

# Šiluminės fizikos tyrimai ir jų raida Lietuvos energetikos institute

Vytautas Žiugžda

Lietuvos energetikos institutas,  
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas,  
el. p. [ziugzda@mail.lei.lt](mailto:ziugzda@mail.lei.lt)

Pateikiama šiluminės fizikos tyrimų plėtros Lietuvos energetikos institute nuo 1956 iki 2006 m. apžvalga. Pažymėtos svarbiausios tyrimų kryptys ir pagrindiniai rezultatai, liečiantys įvairių kūnų ir jų sistemų šilumos mainus, hidrodinamiką, aukštatemperatūrę šiluminę fiziką ir medžiagotyra, pernešimo procesus branduoliniuose ir energetiniuose įrenginiuose.

**Raktažodžiai:** šilumos mainai, šiluminė fizika, kūnų aptekėjimas, hidrodinamika, aukštos temperatūros, pernešimo procesai

Lietuvos energetikos instituto ir energetikos mokslinių tyrimų ištakos siekia tolimus 1948 m., kai Lietuvos MA buvo įkurtas Technikos mokslų institutas ir jame Energetikos sektorius. Šis institutas 1952 m. buvo pavadintas Fizikos ir technikos institutu, o 1956 m. – Energetikos ir elektrotechnikos institutu. Štai nuo čia pradėdame skaičiuoti instituto mokslinės veiklos metus. Keičiantis problematikai ir mokslo mastui, jis 1967 m. buvo pavadintas Fizikinių-techninių energetikos problemų institutu. Šį pavadinimą, matyt, lėmė ir tai, kad jis tada priklausė Tarybų Sąjungos MA tokio pat pavadinimo mokslo skyriui. Ir pagaliau atkūrus Lietuvos Nepriklausomybę, institutas 1992 m. įgavo dabartinį savo pavadinimą. Kadangi instituto mokslo tyrimų gama (erdvė) yra gana plati ir įvairiašakė, tai šiame straipsnyje apžvelgsime tik šiluminę fiziką. Tyrimai šiluminės fizikos srityje buvo pradėti tik pokario metais, kai jaunas inžinierius-mechanikas šilumininkas 1948 m. Kauno universitete, toje pačioje Šiluminių variklių katedroje, pradėjo tirti skersai aptekamo cilindro įvairiuose srautuose šilumos atidavimą.

Šiems tyrimams didelę įtaką turėjo Maskvos energetikos instituto šiluminės fizikos kūrėjai akademikai M. Michejevas, M. Vukalovičius. Jų paskatintas bei susipažinęs su laboratorijomis ir standais, A. Žukauskas Mechanikos fakultete prie Šiluminių variklių katedros sukūrė pirmąjį Lietuvoje universalų aerohidrodinaminį eksperimentinį standą. Jame buvo atliekami tyrimai oro, vandens ir transformatorinės alyvos srautuose, keičiant srautų temperatūrą ir greitį. Buvo nustatyti pagrindinėje panašumo teorijos lygtyje (formulėje)  $Nu_f = c Re_p^m Pr_f^n (Pr_f / Pr_w)^p$  parametrai, t. y. laipsnio rodikliai  $m$ ,  $n$ ,  $p$ . Šių tyrimų rezultatų pagrindu 1953 m. A. Žukauskas parengė technikos mokslų kandidato (dabar daktaro) disertaciją ir labai sėkmingai apgynė Maskvos energetikos institute. Šie tyrimai leido įvertinti kintamų fizikinių srauto savybių įtaką cilindro šilumos atidavimui, šiluminio srauto krypties (cilindras yra

šildomas ar šaldomas) įtaką. Tai buvo nustatyta pirmą kartą, kadangi ankstesni tyrimai, atlikti oro srautuose, to fakto negalėjo patvirtinti.

Nuo 1956 m. šilumos mainų tyrimai buvo tęsiami Lietuvos MA Energetikos ir elektrotechnikos instituto įkurtoje ir A. Žukausko vadovaujamoje Šiluminės technikos laboratorijoje. Šis institutas evoliucionavo iš savo pirmtakų Lietuvos MA Technikos mokslų instituto (1948–1952 m.) ir Fizikos-technikos instituto (1952–1956 m.), kuriems vadovavo prof. J. Indriūnas, o nuo 1953 m. – A. Žukauskas. Energetikos ir elektrotechnikos institute iš esmės ir buvo vykdomi visi vėlesni šiluminės fizikos šilumos mainų tyrimai. Tyrimai, atlikti skysčių srautuose, suteikė galimybę smarkiai išplėsti  $Re$  ir  $Pr$  skaičių (kriterijų) kitimo sritis, eksperimentiškai patikslinti anksčiau pateiktoje kriterinėje pereinamybėje jų laipsnio rodiklius  $m$  ir  $n$ . Buvo nustatyta, kad šie labai svarbūs ir šilumos mainų intensyvumą sąlygojantys rodikliai kinta gana plačiose ribose. Didėjant  $Re_f$  matyti, kad  $m = 0,4$ , kai ( $1 < Re_f < 50$ ),  $0,5$ , kai ( $50 < Re_f < 10^7$ ). Čia kruopštūs tyrimai buvo atlikti visame nurodytų  $Re$  skaičių intervale.

