

## Environmental engineering Aplinkos inžinerija

### AKUMULIACINĖS TALPYKLOS DINAMINIO VEIKIMO EKSPERIMENTINIS IR SKAITINIS TYRIMAS

Tomas KROPAS\*, Giedrė STRECKIENĖ , Anton FRIK

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2019 m. birželio 27 d.; priimta 2019 m. liepos 3 d.

**Santrauka.** Augant suvartojamos energijos kiekiui, taip pat jos gamybos metu į aplinką išmetamų teršalų apimčiai, vis dažniau atsigręžiama į atsinaujinančius energijos šaltinius ir jų transformavimo technologijas. Tai tampa ypač populiariu pastatų ūkio sektoriuje. Kartu su atsinaujinančiomis energijos transformavimo technologijomis kyla ir energijos akumuliacinio svarba, nes minėtieji energijos šaltiniai yra nepastovūs, energijos generavimas ir jos vartojimas laikui einant nesutampa. Dėl šios priežasties inžinerinės sistemos, naudojančios atsinaujinančius energijos šaltinius, tampa vis labiau dinamiškos. Šiame tyrime nagrinėjami vykstantys procesai vertikaloje cilindrinės formos akumuliacinėje talpykloje, kuri skirta buitinio karšto vandens poreikiui pastate patenkinti. Nagrinėjamas vienalaikis dinaminis jos veikimo režimas, kai energija yra ir kraunama, ir tuo pačiu metu iškraunama iš akumuliacinės talpyklos. Atliekami eksperimentiniai bandymai, skaičiuojamas šiluminę stratifikaciją apibūdinantis dydis. Gauti duomenys panaudoti skaitiniam modeliui sukurti ir validuoti. Naudojantis skaičiuojamosios fluidų dinamikos programa „ANSYS Fluent“, tiriama skirtingo nukrovimo debito įtaka tokiam akumuliacinės talpyklos veikimo režimui. Atlikta grafinė ir skaitinė rezultatų interpretacija.

**Reikšminiai žodžiai:** vertikali akumuliacinė talpykla, šilumos kaupimas, dinaminio veikimo režimas, skaičiuojamoji fluidų dinamika, „ANSYS Fluent“, modelio validavimas, šiluminė stratifikacija.

#### Įvadas

Šiuolaikiniame energetikos ir technologijų sektoriuje vis dažniau aptinkamos sistemos, veikiančios nuolat kintančiu – dinaminio – režimu, kaip antai šiluminės elektrinės, decentralizuotos energijos gamybos sistemos, šilumos tinklai, namų ūkio sistemos. Kalbant apie šias sistemas, dinaminį jų veikimo režimą lemia vis populiarėjantys ir dažniau naudojami atsinaujinantys energijos šaltiniai pastato aprūpinimo energija sistemose. Vienas didžiausių iššūkių, naudojant tokius energijos šaltinius, ypač Saulės ir vėjo, yra jų nepastovumas (dažnai energija yra generuojama tada, kai nėra jos vartojimo ir atvirkščiai). Ši problema paprastai sprendžiama naudojant energijos akumuliatorius. Jų veikimo principas grindžiamas energijos kaupimu, esant jos pertekliui, ir tiekimu, kai jos trūksta. Kaip pavyzdys gali būti išskirtos saulės karšto vandens šildymo sistemos. Jose energijos šaltinis yra Saulė, kurios tiekiamos energijos kiekis nepriklauso nuo sistemos energijos poreikio. Jei energija generuojama, bet nėra vartotojo poreikio arba šis poreikis yra mažas, perteklinė energija kaupiama akumuliacinėse talpyklose ir vartojama kilus poreikiui, kai

energija negaminama (Dincer ir Rosen, 2013). Tai padeda užtikrinti sistemos patikimumą, stabilumą, lankstumą ir, žinoma, padidina jos efektyvumą (Dincer ir Rosen, 2013; Streckienė, 2011). Toks poreikis ir gamybos subalansavimas aktualus tiek vienos paros laikotarpiu, tiek viso sezono metu (Alva, Liu, Huang ir Fang, 2017).

