčiai prieš ir po termogravimetrinės analizės.

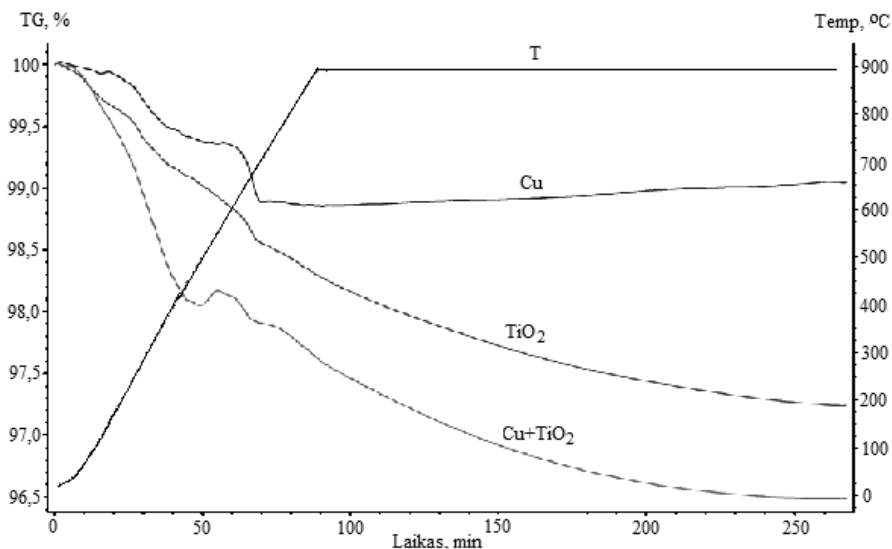
Rezultatų aptarimas. Katalizinio pluošto formavimo metu katalizinės dalelės tikslingai yra užpučiamos ant formuojamo pluošto jo formavimo vietoje, kad nespėtų visiškai išsilydyti plazmos sraute ir padengtų pluošto skaidulas. Tokiu būdu katalizinės pluošto savybės yra maksimalios, nes katalizinės dalelės neprasisverbia į pluošto skaidulų vidų, o jo paviršiaus plotas nesumažėja.



1 pav. Katalizinio pluošto SEM vaizdai. Kairėje – ceolitų pluoštas su vario, dešinėje – su titano oksido dalelėmis

1 pav. pateikti suformuoto ceolitų pluošto su vario ir titano oksido dalelėmis vaizdai, iš kurių matome, kad dispersinės dalelės išlaiko savo taisyklingą sferos formą, ir tik nedaugelis jų sprogsa dėl terminės sąveikos su plazmos srautu. Taip pat, dalelės nespėja net iš dalies išsilydyti, nes jų dydis išlieka toks pat, kaip prieš jų užpūtimą ant pluošto. Tik dalelių paviršius įkaista tiek, kad jos sugebėtų prilipti prie pluošto paviršiaus.

Išmatavus gauto katalizinio pluošto paviršiaus plotą, nustatyta, kad didžiausias paviršiaus plotas yra bandinio su titano oksido dalelėmis ir siekia $8,46 \text{ m}^2/\text{g}$. Bandinio su vario dalelėmis paviršiaus plotas lygus $5,91 \text{ m}^2/\text{g}$, o su vario ir titano oksido dalelėmis – $6,8 \text{ m}^2/\text{g}$. Be katalizinių dalelių formuojamo ceolitų pluošto paviršiaus plotas siekia $4,13 \text{ m}^2/\text{g}$. Taigi, dispersinių katalizinių dalelių užpūtimas ant ceolitų pluošto paviršiaus plotą atskirais atvejais padidina netgi iki 2 kartų, kas labai svarbu katalizinio pluošto efektyvumui.

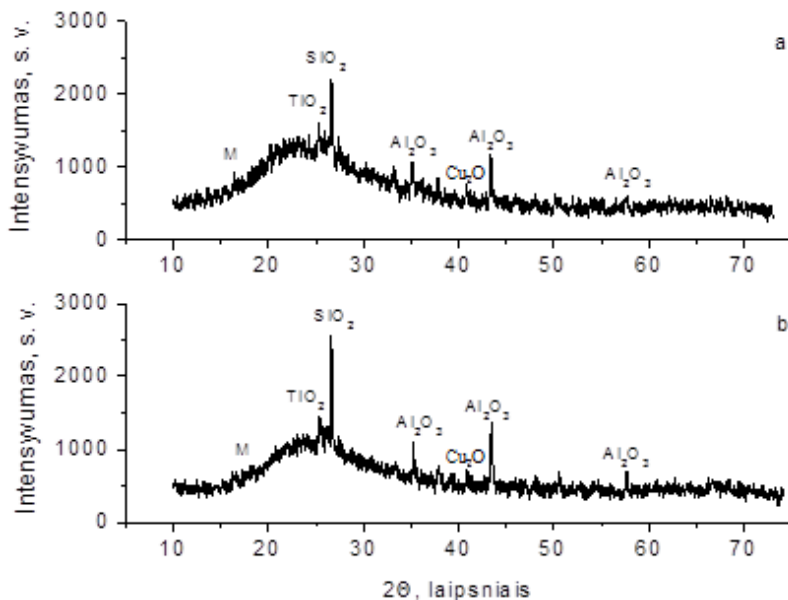


2 pav. Katalizinio pluošto su vario, titano oksido ir jų mišinio dalelėmis termogravimetrinės kreivės

Termogravimetrinės analizės metu bandinių temperatūra buvo didinama $10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ tempu nuo $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros. Po to, $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūra buvo laikoma pastovi 3 val. 2 pav. matome, kad kylant temperatūrai, visi bandiniai sparčiai netenka 1–2 % masės dėl drėgmės išgaravimo. Lėčiausiai masės netenka katalizinio pluošto bandiniai su vario dalelėmis, ką galima paaiškinti vario oksidacija į Cu_2O , kuri vyksta temperatūrose, didesnėse nei $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [7]. Prie $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ vario dalelės jungiasi su aliuminiu, esančiu ceolitų sudėtyje ir sudaro CuAl_2O_4 , kuris taip

pat naudojamas kaip katalizinė medžiaga [8]. Bandinys su titano oksido dalelėmis masės netenka dėl savo fazinių virsmų iš anatazo į rutilą, kurie prasideda prie 600 °C [9]. Pluoštas su lygiomis masinėmis vario ir titano oksido dalelėmis netenka daugiausiai masės, nes jam būdingi abiejų prieš tai aprašytų bandinių virsmai. Apibendrinant, kaitinimo iki 900 °C metu, bandiniai neteko nuo 1 iki 3,5 % masės, kas leidžia teigti, kad jie yra pakankamai atsparūs aukštai temperatūrai.

Kaip teigiama literatūroje [10], keraminis pluoštas, kurio sudėtyje vyrauja kristalinės formos dariniai, prie aukštų temperatūrų yra mažiau linkęs trauktis prarasdamas savo masę, nei toks, kuriame vyrauja amorfinės formos dariniai. Todėl gautas pluoštas buvo tiriamas taikant XRD metodą, siekiant nustatyti jo kristalinę sudėtį prieš ir po kaitinimo terminės analizės metu. 3 pav. pateiktos katalizinio pluošto su vienodomis masinėmis vario ir titano oksido dalelių dalimis XRD kreivės.



3 pav. Katalizinio pluošto su vario ir titano oksido dalelėmis rentgenogramos prieš (a) ir po (b) terminės analizės. M – mulitas, cheminė sudėtis – $\text{Al}_{4,54}\text{Si}_{1,46}\text{O}_{9,73}$

Iš XRD tyrimo matome, kad suformuotame kataliziniame pluošte vyrauja kristalinės formos dariniai, ką parodo aiškiai išreikštos smailės. Katalizinis pluoštas susideda iš kristalinės formos: mulito ($\text{Al}_{4,54}\text{Si}_{1,46}\text{O}_{9,73}$, smailė prie 16 laipsnių), kvarco (silicio oksidas, smailė prie 26 laipsnių) bei korundo (aluminio oksidas, smailės prie 35, 43 ir 58 laipsnių), kurie yra pagrindinė ceolitų sudedamoji dalis; titano oksido atmainų anatazo ir rutilo (smailės atitinkamai prie 25 ir 27 laipsnių);

vario oksido (smailė prie 42 laipsnių). Iš smailių intensyvumo po kaitinimo padidėjimo galime teigti, kad po kaitinimo susidarė daugiau kristalinių darinių. Taip pat, tai patvirtina, kad amorfinės fazės dariniai yra labiau linkę prarasti masę nei kristalinės fazės junginiai.

Išvados

1. Ištirta, kad aukštatemperatūrinio pluošto gamybos plazminė technologija gali būti pritaikyta kataliziniam pluoštui gaminti, ant formuojamo pluošto paviršiaus nusodinant kataliziškai aktyvias dispersines daleles. Dispersinių katalizinių dalelių užpūtimas ant ceolitų pluošto paviršiaus plotą atskirais atvejais padidina netgi iki 2 kartų, kas labai svarbu katalizinio pluošto efektyvumui.
2. Terminės analizės metu nustatyta, kad suformuoto katalizinio pluošto bandiniai, kaitinimo iki 900 °C metu, neteko nuo 1 iki 3,5 % masės, dėl drėgmės išgaravimo, fazinių virsmų bei naujų cheminių junginių susidarymo. Didžiausias masės sumažėjimas būdingas bandiniui su lygiomis masinėmis vario ir titano oksido dalelėmis.
3. XRD tyrimais parodyta, kad suformuoto katalizinio pluošto sudėtyje vyrauja kristalinės formos dariniai. Po bandinių kaitinimo kristalinės formos darinių daugėja, o amorfinės – mažėja.

Padėka. Tyrimus remia Lietuvos mokslo taryba, sutarties Nr. MIP–101/2012.

Literatūra

1. Mulla, S. S., Chen N., Cumarantunge, L., Blau, G. E., Zemlyanov, D. Y., Delgass, N. W., Epling, W. S., Ribeiro, F. H. Reaction of NO and O₂ to NO₂ on Pt: Kinetics and catalyst deactivation. *Journal of Catalysis*. 2006, Vol. 241, P. 389–399.
2. Takenaka, S., Hirata, A., Tanabe, E., Matsune, H., Kishida, M. Preparation of supported Pt–Co alloy nanoparticle catalysts for the oxygen reduction reaction by coverage with silica. *Journal of Catalysis*. 2010, Vol. 274, P. 228–238.
3. Matatov-Meytal, Y., Sheintuch, M. Catalytic fibers and cloths. *Applied Catalysis A: General*. 2002, Vol. 231, P. 1–16.
4. Kalpokaitė-Dičkuvienė, R., Kėželis, R., Čėsniienė, J., Brinkienė, K., Baltušnikas, A., Milieška, M. Microstructure analysis of fibrous material manufactured by plasma spray method. *Materials science (Medžiagotyra)*. 2009, Vol. 15, No. 3, P. 262–265.
5. Trimm, D. L. Thermal Stability of Catalyst Supports. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 1991, Vol. 68, P. 29–51.
6. Milieška M., Kėželis R., Mėčius V. Influence of gas flow rate on the thermal characteristics of plasma-chemical reactor. 7th CYSENI, LEI, May 27-28, 2010. P. 450–456.

7. Isah, K. U., Bakeko, M., Ahmadu, U., Uno, U. E., Kimpa, M. I., Yabagi, J. A. Effect of oxidation temperature on the properties of copper oxide thin films prepared from thermally oxidised evaporated copper thin films. *IOSR Journal of Applied Physics* (IOSR-JAP) e-ISSN: 2278-4861. Vol. 3, Iss. 2, P. 61–66.
8. Salavati-Niasari, M., Davar, F., Farhadi, M. Synthesis and characterization of spinel-type CuAl_2O_4 nanocrystalline by modified sol–gel method. *J Sol-Gel Sci Technol.* 2009, Vol. 51, P. 48–52.
9. Marinescu, C., Sofronia, A., Rusti, C., Piticescu, R., Badilita, V., Vasile, E., Baies, R., Tanasescu, S. DSC investigation of nanocrystalline TiO_2 powder. *J Therm Anal Calorim.* 2011, Vol. 103, P. 49–57.
10. Bhattacharyya, A. K., Choudhury, B. N., Chintiaiah, P., Das, P. Studies on a probable correlation between thermal conductivity, kinetics of devitrification and changes in fiber radius of an aluminosilicate ceramic vitreous fiber on heat treatment. *Ceramics International.* 2002, Vol. 28, P. 711–717.

The investigation of properties of catalytic fiber prepared using plasma technology

Summary

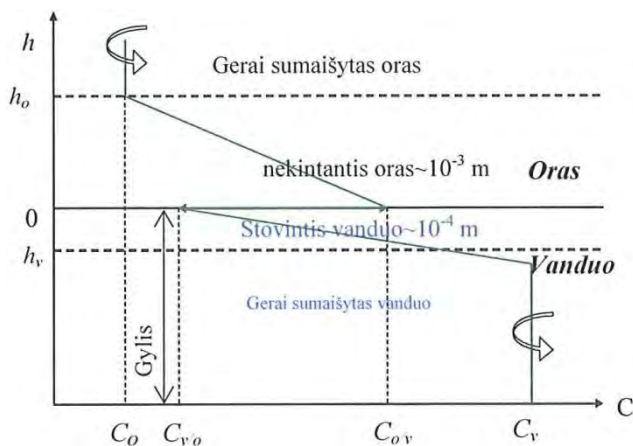
In this work the plasma technology was employed to prepare the catalysts with catalytically active Cu, TiO_2 particles and their mixture on zeolite fiber support and to investigate the thermal stability of obtained catalyst fiber. The most thermally stable was the fiber with the Cu particles as its shrinkage during the heating up to 900 °C was the lowest and equal to 1.2%. The shrinkage of all samples doesn't exceed 4%. The prepared catalytic fiber consists of crystalline structure formations. The quantity of crystalline structures increases after the heating of catalytic fibers.

Oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinio susidarymas krintančio vandens srauto zonoje

Adelė Vaidelienė, Ramutė Grikštaitė
Lietuvos energetikos institutas

Dujų pernaša per oro ir vandens sandūrą. Dujų pernaša, kurią per oro ir vandens sandūrą sukelia difuzijos procesas, vyksta molekuliniam lygmenyje [1]. Tokia dujų pernaša vyksta tiek tada, kai tėkmė tolygi, tiek tada, kai tėkmė turbulentinė (žr. 1 pav.). Kai dujos mažai tirpios, pernešimo intensyvumą lemia vandeningos sandūros terpės priešinimasis [2]. Dujingos terpės pasipriešinimo paprastai nepaisoma.