Skersai aptekamo cilindro vidutiniams šilumos mainams buvo nustatyta  $Pr$  laipsnio  $n$  reikšmė –  $0,37$ . Tiriame vietinius šilumos mainus aplink cilindą, jo kritiniame taške buvo nustatytos laminarinio bei turbulentinio jo aptekėjimo sritys su joms būdingomis  $m$  ir  $n$  laipsnių rodiklių reikšmėmis:  $m = 0,33$ ,  $0,5$ ,  $0,8$  ir  $n = 0,3$ ,  $0,43$ . Tolesni išilgai aptekamų plokščių tyrimai parodė, kad laminarinio srauto atveju dėl labai mažo ar net visai neegzistuojančio dalelių maišymosi pasienio sluoksnyje, palyginus su intensyviu sukuriniu, šilumos mainai vyksta skirtingai. Ne vien skiriasi laipsnio rodikliai kriterinėse priklausomybėse, bet ir didelę įtaką šilumos mainų proceso išraiškai turi plokštės paviršiaus temperatūros kitimo pobūdis (pastovi temperatūra, pastovus šilumos srautas). Laminarinio pasienio sluoksniu

atveju šilumos mainus reikšmingai veikia ir nešildomos priekinės plokštės dalies ilgis. Tai patvirtino ir Energetikos institute Maskvoje atlikti tyrimai. Turbulentinio pasienio sluoksnio atveju šios įtakos neaptikta.

Cilindro vietinio pagal perimetrą šilumos atidavimo tyrimai parodė, kad daug sudėtingesni šilumos mainų procesai vyksta srautui atitrūkstant užpakalinėje jo dalyje. Tačiau veikiant srauto turbulentiškumui didelių  $Re$  skaičių srityje ir priekinėje cilindro dalyje pereinamojo režimo pradžia ryškiai pasislenka kritinio taško kryptimi. Tiriant šį reiškinį ir čia vykstančius procesus gautieji rezultatai 1990 m. TSRS išradimų komiteto buvo pripažinti atradimu. Tai buvo antras toks aukštas Lietuvos mokslininkų pasiekimų įvertinimas.

Įvairių energetinių įrenginių, šilumokaičių pagrindiniai elementai dažniausiai būna skersai aptekami šachmatiniai ir koridoriniai vamzdžių pluoštai. Šiems tyrimams buvo skiriamas didelis prof. A. Žukauskas skyrė daug dėmesio. Per visą instituto istoriją buvo iširta labai daug (apie 100) šių pluoštų geometrijų, tyrimai vykdyti trijose instituto laboratorijose, aprėptas labai platus  $Pr$  skaičiaus (nuo 1 iki 1000) intervalas,  $Re$  skaičius siekė kritinius ir virškritinius režimus. Tyrimai buvo vykdomi oro, vandens, transformatorinės alyvos, glicerino srautuose. Jiems atlikti buvo sukurti galingi eksperimentiniai standai. Jie kaip patys galingiausi šios paskirties įrenginiai Tarybų Sąjungoje buvo naudojami ir natūriniais tyrimams.

Daug dėmesio buvo skiriama šilumos mainų procesų intensyvinimui, siekiant sukurti kompaktiškus šilumokaičius. Intensyviai ir planingai tirti hidrauliniai pasipriešinimai, kaip labai svarbus šilumokaičių efektyvumo kriterijus.

Vertinant efektyvius ir patikimus šilumokaičius, be jų elementų hidraulinių pasipriešinimų, būtina įvertinti jų elementų vibracijas ir jų įtaką šilumos mainams bei mechaniniam atsparumui. Šioms problemoms spręsti buvo plačiai iširti šilumokaičių darbui pavojingi kriterijai ir jų ribos. Tirta ir vibracijų įtaka šilumos mainų intensyvumui.

Ilgainiui, kuriant naujausius aukštos temperatūros branduolinius reaktorius, kosmoso, magnetohidrodinaminis ir kt. įrenginius, iškilo būtinybė tirti intensyvius šilumos mainus esant aukštoms dujų srautų ir paviršių temperatūroms ir labai dideliems šilumos srautams. Tyrimais buvo įrodyta, kad karštos (1000 K) sienelės atveju, kai ją aušina šaltų dujų srautas, anksčiau minėtoje šilumos mainų lygtyje vietoj parametro  $(Pr_f / Pr_w)^{0,25}$  reikia vartoti temperatūrų santykį  $(T_f / T_w)^{0,25}$ .

Sukūrus aukštatemperatūrinių dviatomių dujų srautų laboratoriją su galingais (iki 2000 kW) elektros lanko dujų kaitintuvais (plazmotronais) buvo nustatyta, kad šiuo atveju šilumos atidavimo lygtyse nereikia santykio  $(T_f / T_w)$ , nes laipsnio rodiklis lygus 0. Tokiu būdu, prof. A. Žukausko išvalgumo dėka, po ilgalaikių ir daug kainuojančių aukštatemperatūrinių tyrimų buvo eliminuota šilumos mainų moksle spraga: temperatūrinis faktorius  $T_f / T_w$  intervale nuo 0,1 iki 10 įvertinamas logaritminėse koordinatėse ne interpoliuojama tiese, kaip bu-

vo manyta iki mūsų tyrimų Lietuvoje, bet yra esminiai skirtingas priklausomai nuo to, ar srautas yra kaitinamas, ar šaldomas. Šaldymo atveju santykis  $T_f / T_w$  neveikia šilumos mainų. Tai galioja ir disocijuotoms dviatomėms dujoms, kai fizikinės jų savybės (orui daugiau kaip 2500 K, azotui daugiau kaip 4000 K) skaičiuojamos pagal „užšaldytas“ sąlygas, t. y. interpoliuojant jų kreives, gautas iki disociacijos taško.

Daugiaatomių dujų ir degimo produktų disociacijos bei spinduliavimo reiškinių tyrimas daugelį metų buvo atliekamas gamtinių dujų degimo standuose. Šie standai buvo naudojami ir aukštatemperatūrinių medžiagų atsparumo tyrimams, kadangi daugelis šilumos mainų procesų, pvz., magnetohidrodinaminuose generatoriuose, buvo lydimi masės mainų. Gauti rezultatai tuo metu buvo aktualūs bendradarbiaujant su TSRS MA Aukštų temperatūrų institutu, kuriant MHD principu veikiančiam elektros generatoriui.