Norint numatyti teisingus inžinerinius sprendimus sistemose, reikia suvokti, kaip sistemos veikia dinaminio režimu. Todėl svarbu nustatyti, kiek laiko gali užtekti šilumos, sukauptos akumuliacinėje talpykloje, ir kiek jos bus dar galima sukaupti, esant kintamajam veikimo režimui. Taip pat svarbu įvertinti, koks susidaro temperatūrinis pasiskirstymas talpykloje (stratifikacija) ir kaip jis kinta. Moksliniai tyrimai rodo, kad susidariusi šiluminė stratifikacija padidina saulės šildymo sistemų efektyvumą (Dragsted, Furbo, Dannemand ir Bava, 2017), nes sumažina karšto ir šalto vandens susimaišymo procesą talpyklos tūryje. Tai leidžia vartotojui gauti aukštesnės temperatūros vandenį bei grąžinti kuo vėsesnį skystį į gamybos kontūrą (Chandra ir Matuska, 2019). Šioje srityje plačiai taikomi eksperimentai (Dragsted et al., 2017; Chandra ir Matuska,

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [tomas.kropas@vgtu.lt](mailto:tomas.kropas@vgtu.lt)

2019) bei skaitiniai tyrimai (Dehghan ir Barzegar, 2011; Bouhal et al., 2017), o šie apima vis platesnes veikimo režimų ribas. Šiuo tikslu straipsnyje nagrinėjamas dinaminis vienalaikis vertikali akumuliacinės talpyklos įkrovimo ir iškrovimo procesas, t. y. kai vienu metu šilumos energija kraunama į talpyklą ir tuo pačiu metu talpykloje jau sukaupta energija vartojama vartotojo šilumos poreikiui padengti. Iki šiol trūksta darbų, kurie vertintų tokių sistemos veikimo modelį (Li, 2016; Dehghan ir Barzegar, 2011). Norint įvertinti vykstančius procesus akumuliacinėje talpykloje, veikiančioje dinaminio režimu, atliekami eksperimentai bei sudaromas skaitinis modelis skaičiuojamosios fluidų dinamikos (SFD) pakete „ANSYS Fluent“. Gauti skaitiniai rezultatai palyginami su eksperimento duomenimis. Taip pat pateikiama debito įtakos talpyklos veikimui analizė.

## 1. Tyrimo metodika

### Tyrimo objektas ir eksperimentinio matavimo įranga.

Tyrimo objektas – vertikali karšto vandens akumuliacinė talpykla „Reflex SF 500/2“, esanti VGTU Pastato energetinių ir mikroklimato sistemų laboratorijoje. Ši akumuliacinė talpykla skirta karštam vandeniui, skirtam pastato inžinerinėms sistemoms, ruošti. Viduje įtaisyti du šilumokaičiai talpyklai įkrauti ir iškrauti, be to, galima taikyti tūrinį įkrovimą ar/ir iškrovimą. Talpyklos apačioje įmontuotas 12 kW galios elektrinis šildomasis kaitinimo elementas. Talpyklos pagrindiniai matmenys yra tokie: aukštis – 1961 mm, tūris – 470 l, didžiausia darbinė talpyklos temperatūra – 95 °C, šilumokaičio maksimali temperatūra – 110 °C, didžiausias darbinis slėgis – 10 bar. Talpykla yra izoliuota 50 mm poliuretano putų izoliacija.

Eksperimento metu buvo naudojama ši matavimo įranga:

- srauto jutiklis – ultragarsinis debitmatas US ECHO II. Matavimo ribos – 0,6–15,0 m<sup>3</sup>/h, darbo temperatūra – 130 °C, nominalusis slėgis – iki 16/25 bar, pagal EN 1434 tikslumo klasė 2±0,3;
- daugiafunkcis elektros srovės, stiprio ir galios matavimo prietaisas MD 9272. Srovės stiprio matavimo paklaida rodmenims iki 40 A±1,0 %, 0,01 A, įtampai matuoti ±0,5 %, 0,01 V;
- temperatūros jutikliai (termopora panardinta), B klasė, PT1000. Matavimo ribos – 200–850 °C, tikslumas – ±0,3 °C esant 0 °C;
- daugiataškis temperatūros matavimo prietaisas su 10 jutiklių (pirmasis jutiklis įrengiamas 199 mm virš talpyklos dugno, atstumas tarp kiekvieno temperatūros jutiklio – 160 mm). Termopora (NiCr-Ni) K tipo, 2 klasė, matavimo ribos – 200–1370 °C, tikslumas – ±0,05 K.