Literatūroje [3] vandeninga terpe priimta vadinti, kai vyksta dujų difuzija iš vandens į orą per oro ir vandens sandūrą. Vykstant dujų difuzijai iš oro į vandenį per oro ir vandens sandūrą, literatūros šaltiniuose [3–4] vadinama dujinga terpe.

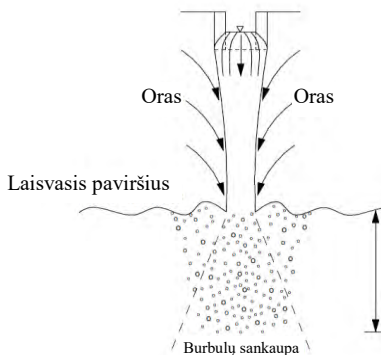


1 pav. Dujų pernaša per oro ir vandens sandūrą

Vykstant turbulencijai difuzijos procesas sukuria sandūroje labai ploną vandeningos masės ribinį sluoksnį, kurio dujų koncentracijos gradientas ir nulemia dujų srauto dydį [5]. Maišymosi procesai vandeningoje sandūros terpėje – laisvo paviršiaus bangavimas ir turbulencija sluoksniuose arti paviršiaus – plonina minėtąjį sluoksnį, tuo pačiu didindami koncentracijos gradientą ir dujų mainus sandūroje [6]. Ką tik nurodytame darbe tiriama nesuardyta, t. y. nesutrūkinėjusi, oro ir vandens sandūra. Jame nagrinėjama oro ir vandens sandūros būseną, kai vandens paviršius netrūkinėja ir vanduo neišsiliauja per įtrūkius. Kai vandens paviršius trūkinėja ir van-

duo stipriai išsilieja per įtrūkius, tai tokios būsenos laikomos labai dinamiškomis, o jas lydintys oro įtraukimo, burbuliukų susidarymo bei aerozolių generavimo reiškiniai, turinčiais didelės įtakos dujų pernašai. Tačiau, net ir veikiant burbuliukams ir aerozoliams, vandens ir oro mainus užtikrina difuzija vykstanti dvifazėje sandūroje. Šios rūšies difuzija aptariama [7] darbe. Čia daroma prielaida, kad oro ir vandens sandūra yra plokščia, o dujų srautas per oro ir vandens sandūrą yra pakankamai homogeniškas.

Oro burbuliukų įtraukimo į vandenį pradžios sąlygos. Orą į vandenį gali įtraukti vandens čiurkšlė, krintanti į telkinio vandens paviršių. Čiurkšlės smūgio į vandens paviršių metu oro ir vandens sandūroje susidaro oro burbuliukai, kurių didesnė ar mažesnė dalis (atsižvelgiant į sąlygas) yra įtraukiama į vandenį (žr. 2 pav.). Tokie oro įtraukimai į vandenį vyksta, kai vanduo teka per užtvankas, hidroelektrines ar rėvas. Įtraukti oro burbuliukai ir vandens lašeliai sudaro oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinį. Šį oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinį dėl jo vizualiai sukeliama išpūdžio įprasta vadinti „baltuoju vandeniu“. Šie oro burbuliukų ir vandens lašelių mišiniai gali susidaryti ežeruose, dideliuose tvenkiniuose bei vandenynuose. Juose oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinį sudaro lūžtančios bangos, atsirandančios dėl vėjo poveikio oro ir vandens sąlyčio metu.

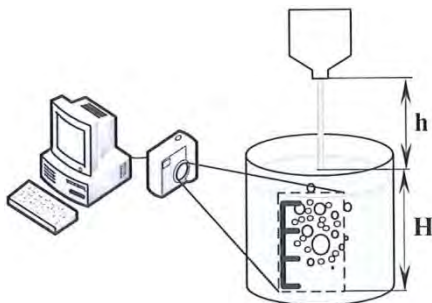


2 pav. Oro burbuliukų įtraukimo schema [8]

Tiriant oro burbuliukų įtraukimo procesą, svarbu nustatyti pradines ribines sąlygas, kurioms esant oro burbuliukai pradedami įtraukinėti. Tai, kad tokios sąlygos egzistuoja, nesunku suprasti reiškinių nagrinėjant energetiniu požiūriu. Krintantis vandens srautas turi turėti minimalų energijos kiekį, kad įtrauktų orą, nes turi būti atliekamas darbas paviršiaus įtempiams įveikti ir potencinei gravitacijos energijai atsverti. Daugelio tyrėjų darbuose vandens čiurkšlės geometriniai parametrai siejami su tokiais parametrais, kaip krintančios čiurkšlės atstumas iki vandens paviršiaus, purkštuko forma, purkštuko diametru, krintančios čiurkšlės diametru smūgio metu į

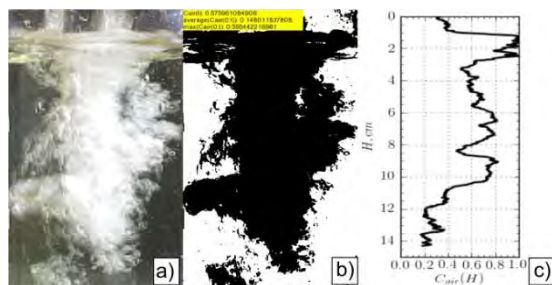
vandens paviršių ir kitais geometriniais parametrais [9]. Lin ir Reitz savo darbuose tyrė tik tuos geometrinius čiurkšlės parametrus, kuriems esant formuojasi atskiri vandens lašeliai ir visai netyrė oro įtraukimo proceso. Bim oro įtraukimo procesą siejo su We (Veberio) skaičiumi. Be to, Bim teigė, jog oras įtraukiamas į vandenį dėl to, kad krintanti vandens čiurkšlė suskyla į daugelį atskirų lašelių. Šiuo tikslu buvo pradėti atskiri pavienių krintančių lašelių tyrimai. Vėlesniuose darbuose mokslininkai įtraukiamo oro kiekį į vandenį ir kitus mažos klampos skysčius siejo su krintančios čiurkšlės greičiu [9-10].

Oro burbuliukų įtraukimo į vandenį tyrimo rezultatai. Sudarytas A. Vaidelienės, A. Galdiko ir P. Tervydžio oro įtraukimo ir pasišalinimo matematinis modelis, aprašytas [11]. Teorinio ir eksperimentinio tyrimo metu visa mišinio zona suskaidyta į atskirus plonus oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinio sluoksnius (sluoksnelio storis 10^{-4} m). Sudarytas oro ir vandens sandūroje vykstančių oro įtraukimo, pasišalinimo, vandens lašelių išmušimo, garavimo ir grįžamojo įtekio procesus apimantis matematinis modelis, ir siekiant jį patikrinti, atlikti eksperimentai su vertikaliai krintančia vandens čiurkšle į uždara indą ir vaizdų apdorojimo būdu išmatuota įtraukto oro koncentracija kiekvienuose gilesniuose vandens sluoksniu taškuose tiek į gylį, tiek ir į plotį. Skaitmeninis vaizdų apdorojimo būdas leidžia vienu metu fiksuoti visą susidariusio oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinio vaizdą (žr. 3 pav.).



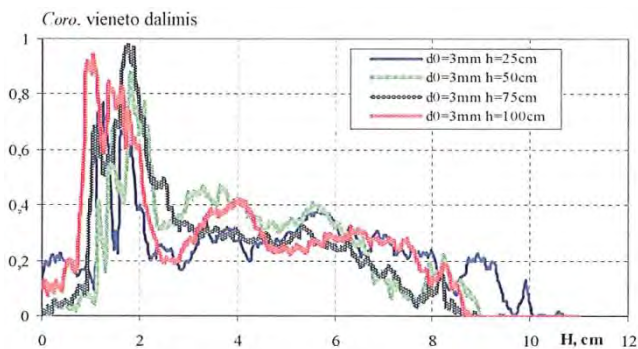
3 pav. Eksperimento įrangos schema

Kaip matyti iš 3 paveikslų, krintančios į vandenį čiurkšlės zonoje yra įtraukiamas oras, kuriam maišantis su vandeniu susidaro oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinys. Gautas vaizdas fiksuojamas skaitmenine vaizdo kamera, kuri sujungta su kompiuteriu. Skaitmeniniu vaizdų apdorojimo būdu matuojame oro burbuliukų koncentraciją. Skaitmenine fotokamera gautų vaizdų analizei buvo naudojama Python 2.7 vaizdų biblioteka.

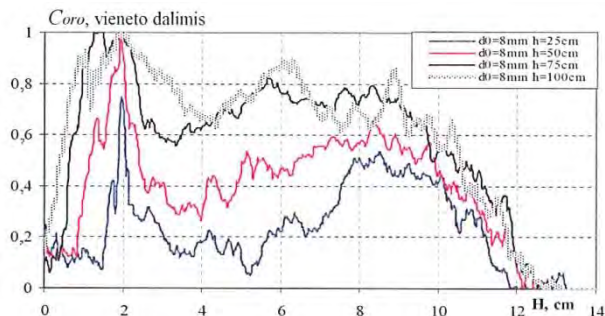


4 pav. Oro įtraukimo kitimas gautas eksperimento metu: a) – foto vaizdas su oro burbuliukais vandenyje, b) – modifikuotas įtrauktų oro burbuliukų vaizdas: juoda spalva atitinka oro burbuliukus, o balta, pagrindo spalva, – vandenį, c) – oro koncentracijos pasiskirstymo kreivė į gylį ir plotį

Eksperimento metu gautas vaizdas pateiktas 4 paveiksle. Kaip matyti iš šio paveikslo, eksperimento metu gauname trijų dalių vaizdą. Kairioji pusė (žr. 4a pav.) yra realus oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinio vaizdas. Vidurinė paveikslo dalis (žr. 4 b pav.) yra modifikuotas skaitmeninis oro įtraukimo į vandenį vaizdas, gautas vaizdų apdorojimo Pyhton 2.7 PIL bibliotekos kodu. Juodas skaitmeninis vaizdas atitinka oro burbuliukus, o baltas vaizdas – vandenį. Dešiniojoje paveikslo dalyje Dekarto koordinatų sistemoje rodomas įtraukto oro koncentracijos kitimas į gylį (žr. 4 c pav.).



5 pav. Įtraukto oro į gylį maksimalios koncentracijos kitimas, atsižvelgiant į krantinčios čiurkšlės aukštį, kai $d_0 = 0,003$ m



6 pav. Įtraukto oro į gylį maksimalios koncentracijos kitimas, atsižvelgiant į krantinės čiurkšlės aukštį, kai $d_0 = 0,008$ m

Eksperimento metu keitėme atstumą nuo $h = 0,25$ m iki $h = 1$ m kas $0,25$ m. Taip pat keitėme purkštuko skersmenį d_0 .

Įtraukto oro koncentracijų maksimumo kitimas, gautas eksperimento metu, pateiktas 5–6 paveiksluose. Didžiausia tūrinė santykinė įtraukto oro koncentracija pasiekama, kai purkštuko skersmuo yra $d_0 = 0,008$ m (žr. 6 pav.). Kaip matome iš 5–6 paveikslų, įtraukto oro koncentracija į gylį yra tiesiog proporcinga krantinės čiurkšlės aukščiui.

Išvados

1. Pasiūlytas naujas optinis oro įtraukimo į vandenį metu susidarančio oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinio sudedamųjų dalių koncentracijos matavimo metodas, pagrįstas skaitmeniniu vaizdų apdorojimo būdu.
2. Skaitmeninis vaizdų apdorojimo būdas leidžia vienu metu fiksuoti visą susidariusio oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinio vaizdą ir apskaičiuoti įtrauktų oro burbuliukų koncentracijos funkcinį priklausomumą tiek nuo gylio, tiek nuo pločio.

Literatūra

1. Wanninkhof, R.; Asher, W. E.; Ho, D. T.; Sweeney, C.; McGillis, W. R. Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 1, 2009, P. 213–244.
2. McGillis, W. R.; Dacey, J. W. H.; Ware, J. D.; Ho, D. T.; Bent, J. T.; Asher, W. E.; Wanninkhof, R.; Komori, S. Air-water flux reconciliation between the atmospheric CO_2 profile and mass balance techniques. *Transport at the Air Sea Interface*, 2007, P. 1–15.
3. Rowe, M. D.; Perlinger, J. A. Micrometeorological measurement of hexachlorobenzene and polychlorinated biphenyl compound air-water gas exchange in Lake Superior and comparison to model predictions. *Atmospheric Chemistry*

- and *Physics Discussions* 12, 2012, p. 983–1017. DOI:10.5194/acpd-12-983-2012
4. Johnson, M. T. A numerical scheme to calculate temperature and salinity dependent air-water transfer velocities for any gas. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 7, 2010, P. 251–290.
 5. Hintsä, E. J.; Dacey, J. W. H.; McGillis, W. R.; Edson, J. B.; Zappa, C. J.; Zemmeling, H. J. Sea-to-air fluxes from measurements of the atmospheric gradient of dimethylsulfide and comparison with simultaneous relaxed eddy accumulation measurements. *J. of Geophysical Research*, Vol. 109, 2004, p. C01026:1–7.
 6. Cole, J. J.; Bade, D. L.; Bastviken, D.; Pace, M. L.; Van de Bogert, M. Multiple approaches to estimating air-water gas exchange in small lakes. *Limnol. Oceanogr.: Methods* 8, 2010, 285–293.
 7. Chatterjee, S.G. A Theoretical Analysis of Dissolved-Gas Transfer to the Bulk Liquid in Gas Absorption with a First-Order Reaction. *Indian Chemical Engineer* 51, 2009, P. 177–193.
 8. Ozkan, F.; Kaya, T.; Baylar, A. Study of the influence of venturi weir type on air bubble entrainment. *Scientific Research and Essay* Vol. 4(11), 2009, p. 1184–1193.
 9. Müller, A.; Behrens, J.; Giraldo, F. X.; Wirth, V. Comparison between adaptive and uniform discontinuous Galerkin simulations in dry 2D bubble experiments. *Journal of Computational Physics* 235, 2013, P. 371–393.
 10. Qu, X.; Goharzadeh, A.; Khezzer, L.; Molki, A. Experimental characterization of air-entrainment in a plunging jet. *Experimental Thermal and Fluid Science* 44, 2013, p. 51–61.
 11. Vaidelienė, Adelė; Galdikas Arvidas; Tervydis, Paulius. Modeling of Kinetics of Air Entrainment in Water Produced by Vertically Falling Water Flow. *Materials Science*. 3(20), 2014, P. 357–362.