Vystantis termoanemometrinių tyrimų metodams, institute buvo iširta srautų turbulentiškumo įtaka šilumos mainams ir įvairūs jos aspektai. Buvo atlikti fundamentalūs turbulentinio pasienio sluoksnio ir šilumos mainų tyrimai, esant turbulentiniam tekėjimui virš plokščių paviršių. Tai sudarė prielaidas geriau suprasti šilumos mainų intensyvinimo galimybes ir jas pritaikyti realiuose šilumokaičiuose.

Įvairūs šilumos mainų aspektai bei hidraulinis pasipriešinimas buvo intensyviai tiriami žiediniuose kanaluose, lygių, šiurkščių bei spirališkai susuktų vamzdžių pluoštuose. Šie tyrimai buvo atlikti dujų srautuose plačiame temperatūrų ir greičių kitimo intervale. Daug dėmesio buvo skiriama šilumos mainų procesams dujų aušinamuose kanaluose veikiant termogravitacinėms ir išcentrinėms jėgoms.

Pažymėtini gana platūs žematemperatūrinių šilumos vamzdžių, naudojamų radioelektroninių ir kt. techninių įrenginių aušinimui, tyrimai. Žematemperatūros plazmos srautuose buvo iširti apvalūs, plokšti kanalai, įvairūs šilumokaičiai, tinkami dviatomių dujų grūdinimui. Čia taip pat buvo iširti šilumos mainai oro ir azoto srautuose esant temperatūrai atitinkamai iki 2500 ir 4000 K.

Plačiai buvo tiriami šilumos mainų procesai, vykstant cheminėms reakcijoms. Šilumokaičiuose, be įvairių tipų konvekcijos, vyksta aukštų temperatūrų srityse spinduliavimo ar radiaciniai šilumos mainai, kurie yra labai svarbūs aukštatemperatūroje šiluminėje fizikoje, ypač kuriant įvairios paskirties degimo, grūdinimo kameras.

Be įvairių šilumos mainų procesų, instituto laboratorijose buvo tiriamos medžiagos aukštose temperatūrose, kur buvo analizuojami keraminių medžiagų irimo procesai bei jų mechaninės ir terminės savybės, jų sąveika su aukštatemperatūriniais srautais. Tai buvo nauja šiluminės fizikos kryptis, susieta su medžiagotyra bei su šilumos ir masės mainais.

Lietuvai atkūrus nepriklausomybę, Lietuvos energetikos instituto veikla buvo labiau orientuota į Lietuvos Respublikos reikmes, tai – branduolinės energetikos sau-

ga, energetikos strategijos ir vystymo formavimas. Šiluminės fizikos problemos atsispindėjo ir kai kuriose Vyriausybės patvirtintose pagrindinėse mokslinių tyrimų kryptyse. Pažymėtina reaktorių termohidraulinių ir neuroninių charakteristikų modeliavimas. Reikia pripažinti, kad galingi saugos analizės programų paketai remiasi pagrindinėmis hidrodinamikos ir energijos pernešimo lygčių sistemomis, o jų panaudojimo patirtį turi šiose srityse dirbantys instituto mokslininkai.

Ir toliau numatoma tirti mišriosios konvekcijos problemas, aprėpiant tiriamą įvairios konfigūracijos ir orientacijos erdvėje paviršių šilumos mainus, o tai labai aktualu kuriant ypač saugius branduolinius reaktorius. Svarbią vietą užima degimo procesų tyrimas, siekiant sumažinti žalingą atmosferos teršimą, terminis skystųjų ir kietųjų toksinių medžiagų nukenksminimas.

Atlikta ir atliekama daug šilumos atidavimo tyrimų esant mišriai turbulentinei konvekcijai vertikaliuose vamzdžiuose ir kanaluose. Tyrimai parodė, kad esant priešingoms laisvosios ir priverstinės konvekcijos kryptims, šilumos mainai mišriosios konvekcijos atveju yra intensyvesni, palyginus su vien priverstine konvekcija, tuo tarpu sutapus konvekcijų kryptims, srautas laminarizuojamas ir šilumos atidavimas sumažėja. Atlikti gausūs tyrimai ir vertikaliuose plokščiuose kanaluose įvairiais paviršių kaitinimo ir jų orientacijos erdvėje atvejais. Eksperimentiškai ištirtas šilumos atidavimas esant priešingų kryptių tėkmėms turbulentinės mišriosios konvekcijos atveju vertikaliame ir pasvirusiame plokščiaame kanale, esant vienpusiam kaitinimui. Vykdomi ir skaitiniai turbulentinės mišriosios konvekcijos įvairiais kanalų orientacijos ir jų kaitinimo atvejais tyrimai. Pažymėtini eksperimentiniai ir skaitiniai mišriosios konvekcijos tyrimai laminarinio-sūkurinio tekėjimo zonoje plokščiaame kanale, esant priešingoms bei vienos krypties tėkmėms.

Plačiame hidrodinaminių parametrų intervale atlikti eksperimentiniai ir skaitiniai mišriosios konvekcijos tyrimai plokščiaame kanale laminarinio-sūkurinio tekėjimo atveju. Atliekami dvimačiai stacionarūs ir nestacionarūs skaitiniai tyrimai vertikaliame plokščiaame kanale laminarinio-sūkurinio tekėjimo atveju, esant vienkryptėms ir priešingų kryptių tėkmėms. Atliktas labai svarbus ir originalus šilumos mainų modeliavimas geologiniuose žalingų radioaktyviųjų atliekų laidojimo kapinynuose. Pažymėtina, kad Branduolinės inžinerijos laboratorijoje ryškiausiai pasireiškia klasikinės šiluminės fizikos tyrimai.