Siekiant nustatyti temperatūrų pasiskirstymą talpykloje, daugiataškis temperatūros matavimo prietaisas įleidžiamas į akumuliacinę talpyklą per jos viršutinėje dalyje esančią angą. Duomenims fiksuoti ir įrašyti naudojamas AHLBORN įrenginys ALMEMO 5990-2.

**Šiluminės stratifikacijos vertinimas.** Siekiant imituoti natūralias akumuliacinės talpyklos veikimo sąlygas, pvz., įkrovimas saulės kolektoriais ir karšto vandens naudojimas vienu metu, eksperimentiškai nagrinėjamas dinaminis vienalaikis įkrovimo ir iškrovimo procesas. Šio proceso metu akumuliacinė talpykla šildoma elektriniu kaitinimo elementu ir tuo laiku vyksta tūrinis šilumos nuėmimas. Dinaminiam procesui vertinti pasirinktas stratifikacijos skaičius (*Str*), apibūdinantis temperatūrų pasiskirstymą talpykloje. Idealiu atveju, kai temperatūros talpykloje pasiskirsto tolygiai, *Str* = 1. Jei talpykloje temperatūrinis režimas nenusistovėjęs ir stratifikacijos visai nėra, *Str* = 0 (Streckienė, 2011). Dinaminio režimo metu *Str* apibrėžiamas taip:

$$Str = \frac{\overline{(\partial T / \partial z)_t}}{(\partial T / \partial z)_{t=\max}}. \quad (1)$$

Temperatūrų gradientų vidurkis bet kuriuo laiko momentu išreiškiamas šia formule (Bouhal et al., 2017; Streckienė, 2011):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_t = \frac{1}{J-1} \cdot \left[ \sum_{j=1}^{J-1} \frac{T_{j+1} - T_j}{\Delta z} \right], \quad (2)$$

čia  $\Delta z$  – atstumas tarp temperatūros jutiklių arba sluoksnių, m;  $T$  – temperatūra, K;  $z$  – talpyklos aukštis, m;  $t$  – laikas, s;  $J$  – vandens sluoksnių skaičius;  $j$  – vandens sluoksnius.

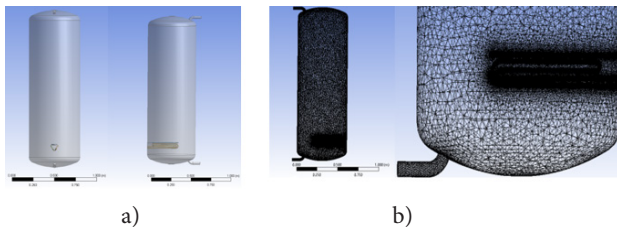
Didžiausias vidutinis temperatūros gradientas įkrovimo ir iškrovimo metu išreiškiamas formule (Han, Wang ir Dai, 2009; Streckienė, 2011b):

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{\max} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{(J-1) \cdot \Delta z}. \quad (3)$$

Vidutinis maksimalus temperatūros gradientas apskaičiuojamas tariant, kad maksimalus temperatūros skirtumas vyksta tik viename iš sluoksnių, o visuose kituose sluoksniuose temperatūros gradientas lygus nuliui. Didžiausia temperatūra ( $T_{\max}$ ) – tai aukščiausia vandens temperatūra proceso pradžioje, o minimali temperatūra ( $T_{\min}$ ) yra įtekančio vandens srauto, jei vyksta talpyklos iškrovimas.

**Skaitinio modelio kūrimas.** Skaitinis akumuliacinės talpyklos modelis kuriamas naudojant „ANSYS Fluent“ programinę įrangą. Talpykloje vykstantys nestacionarūs šilumos ir masės mainų procesai aprašomi energijos, tolydumo ir judesio lygtimis. Kuriant modelį, tinklas sutankintas ties tūrinio iškrovimo ir įkrovimo atvamzdžiais, aplink kaitinimo elementą bei ten, kur keičiasi talpyklos geometrija – apačioje ir viršuje (1 pav., b). Modeliuojant taikomi baigtinių elementų dydžiai: minimalus elemento dydis 0,001 m; maksimalus elemento dydis 0,025 m; elementų skaičius 2319111.