Air bubbles and water droplets mixture forming in the falling water jet zone

Summary

The paper deals with process of air entrainment in water caused by water flow vertically falling in the free water surface. For the experimental part of this study a new method based on digital imaging process was developed.

Vandens lašelių fazinių virsmų ciklo skaitinio modeliavimo iteracinės schemos optimizavimo savitumai

Monika Maziukienė, Gintautas Miliauskas
Kauno technologijos universitetas

Lašelių garavimo sparta apibrėžia daugelio skysčio išpurškimo grindžiamų terminų technologijų efektyvumą. Tarp jų jau tradicinėmis laikomos skystojo kuro deginimo išpurkštame pavidale energetikoje ir transporte technologijos. Jose skysčio lašeliai visiškai išgarinami. Oro kondicionavimas taip pat turi senas tradicijas, tačiau šiuo atveju orui drėkinti vandens lašeliai išgarinami tik iš dalies, o oro sausinimas galimas tik vandens garo kondensacijos lašelių paviršiuje režime. Kondensaciniu fazinių virsmų režimu grindžiamos ir šiuolaikinės fazinių virsmų šilumos iš dūmų utilizavimo technologijos. Jose pritaikomas ir vandens išpurškimas: rekuperaciniuose kondensatoriuose vanduo purškiamas hidrodinaminiam kondensacinės plėvelės vamzdeliuose režimui pagerinti, o perspektyviuose kontaktiniuose kondensatoriuose vandens čiurkšlė užtikrina tiesioginį lašelių pašilimą dūmuose esančio garo kondensacijos jų paviršiuje metu. Taigi, įvairių terminų technologijų tobulinimas ir naujų kūrimas reikalauja šilumos ir masės mainų procesų pažinimo lašelių fazinių virsmų pilname cikle, kurį atskiram lašeliui galima apibrėžti skysčio išpurškimą ir lašelio pilną išgaravimą apibrėžiančiais laiko $\tau \equiv \tau_0 = 0$ ir $\tau \equiv \tau_f$ momentais atitinkamai. Šiame lašelio fazinių virsmų cikle $0 \div \tau_f$ svarbūs kondensacinis, nestacionariojo ir pusiausvirojo garavimo režimai:

$$0 \div \tau_f \rightarrow 0 \div \tau_{ko} \div \tau_{nf} \div \tau_f. \quad (1)$$

Fazinių virsmų režimą (1) cikle galima apibrėžti pagal lašelio paviršiaus temperatūrą T_R . Kondensaciniam fazinių virsmų režimui vykti reikia, jog lašelio apsuptyje būtų skysčio garo ($p_{g,\infty} > 0$), ir lašelio paviršius būtų šaltesnis už rasos taško temperatūrą ($T_R < T_n$). Kondensaciniame fazinių virsmų režime ($\tau \equiv 0 \div \tau_{ko}$) lašelio paviršius pašyla nuo išpurškiamo skysčio temperatūros iki rasos taško temperatūros. Lašeliui pašilus iki rasos taško temperatūros, pasikeičia fazinių virsmų režimas ir prasideda skysčio paviršinis garinimas. Pradžioje garavimas laikomas nestacionariuoju, kadangi lygiagrečiai vyksta ir skysčio lašelyje šilimas. Nestacionariojo garavimo režime lašelis pašyla iki pusiausvirą garavimą užtikrinančios terminės būsenos. Pusiausviram garavimui pasiekti būtinas laikas apibrėžiamas kondensacinio ir nestacionariojo garavimo fazinių virsmų režimo trukmėmis: $\tau_e \equiv \tau_{ko} + \tau_{ng}$. Pusiausviro garavimo terminė būsena apibrėžti tenka atsižvelgti ir į lašelio šilumokaitos su apsuptimi savitumus [1–3]. Laidumu šildomas lašelis („k“ šilumokaita)

pusiausvirą garavimą pasiekia izoterminškos būsenos, kurią apibrėžia $T_{e, "k"}$ temperatūra: $T(\eta, \tau_{e, "k"}) \equiv T_{R, e, "k"}$. Pastaroji yra lašelį supančių dujų mišinio temperatūros T_d ir jame esančio skysčio garo tūrinės dalies, išreiškiamos skysčio garo dalinio ir mišinio slėgių santykiu $\bar{p}_{g, \infty} = p_{g, \infty} / p$, funkcija $T_{e, "k"} = f(T_d, \bar{p}_{g, \infty})$. Dujose slystančio lašelio („c“ šilumokaita) pusiausviras garavimas prasideda jam pašilus iki aukštesnės už „k“ šilumokaitos atvejo temperatūrą $T_{e, "c"} > T_{e, "k"}$, tačiau pusiausviro garavimo pradžioje lašelis yra izoterminškas, t. y. $T(\eta, \tau_e) \equiv T_{R, e}$. Sudėtinio šildymo laidumu ir spinduliavimu („k+r“ šilumokaita) bei konvekcija ir spinduliavimu („c+r“ šilumokaita) atvejais pusiausvirą garavimo režimą pasiekia lašelis ne tik daugiau pašilęs, bet ir būdamas neizoterminškas su neigiamu gradiento temperatūros lauku [1]. Pusiausviro garavimo terminės būsenos specifiką apibrėžia spinduliuotės srauto sugėrimo pusskaidriame lašelyje savitumai, pasireiškiantys tūriniu spinduliuotės sugėrimu. Kadangi lašelio paviršiuje spektrinė spinduliuotė praktiškai nesugerinama [4], todėl šilumos srautų sąveikoje lašelio paviršiuje nedalyvauja ir tiesioginio poveikio lašelio garavimui neturi. Tačiau lašelyje sugertas spinduliuotės srautas perkaitina vidinius lašelio sluoksnius, ir tai sudaro prielaidas susiformuoti neigiamo gradiento temperatūros laukui lašelyje. Tuomet jau susidaro prielaidos sugertos spinduliuotės šiluminei energijai būti išvestai į lašelio paviršių skysčio laidumu (skysčiui cirkuliuojant ir konvekcija) ir dalyvauti skysčio garinime. Pusiausviro garavimo pradžios $\tau_{e, "k+r"}$ arba $\tau_{e, "c+r"}$ momentu temperatūros lauko gradientas lašelyje užtikrina viso sugeriamo spinduliuotės srauto transportavimą į lašelio paviršių. Pusiausviro garavimo $\tau \equiv \tau_e \div \tau_f$ režime lašelio temperatūra „k“ šilumokaitos atveju nekinta, o sudėtingesnio šildymo atvejais nuosekliai mažėja link $T_{e, "k"}$ temperatūros. Tam įtakos turi trinties pasipriešinimo jėgų poveikyje slopstantis lašelio skydymas dujose ir spinduliuotės srauto silpnėjantis sugėrimas mažėjančiame lašelyje [2].

Taigi, lašelio terminės būsenos apibrėžimas jo fazinių virsmų cikle yra raktas „lašo“ uždaviniui išspręsti. Šiuo uždaviniu suprantama jau daugiau kaip šimtmetį tyrėjus dominanti skysčio lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų problema, apjungianti „lašo išorinį“ bei „lašo vidinį“ uždavinius. „Lašo išorinio“ uždavinio sprendiniai teikia atsakymą apie šilumokaitos ir masės pernašą tarp lašelio ir jo apsupties, o „lašo vidinio“ uždavinio sprendiniai apibrėžia pernašos procesų intensyvumą lašelyje. Būtina suvokti, jog tarp pernašos procesų lašelyje ir jo apsuptyje yra glaudri sietis, pasireiškianti intensyvia tarpusavio sąveika. Todėl pažangiausi „lašo“ uždavinio sprendimo metodai yra tie, kur skatinamas kompleksinis požiūris į abu „lašo“ uždavinius [5]. Pastarasis reikalauja abiejų uždavinių sprendinių lygiavėrio traktavimo. Problema ta, jog (1) ciklo nestacionariųjų fazinių virsmų režimuose abu uždaviniai yra apibrėžti tik tuomet, kai jau žinomas kito sprendinys. Todėl griežtų verti-

nimų kompleksinis požiūris gali būti realizuojamas tik iteraciniais skaitiniais metodais. Dažnai jie grindžiami lašelio paviršiaus temperatūros apibrėžimu pagal prie šio paviršiaus pritekančius (tiek iš skysčio, tiek ir iš lašelio apsupties) ir nuo jo nutėkančius (tiek į skystį lašelyje, tiek ir į jo apsuptį) šiluminės energijos srautus, reikalaujant jų momentinio atitikimo. Plačiai taikomos lašelio sferiškumo prielaidos rėmuose suminiai šilumos srautai lašelio paviršiaus pusėse ir fazinių virsmų šilumos srautas susiejami sąlyga [1]:

$$\begin{aligned} \bar{q}_{\Sigma}^{+}(\tau) + \bar{q}_{\Sigma}^{-}(\tau) + \bar{q}_f^{+}(\tau) &\equiv 0 \rightarrow \\ \frac{Nu_f}{2R} (T_d - T_R) + (q_r^{+} - q_r^{-}) + k_c^{-} \lambda_l \frac{\partial T_r}{\partial r} \Big|_{r=R} + m_g^{+} L &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

čia: $q_{\Sigma} = q_r + q_c$ – suminis šilumos srautas lašelio paviršiaus išorinėje (+) ar vidinėje (–) pusėse, apibrėžiamas radiaciniu ir konvekciniu (arba kondukciniu) sandais atitinkamai; q_f – fazinių virsmų šilumos srautas, apibrėžiamas skysčio garo srauto ir skysčio fazinių virsmų šilumos sandauga; Nu_f – lašelio konvekcinio šildymo intensyvumą fazinių virsmų atveju apibrėžiantis Nuselto kriterijus aprašomas pagal kietos dalelės konvekcinio šildymo empirines formules, pakoreguotas „lašo“ tyrimuose pasaulyje plačiai taikomų šilumos pernešimo Spoldingo parametro pataisos funkcijų dėka. Būtina pabrėžti, jog (2) išraiška yra transcendentinė lygtis, t. y. kai kuriuos narius galima apibrėžti tik žinant jos sprendinį. Tačiau iteraciniuose metoduose tai nėra kartinė problema. Esminiai iššūkiai yra susiję su spektrinės spinduliuotės sugėrimo pusskaidriame skystyje ir optinių efektų lašelio paviršiuje įvertinimu, apskaičiuojant spinduliuotės lokalųjį integralų srautą lašelyje, taip pat su poreikiu apibrėžti nestacionariojo temperatūros lauko lašelyje gradientą $gradT_{r=R}$ sudėtinės šilumokaitos procesų lašelyje sąveikos sąlygomis. Bendroju radiacinės-konvekcinės šilumos pernašos lašelyje atveju apibrėžti nestacionariojo temperatūros lauko gradientą lašelyje yra labai keblu. Todėl praktikoje sėkmingai pritaikomi paprastesnės radiacinės-konvekcinės šilumokaitos atveju žinoma nestacionariojo temperatūros lauko $T(r, \tau)$ analitinė išraiška, grindžiama integralių lygčių begaline eilute [1]. Galimas skysčio cirkuliavimo lašelyje poveikis įvertinamas efektyviuoju šilumos laidžio koeficientu $\lambda_{ef} \equiv \lambda \cdot k_c^{+}$ pagal [6] rekomendacijas. Tuomet apibrėžto pradinio $2R_0$ skersmens izotermiškos pradinės būsenos lašeliui gradientas (2) išraiškoje pateikiamas integralia lygtimi:

$$\begin{aligned}
 grad T_{r=R}(\tau) = & \frac{2\pi}{R^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n n \int_0^{\tau} \left[(-1)^n \frac{R}{n\pi} \frac{dT_R}{d\tau} \right] \\
 & + \frac{1}{R\rho c_p} \int_0^R \left(\sin \frac{n\pi r}{R} - \frac{n\pi r}{R} \cos \frac{n\pi r}{R} \right) q_r dr \exp \left[-a \left(\frac{n\pi}{R} \right)^2 (\tau - \tau_*) \right] d\tau_*, \quad (3)
 \end{aligned}$$

įgalinančia atsižvelgti į šylančio lašelio paviršiaus temperatūros kitimo tempą ir spinduliuotės srauto sugėrimą pusskaidriame skystyje. Lokalusis spinduliuotės srautas taip pat aprašomas integralia išraiška [7]:

$$q_r(r) = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\pi} \cos \gamma \sin \gamma \left(\begin{aligned} & I_{\omega,R} \exp(-\theta_{r \sin \gamma}^R - \theta_{r \sin \gamma}^r) - I_{\omega,R} \exp(-\theta_r^R) \\ & - \int_r^R n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \exp(-\theta_r^{r_*}) d\theta_r^{r_*} \\ & + \int_{r \sin \gamma}^r n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \exp(-\theta_r^{r_*}) d\theta_r^{r_*} \\ & + \int_{r \sin \gamma}^R n_{\omega}^2 I_{\omega,0} \exp(-\theta_{r \sin \gamma}^r - \theta_{r \sin \gamma}^{r_*}) d\theta_r^{r_*} \end{aligned} \right) d\gamma d\omega. \quad (4)$$

čia: $I_{\omega,R}$ – spektrinės spinduliuotės intensyvumas vidiniame lašelio paviršiuje W/(m ster); $I_{\omega,0}$ – absoliučiai juodo kūno spektrinis spinduliuotės intensyvumas W/(m ster); n_{ω} – šviesos lūžio spektrinis rodiklis; γ – spinduliavimo šilumokaitai lašelyje būdingas kampas rad; Θ – optinio storio simbolis aprašomas formalia išraiška [7]:

$$\theta_{r_1}^{r_2} \equiv \int_{r_1}^{r_2} \chi_{\omega} dr_* / \sqrt{1 - (r/r_*)^2 \sin^2 \gamma}, \quad (5)$$

kurioje integralo simboliniai režiai r_1 ir r_2 atspindi atitinkamus režius prie optinių storių (4) išraiškoje, o spektrinis sugėrimo koeficientas išreiškiamas spektrinio sugėrimo rodiklio ir šviesos bangos ilgio santykiu $\chi_{\omega} = 4\pi\kappa_{\omega}/l_B$.