Institute daug dirbama atliekant Ignalinos AE reaktorių saugos pagrindimą ir įvertinant reaktorių saugą po įvykdytų modernizacijų bei nutraukiant reaktoriaus eksploataciją, būtina atlikti pereinamųjų procesų ir galimų avarinių situacijų modeliavimą. Tam tikslui Lietuvos energetikos institute jau daugiau kaip dešimt metų naudojama Ignalinos AE reaktorių matematiniais modeliais, sukurtais remiantis geriausio įverčio termohidraulinių programų paketais. Šie modeliai leidžia modeliuoti pereinamuosius procesus ir galimas avarines situacijas RBMK-1500 reaktoriuose. Sudarant matematinis

modelius bei interpretuojant modeliavimo rezultatus reikia pažinti šilumos mainų ir hidrodinamikos procesus, vykstančius reaktoriaus aušinimo kontūre.

Šiuo metu šiluminių ir hidraulinių procesų modeliavimas reaktoriaus aušinimo kontūre bei jį gaubiančiose patalpose atliekamas, naudojantis geriausio įverčio programų paketais. Šie programų paketai yra patogūs naudoti, tačiau yra sukurti ir patikrinti korpusiniams suslėgto ir verdančio vandens reaktoriams. Kad šiuos programų paketus būtų galima naudoti kanaliniams reaktoriams (pvz., AE RBMK), reikia atlikti jų patikrą. Šiam darbui reikia sukaupti ir apdoroti informaciją apie šilumos mainų, hidrodinamikos, virimo krizės ir srauto nestabilumo lygiagrečiuose vertikaliuose kanaluose tyrimus. Modeliuojanti termohidraulinius procesus AE patalpose, būtina teisingai atspindėti garo tekėjimo, maišymosi su oru ir kondensacijos procesus, vykstančius specifinės konstrukcijos kondensaciniuose baseinuose. Programų paketų patikra reikalauja specifinių termohidraulikos žinių. Nors nemažai eksperimentinių darbų, tinkamų RBMK tipo reaktoriams, buvo atlikta Rusijoje (Elektrogorske, Maskvos moksliniuose centruose – Kurčiatovo institute ir NIKIET institute), tokie svarbūs procesai, kaip šilumnešio srauto nestabilumas ir virimo krizė lygiagrečiuose kuro kanaluose, bei kt. klausimai, nėra galutinai išspręsti. Kai kurie tyrimai yra atlikti palyginti seniai ir jų rezultatai, įvertinant to meto matavimo prietaisų galimybes ir eksperimento tikslumą, šiuo metu keičia kai kurių abejonių.

Atliekant branduolinių reaktorių saugos analizę, Lietuvos energetikos institute nuolat gilinamos ir pritaikomos žinios fundamentalių tyrimų srityje apie šilumos mainų ir hidrodinamikos procesus, vykstančius vandens-garo ir nesikondensuojančių dujų sistemose.

Intensyviai vykdomi kondensacinio pliūpsnio tyrimai esant dvifazės garas-vanduo sistemos hidrodinaminiam nestabilumui. Tyrimais nustatytas ir patvirtintas konstrukcinis kriterijus, lemiantis kondensacinio pliūpsnio susiformavimo sąlygas. Apžvelgta galimybė kondensacijos pliūpsniais varomą avarinio aušinimo sistemą realiai pritaikyti RBMK-1500 reaktoriuose. Sukurti skaitiniai tyrimo modeliai ir eksperimentinis standas tarpfazinio paviršiaus nestabilumo tyrimui.

Intensyvi atominės ir bendrai energetikos plėtra nulėmė poreikį tirti šilumos ir masės mainų intensyvinimo procesus ir sukurti šilumos masės mainų teorijos pagrindus dirbtinės srauto turbulizacijos sąlygomis, pasukant srautą. Taip susiformavo nauja mokslinių tyrimų kryptis – šilumos ir masės mainai dirbtinai turbulizuojant srautą.

Šilumos ir masės mainų procesų intensyvinimas, sąlygojamas dirbtinio srauto turbulizavimo, yra vienas iš aktualiausių šiuolaikinės technikos sprendimų, įgalinantis sumažinti šilumokaičių bei įrenginių masę ir matmenis, šilumos mainų paviršių temperatūras, padidinti branduolinių įrenginių cirkuliacinių srautų parametrus.

Intensyvesni šilumos ir masės mainų procesai, pasukant srautą kanaluose iš suktų ovalinio profilio vamzdžių

bei strypų su vielos apvijomis, gaunami intensyviau turbulizuojant srautą ir dėl konvencinio fluideo pernešimo sraigintais strypų (vamzdžių) kanalais. Skatinant pasienio sluoksnio ir pagrindinio srauto fluideo–masių mainus, šis intensyvinimo metodas buvo analitiškai ir eksperimentiškai iširtas dujų srautuose ir pritaikytas aukštatemperatūriams branduoliniams dujomis aušinamiems reaktoriams bei šilumokaičiams. Be minėto šilumos mainų intensyvinimo metodo, tėkmė papildomai dar buvo turbulizuojama šilumą išskiriančių elementų distancio navimo rėtinėmis.

Tyrimai buvo atlikti plačiame darbo ir geometrinių parametrų kitimo diapazone esant stacionarioms ir nestacionarioms darbo sąlygoms. Sukurtos ir moksliskai pagrįstos analitinės išilgai aptekamų rinklių šiluminių hidraulinių procesų skaičiavimo metodikos.

Parengti tyrimo metodai ir sukurti eksperimentiniai įrenginiai šilumos–masės mainų procesų eksperimentiniams tyrimams stacionariomis ir nestacionariomis sąlygomis atlikti. Jie leido nustatyti efektyvinius difuzijos, šiluminio laidumo ir klampumo koeficientus. Sukurtuose eksperimentiniuose įrenginiuose buvo nustatomi intensyvių nestacionarių procesų parametrai, kurie buvo automatiškai registruojami ir apdorojami. Stacionaraus tekėjimo atveju galima tiesiogiai atlikti matavimus įvairiausios konfigūracijos strypų rinklėse, nustatant vietinius ir vidutinius šilumos mainus, rinklių pasipriešinimą, vietinius greičių pasiskirstymus tarpstrypinėje erdvėje, tangentinius įtempimus ant šilumą išskiriančio rinklių paviršiaus bei turbulentiškus maišymosi koeficientus.