Pirmajame skaitinio modelio kūrimo etape AutoCAD programine įranga yra sukurtas akumuliacinės talpyklos 3D geometrinis modelis, kuris įkeliamas į „ANSYS Fluent“ programą (1 pav., a). Antrasis etapas apima baigtinių elementų tinklo generavimą (1 pav., b). Trečiajame etape



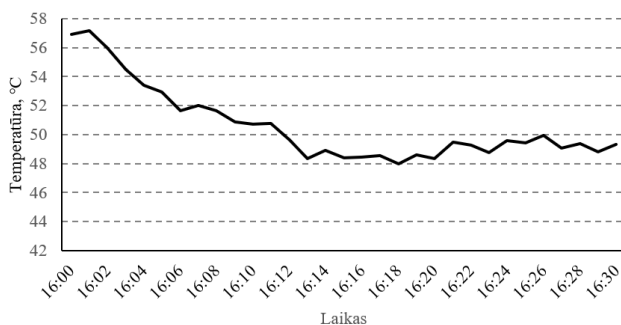
1 paveikslas. Akumuliacinė talpykla „ANSYS Fluent“ programoje (a); baigtinių elementų tinklas (b)  
Figure 1. Heat storage in “ANSYS Fluent” software (a); grid of finite elements

numatomos kraštinės sąlygos, nusakančios konkrečius veikimo parametrus – tokius pačius arba kuo artimesnius kaip atliktame eksperimente. Nagrinėjamu atveju pasirenkamas kaitinimo elementas – varinis vamzdis su vidiniu šilumos šaltiniu ( $2,26 \cdot 10^7 \text{ W/m}^3$  kaitinimo elementui). Šilumos nuostoliams vertinti talpykla padengiama iš išorės 5 cm putų polistireno izoliacija, kurios šilumos perdavimo koeficientas  $U = 1,42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Išorės oro temperatūra –  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 2. Rezultatai ir jų aptarimas

**Ekspirimentinio tyrimo duomenų analizė.** Vykdamas dinaminį talpyklos įkrovimo ir iškrovimo procesą, eksperimentinio bandymo metu matuojama iš talpyklos tiekiamo ir grąžinamo šilumnešio temperatūros, skirtinguose talpyklos aukščiuose esanti temperatūra bei šilumnešio srauto debitas. Taip pat vykdoma suvartotos elektros energijos apskaita. Šio eksperimento metu talpykla nukraunama paimant karštą vandenį iš viršutinės jos dalies ir grąžinant vėsų vandenį į apatinę jos dalį, kartu veikia ir elektrinis kaitinimo elementas vienašaliai įkrovimo procesui vykdyti.

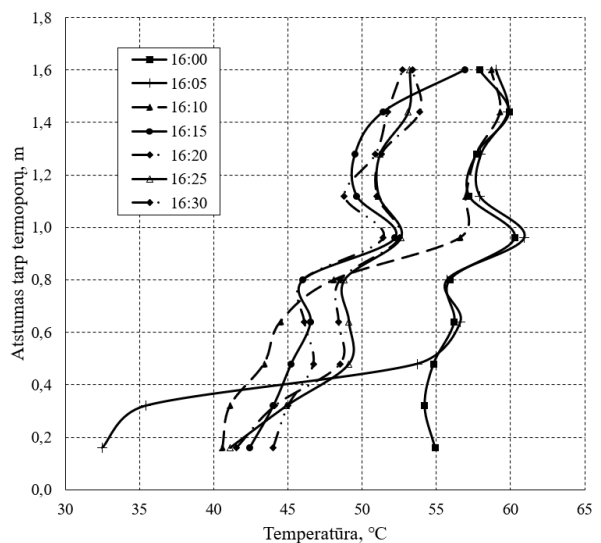
Nagrinėjamas procesas vyko 30 min. Eksperimento pradžioje talpykloje buvo suakumuliuota 17 kWh šilumos. Kaitinimo elemento suteiktas energijos kiekis sudarė 5,40 kWh. Apskaičiuotas iš akumuliacinės talpyklos paimtas šilumos kiekis – 9,21 kWh, patirti šilumos nuostoliai – 0,05 kWh. Taigi buvo prarasta 3,86 kWh energijos. Šio proceso metu vidutinė talpyklos temperatūra nukrito nuo  $56,9 \text{ }^\circ\text{C}$  iki  $49,31 \text{ }^\circ\text{C}$  (2 pav.). Skirtinguose talpyklos aukščiuose išmatuota temperatūra pavaizduota 2 paveiksle.