(3–5) išraiškų savitumai apsprendžia (2) išraiškos iteracinio skaitinio sprendimo algoritmo sudarymo specifiką. Pirmiausia būtina pastebėti, jog visi (2) išraiškoje įvertintini nariai yra lašelio paviršiaus temperatūros funkcijos. Todėl (2) išraiška tam tikru momentu aprašomą temperatūrą numatoma atrinkti jos atitikmenį – funkcionalą – minimizuojant greičiausio nusileidimo metodu, tam pritaikant savarankiškai veikiančią suderintą specialios paskirties paprogramę, prieš tai numčius laiko žingsnį, apibrėžus lašelio pradinius parametrus ir parinkus visus paprogramei veikti ir norimą tikslumą pasiekti reikalingus parametrus. „Vienišo“ lašelio atveju, jo apsupties T_d ir $\bar{p}_{g,\infty}$ parametrai laikomi pastoviais. Tai numčius, reikia lašelio gyva-

vimo (1) cikle parinkti tiriamąjį laiko $0 \div \tau$ intervalą. Pastarajame teks apibrėžti sveiką baigtinį skaičių I tarpinių τ_i laiko momentu. Aišku, jog sąlygą $\sum_{i=1}^{I-1} (\tau_{i+1} - \tau_i) \equiv \tau$ būtina tenkinti. Begalinėje integralių lygčių eilutėje (3) išraiškoje teks pasirinkti baigtinį N narių skaičių, kurį iš lanksto nuspėti keblu. Lašelio koordinatės integralų apskaičiavimas susijęs su lašelio momentiniu kintančiu $R(\tau)$ matmeniu, kuris numatytu tiriamuoju τ_i laiko momentu bus nežinomas. Todėl skaitinis integralas vykdomas pagal ankstesnėje iteracijoje apibrėžtą R_{i-1} lašelio matmenį, pastarąjį sudalijus į laisvai parinktą sveiką baigtinį $J-1$ skaičių Δr_j intervalų. Lašelio matmuo patikslinamas po kiekvieno iteracinio ciklo lašelio paviršiaus temperatūrai apibrėžti. Siekiant universalumo, kiekvienu laiko momentu pritaikoma vienetinio lašelio matmens prielaida bematės koordinatės $\eta_j = r_j / R_i$ pagrindu, reikalaujant sąlygos $\sum_{j=1}^{J-1} (\eta_{j+1} - \eta_j) \equiv 1$ tenkinimo. Tačiau kiekviename iteraciniame cikle lašelio radialinių koordinatų r_j masyvas yra savitas.

Pagal (4) išraišką skaitiškai apskaičiuojant lokalųjį spinduliuotės srautą lašelyje, pagal būdingą kampą γ integruojama Gauso metodu pagal penkių taškų schemą [7]. Spinduliavimo spektrą patogiau analizuoti pagal šviesos spindulio ilgiu atvirkščią banginį $\omega \equiv 1/l_b$ skaičių, nes tuomet patogiu skaitinėje spinduliavimo srauto apskaičiavimo schemoje sutankinti tinklėlių trumpųjų bangų srityje, nes joje ryškūs vandens (tikėtina ir kitų skysčių) optinių savybių pokyčiai [4], o trumpųjų bangų srityje spinduliavimas intensyvus. Todėl tenka apsispręsti dėl spinduliavimo skaičiuotiną spektrą $\omega_1 \div \omega_2$ apibrėžiančių ω_1 ir ω_2 banginiais skaičių ir numatyti sveiką baigtinį skaičių M skaičių ω_m banginių skaičių, užtikrinant $\sum_{m=1}^{M-1} (\omega_{m+1} - \omega_m) \equiv \omega_2 - \omega_1$ sąlygą.

Taigi, „lašo“ uždavinio kompleksinio modeliavimo atveju, iteracinės schemos optimizavimas reikalauja planingo daugiapakopio skaitinio eksperimento. Jį būtina vykdyti nuosekliai, pradžioje išskyrus esminius parametrus ir apibrėžus jų optimalias vertes. Kompleksinėje „lašo“ uždavinio analizėje reikšmingas „vidinio“ uždavinio vaidmuo. Todėl optimalių iteracinės schemos parametų paieškoje atraminiais parametrais verta laikyti lašelio terminę būseną (1) cikle apibrėžiančius nestacionariojo temperatūros lauko ir jo gradiento parametrus. Tuomet skaitinės schemos optimizavimą verta pradėti nuo nestacionarųjį lauką lašelyje ir jo gradientą aprašančioje begalinėje integralių lygčių eilutėje įvertintinų narių skaičiaus N_{op} apibrėžimo. Po to jau galima nuosekliai iteracinę skaitinę schemą optimizuoti ir kitų aptartų parametų atžvilgiu.

N_{op} apibrėžti sumodeliuotas 290 K temperatūros 150 mikrometrų skersmens vandens lašelio terminės būsenos kitimas (1) fazinių virsmų cikle „ k “ šilumokaitos

atveju 1000K temperatūros ore. Lašelių šildymas laidumu modeliuotas tarus, jog $q_{r,j} \equiv 0$ ir $Nu = 2$. Iteracinio *it* ciklo baigiamojoje iteracijoje leistinas šilumos srautų lašelio pusėse galimas neatitikimas (2) išraiškos sąlygai apibrėžtas griežtu reikalavimu:

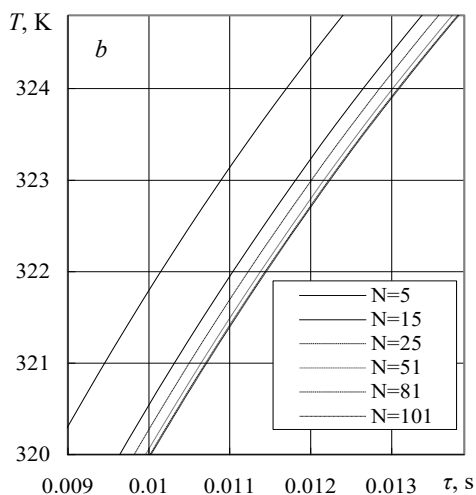
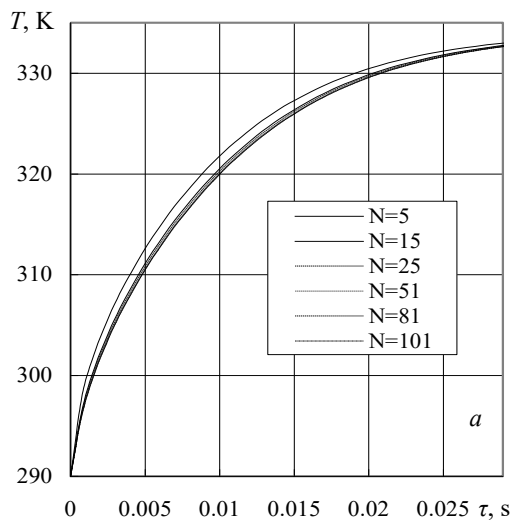
$$\left[1 - \frac{q_{\Sigma,it}^- + q_{f,it}^+}{q_{\Sigma,it}^+} \right] \cdot 100\% < \delta_{leist} \equiv 0.02\% . \quad (6)$$

Skaitinio eksperimento metu begalinėje integralioje eilutėje įvertinamų narių skaičius keistas nuo 5 iki 151, o kiti iteracinės schemos tinklėlio parametrai išlaikyti pastovūs: $I = 41$, $J = 81$. Modeliuojant lašelio terminę būseną daugiausia dėmesio skirta nestacionariųjų fazinių virsmų režimui, kuriame lašelis intensyviai šyla (1 pav.) ir nestacionariojo temperatūros lauko gradientai yra ryškiausi (2 pav.). Pagal lašelio šilumokaitai ir faziniams virsmams vieną svarbiausių parametų – lašelio paviršiaus temperatūrą – galima teigti, jog begalinėje sumoje įvertintinų narių skaičius yra reikšmingas apskaičiuotajai paviršiaus temperatūrai (1 pav. b) ir daro esminę įtaką apskaičiuotajam lašelio temperatūros lauko gradientui (2 pav. b). Šių terminių parametų apskaičiavimo patikimumas turi įtakos ir apskaičiuotajam lašelio garavimo procesui (3 pav.). Ryškią įtaką atspindi procesas siauresniame laiko mastelyje (3 pav. b).

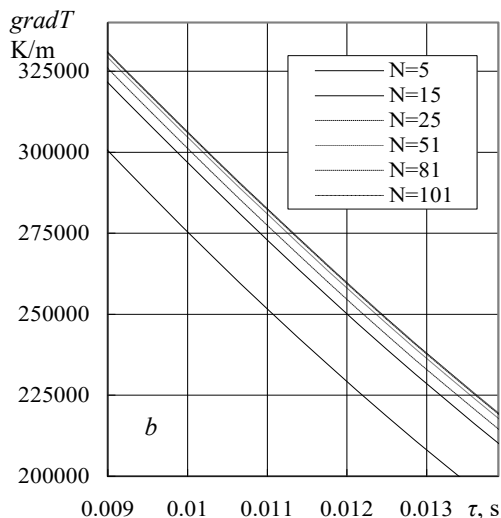
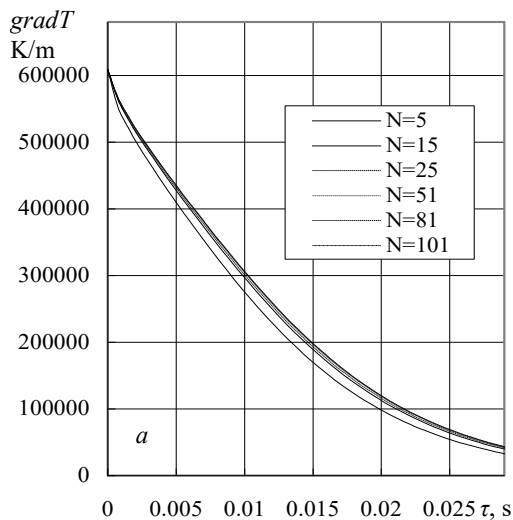
Išvados

Pagal šio tyrimo rezultatus galima teigti:

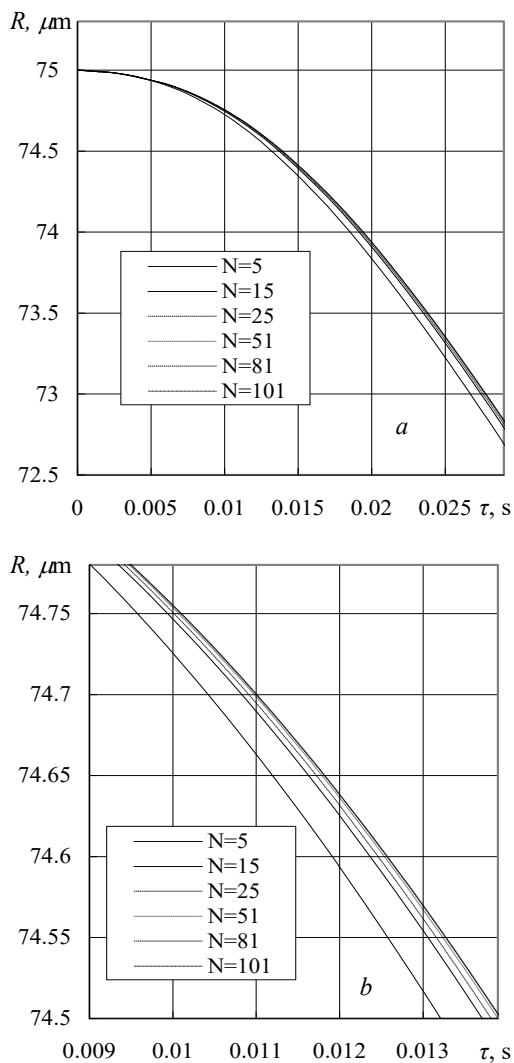
1. Kad aptarta „vidinio“ ir „išorinio“ „lašo“ uždavinių susieto modeliavimo metodika užtikrintų skaitinio sprendimo iteracinės schemos didelį patikimumą, būtina iteracinio skaičiavimo tinklėlio optimizacija.
2. Skaitinės schemos optimalių parametų vertės galima apibrėžti tik planingu kompleksiniu „lašo“ uždavinio skaitiniu tyrimu.
3. Skaitinio tyrimo pradžioje išskirtinį dėmesį būtina skirti lašelio terminių parametų patikimam apskaičiavimui. Apskaičiuojant nestacionariųjų temperatūros lauką ir jo gradientą jų analitinėse išraiškose integralioje begalinėje eilutėje, būtina įvertinti ne mažiau kaip aštuoniasdešimt narių.



1 pav. Vandens lašelio paviršiaus apskaičiuotosios temperatūros nestacionariojo garavimo režime priklausomumas nuo temperatūros lauką aprašančioje begalinėje integralioje eilutėje įvertinamų narių skaičiaus



2 pav. Vandens lašelio nestacionariojo temperatūros lauko apskaičiuotojo gradiento nestacionariojo garavimo režime priklausomumas nuo temperatūros lauką aprašančioje begalinėje integralioje eilutėje įvertinamų narių skaičiaus



3 pav. Vandens lašelio nestacionariojo garavimo apskaičiuotosios dinamikos priklausomumas nuo temperatūros lauką aprašančioje begalinėje integralioje eilutėje įvertinamų narių skaičiaus

Literatūra

1. Miliauskas G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001. Vol. 44. P. 785–798.
2. Miliauskas G., Sabanas V. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2006. Vol. 49. P. 785–798.
3. Miliauskas G., Sabanas V., Bankauskas R., Miliauskas G., Sankauskaite V. The peculiarities of sprayed liquid's thermal state change, as droplets are heated by conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. P. 4145–4160.
4. G.M. Hale, M.R. Querry. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region. *Applied Optics*. 1973. Vol. 12. P. 555–562.
5. Sazhin S.S. Advanced models of fuel droplet heating and evaporation. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2006. Vol. 32. P. 162–214.
6. Abramzon B., Sirignano W. A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1989. Vol. 32. P. 1605–1618.
7. Miliauskas G., Tamonis M., Svenčianas P. Radiation and combined heat transfer in spherical volume of selectively-radiating and absorbing medium 1. Determination of radiation heat flow. *LTSR MA Works B*. 1983. Vol. 139. P. 53–61

Modeling of water droplets in the course of phase transition and peculiarities of iterative scheme optimization

Summary

Peculiarities of water droplets phase transitions cycle are discussed in this article. Modelling by numerical simulation method peculiarities is outlined. Numerical schemes of the optimal parameter values can be defined only by a complex “droplet problem” modelling. A special emphasis of the droplet thermal parameters for reliable calculation is dedicated at the beginning of the study. Unsteady evaporation mode of droplet heated by conductivity was modelled. For unsteady droplet temperature field and its temperature gradient analytical expression in the infinite sum need to evaluate at least eighty members of optimal numbers.