Buvo gauti gausūs eksperimentiniai duomenys apie šilumnešio tarpkanalinį susimaišymą ir pernešimo koeficientus plačiame darbo ir geometrinių parametrų kitimo diapazone, esant stacionarioms ir nestacionarioms sąlygoms. Jie apibendrinti kriterinėmis priklausomybėmis ir gerai sutampa su kitų autorių duomenimis.

Nustatyti nauji šilumos ir masės pernešimo dėsniniai įgalina atlikti trimačių nestacionarių šilumos ir masės mainų skaičiavimą, remiantis srauto vietinėmis charakteristikomis.

Aukštatemperatūriai šilumos mainų procesai tiriami plazminių technologijų sektoriuje. Šioje srityje dirba nedidelė grupė mokslo darbuotojų, kurie, greta kitų žemos temperatūros plazmos ir jos technologijų įdiegimo uždavinių, tiria šilumos ir masės mainus bei dujų dinamikos dėsningumus aukštatemperatūriuose srautuose. Šilumos mainų tyrimai turbulentiškai tekant karštomis dujomis kanaluose atliekami, kai ištekančio iš jų plazmos srauto temperatūra yra ne aukštesnė kaip 5000 K.

Kuriant naujus plazmos generatorius, dirbančius įvairios paskirties įrenginiuose, atliekami jų elektrinių ir šiluminių charakteristikų tyrimai. Nustatyti ir apibendrinti šilumos mainai degant elektros lankui kanaluose, jį aptekant įvairios sudėties dujomis. Tuo tikslu tiriami šilumos mainai reakcinėje lanko zonoje plazmotrone, nagrinėjamas elektros lanko stiprio kitimas esant laminariam ir turbulentiškam lankui, lanko spinduliavimo intensyvumas tekant skirtingoms dujomis.

Atlikti šilumos mainų tyrimai tekant karštomis dujomis trumpais vamzdžiais parodė, kad šilumos mainų intensyvumas priklauso nuo įtekančių dujų struktūros, t. y. nuo dujų įtekėjimo sąlygų. Nustatytos empirinės priklausomybės rezultatams apibendrinti pagal vienmatį ir dvimatį tekėjimo modelį, tekant dujomis (orui 1400–4000 K ir azotui 3000–5000 K) vamzdyje, kurio  $0,05 < x/d < 10$ , o sienelės temperatūra 300–450 K,  $4 \cdot 10^3 < Re_d < 8 \cdot 10^4$ .

Šilumos mainų intensyvinimui buvo panaudoti pasienio sluoksnio trikdžiai (įvairaus ilgio ir skersmens įgilinimai). Buvo atlikti šilumos mainų tyrimai recirkuliacinėje tekėjimo kanalo zonoje. Remiantis atliktų eksperimentų rezultatų analize nustatyta, kad, atsižvelgus įtekančių į kanalą sąlygas, vietiniai šilumos mainai gali padidėti net 4 kartus, palyginti su stabilizuotu dujų tekėjimu vamzdyje.

Šaldomais kalorimetriniais zondais matuojami plazmos greičių ir temperatūrų profiliai, nustatomos vietinės jų reikšmės, lyginama su iš šilumos balanso lygčių gautomis vidutinėmis reikšmėmis, nustatomi greičių ir temperatūrų pasiskirstymo dėsningumai. Termoanemometru su šaldomu pirminiu keitikliu buvo nustatyti greičių pulsai, o dvigubu elektriniu zondų išmatuotos temperatūros pulsacijos ir nustatytas elektronų temperatūros pasiskirstymas. Nustatyta, kad daugeliu atvejų atmosferos slėgio plazmoje elektronų temperatūra gali viršyti dujų sunkiųjų dalelių temperatūrą. Greičių ir temperatūrų matavimų rezultatai pasienio sluoksnyje leido nustatyti Prandtliaus ir Karmano pastoviosios reikšmes. Tokiu būdu, buvo sukurtas Cebesi-Smito metodas skaičiuoti šilumos mainams vamzdyje, esant kintamoms dujų savybėms.

Nukenksminant toksines medžiagas reikia temperatūrą pakelti daugiau kaip iki 1800°C. Tai galima pasiekti plazmocheminiame reaktoriuje, į kurį tiekiami įvairių dujų (oro, vandens garų, vandenilio) srautai, įkaitinti plazmotrone iki 3000–4000 K. Kad pavojingos medžiagos būtų tinkamai nukenksmintos, jos turi išbūti reaktoriuje reikiamoje temperatūroje tam tikrą laiką, apskaičiuojamą arba nustatomą eksperimentiniu būdu. Nustatyta proceso greičio ir reakcijos laiko priklausomybė nuo temperatūros.

Naujojoje katalizinių neutralizatorių kartoje vietoj keramikos naudojamas metalinis substratas, o tauruosius metalus pamažu keičia pigesni metalų oksidai, ceolitai ir kitos medžiagos. Iš specialių dangų pagamintuose kataliziniuose reaktoriuose masės ir šilumos pernašos procesai buvo tirti naujai sukurtame katalizinių dangų savybių tyrimo įrenginyje, kurio ištekėjimo tūtoje įrengtas katalizinis reaktorius. Darbui atlikti sukurta dujų dinaminė ir šiluminių charakteristikų tyrimo pasienio sluoksnio zonoje metodika, sukomplektuota įranga ir aparatūra srauto struktūrai tirti. Nustatyti reaguojančių dujų greičių, temperatūros, medžiagų koncentracijos pasiskirstymas prie katalizatoriaus sienelės, srauto ir sienelės šilumos–masės mainų koeficientai.