Kaip matome (2 pav.), proceso pradžioje fiksuojamas staigus akumuliacinės talpyklos vidutinės temperatūros kritimas, vėliau jis stabilizuojasi ir temperatūra yra gana pastovi – svyravimas yra  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tokių staigų kritimą lemia tai, kad, pradėjus eksperimentą, nukrovimo kontūras yra patalpos temperatūros – vamzdyne esantis šilumnešis atvėsęs. Vėliau, vienu laiku vykstant ir įkrovimui, ir nukrovimui, procesas stabilizuojasi ir temperatūra svyruoja nedaug.

Nagrinėjant susidariusias temperatūras skirtinguose talpyklos aukščiuose, pastebimi išsiskiriantys apatinio temperatūros jutiklio rodmenys (16:05 val.). Šį skirtumą lemia iškrovimo proceso pradžia, t. y. iškrovimo kontūras yra atvėsęs, jo temperatūra lygi aplinkos temperatūrai. Todėl, pradėdamas iškrovimą, šio kontūro fluidas patenka į talpyklą ir ši šalta srovė atvėsina apatinę talpyklos dalį. Vėliau vidurinėje talpyklos dalyje formuojasi temperatūrinis laiptas – termoklina. Ji formuojasi todėl, kad karštas vanduo paimamas iš talpyklos viršaus ir grąžinamas atvėsęs į apatinę talpyklos dalį. Šie srautai tarpusavyje nesimaišo ir laikui bėgant atskiria temperatūrinį laiptą karštąją ir šaltąją akumuliacinės talpyklos zonas.

Dinaminio vienašaliai įkrovimo ir iškrovimo proceso metu esančiam talpyklos susisluoksniavimui vertinti apskaičiuojamas stratifikacijos skaičius. Nustatyta, kad stratifikacijos skaičius svyruoja nuo 0,49 pačioje dinaminio proceso pradžioje iki 1,0. Po įkrovimo proceso susidariusi stratifikacija suardoma, šilumnešis talpykloje susimaišo. Kadangi karštas šilumnešis paimamas talpyklos viršuje, o grąžinamas į apatinę jos dalį, stratifikacija greitai susiformuoja iš naujo ir toliau svyruoja nuo 0,79 iki 1,0. Tai reiškia, kad akumuliacinė talpykla yra susistratifikavusi, o temperatūrinis režimas joje yra pakankamai nusistovėjęs ir stabilus. Vidutinis dinaminio vienašaliai įkrovimo ir iškrovimo proceso metu esantis stratifikacijos skaičius – 0,92. Svarbu paminėti, kad būtent tokie



2 paveikslas. Vidutinės akumuliacinės talpyklos temperatūros kitimas (kairėje); temperatūros pasiskirstymas talpykloje dinaminio įkrovimo ir iškrovimo proceso metu (dešinėje)

Figure 2. Variation of average storage temperature (on the left); Temperature distribution in the storage during dynamic charge–discharge process (on the right)

dinaminiai procesai butyje yra dažniausi, o paruošto šilumnešio užtenka gerokai ilgiau.

**Skaitinio modeliavimo rezultatai.** Modeliuojant taikoma pradinė talpyklos vidutinė temperatūra yra 56,9 °C, grįžtamo iš šilumos nuėmimo kontūro fluido temperatūra yra 30 °C. Akumuliacinės talpyklos modelio nukrovimo debitas imamas kaip vidutinis nukrovimo debitas eksperimente ir yra 0,44 kg/s. Taikomas modeliuoti laiko žingsnis – 60 s. Analizuojamo proceso trukmė – 30 min. Skaitinio modeliavimo rezultatai pateikiami 3 paveiksle.