IV. ŠILDYMAS, ŠILUMOS TIEKIMAS IR TERMOFIKACIJA

Konkurencija centralizuotai tiekiamos šilumos sektoriuje

Aušra Pažėraitė*, **, Mindaugas Krakauskas*

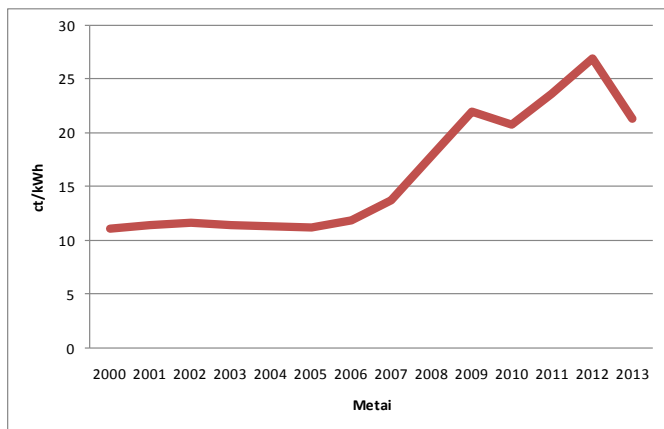
* Lietuvos energetikos institutas, ** Vytauto Didžiojo universitetas

Konkurencija centralizuotai tiekiamos šilumos sektoriuje vis dar didelė naujiena, nors kituose energetikos sektoriuose tai reiškinyne ne tik seniai tapęs realybe, bet ir atnešęs nenuginčijamos naudos, visų pirma vartotojams.

Nepriklausomų šilumos gamintojų atėjimas į centralizuotos šilumos tiekimo sektorių yra tam tikras iššūkis visai sistemai. Teisinė bazė nėra pakankama, norint integruoti ne vieną kitą, o didelį kiekį nepriklausomų gamintojų.

Nors Šilumos ūkio įstatyme nurodoma, kad šilumos gamyba turi būti grįsta konkurencija tarp gamintojų, tačiau iki šiol konkurencija šilumos sektoriuje veikia labai menkai. Praktiškai sektorius veikia ne konkurencijos, o reguliaciniais principais.

Reikia atkreipti dėmesį, kad per visą tyrinėjamą laikotarpį reguliavimo priemonėmis nebuvo pasiekta ženklėsnio kainų mažėjimo, išskyrus krizinį laikotarpį (žr. 1 pav.). Kita vertus, šiame sektoriuje yra ypač daug nusiskundimų, tiek iš vartotojų, tiek ir iš esamų gamintojų ar norinčių jais tapti. Pastarųjų, nepaisant sektoriaus sudėtingumo, atsiranda vis daugiau. Tai savo ruožtu lemia didelį poreikį naujoms veikimo centralizuotos šilumos rinkoje taisyklėms.



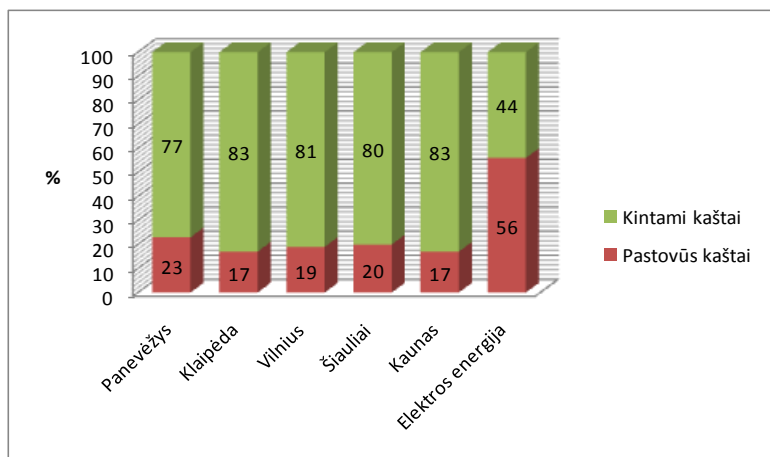
1 pav. Vidutinė centralizuotai tiekiamos šilumos kaina Lietuvoje, paruošta pagal VKEKK duomenis

Liberalizacijos diegimas elektros energetikos sektoriuje daugelyje šalių ne tik pasiteisino, bet ir viršijo laukto efektyvumo lūkesčius. Sėkmingiausiu pavyzdžiu pateikiamas Skandinavijos regionas. Kita vertus, tokio efekto Lietuvoje elektros energijos vartotojai nepajuto. Tam yra objektyvių priežasčių. Liberalizacijos efektyvumui pasireikšti būtina sudaryti tinkamas sąlygas, t. y. ne rinkos dalis turi būti kuo mažesnė, kad konkurencija turėtų pakankamai vietos veikti (playing field) [1].

Lietuvos centralizuotos šilumos sektoriui situacija konkurencijai diegti yra daug palankesnė, palyginus su elektros energijos sektoriumi:

- ženklus kainų skirtumas skirtingose Lietuvos vietose (nuo 17,10 ct/kWh Utenoje iki 33,54 ct/kWh Nemenčinėje, VKEKK 2013 m. gruodžio duomenimis),
- „lengvi tinklai“, nes didžiosios dalies Lietuvos vartotojų (Vilniaus, Kauno, Klaipėdos, Šiaulių ir Panevėžio) mokamos už centralizuotą šildymą kainos pastovi dedamoji sudaro nuo 17 % iki 26 %.

Ypač gerai situacijos skirtumai centralizuotos šilumos ir elektros energetikos srityje matosi sugretinus abiejų sektorių duomenis apie galutinės kainos dedamąsias (žr. 2 pav.).



2 pav. Pastovios ir kintamos kainos dalių palyginimas CŠ ir elektros energetikos sektoriuose, paruošta pagal VKEKK 2012 m. vasario duomenis

Taigi, galima daryti išvadą, kad situacija konkurencijai įgyvendinti CŠ sektoriuje yra daug palankesnė, nei buvo diegiant liberalizaciją elektros energetikos srityje.

Be to, tokios rinkos kūrimas centralizuotos šilumos sektoriuje nėra pats savaime savitiksli. Tokio modelio prekyba kuriama siekiant tam tikrų tikslų:

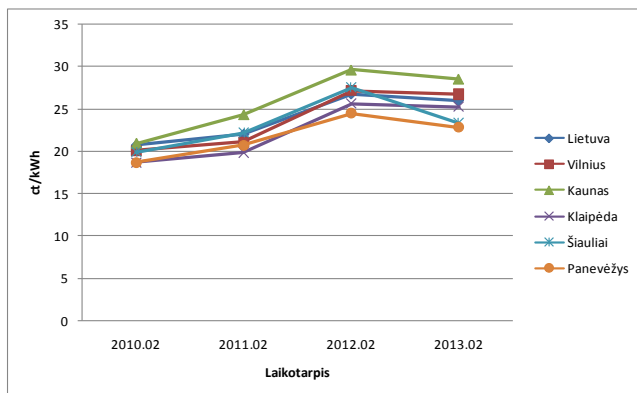
- visų pirma skatinti, kad ir lokaliuose CŠ tinkluose, konkurenciją,

- gaminti šilumą ekonomiškesniais būdais,
- išnaudoti efektyvesnius šilumos gamybos vienetus.

Savaime aišku, kad siekiant minėtų tikslų, turėtų būti užtikrinta tiekiamos šilumos kokybė (tenkinamos patvirtintos ir viešai žinomos charakteristikos), taipogi turėtų būti minimizuota neigiamą, jeigu tokia pasireiškia, įtaka aplinkai.

Lietuvoje konkurencijos diegimas elektros energetikos sektoriuje susilaukė didelio pasipriešinimo, nenuostabu, kad centralizuotos šilumos sektoriuje neigiamos reakcijos dar daugiau. Vienas iš argumentų yra sektoriaus sudėtingumas, išskirtinumas, kuris konkurencijos diegimą paverčia neįmanoma.

Išsamiau panagrinėjus esamas rinkos sankloda didžiuosiuose miestuose, galima daryti išvadą, kad Kaunas yra išskirtinėje padėtyje, nes nepaisant to, kad Kauno energija turi miestui pakankamai instaliuotos galios, 95 % šilumos miestui tiekia nepriklausomas gamintojas – Kauno termofikacijos elektrinė. Praktiškai tai yra vertikalios restruktūrizacijos atvejis. Rinkos sanklodos situacija Klaipėdoje yra gana panaši. Tačiau kainos aptariamuose miestuose gerokai skiriasi (3 pav.).



3 pav. Centralizuotos šilumos žiemos kainos didžiausios apkrovos laikotarpiu, ct/kWh

Kainų sumažėjimas Šiauliuose ir Panevėžyje gali būti paaiškintas ženkliai biokuro naudojimu: 38 % ir 41 % atitinkamai [2].

Tačiau Alytuje, Marijampolėje, Telšiuose bei Palangoje iš biokuro pagaminamos šilumos dalis dar didesnė – 44–48 %, bet centralizuotos šilumos kainos yra aukštesnės nei Klaipėdoje, kur biokuras VKEKK duomenimis tuo laiku buvo nenaudojamas visiškai. Reikšmingiausias skirtumas yra tas, kad Klaipėdoje yra įdiegti tam tikri konkurencijos principai. Teigtina, kad konkurencija centralizuotos šilumos sektoriuje ne tik galima, bet ir teikia realią naudą vartotojams.

Atkreiptinas dėmesys, kad kuro pakeitimas tikrai nėra pagrindinė ir vienintelė sąlyga kainoms sumažinti centralizuotos šilumos sektoriuje. Kita vertus, jei visi

pradės išnaudoti biokurą, pastarasis taps vyraujančiu, o tai savo ruožtu lemia priklausomumą nuo kuro, ir sektorius vėl gali tapti jautrus kuro kainų pokyčiams.

Išvados

1. Norint efektyvesnės veiklos sektoriuje ir tikėtinos kainų naštos sumažinimo vartotojams, būtina pradėti sektoriaus liberalizaciją.
2. Prieš pradėdant liberalizacijos procesą, būtina paruošti ir įdiegti nediskriminacines prisijungimo prie tinklų taisykles, paruošti ir įdiegti konkurencijos plėtrai tinkamas prekybos taisykles.
3. Labai svarbu, kad pradėjus liberalizacijos procesą, kuo greičiau būtų suteiktos galimybės konkurentinėje rinkoje dalyvauti ne tik gamintojams, bet ir kvalifikuotėms vartotojams, kurie galėtų teikti sisteminės paslaugas (pav. nevartoti šilumos tam tikrą laikotarpį).

Literatūra

1. Pažėraitė A., Krakauskas M. Centralized heat market liberalization mission (im)possible? *International scientific conference practice and research in private and public sector-2012*, Vilnius, April 26-27, 2012. Vilnius, Mykolas Romeris University, 2012. ISSN 2029-7378, P. 312–320.
2. Pažėraitė A., Krakauskas M. Development of new clean technologies implementation methods in the Lithuanian electricity generation sector. *“Management Horizons in Changing Economic Environment: Visions and Challenges”* September 26-28, 2013, Kaunas. Vytautas Magnus University, 2013. ISSN 2029-8072, P. 683–695.
3. Valstybinė kainų ir energetikos kontrolės komisija, (2013). Prieiga internetu (2013 m. gruodžio 1 d.): <http://www.regula.lt>

Competition in the district heating sector

Summary

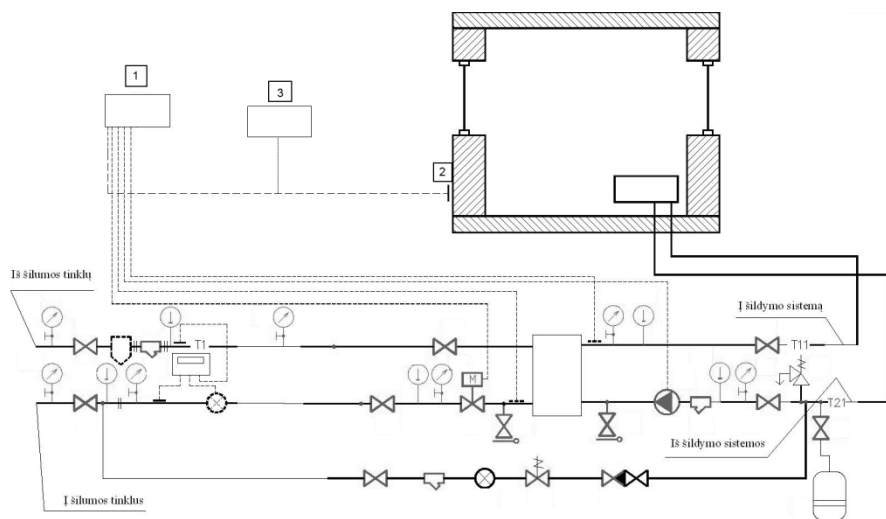
Lithuanian district heating sector is highly integrated, local, naturally monopolistic and often municipality owned. Moreover, the constantly increasing price of the heat is one of the reasons consumers to complain and to disconnect from the district heating networks. This situation implies strong need for change.

Paper contains relevant analysis which is made using an official data. The article ends with conclusions and practical suggestions addressed for Lithuanian district heating sector.

Šilumos mainų pastatuose matematiniai modeliai ir jų taikymo pastatų šildymo sistemų darbo režimo valdymui galimybių tyrimas

Stasys Šinkūnas, Mantas Morkvėnas, Juozas Gudžinskas, Romualdas Morkvėnas
Kauno technologijos universitetas

Tyrimo objektas – pastatui šildyti tiekiamos šilumos srauto ir šildymo sistemų darbo režimų valdymo ir automatinio reguliavimo pastato įvade probleminiai klausimai, jų sprendimo būdai, pateikiami autorių siūlomi šildymo sistemų darbo procesų valdymo matematinio modeliavimo metodai, kurių pritaikymo galimybės atsiranda pradėjus šilumos vartojimo įrenginiuose taikyti šiuolaikines technologijas ir įrangą.