Be šilumos mainų procesų tyrimo neapsieinama ir realizuojant dangų sintezės procesą. Todėl intensyviai tyrinėjami šilumos–masės mainų procesai daugiafazėje



plazmos srovėje, dispersinių dalelių ir plazmos srovės vyraujantys šiluminiai procesai bei daugiafazės plazmos srovės ir apdorojamo substrato sąveika.

Ateityje numatyta plačiau tirti šiluminius ir heterogeninius procesus įvairių dangų, skirtų įvairiems tikslams, sudarymo metu, formuojant jas vakuuminio (plazminiai polimerai, nanovamzdėliai, nanovielos, nanosvoglūnai), redukuoto (fulerenai, deimanto tipo, hidrofobinės dangos) ir atmosferos (katalizinės, tribologinės, apsauginės ir kt.) slėgio plazmoje.

Atsinaujinančių energijos šaltinių laboratorijoje vykdomi šilumos ir masės mainų tyrimai skaitinio modeliavimo metodais. Ištirti skersai aptekamų turbulentinio oro bei vandens srauto įvairaus geometrinio profilio cilindrinų kūnų aptekėjimo klausimai, išanalizuoti šilumos atidavimo reiškiniai bei atliktas vėjo jėgainių įvairių konstrukcijų atitrūkimo procesų bei elementų aerodinaminio aptekėjimo modeliavimas.

Sprendžiant gamtosaugos klausimus ištirta vandens telkinių-aušintuvų termohidrodinaminė būklė, išanalizuotas dujinių ir kietų dalelių koncentracijos kitimas atmosferoje, išnagrinėta oro srovių turbulentiškumo įtaka koncentracijos pasiskirstymui. Skaitmeninio modeliavimo uždaviniai apima tiek stacionarius, tiek nestacionarius procesus. Šių uždavinių sprendimui pradėti naudoti PHOENICS ir FLUENT programų paketai. Remiantis eksperimentiniais ir nestacionaraus trimačio skaitinio modeliavimo rezultatais, nustatytos aerohidrodinaminės konstantos, būtinos srautų judėjimo vandens telkiniuose aprašymui, atsižvelgiant į išorinius veiksnius bei vietos sąlygas, temperatūras, vėjo greičius, bangavimą ir kt. Šie tyrimai atlikti Drūkšių vandens telkinyje – Ignalinos AE baseine-aušintuve.

Svarbi tyrimų kryptis – tai organinio kuro deginimo efektyvumo didinimas ir išskiriamų į atmosferą žalingų degimo produktų kiekių mažinimas. Ypač daug dėmesio buvo skiriama azoto oksidų kiekių mažinimui, panaudojant vadinamąjį pakopinį jo deginimą. Remiantis tyrimų rezultatais, sukonstruota ir įdiegta praktikoje keletas degiklių modifikacijų, pasižyminčių mažu išskiriamu azoto oksidų kiekiu. Atlikti eksperimentiniai ir teoriniai pulsuojančio degimo tyrimai, nustatyta pulsacijų įtaka  $\text{NO}_x$  generacijai. Šis kuro deginimo būdas pasižymi dideliu šilumos mainų intensyvumu. Ištirtas heterogeninio angliavandenilių deginimo paviršiaus pasienio sluoksnyje mechanizmas, kuris leido sukurti modernų degiklį su išankstiniu mazuto dujinimu. Jis ypač aktualus mažoms kūrykloms. Laboratorijoje daug dirbama naudojant skaitinius šilumos ir masės mainų dėsningumus procesams reaguojančiose terpėse. Čia pradėtas naudoti tobulas FLUENT programų paketas, kuris leidžia atlikti nestacionarių trimačių hidrodinaminį, šilumos pernešimo procesų analizę, esant cheminėms reakcijoms ir daugiafazei aplinkai.

Degimo procesų laboratorija turi licenciją gaminti dujų mazuto degiklius, kurių galia siekia 7, 10 ir 30 MW. Laboratorija sėkmingai gamina ir tobulina degiklius daugelyje Lietuvos pramonės įmonių.

Pastaruoju metu siekiant ekonomiškumo ir palankaus gamtosaugai mazuto deginimo, pasiūlytas jo ištaškymo

smulkiais lašeliais metodas, įgalinantis tobuliau valdyti degimo procesą. Sukurta metodika gaminti ir rekonstruoti degiklius, užtikrinančius mažus  $\text{NO}_x$ , suodžių ir CO kiekius dūmuose deginant skystąją ir dujinį kurą. Sukurta metodika ir įrenginiai, įgalinantys sudujinti atliekines padangas ir kt. organines atliekas autopirolizės metodu. Intensyviai tobulinamos degimo procesų skaičiavimo metodikos, pagrįstos aerodinamikos, šilumos ir masės mainų bei cheminių virsmų dėsningumais. Išvystytas visiškai naujas procesų skaičiavimo metodas, srauto kontinuumą pakeičiantis dalelių ansamblio judėjimu.