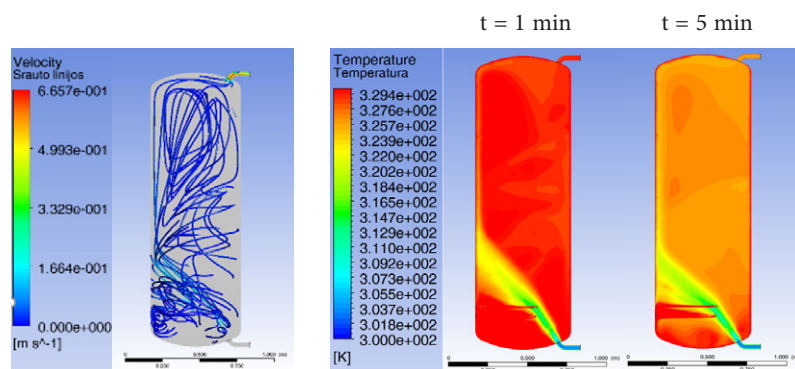
Srauto linijų analizė (3 pav.) rodo, kad į talpyklą patekęs fluidas dėl įtekėjimo greičio atsimuša į talpyklos sienelę. Tuomet sukasi bei kyla į viršų ir sukuria sūkurius bei maišymąsi visoje talpykloje. Bendras fluido srautas sukasi laikrodžio rodyklės kryptimi – kyla iš viršaus į apačia, sukasi į dešinę pusę ir leidžiasi žemyn. 3 paveikslas taip pat atspindi temperatūrinį režimą pačioje proceso pradžioje, po 1 min ir po 5 min. Kaip ir srauto judėjimą nusakančios srauto linijos, taip ir temperatūrinis pjūvis rodo, jog į talpyklą patekęs šaltis fluidas, dėl įtekėjimo greičio atsimušęs į talpyklos sienelę, kyla į viršų ir sukuria maišymąsi. Kadangi karštas fluidas paimamas iš talpyklos viršaus, o atvėsęs grąžinamas į apatinę jos dalį, temperatūra talpykloje palaipsniui mažėja.

Norint patikrinti skaitinio modelio rezultatų tikslumą, palyginami skaitinio ir natūrinio eksperimento rezultatai. Nustatytas nedidelis nesąryšis tarp išmatuotos ir sumodeliuotos vidutinės talpyklos temperatūros (santykinė paklaida tarp eksperimentinių duomenų ir modeliavimo

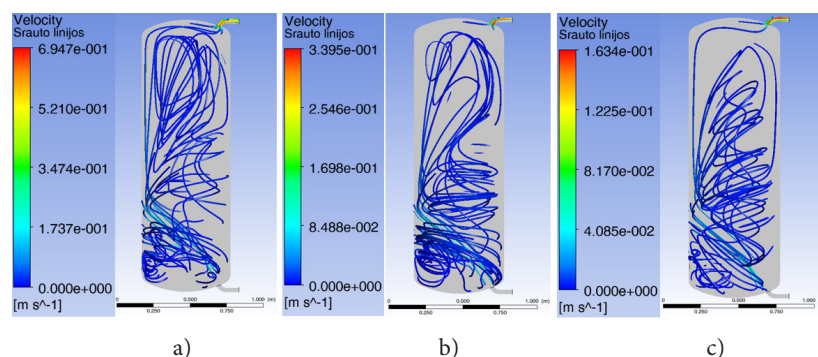
rezultatų), kuris sudaro 2,75 %. Nesutapimą galėjo sukelti keli veiksniai. Pirmiausia eksperimento metu iš nukrovimo kontūro grįžtanti temperatūra nėra pastovi viso proceso metu, nes šiluma mažinama per realaus vėdinimo įrenginio šilumokaitį „oras–vandeniu“. Čia palaikomas pastovus nukrovimo debitas, bet grįžtanti į talpyklą temperatūra nuolat kinta. Taip pat įtakos turi ir tai, kad eksperimentinėje talpykloje yra du spiralės formos šilumokaičiai, kurie stabdo tiesioginio srauto patekimą į išėjimą iš talpyklos ir veikia kaip vietinė kliūtis. Skaitiniame modelyje šie šilumokaičiai nėra detalizuojami dėl ribotų skaičiavimo ir kompiuterinių išteklių.