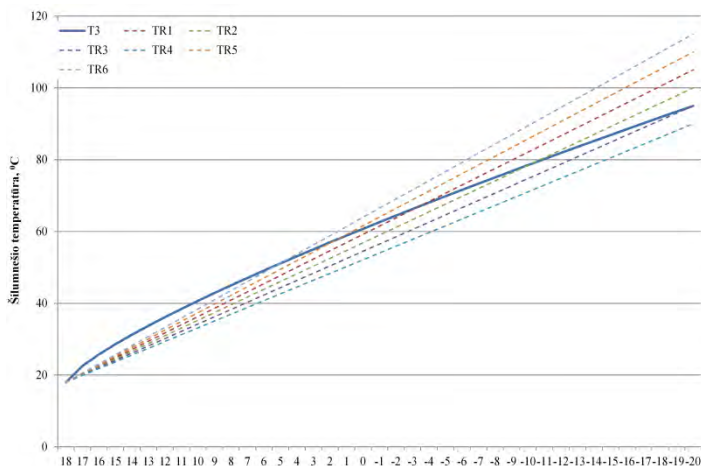
PRINCIPINĖ NEPRIKLAUSOMA ŠILUMOS PUNKTO SCHEMA SU VIENOS PAKOPOS KARŠTO VANDENS ŠILUMOKAIČIU

1 pav. Šildymo sistemų darbo režimų valdymo ir automatinio reguliavimo pastato įvade principinė schema. 1 – valdiklis; 2 – papildomas modulis; 3 – lauko oro termometras

Tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūros ir lauko oro temperatūros skaičiuojamoji priklausomybė aprašoma tokia formule:

$$t_3 = t_{in} + \left(\frac{t_{3n} + t_{2n}}{2} - t_{in} \right) \left(\frac{t_{in} - t_e}{t_{in} - t_{en}} \right)^{0.75} + \left(\frac{t_{3n} - t_{2n}}{2} \right) \left(\frac{t_{in} - t_e}{t_{in} - t_{en}} \right), \quad (1)$$

čia: t_{3n} – skaičiuojamoji tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūra; °C; t_3 – tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūros kitu laiku; °C; t_{in} – skaičiuojamoji šildomų patalpų oro temperatūra; °C; t_{en} – skaičiuojamoji lauko oro temperatūra; °C; t_e – lauko oro temperatūros kitu laiku; °C. Priimta, kad gyvenamosioms patalpoms vidaus oro temperatūra yra $t_{in} = +18$ °C.



2 pav. Tiekiamo į šildymo sistemą šilumnešio temperatūros ir lauko oro temperatūros skaičiuojamoji ir valdiklio realizuojama priklausomybės

Pastatų šildymo sistemos galia projektuojama taip, kad būtų užtikrinama patalpų vidaus oro temperatūra t_{in} , esant lauko oro temperatūrai norminėmis sąlygomis (skaičiuojamajai temperatūrai šildymui) t_{en} . Ši temperatūra yra šalčiausio stebėto penkiadienio tam tikroje vietovėje, vidutinė temperatūra.

Valdikliu realizuojama tiekiamo šilumnešio į šildymo prietaisus temperatūros **trikdžio kompensavimo** automatinio reguliavimo sistema, kuomet valdiklis matuoja lauko oro temperatūrą ir tiekiamo į šildymo prietaisus šilumnešio temperatūrą, ir atitinkamai keičia šildančio šilumnešio srautą, kad visą laiką būtų išlaikytas lauko oro temperatūros ir tiekiamo į šildymo prietaisus šilumnešio temperatūros santykis pagal iš anksto nustatytą priklausomumą. Daugelis gaminamų valdiklių, taikant trikdžio kompensavimo ARS (plačiausia taikoma), gali realizuoti tik tiesinį priklausomumą tarp lauko oro ir tiekiamo šilumnešio temperatūrų.

Valdikliai derinami tik keičiant nustatomą, pagal poreikius, (paprastai eksperimento būdu prie tam tikrų atsitiktinių lauko oro temperatūrų) lauko oro ir tiekiamo šilumnešio temperatūrų santykio (tiesinį) priklausomumą.

Tai sudaro prielaidas, kad tam tikruose lauko oro temperatūrų diapazonuose neužtikrinama reikiama patalpų oro temperatūra.

Ši problema gali būti sprendžiama:

- jei yra numatytos tokios techninės galimybės valdyklyje, skaidyti reguliavimo kreivę į lauko oro temperatūrų sektorius taip, kad kiekviename sektoriuje valdiklio reguliavimo tiesė būtų galimai artimesnė skaičiuojamajai;
- taikyti grįžtamojo ryšio arba kombinuoto tipo ARS;
- naudoti nuotolinio valdymo sistemas ir pagal lauko oro temperatūrą koreguoti valdiklio parametrus;
- įvesti papildomą modulį, realizuojantį valdiklyje (programinė įranga) ar jo lauko oro temperatūros matavimo įvade (autorių siūlomas modulis) lauko oro temperatūros ir tiekiamo į šildymo sistemas šilumnešio temperatūros skaičiuojamąjį priklausomumą.

Valdikliui pagal lauko oro temperatūrą palaikant tiekiamo į šildymo sistemą skaičiuojamąją šilumnešio temperatūrą dėl šiluminės inercijos pereinamųjų procesų metu nebus užtikrinama pastovi patalpų vidaus oro temperatūra. Norint pašalinti šią problemą, būtina įvertinti atitvarų šilumos inerciją.

Tuo tikslu siūloma įvesti projektuojamos lauko oro temperatūros sąvoką, kuri nuo faktinės momentinės lauko oro temperatūros realiu laiku skirtųsi tokiu nestacionaraus proceso dėsniumu, koku vyksta nestacionarūs šilumos mainai per išorės atitvaras tarp patalpos ir lauko oro temperatūrų.

Projektuojamos lauko oro temperatūros, įvertinus atitvarų šilumos inerciją, skaičiavimo matematinis modelis yra toks:

$$\begin{aligned}
 T'_e \frac{dt'_e(\tau)}{d\tau} + t'_e(\tau) &= (1 - \sigma) t_e(\tau) \\
 T''_e \frac{dt'_e(\tau)}{d\tau} + t'_e(\tau) &= \sigma t_e(\tau)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

čia: t'_e – projektuojama lauko oro temperatūra, kurios kitimo laiko atžvilgiu dėsninumas pakitus t_e atitinka T_3 kitimo dėsninumą ir pasibaigus pereinamajam procesui yra lygi t_e ; σ – pastato įstiklinimo (langu) ir infiltracijos plotų sumos santykis su jo bendru išorės atitvarų plotu.

T'_e ir T''_e – koeficientai, atitinkamai nusakantys didelės šiluminės talpos atitvarų (sienų, stogo) ir mažos šiluminės talpos atitvarų (langu, infiltracijos) šiluminę inerciją, skaičiuojami pagal formulę:

$$T_e = \frac{C}{\alpha_{snl,e} + \alpha_{snl,i} + \alpha_{snl,e} \alpha_{snl,i} R}
 \tag{3}$$

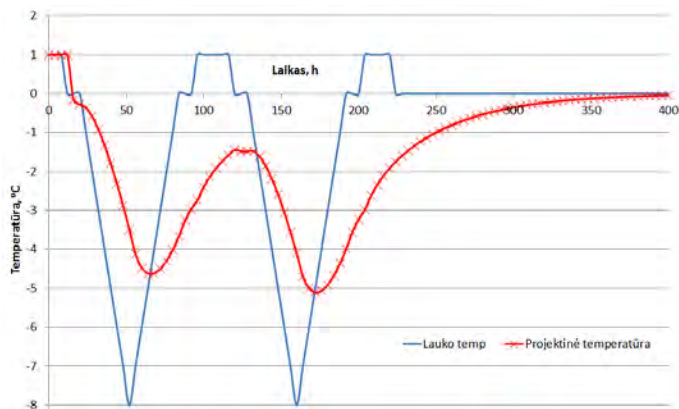
čia: $\alpha_{snl,e}$ – lauko atitvarų išorinio paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas; $\alpha_{snl,i}$ – lauko atitvarų vidinio paviršiaus šilumos atidavimo koeficientas; R – lauko atitvarų šiluminė varža; C – lauko atitvarų šilumos imlumo koeficientas.

Lauko atitvarų šiluminė varža ir šilumos imlumo koeficientas skaičiuojami pagal šias formules:

$$R = \delta/\lambda \quad C = \delta c \rho, \quad (4)$$

čia: δ – atitvaros storis, m; λ – atitvaros šilumos perdavimo koeficientas, W/(m·°C); ρ – atitvaros medžiagos tankis, kg/m³; c – atitvaros medžiagos šilumos imlumo koeficientas, J/(kg·°C).

Šilumnešio, tiekiamo į šildymo sistemą, temperatūros reguliavimo procesui, pagal šilumos tiekimo reguliavimo grafiką stacionariomis sąlygomis, valdyti, įvertinus atitvėrių šiluminę inerciją, būtų galima gavus diferencialių lygčių sprendinius realiu laiku, t. y. esant bet kokiam Δt_I pokyčio pobūdžiui (šuoliškam, harmoningų svyravimų), gauti $\Delta t_I(\tau)$ atitinkamam šilumos tiekimo ir šildymo sistemos darbo periodui.



3 pav. Faktinės lauko oro temperatūros ir skaičiuotos pagal siūlomą matematinę modelį projektinės lauko oro temperatūrų grafinis vaizdas

Tačiau šiuolaikinių valdiklių skaičiuoklėms, toks uždavinys yra pakankamai sudėtingas.

Siūloma skaidyti tolydinį lauko oro temperatūros kitimo procesą į vienetinius šuolinius pokyčius ir pasinaudoti diferencialinių lygčių sprendiniu, esant tokiam pokyčiui. Jo išraiška yra tokia:

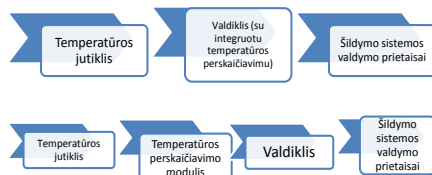
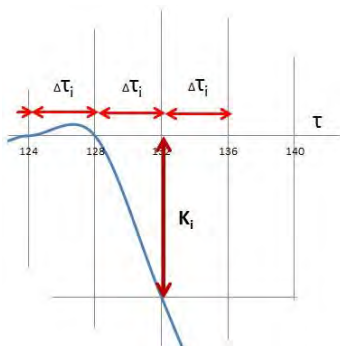
$$x(\tau) = K(1 - e^{-\frac{\tau}{T}}). \quad (5)$$

Valdiklyje pagal tokią išraišką būtų atliekami $\Delta t_I(\tau)$ skaičiavimai, kiekvienai atitvėrių grupei ir kiekvienam faktiniam Δt_I bei realiu laiku sumuojant visus įvyku-

sius atitinkamu darbo periodu pokyčius. Bendrojo sprendinio matematinė išraiška būtų tokia:

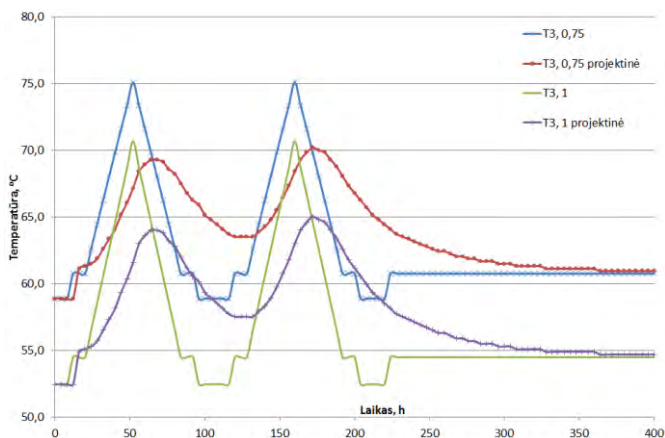
$$t_r(\tau) = \sum_{i=1}^n \left\{ K_i \left[(1-\sigma) \times \left(1 - e^{\frac{\tau}{T_i}} \right) + \sigma \left(1 - e^{\frac{\tau}{T''}} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

čia: $K_i = t_{i\dot{s}_i} - t_{i\dot{s}_{(i-1)}} = \Delta t_{i\dot{s}_i}$ (7)



4 pav. Lauko oro temperatūros tolygaus kitimo transformavimo į šuolinių pokyčių schema

5 pav. Siūlomo šildymo sistemų darbo procesų valdymo matematinio modelio praktinio taikymo blokinių schemų galimi variantai



6 pav. Šildymo sistemos darbo režimo „iki“ ir „po“ siūlomo modelio pritaikymo pavyzdžio grafinis vaizdas

Išvados

Siekiant efektyvaus šilumos vartojimo ir tinkamo mikroklimato sąlygų užtikrinimo patalpose, šildymo sistemų darbo režimo reguliavimo procese turėtų būti:

- įvertintas pastato šiluminis inertiškumas, taikant siūlomą projekcinės lauko oro temperatūros skaičiavimo matematinį modelį;
- įvertinta skaičiuojamoji (dėl natūralios konvekcijos šilumos mainų procesų šildymo prietaiso aplinkoje ypatumų) tiekiamo šilumnešio ir lauko oro temperatūrų priklausomybė.

Šiame darbe pateikiamas optimalių skaičiuojamųjų šilumnešio parametrų nustatymo ir skaičiavimo matematinis modelis ir praktinio taikymo rekomendacijos sudaro prielaidas didinti aprūpinimo šiluma sistemų efektyvumą.

Literatūra

1. Gedgaudas M., Šležas A., Švedarauskas J., Tuomas E. Šilumos tiekimas. Vilnius, 1992, P. 17–26, 88–120.
2. Morkvėnas R. Šilumos tiekimo pastatų šildymui reguliavimo matematinis modelis. *Šiluminė technika*, 2004, Nr. 3(21), P. 4–6.
3. Šinkūnas S., Morkvėnas M., Gudzinskas J., Morkvėnas R. Šilumos mainų pastatuose matematiniai modeliai ir jų taikymo pastatų šildymo sistemų darbo režimo valdymui galimybių tyrimas. *Šilumos energetika ir technologijos*, 2013, P. 297–306.