Pasitinkant Lietuvos energetikos instituto penkiasdešimtmetį ir analizuojant šiluminės fizikos tyrimų raidą jame, reikia akcentuoti akademiko Algirdo Žukausko nuveiktus didžiulius darbus kuriant institutą, vykdamas jo evoliuciją, formuojant pagrindines ir aktualiausias mokslo tyrimų kryptis Lietuvai. Jis yra šiluminės fizikos mokyklos įkūrėjas, kaip jau minėta, žengęs pirmuosius žingsnius šilumos mainų tyrimų srityje dar Kauno universitete 1948 m. Kaip rodo [44] darbe atlikta nuodugni šiluminės fizikos mokyklos įkūrimo analizė, ji susiformavo per 21 metus, čia užaugo didžiulis aukštai kvalifikuotų mokslininkų, iškovojusių platų pripažinimą Tarybų Sąjungoje ir daugelyje pasaulio mokslo centrų. Čia subrendo ir tęsia tradicijas nauja mokslininkų karta, toliau garsindama instituto mokslininkų tyrimus toli už Lietuvos ribų. Gyvenimo aktualijos diktuoja naujus iššūkius: šiandien institutas plačiai žinomas ir pripažintas Branduolinės energetikos saugos, energetikos ekonomikos ir strategijos, metrologijos, medžiagotyros srityse. Šiluminės fizikos ir šilumos mainų tyrimai dabar užima mažesnę dalį, bet jie, kaip ir anksčiau, gana sėkmingai plėtojami, vėl plečiantis ir intensyvėjant naujos kartos branduoliniams reaktoriams, termobranduoliniams reaktoriams, vandenilio generavimo, transportavimo ir panaudojimo įrenginių kūrimo procesui Europoje ir pasaulyje, skiriant šiems tikslams vis daugiau lėšų, institutas numato vėl gerokai išplėsti tam reikalingus tyrimus.

Reikia tikėtis, kad per 50 metų instituto sukaupia patirtis bei žinios ir ateityje pravers kuriant modernią Lietuvos energetiką, įneš reikšmingą indėlį į bendrą Europos Sąjungos mokslų pasiekimų lobyną.

Pažymėtina, kad visi pagrindiniai instituto laimėjimai yra nuodugniai apibendrinti ir plačiai paskelbti specialioje monografijų serijoje „Šiluminė fizika“. Šios serijos iniciatorius ir ilgametis vyriausiasis redaktorius buvo akademikas A. Žukauskas. Jo pastangomis dauguma – net 12 – šios serijos knygų buvo išverstos į anglų klabą ir išleistas Hemisphere Publishing Corporation (HPC) ir Begell House Inc., JAV leidyklų, labai nuoširdžiai globojant šių leidyklų prezidentui dr. Williamui Begellui. Visas knygų serijos sąrašas pateikiamas toliau. Svarbiausi mokslinių tyrimų rezultatai visose instituto tyrimų kryptyse išsamiai apžvelgiami ir „Lietuvos mokslo“ leidinyje [45].

**Monografijos**

1. Žukauskas A., Makarevičius V., Šlančiauskas A. Vamzdžių pluoštų šilumos atidavimas skersiniame skysčio sraute // Šiluminė fizika (toliau – ŠF) 1. Vilnius: Mintis, 1968. 192 p.
2. Žukauskas A., Žiugžda J. Šilumos atidavimas laminariniam skysčio sraute // ŠF 2. Vilnius: Mintis, 1969. 266 p.
3. Dauknys V., Kazakevičius K., Pranckevičius G., Jurėnas V. Ugniai atsparios keramikos terminio patvarumo tyrimas // ŠF 3. Vilnius: Mintis, 1971. 150 p.
4. Šilumos mainai aukštos temperatūros dujų sraute: Str. rink. // ŠF 4. Vilnius: Mintis, 1972. 231 p.
5. Žukauskas A., Šlančiauskas A. Šilumos atidavimas turbulentiame skysčio sraute // ŠF 5. Vilnius: Mintis, 1973. 327 p.
6. Stasiulevičius J., Skrinska A. Skersai aptekamų briaunotų vamzdžių pluoštų šilumos atidavimas // ŠF 6. Vilnius: Mintis, 1974. 241 p.
7. Majauskas J., Dauknys V., Abraitis R., Griniūtė G. Ugniai atspari keramika aukštų temperatūrų dujų sraute // ŠF 7. Vilnius: Mokslas, 1975. 180 p.
8. Vilemas J., Čėsna B., Survila V. Šilumos atidavimas žiediniuose kanaluose, aušinamuose dujomis // ŠF 8. Vilnius: Mokslas, 1977. 253 p.
9. Peras A., Dauknys V. Ugniai atsparios keramikos stiprumas ir jo tyrimo metodai // ŠF 9. Vilnius: Mokslas, 1977. 180 p.
10. Makarevičius V. Šilumos mainai, esant fiziniams-cheminiams pakitimams // ŠF 10. Vilnius: Mokslas, 1978. 227 p.
11. Žukauskas A., Žiugžda J. Cilindro šilumos atidavimas skersiniame skysčio sraute // ŠF 11. Vilnius: Mokslas, 1979. 236 p.
12. Tamonis M. Radiaciniai ir sudėtiniai šilumos mainai kanaluose // ŠF 12. Vilnius: Mokslas, 1981. 250 p.
13. Kazakevičius K., Janulevičius A. Prizminių kūnų terminio irimo dėsniumai // ŠF 13. Vilnius: Mokslas, 1981. 164 p.
14. Eva V., Asakavičius J., Gaigalis V. Žemos temperatūros šiluminiai vamzdžiai // ŠF 14. Vilnius: Mokslas, 1982. 180 p.
15. Ambrazevičius A. Šilumos mainai grūdinant dujas // ŠF 15. Vilnius: Mokslas, 1983. 192 p.
16. Žukauskas A., Ulinskas R., Katinas V. Hidrodinamika ir vibracijos aptekamuose vamzdžių pluoštuose // ŠF 16. Vilnius: Mokslas, 1984. 312 p.
17. Drižius M.R. Tvenkinių-aušintuvų hidroterminis režimas // ŠF 17. Vilnius: Mokslas, 1985. 169 p.
18. Žukauskas A., Ulinskas R. Šilumos atidavimas skersai aptekamuose vamzdžių pluoštuose // ŠF 18. Vilnius: Mokslas, 1986. 203 p.
19. Pedišius A., Šlančiauskas A. Turbulentinis šilumos pernešimas pasienio sluoksniuose // ŠF 19. Vilnius: Mokslas, 1987. 239 p.
20. Gimbutis G. Šilumos mainai esant gravitaciniam skysčio plėvelės tekėjimui // ŠF 20. Vilnius: Mokslas, 1988. 232 p.
21. Vilemas J., Šimonis V., Adomaitis J.E. Šilumos mainų intensyvinimas dujomis aušinamuose kanaluose // ŠF 21. Vilnius: Mokslas, 1989. 258 p.
22. Bubelis E., Makarevičius V. Energijos pernešimo procesai šilumos siurbliuose // ŠF 22. Vilnius: Mokslas, 1990. 186 p.
23. Vilemas J., Poškas P. Termogravitacijos ir išcentrinų jėgų įtaka šilumos mainams dujomis aušinamuose kanaluose // ŠF 23. Vilnius: Academia, 1992. 240 p.
24. Katinas V., Žukauskas A. Vamzdžių vibracijos šilumokaičiuose // ŠF 24. Kaunas: LEI, 1993. 229 p.
25. Vaitiekūnas P. Konvencinio pernešimo skaitiniais modeliavimas // ŠF 25. Kaunas: LEI, 1998. 264 p.
26. Ušpuras E., Kaliačka A. Avariniai pereinamieji procesai su RBMK-1500 // ŠF 26. Kaunas: LEI, 1998. 194 p.
27. Čėsna B. Šilumos atidavimas ir hidrodinamika šilumą išskiriančiose strypinėse rinklėse, aušinamose dujomis // ŠF 27. Kaunas: LEI, 2003. 246 p.
28. Ušpuras E., Kaliačka A. Avariniai ir pereinamieji procesai AE su kanaliniiais reaktoriais // ŠF 28. Kaunas: LEI, 2006. 300 p.