**Debito įtakos akumuliacinės talpyklos veikimui tyrimas.** Siekiant palyginti skirtingo debito įtaką talpyklos veikimo režimui, nagrinėjami trys skirtingi variantai. Pirmasis – kai iškrovimo kontūro debitas yra jau nagrinėtasis 0,44 kg/s, antrasis – 0,22 kg/s ir trečiasis – 0,11 kg/s. Analizuojamo proceso trukmė – 30 min. Gauti modeliavimo rezultatai, vizualiai perteikiantys proceso metu vykstančias judėjimo tendencijas kiekviename iš atvejų, pateikiami 4 paveiksle.

Srautų judėjimo analizė (4 pav.) rodo, kad kuo didesnis įtekėjimo greitis, tuo susidarę sūkuriai yra didesni ir apima visą talpyklos tūrį, kuris tarsi visas sukasi ratu srauto judėjimo kryptimi. Mažėjant debitui, mažėja ir sūkuriai, srautas juda ta pačia kryptimi, tačiau labiau pasiskirsto ir į apatinę jos dalį, sūkuriai tampa nuožulnesni ir labiau ima sukintis apie akumuliacinės talpyklos vertikale. Kai įtekėjimo debitas yra mažiausias (c), bendra srauto judėjimo



3 paveikslas. Srauto judėjimo linijos akumuliacinėje talpykloje  $t = 15$  min (kairėje); temperatūros pasiskirstymas (dešinėje)  
Figure 3. Flow lines in the storage tank  $t = 15$  min (on the left); temperature distribution (on the right)



4 paveikslas. Srauto judėjimas esant skirtingiems modeliams,  $t = 15$  min: a)  $q = 0,44$  kg/s; b)  $q = 0,22$  kg/s; c)  $q = 0,11$  kg/s  
Figure 4. Flow lines in different models,  $t = 15$  min: a)  $q = 0.44$  kg/s; b)  $q = 0.22$  kg/s; c)  $q = 0.11$  kg/s

ratu tendencija išlieka, tačiau sumažėja sūkurių apatinėje dalyje, po kaitinimo elementu, srautas patenka virš kaitinimo elemento, o jo sukeliama sūkuriai sunkiau išjudina zoną po elektriniu kaitinimo elementu. Skirtingas srauto debitas taip pat daro įtaką temperatūriniam pasiskirstymui – kuo didesnis nukrovimo debitas, tuo mažesnė likusi vidutinė talpyklos temperatūra.

Išanalizavus visų skaitinių modelių rezultatus, galima teigti, kad akumuliacinės talpyklos dinaminiam veikimo režimui nukrovimo debitas turi didelę įtaką. Nuo jo priklauso srautų judėjimas talpykloje, sūkurių ir srovių susidarymas. Pastebėta, kad kai ties įtekėjimo ar ištekėjimo atvamzdžiais nėra jokių kreipiamųjų menčių ar vietinių kliūčių, stratifikacijos reiškinio nematome, vadinasi, talpykloje esantis fluidas maišosi ir energijos akumulatorius neišnaudoja viso potencialo. Todėl tokių modelių reikia tobulinti, numatyti kreipiamąsias, vietines kliūtis ar įtekančio fluideo difuzorių, kad įtekantis srautas patektų į talpyklos apačią kuo labiau išsklaidytas, kiek įmanoma labiau apatinėje talpyklos dalyje ir žemiau vidinio šilumos šaltinio. Tada akumuliacinės talpyklos temperatūrinis režimas bus stabilesnis, srautas taip nesimaišys ir nesuardys stratifikacijos.