Summary

The method and recommendations of building heating system parameter optimization were given in this article. The optimization includes dynamic heat transfer characteristics and evaluates heat capacity of different building partitions. The calculation algorithm of heat capacity evaluation for building heating system control was designed and presented in this article.

Atsiskaitymo su investuotoju, atnaujinus pastatą, metodika

Jūratė Karbauskaitė, Romualdas Morkvėnas, Vytautas Stankevičius
Kauno technologijos universitetas

Santrauka

Pasiūlytas naujas atnaujinant daugiabučius namus šiluminės energijos sąnaudų skaičiavimo modelis (metodika), pagrįstas dienolaipsniais ir sutaupytos šilumos kiekiu. Šis modelis suprantamas buto savininkui ir priimtinas bankui, teikiančiam statybos organizacijai paskolą. Čia bankas turės garantiją, kad buto savininkas po namo atnaujinimo už šildymo kaštus mokės ankstesniu tarifu, realia šiluminės energijos kaina.

Raktiniai žodžiai: Pastatai, dienolaipsniai, atnaujinimas, šiluma, kaštai.

Išvadas

Šiuo metu reiškiamas didžiulis susirūpinimas energijos sąnaudomis pastatuose, ypač daugiabučiuose gyvenamuosiuose. Valstybei būtų naudinga sumažinti šias sąnaudas, tuo pačiu mažėtų socialinės išmokos, reiktų kaupti kur kas mažesnes rezervines atsargas, sumažėtų aplinkos tarša. Gyventojai, savo ruožtu, galėtų padidinti savo būstų vertę ir sumažinti išlaidas šildymui. Šiuo tikslu, siekiant išplėsti galimų investicijų pritraukimą, siūlomas aptariamas atsiskaitymo modelis.

Principinis atsiskaitymo modelio aprašymas

Butų savininkų atsiskaitymo pagrindas – investuotojas (namo administratorius) su šilumos tiekėju atsiskaito pagal įvadinio šilumos apskaitos prietaiso rodmenis. Butų savininkai atsiskaito už šilumos sąnaudas su investuotoju kaip neatnaujintam namui, įvertinant to laikotarpio išorės oro temperatūrą, šildymo trukmę ir šilumos sąnaudų vienam dienolaipsniui vertę iki atsiperkant namo atnaujinimo išlaidoms. Galimas atvejis, kai buto savininkas moka dviem sąskaitomis – šilumos tiekėjui už sunaudotą šilumą po namo atnaujinimo, o investuotojui už šilumos sąnaudų skirtumą tarp šilumos kiekio, jei namas būtų neatnaujintas ir tikrojo suvartoto šilumos kiekio, atnaujinus pastatą.

Atsižvelgiant į poreikį, galima naudoti kalendorinių metų (nuo sausio iki gruodžio) arba šildymo sezono dienolaipsnius (pavyzdžiui 2010/2011 metų).

Pirmiausia surenkami duomenys apie neatnaujinto pastato šildymo sąnaudas per paskutiniuosius 3 metus (mėnesiniai kiekvienų metų šilumos poreikiai Q_{mon} , išorės oro temperatūra θ_e °C ir mėnesio šildymo trukmė – paromis). Duomenys gaunami iš šilumos tiekėjo. Jei šildoma ne visą mėnesį, vertinamas tik šildymo laikotarpis. Vėliau pagal vidutinės mėnesio temperatūras ir šildymo trukmę apskaičiuojamas kiekvienų metų šildymo dienolaipsnių kiekis DL_y :

$$DL_y = \sum_{i=1}^m (18 - \Theta_e) \cdot t_{mon}, \quad (1)$$

čia: DL_y – metiniai šildymo dienolaipsniai, (K·paros),

Θ_e – vidutinė mėnesio išorės oro temperatūra šildymo metu, °C,

t_{mon} – atskiro šildymo mėnesio trukmė, paromis,

m – šildymo mėnuo.

Visų trijų metų šildymo dienolaipsnių vidurkis apskaičiuojamas pagal (2) formulę:

$$DL_{av} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n DL_y, \quad (2)$$

čia: DL_{av} – šildymo metų dienolaipsnių vidurkis, (K·paros),

n – šildymo metai.

Kiekvienų metų šilumos sąnaudos pastatui šildyti apskaičiuojamas pagal 3 ir 4 formules (davinius pateikia šilumos tiekėjas):

$$Q_y = \sum_{i=1}^m Q_{mon}, \quad (3)$$

čia: Q_y – šilumos sąnaudų poreikis pastato šildymui per atskirus šildymo metus, MWh/metus;

Q_{mon} – šilumos poreikis pastato šildymui per mėnesį, MWh/mėn;

m – šildymo mėnesiai.

$$Q_{av} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n Q_y; \quad (4)$$

čia: Q_{av} – vidutinis šilumos poreikis pastato šildymui per šildymo metus (MWh per metus);

n – šildymo metai.

Pagal (5) formulę apskaičiuojamas vidutinis savitasis pastato šilumos sąnaudų poreikis vienam dienolaipsniui, atitinkantis pastato charakteristikas prieš atnaujinimą.

$$q_{av} = \frac{Q_{av}}{A \cdot DL_{av}}, \quad (5)$$

čia: q_{av} – vidutinis metinis savitasis pastato šilumos sąnaudų poreikis vienam m^2 šildomojo ploto vienam dienolaipsniui, $(kWh)/(m^2 \cdot K \cdot para)$;

A – pastato bendrasis šildomas plotas, m^2 .

Sekančiais metais apskaičiuojami atskirų mėnesių dienolaipsniai, kurie dauginami iš koeficiento q_{av} ir taip gaunamos iki atnaujinant pastatą tų metų šilumos sąnaudos:

$$Q_{mon\ rec} = q_{av} \cdot DL_{mon}, \quad (6)$$

$$Q_v = \sum_i^m Q_{mon\ rec}. \quad (7)$$

Ši procedūra kartojama iki investicijų pastatui atnaujinti atsipirkimo.

Atnaujinus pastatą, šilumos sąnaudas kiekvieno mėnesio ir metines pateikia šilumos tiekėjas.

Nustatomos kiekvieno mėnesio išlaidos S_{mon} (Lt/mėn), kurias sumoka butų savininkai:

$$S_{mon} = k \cdot Q_{mon\ rec} \cdot E, \quad (8)$$

čia: k – skatinimo koeficientas, priimamas pagal susitarimą (rekomenduojama 0,85–0,95);

E – šilumos kaina, Lt/MWh;

$Q_{mon\ rec}$ – mėnesinės šilumos sąnaudos, jeigu namas būtų neatnaujintas.

Pagal (9) formulę nustatomos kiekvieno mėnesio išlaidos, kurias šilumos tiekėjui moka investuotojas

$$S_{invest.mon} = Q_{mon.ren.} \cdot E, \quad (9)$$

čia: $Q_{mon.ren.}$ – šilumos sąnaudos namą atnaujinus.

Nustatoma investuotojo investicijų grąža per nagrinėjamą mėnesį:

$$\Delta S_{mon} = S_{mon} - S_{invest.mon}. \quad (10)$$

Nustatomos metinės šildymo išlaidos neatnaujintam namui, kurias sumoka butų savininkai, Lt/metai:

$$S_y = \sum_{i=1}^m S_{mon};. \quad (11)$$

čia: m – mėnesiai.

Nustatomos metinės šildymo išlaidos, kurias šilumos tiekėjui sumoka investuotojas, Lt/metai:

$$S_{invest.y} = \sum_{i=1}^{nm} S_{invest.mon} \quad (12)$$

Nustatoma investuotojo investicijų grąža per šildymo metus, Lt:

$$\Delta S_y = \sum_{i=1}^m \Delta S_{mon} \quad (13)$$

Pagal (14) ir (15) formules nustatomas investuotojo investicijų likutis po šildymo metų, Lt:

$$I = (1+r) \cdot I_0 - \Delta S_y, \quad (14)$$

$$I_n = (1+r) \cdot I_{n-1} - \Delta S_{y,n-1}, \quad (15)$$

čia: r – palūkanų norma, vieneto dalimis.

Atsiskaitymo skaičiavimo pavyzdys

Nagrinėjame pavyzdyje pateikiami atnaujinimo kaštų skaičiavimai 60 m² dydžio butui, kuris yra 1970–1980 m. statybos vidutinės kokybės daugiabučiame gyvenamajame name.

Panaudojama 55 butų daugiabučio namo su 60 m² ploto butais atnaujinimo analizė (išeities duomenys paimti iš 2009 m. Finansų ministerijos paruošto pavyzdžio).

Pradinės sąlygos: šilumos punktas ir 30 % langų pakeisti naujais; vidutinės investicijos 300 Lt/ m² šildomojo ploto; iš viso investicijų – 23660 Lt.

Atskaitoma gaunama Valstybės 15 % parama – 20111 Lt. Šilumos sutaupymai – 47 %.

Šilumos kainos kitimas vertinamas pagal Europos Sąjungos rekomendacijas (2,8 % metams), pradinė šilumos kaina – 0,3 Lt/kWh.

Atnaujinus pastatą, gyventojai už buto šildymą moka kaip už neatnaujinto pastato šilumos nuostolius iki įdėtų investicinių kaštų atsipirkimo.

Prieš namo atnaujinimą trijų metų šilumos sąnaudos (pateiktos 1 lentelėje) imamos iš namui atnaujinti paruošto projekto (pateikė Kauno šilumos tinklai).

Skaičiavimams priimti Kauno miesto 1981–2010 m. šildymo sezonų klimato duomenys, kad galima būtų vertinti klimato įtaką.

1 lentelė. Pradinis sąnaudų šildymui įvertinimas

Metai	Dienolaipsniai, DL_y	Sąnaudos šildymui Q_y , kWh/met	Vidutinės sąnaudos šildymui, q_{av} , kWh/DL
1	4155	9889	2,38
2	3970	9449	
3	3789	9018	
Vidurkis	3971	9452	

Kaip matyti iš 2 lentelėje pateikiamų skaičių, butui atnaujinti panaudotos lėšos atsipirktų 13-taisiais metais.

Šia tvarka atsiskaitoma iki investuotojas susigražina įdėtas lėšas. Vėliau butų savininkai už šildymą moka pagal savo šilumos skaitiklių (daliklių) rodmenis, taip pat įvertinant ir bendruosius pastato šilumos nuostolius (paprastai iki 30 % nuo viso namo šilumos nuostolių). Šiems nuostoliams apskaičiuoti galima taikyti vieną iš Valstybinės kainų ir energetikos kontrolės komisijos metodų.

2 lentelė. Investicijų atsipirkimo skaičiavimas

Šildymo sezonas	Šildymo sezono dienolaipsniai DL_y , (K·day)	Sąnaudos šildymui pagal buvusią būklę Q_y , kWh/met	Šilumos kaina E , Lt/kWh	Mokėjimai pagal buvusią būklę, Lt/met	Mokėjimas šilumos tiektėjui $S_{invest,y}$, Lt/met	Investuotojo grąža, ΔS_y , Lt/met	Investicijų likutis, Lt
1	3618	8611,8	0,3	2583,5	1214,3	1369,3	18741,7
2	3829	9114,0	0,3	2825,3	1327,9	1497,4	17244,3
3	3462	8240,4	0,3	2636,9	1239,4	1397,6	15846,7
4	3430	8164,3	0,3	2694,2	1266,3	1427,9	14418,8
5	3401	8095,3	0,3	2752,4	1293,6	1458,8	12960,0
6	4212	10025,6	0,4	3509,0	1649,2	1859,8	11100,3
7	3733	8885,5	0,4	3198,8	1503,4	1695,4	9404,9
8	3605	8580,8	0,4	3174,9	1492,2	1682,7	7722,2
9	4078	9706,7	0,4	3688,5	1733,6	1954,9	5767,3
10	3298	7850,1	0,4	3061,5	1438,9	1622,6	4144,7
11	3407	8109,5	0,4	3243,8	1524,6	1719,2	2425,4
12	3475	8271,4	0,4	3391,3	1593,9	1797,4	628,1
13	3858	9183,0	0,4	3856,9	1812,7	2044,1	-1416,1

Išvados

Siūlomas daugiabučių gyvenamųjų namų atnaujinimo finansavimo modelis, įvertinantis Lietuvoje susiklosčiusias aplinkybes. Per padidintą šilumos energijos įkainį iki į pastato atnaujinimą įdėtų lėšų atsipirkimo laiko pabaigos (12–15 metų) gyventojai padengia jiems priskirtas daugiabučio pastato atnaujinimo išlaidas. Vals-tybė turi užtikrinti paramą sėkmingai atnaujintiems objektams.

Į pastato modernizavimą būtina įtraukti šildymo sistemų pertvarką, įvedant su-
vartotos šilumos apskaitą bei patalpų temperatūros reguliavimą butuose.

Reikia sukurti organizacijas, kurios organizuotų visą pastatų modernizavimo
procesą. Tikslinga, jeigu jos būtų valdomos savivaldybių.

Literatūra

1. Stankevičius, V.; Karbauskaitė, J. Metodika, kaip gyventojams atsiskaityti už
namų atnaujinimą ir šildymą. *Šiluminė technika*, 2013, Nr. 1, P. 23–25.
2. Juodis, E. Šilumos sąnaudų nustatymo pagal šildymo dienolaipsnius taikymo
galimybės taupiai šilumą naudojančiuose pastatuose. *Šiluminė technika*, 2013,
Nr. 1, P. 15–18.
3. <http://old.regula.lt/lt/siluma/svarbu/2013.php> .

Summary

A new method for calculation of energy consumption estimation and payment after
building refurbishment is proposed. The calculation mode is based on degree-days
and estimation of payment according to former energy consumption level in apart-
ment building. This payment model is well understandable to apartment owners and
acceptable to banks and construction companies at investment agreements.