**Monografijų vertimai**

29. Žukauskas A., Žiugžda J. Heat Transfer of a Cylinder in Crossflow. New York: Hemisphere Publishing Corporation (toliau – HPC), 1985. 208 p.
30. Stasiulevičius J., Skrinska A. Heat Transfer of Finned Tube Bundles in Crossflow. New York: HPC, 1987. 244 p.
31. Tamonis M. Radiation and Combined Heat Transfer in Channels. New York: HPC, 1987. 208 p.
32. Vilemas J., Čėsna B., Survila V. Heat Transfer in Gas-Cooled Annular Channels. New York: HPC, 1987. 226 p.
33. Žukauskas A., Šlančiauskas A. Heat Transfer in Turbulent Fluid Flows. New York: HPC, 1987. 282 p.
34. Žukauskas A., Ulinskas R., Katinas V. Fluid Dynamic and Flow-Induced Vibrations of Tube Banks. New York: HPC, 1987. 290 p.
35. Žukauskas A., Ulinskas R. Heat Transfer in Tube Banks in Crossflow. New York: HPC, 1988. 199 p.
36. Žukauskas A. High Performance Single Phase Heat Exchangers. New York: HPC, 1989. 515 p.; Bejing, 1986. 602 p. (kinų kalba).
37. Dzyubenko B. V., Dreitser G. A., Ashmantas L. Unsteady Heat and Mass Transfer in Helical Tube Bundles. New York: HPC, 1990. 225 p.
38. Жукаускас А. А. Конвективный перенос в теплообменниках. Москва: Наука, 1982. 427 с.
39. Pedišius A., Šlančiauskas A. Heat Transfer Augmentation in Turbulent Flows. New York, Kaunas: Begell House Inc., Lithuanian Energy Institute, 1995. 266 p.
40. Vilemas J., Šimonis V., Adomaitis J.E. Heat Transfer Augmentation in Gas-Cooled Channels. London, Tokyo: Begell House Inc., CRC Press, 1994. 253 p.
41. Katinas V., Žukauskas A. Vibrations of Tubes in Heat Exchangers. New York: Begell House Inc., 1997. 222 p.
42. Vilemas J., Poškas P. Heat Transfer in Gas-Cooled Channels under the Effects of Buoyancy and Centrifugal Forces. New York: Begell House Inc., 1998. 264 p.
43. Čėsna B. Heat Transfer and Hydrodynamics in Gas-Cooled Fuel Rod Assemblies. New York, Kaunas: Begell House Inc., Lithuanian Energy Institute. 2005. 238 p.

**Kiti šaltiniai**

44. Sasnauskaitė G. Akademiko Algirdo Žukausko mokslinė mokykla: socialinis-komunikacinis tyrimas // Energetika. 2001. Nr. 1. P. 49–54.
45. Lietuvos energetikos institutas 50 // Lietuvos mokslas, 61 knyga. Vilnius: „Lietuvos mokslo“ redakcija, 2006. 530 p.

**Vytautas Žiugžda****INVESTIGATIONS OF THERMOPHYSICS AND THEIR DEVELOPMENTS AT THE LITHUANIAN ENERGY INSTITUTE****S u m m a r y**

An overview of thermophysics research and its development at the Lithuanian Energy Institute in the period from 1956 to 2006 is presented. Most important trends and main results related to heat transfer of different bodies and their systems in different flows, high temperature thermal physics, transfer processes in nuclear power equipment are highlighted.

**Key words:** heat transfer, thermophysics, hydrodynamics, high temperature

**Витаутас Жюгжда****ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИКИ И ИХ РАЗВИТИЕ В ЛИТОВСКОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ****Р е з ю м е**

Приводится обзор развития теплофизических исследований в Литовском энергетическом институте в 1956–2006 гг. Отмечаются важнейшие направления исследований, приводятся основные результаты по исследованию теплообмена различных тел и их систем, результаты высокотемпературной теплофизики и процессы переноса в ядерных и энергетических устройствах.

**Ключевые слова:** теплообмен, теплофизика, высокие температуры, обтекание тел