## Išvados

Naudojant sukonstruotą daugiataškį temperatūros matavimo prietaisą, atlikti eksperimentiniai tyrimai su 470 litrų vertikalia akumuliacine talpykla leido nustatyti dinaminio proceso veikimo ypatumus ir stratifikacijos kitimą. Eksperimentų metu nustatyta, kad vidutinis vienašio dinaminio įkrovimo ir iškrovimo proceso metu susidaręs stratifikacijos skaičius sudaro 0,92 ir dinaminio veikimo režimo išlaikomas pagedaujamas šiluminis išsisluoksnavimas. Tai leidžia ilgiau išlaikyti ir naudoti paruoštą karštą šilumnešį net ir talpyklos dinaminio veikimo metu.

Sudarius skaitinį akumuliacinės talpyklos modelį, jo rezultatai buvo palyginti su eksperimentiniais duomenimis, gautų rezultatų suminis nesąryšis, atsiradęs dėl modelio geometrijos supaprastinimo, sudarė 2,75 %. Tai leidžia šį modelį taikyti bei adaptuoti kitų vertikalų akumuliacinių talpyklų veikimo režimų tyrimams. Gauti skaitiniai rezultatai atskleidė, kad, priklausomai nuo talpyklos iškrovimo debito, temperatūrinis režimas ir srautų judėjimas talpykloje smarkiai keičiasi. Kuo didesnis debitas, tuo greičiau talpykla iškraunama, o jos temperatūrinis režimas labiau sutrikdytas – fluidas susimaišęs. Gauti rezultatai parodė, kad, norint efektyviai naudoti vertikalias cilindro formos akumuliacines talpyklas, būtina atsižvelgti į konstrukcines priemones, siekiant sumažinti įtekančio srauto įtaką bendram talpyklos veikimo režimui. Tai leistų pasiekti stabilesnį temperatūrinį režimą talpykloje.

## Literatūra

Alva, G., Liu, L., Huang, X., & Fang, G. (2017). Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 693-706. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.021>

- Bouhal, T., Fertahi, S., Agrouaz, Y., El Rhafiki, T., Kousksou, T., & Jamil, A. (2017). Numerical modeling and optimization of thermal stratification in solar hot water storage tanks for domestic applications: CFD study. *Solar Energy*, 157, 441-455. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.061>
- Chandra, Y. P., & Matuska, T. (2019). Stratification analysis of domestic hot water storage tanks: a comprehensive review. *Energy & Buildings*, 187, 110-131. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.052>
- Dehghan, A. A., & Barzegar, A. (2011). Thermal performance behavior of a domestic hot water solar storage tank during consumption operation. *Energy Conversion and Management*, 52, 468-476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.075>
- Dincer, I., & Rosen, M. A. (2013). Exergy analysis of thermal energy storage systems. In *Exergy* (pp. 133-166). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097089-9.00009-7>
- Dragsted, J., Furbo, S., Dannemand, M., & Bava, F. (2017). Thermal stratification built up in hot water tank with different inlet stratifiers. *Solar Energy*, 147, 414-425. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.008>
- Han, Y. M., Wang, R. Z., & Dai, Y. J. (2009). Thermal stratification within the water tank. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 1014-1026. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.001>
- Li, G. (2016). Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 897-923. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.006>
- Streckienė, G. (2011). *Kogeneracinės jėgainės šilumos akumuliacinės talpos veikimo režimų tyrimai: disertacija*. Vilnius: Technika.

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESEARCH OF DYNAMIC OPERATION OF HEAT STORAGE TANK

T. Kropas, G. Streckienė, A. Friš

### Abstract

Renewable energy sources (RES) and their transformation technologies become more attractive in building sector as energy demand and emissions to the environment increase. Along with renewable energy transformation technologies, the importance of energy storage also arises as these RES are characterized by volatility and energy mismatch over time. For this reason, engineering systems which use RES are becoming increasingly dynamic. This study examines ongoing processes in a vertical cylindrical storage tank designed to cover domestic hot water demand in a building. Simultaneous dynamic mode of operation when the energy is being charged and at the same time discharged from the storage tank is analysed. Experiments are performed and stratification number describing thermal stratification is calculated. The obtained data are used for the development and validation of the numerical model. Using Ansys Fluent software, the influence of different discharge rate on operation mode of the storage tank is investigated. Graphical and numerical interpretation of results is performed.

**Keywords:** vertical heat storage tank, hot water storage, operation mode, computational fluid dynamics, ANSYS Fluent, experimental validation, thermal stratification.