Srauto trikdžių įtakos vandens skaitiklių metrologinėms charakteristikoms tyrimo rezultatai

Mindaugas Mockevičius, Gediminas Zygmantas, Darius Valaitis
Lietuvos energetikos institutas

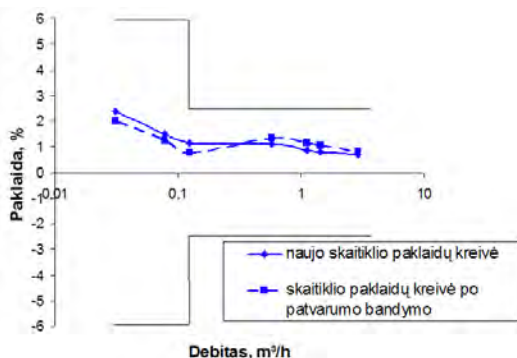
Pastaruoju metu žiniasklaidoje pasirodė įvairių pranešimų, kad pas gyventojus sumontuoti buitiniai vandens skaitikliai rodo žymiai daugiau (iki 30 %), nei realiai per skaitiklį pratekėjęs vandens kiekis. Ypač tai pastebima, kai Valstybinės metrologijos tarnybos Direktoriatas 2013-08-29 įsakymu Nr. V-130 nuo 4 iki 6 metų pailgėjo buitinių vandens skaitiklių patikros periodiškumas. Buvo pateiktas skundas Vartotojų teisių apsaugos tarnybai iš vienos namo bendrijos, kuriame teigiama, kad 6 metų patikros periodiškumas buitiniams skaitikliams yra per ilgas, nes po tokio laikotarpio skaitikliai esą rodys žymiai daugiau, taigi vartotojų nenaudai.

Tarptautinės teisinės metrologijos organizacijos OIML rekomendacijoje D16, priede 2 (Vandens skaitiklių patikros periodiškumas) pateikti Čekijoje atliktų tyrimų rezultatai, kurių išvadose teigiama, kad pagrindiniai faktoriai vandens skaitiklių matavimo tikslumui eksploatacijos vietoje yra teisingas skaitiklio sumontavimas, vandens kokybė ir skaitiklio konstrukciniai ypatumai, bet ne eksploatacijos laikas tarp patikrų. Bet kuriuo atveju turi būti nepažeidžiami vartotojo interesai.

Montuojant skaitiklius eksploatacijos vietoje didelę įtaką turi smulkaus valymo filtras prieš skaitiklį, kurio daugelis vandens tiekimo įmonių sąmoningai nemontuoja, kad išvengtų vartotojų nesąžiningo elgesio, siekiant atsukti atgal skaitiklio rodmenis. Neesant šio filtro, jei vanduo blogos kokybės, įvairiais nešvarumais užsiteršia skaitiklio įtekėjimo atvamzdyje esantis sietelis, dėl ko labai padidėja skaitiklio matavimo paklaida.

Kaip buvo paminėta, skaitiklio matavimo tikslumui mažai įtakos turi jo eksploatacijos laikas. Tai parodė ir daugkartinių tyrimų, atliktų LEI Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorijoje, rezultatai, kai atliekamas 100 val. trukmės skaitiklio patvarumo bandymas, skaitikliui dirbant didžiausiu leidžiamu debitu Q_{max} . Nors skaitiklis šiuo atveju dirba didžiausiu apkrovimu, kai yra tikėtinas didžiausias skaitiklio besisukančių detalių sudilimas, jo paklaidos po bandymo daugeliu atvejų tik nežymiai pasikeičia, lyginant su prieš bandymą nustatytomis matavimo paklaidomis. Bandymo metu per skaitiklį prateka apie 300 m³ vandens (esant skaitikliui, kurio vardinis debitas $Q_n = 1,5$ m³/h), o realiai buityje per 4–5 skaitiklio eksploatacijos metus sunaudojama tik apie 100–150 m³ vandens.

Tipinė naujo buitinio vandens skaitiklio paklaidų kreivė ir paklaidų kreivė po 100 val. patvarumo bandymo pateikta 1 paveiksle, iš kurio matyti, kad matavimo paklaidų pokytis po bandymo nesiekia nė 0,5 %.



1 pav. Tipinė naujo buitinio vandens skaitiklio paklaidų kreivė ir paklaidų kreivė po 100 val. patvarumo bandymo

Papildomų tyrimų, atliktų Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorijoje tikslas – ištirti buitinių vienasrovių vandens skaitiklių (žr. schemą 2 paveiksle) srauto profilio iškraipymų, kurie atsiranda prieš ar po skaitiklio sumontavus vieną alkūnę arba dvigubą alkūnę, įtaką skaitiklio matavimo tikslumui.



2 pav. Vienasrovio vandens skaitiklio schema

Darnusis Europos standartas LST EN 14154-3:2005+A2:2011 (Vandens skaitikliai. 3 dalis. Bandymo metodai ir įranga) aprašo standartinius bandymus, kurie atliekami skaitiklio tipo patvirtinimo/tyrimo bandymų metu, kai nustatoma skaitiklio jautrumo profilio klasė, kuri apibūdina, kokia tiesioji be kliūčių dalis reikalinga prieš ir už skaitiklio, jį sumontavus eksploatacijos vietoje. Bandymams numatytos specialios priemonės, imituojančios pagrindinius srauto profilio trikdžių šaltinius – dvigubą alkūnę ir ne visiškai atidarytą sklendę. Standartiniai sukurių generatoriai, imituojančios dvigubos alkūnės prieš/už skaitiklio poveikį, parodyti 3 paveiksle.



3 pav. Dešininis ir kairinis sukurių generatoriai

Kadangi daugelis vienasrovių buitinių vandens skaitiklių gamintojų deklaruoja, kad skaitiklį montuojant eksploatacijos vietoje, tiesioji be kliūčių vamzdžio dalis nebūtina (žymima U0 ir D0), LEI Šiluminių įrengimų tyrimo ir bandymų laboratorijoje buvo atlikti tyrimai, sumontavus prieš ir/arba už skaitiklio realias 90 laipsnių alkūnes (vieną arba dvigubą alkūnę) įvairiomis padėtimis ir įvairiais atstumais nuo tikrinamojo skaitiklio ir analizuojant, kaip keičiasi skaitiklio matavimo tikslumas dėl šių kliūčių sukeltų srauto trikdžių. Bandymais buvo siekiama nustatyti, ar anksčiau paminėti standartiniai sukurių generatoriai visiškai imituoja srauto trikdžius, kurie atsiranda dirbant skaitikliui realiomis sąlygomis.

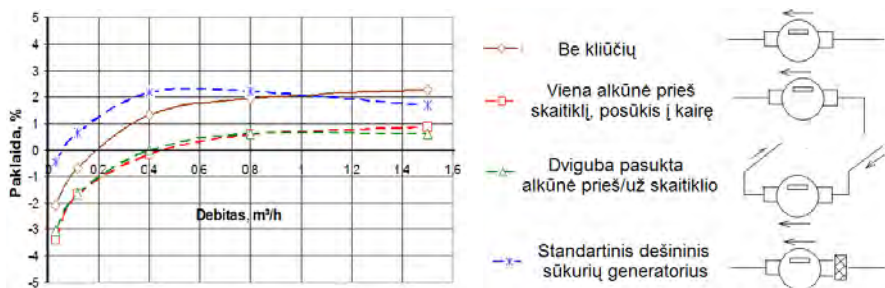
Buvo išbandyti trijų tipų vienasroviai buitiniai vandens skaitikliai:

- VS 30-1,5; $Q_n = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$; $l = 110 \text{ mm}$; gamintojas UAB BANA, Lietuva;
- GSD 8; $Q_3 = 2,5 \text{ m}^3/\text{h}$; $l = 80 \text{ mm}$; gamintojas B Meters, Italija;
- Contour Group; $Q_n = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$; $l = 110 \text{ mm}$; gamintojas Contour Group, Rumunija.

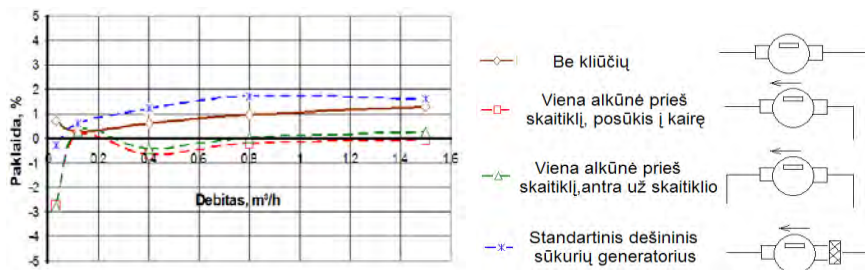
4–6 paveiksluose pateikti atliktų bandymų rezultatai – skaitiklių matavimo paklaidų palyginimas, nesant kliūčių, sumontavus vieną arba dvigubą alkūnę, taip pat standartinių sukurių generatorių (prieš/už skaitiklio).



4 pav. Skaitiklio VS 30-1,5, $l = 110 \text{ mm}$, su didesne matavimo kamera, bandymų rezultatai



5 pav. Skaitiklio GSD 8, $l = 80 \text{ mm}$, bandymų rezultatai



6 pav. Skaitiklio Contour Group, $l = 110$ mm, su mažesne matavimo kamera, bandymų rezultatai

Išvados

1. Standarte LST EN 14154-3:2005+A2:2011 aprašyti skaitiklio srauto trikdžių įtakos bandymai ne visiškai aprašo visus galimus srauto trikdžius, kurie gali atsirasti sumontavus būtini vandens skaitiklį eksploatacijos vietoje.
2. Realios 90 laipsnių alkūnės (viena alkūnė arba dviguba alkūnė) kai kurių tipų skaitikliams sukelia didesnius trikdžius, nei bandymams numatyti standartiniai sukurių generatoriai (trumpiems $l = 80$ mm skaitikliams ir skaitikliams $l = 110$ mm su mažesne matavimo kamera).
3. Skaitikliams didesnio montavimo ilgio ($l = 110$ mm) ir su didesne matavimo kamera srauto trikdžiai, sukelti sumontavus alkūnes prieš ar už skaitiklio, yra patys mažiausi.
4. Tikslinga parengti Lietuvoje vandens skaitiklių montavimo eksploatacijos vietoje taisyklės, kuriose būtų išsamiai aprašyti visi galimi srauto trikdžiai, galintys atsirasti skaitiklį sumontavus ir turintys įtakos jo metrologinėms charakteristikoms.

Literatūra

1. LST EN 14154-3:2005+A2:2011. Vandens skaitikliai. 3 dalis. bandymo metodai ir įranga.

The influence of the flow disturbances for water meters metrological characteristics research results

Summary

It is advisable to prepare the instruction for mounting water meters in place, where all the possible flow disturbances are comprehensively described when the water meter is mounted and which can influence its metrological characteristics.

TURINYS

1. ATSINAUJINANTYS ENERGIJOS IŠTEKLIAI IR BIOSFEROS APSAUGA

Žydrūnas Kavaliauskas, Rolandas Uscila

Atsinaujinančių energijos išteklių darbinių parametrų stebėjimo posistēmė 5

Robertas Poškas, Arūnas Sirvydas

Kietųjų dalelių susidarymas deginant biokurą ir jų sugaudymo efektyvumas naudojant elektrostatinį filtrą..... 9

Juozas Savickas, Marijona Tamašauskienė

Biodegalų ir biodujų gamybos Lietuvoje 1998 – 2013 m. analizė ir ateities prognozės 14

Antanas Markevičius, Vygandas Gaigalis, Juozas Savickas

Tvarios energetikos strategijos – Lietuvos regionų plėtros prielaida..... 20

Vladislovas Katinas, Mantas Marčiukaitis, Marijona Tamašauskienė

Vėjo jėgainių generuojamo triukšmo sklaidos tyrimai 25

Rolandas Paulauskas, Algis Džiugys, Nerijus Striūgas

Medžio granulės pokyčių tyrimas pirolizės metu 31

Lina Murauskaitė, Valentinas Klevas

Saulės ir geoterminės energijos panaudojimo galimybės centralizuoto šilumos tiekimo sistemoje..... 37

Titas Sereika, Kęstutis Buinevičius

NOx koncentracijų skaičiavimų metodika azoto turinčiam kurui..... 43

Monika Maziukienė, Algimantas Balčius

Ūkininko sodybos energetinio aprūpinimo analizė..... 47

2. BRANDUOLINĖ ENERGETIKA

Tadas Kaliatka

W7-X įrenginio termohidraulinė analizė nedidelio trūkio aušinimo sistemoje atveju 52

Gintautas Poškas

Ignalinos AE pastato V1 sistemų išmontavimo alternatyvų neapi- brėžtumo analizė	56
--	----

Marius Trepulis

RBMK - 1500 reaktoriaus valdymo strypo kanalo aušinimo putų srautu modeliavimas	62
--	----

Andrius Slavickas, Raimondas Pabarčius

Doplerio reaktyvumo koeficiento tyrimas inovatyvioje BWR kuro rinklėje	70
---	----

Александр Каган, Александр Меньшиков, Владимир Буравлев

Получение тяжёлой воды методом последовательного ступенчатого вымораживания природной воды	76
---	----

3. ŠILUMOS IR MASĖS MAINAI

Viktorija Sankauskaitė, Gintautas Miliauskas

Šiuolaikinių „lašų“ tyrimų įvertinimas binarinio skysčio lašelių gara- vimo modeliavimo kontekste	86
--	----

Roman Neilo

Experimental investigation heat and mass transfer during natural con- vection.....	95
---	----

Žydrūnas Kavaliauskas

Plazmos srauto parametrų tyrimai kolorimetriniu zondų	99
---	----

Mindaugas Milieška, Romualdas Kėželis, Vitas Valinčius

Katalizinio pluošto formavimas plazmine technologija ir jo savybių tyrimas.....	101
--	-----

Adelė Vaidelienė, Ramutė Grikštaitė

Oro burbuliukų ir vandens lašelių mišinio susidarymas krintančio van- dens srauto zonoje	107
---	-----

Monika Maziukienė, Gintautas Miliauskas

Vandens lašelių fazinių virsmų ciklo skaitinio modeliavimo iteracinės
schemos optimizavimo savitumai 113

4. ŠILDYMAS, ŠILUMOS TIEKIMAS IR TERMOFIKACIJA

Aušra Pažėraitė, Mindaugas Krakauskas

Konkurencija centralizuotai tiekiamos šilumos sektoriuje 123

**Stasys Šinkūnas, Mantas Morkvėnas, Juozas Gudzinskas,
Romaldas Morkvėnas**

Šilumos mainų pastatuose matematiniai modeliai ir jų taikymo pastatų
šildymo sistemų darbo režimo valdymui galimybių tyrimas 127

Jūratė Karbauskaitė, Romualdas Morkvėnas, Vytautas Stankevičius

Atsiskaitymo su investuotoju, atnaujinus pastatą, metodika..... 133

Mindaugas Mockevičius, Gediminas Zygmantas, Darius Valaitis

Srauto trikdžių įtakos vandens skaitiklių metrologinėms charakter-
istikoms tyrimo rezultatai 139