

Inovacinės akumuliacinės talpyklos saulės kolektoriaus sistemoje energetinių charakteristikų tyrimas

Antanas Kavolynas,

Ignas Šateikis,

Kęstutis Navickas

*Lietuvos žemės ūkio universitetas,
Studentų g. 11,
LT-53361 Akademija, Kauno r.
El. paštas: Antanas.Kavolynas@lzuu.lt,
ignsat@mei.lt,
kestutis.navickas@lzuu.lt*

Akumuliacinės talpyklos naudojamos daugumoje saulės kolektorių sistemų, įrengiamų Lietuvoje. Šilumos nuostolių susidarymo mechanizmų tyrimai suteikia galimybę kurti efektyvesnes akumuliacines talpyklas saulės kolektorių sistemose.

Straipsnyje pristatomi eksperimentiniai naujos konstrukcijos vertikalios cilindrinės akumuliacinės talpyklos saulės kolektorių sistemoje energetinių charakteristikų tyrimai. Tirti inovacinės talpyklos energijos akumuliacinio stacionarieji procesai. Unikali akumuliacinės talpyklos savybės bei energetinės charakteristikos teikia galimybę efektyviai akumuliuoti šilumos energiją saulės kolektorių sistemoje. Šilumos nuostoliams mažinti akumuliacinės talpyklos konstrukcijoje naudotas uždaras oro tarpas. Nustatyta, kad talpyklos lyginamuosius šilumos nuostolius energijos akumuliacinio metu galima sumažinti iki 35 %.

Raktažodžiai: vertikali cilindrinė akumuliacinė talpykla, lyginamieji šilumos nuostoliai, energijos akumuliacinimas, uždaras oro tarpas, temperatūriai sluoksniai

1. ĮVADAS

Energetinėse sistemose, kurioms energija tiekama iš laiko atžvilgiu kintančių atsinaujinančių energijos šaltinių, būtina suderinti energijos gamybos bei vartojimo netolygumus. Akivaizdu, kad energijos akumuliacinimas yra labai svarbi sritis atsinaujinančioje energetikoje. Saulės bei vėjo energijos sistemose, akumuliuojant energiją, gali būti pasiekta nepertraukiama ir efektyvi energijos gamyba bei tiekimas [1]. Šios priemonės reikšmingai sumažina šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisiją, nes sumažėja iškastinio kuro poreikis [2].

Pastaruoju metu akcentuojama būtinybė naudoti švaresnius atsinaujinančius energijos šaltinius [3]. Saulės energija laikoma švaresnia ir saugiausia energijos forma [4]. Todėl ši energijos forma priimtinausia buitiniams poreikiams tenkinti, karštam vandeniui ruošti bei patalpoms šildyti. Saulės energijai konvertuoti į šilumos energiją naudojami įvairių konstrukcijų saulės kolektoriai [1, 5]. Šiam tikslui naudojamos saulės kolektorių sistemos pasižymi didele konstrukcijų įvairove [1, 6]. Tipinę sistemą sudaro saulės kolektorius, akumuliacinė talpykla, cirkuliacinis siurblys, valdymo bei papildoma įranga. Lietuvoje dėl nepalankių meteorologinių sąlygų naudojamos uždaro srauto priverstinės cirkuliacijos sistemos. Šios sistemos 30–80 % efektyvesnės už natūralios cirkuliacijos sistemas [6].

Saulės energija yra sklaidi, neprognozuojama. Energijos vartojimas dažnai nesutampa su energijos gamybos laikotarpiu. Todėl šilumos energiją akumuliuojant subalansuojamas energijos gamybos ir vartojimo netolygumas bei padidėja sistemos patikimumas [7]. Energiją akumuliuoti šilumos pavidalu tikslinga trumpą laiką, kadangi patiriami nuostoliai spinduliavimu, konvekcija ir laidumu [8]. Trumpalaikis šilumos energijos akumuliacinimas – tai dinaminė sistema, kuri atlieka kasdienius įkrovimo, iškrovimo ir akumuliacinio ciklus.

Šilumos energijai akumuliuoti saulės kolektorių sistemoje naudojama fazinio virsmo medžiagos [9], termocheminės reakcijomis pagrįstos technologijos [10] bei daugelis kitų būdų ir technologijų [11]. Mažose sistemose šiluminei energijai akumuliuoti naudojamas vanduo [1, 11, 12]. Šias sistemas lengva eksploatuoti, aptarnauti, saugu bei santykinai pigu. Minėta technologija tobulinama, diegiami nauji techniniai sprendimai gerinant akumuliacinių talpyklų energetines charakteristikas.

Saulės kolektorių sistemose tikslinga naudoti stratifikuotą akumuliacinę talpyklą, kurios apie 30–37 % efektyvesnės už nestratifikuotą [12, 13]. Akumuliacinėse talpyklose įrengiamas išorinis arba vidinis šilumos nuvedimo kontūras. Todėl sistemoje masės ir šilumos transportavimas atskirtas. Talpos įkrovimo metu fluidas nesimaišo, todėl išvengiama

stratifikacijos degradacijos [14]. Skysčio stratifikacija talpykloje susidaro dėl medžiagos tankio pokyčio, sąlygoto temperatūros pokyčio. Stratifikuotose akumuliacinėse talpyklose skysčio karštesnis sluoksnis susiformuoja viršutinėje, o šaltesnis – apatinėje dalyje. Skysčio šiluminė stratifikacija talpykloje išsidėsčiusi vertikalia kryptimi. Akumuliacinei talpyklai įkrauti šilumos nuvedimo kontūras įrengiamas apatinėje talpyklos dalyje, todėl į saulės kolektorių patenka žemesnės temperatūros šilumnešis [1]. Šitaip padidėja saulės energijos panaudojimo efektyvumas bei sumažėja papildomos energijos poreikis.

Literatūroje pristatoma teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, kuriuose analizuojama temperatūros laukų akumuliacinėse talpyklose susidarymas ir migracija. Nustatyta, kad intensyviausiai srautų migracija pasireiškia talpyklą įkraunant arba iškraunant [15]. Pereinamųjų procesų metu akumuliacinėje talpykloje pasireiškia laminarinis ir turbulentinis srautų judėjimas [16, 17]. Srautų judėjimo greitis ir pobūdis priklauso nuo talpyklos įkrovimo ar iškrovimo greičio [14]. Pastebima, kad stratifikacijos susidarymą talpykloje šių ciklų metu sąlygoja priverstinės konvekcijos srautai bei šilumos srautų maišymasis įleidžiant ar išleidžiant skystį [13].

Literatūroje teigiama, kad šilumos energiją akumuluojant skysčiuose, kai nėra priverstinio masės judėjimo, natūrali konvekcija yra pagrindinis veiksnys, formuojantis šilumos mainus talpykloje [18]. Skysčio temperatūrų sluoksnių stratifikacijos susidarymą talpykloje sąlygoja skirtingos temperatūros sluoksnių šilumos mainai, sudėtingi skysčio ir talpyklos sienelių šilumos mainai pasienio ruože bei skysčio ir talpyklos išorės šilumos mainai per talpyklos atitvaras [17].

Akumuluojant šiluminę energiją, skysčio temperatūros sluoksniai susiformuoja talpyklos vertikalios ašies atžvilgiu. Tyrimais nustatyta, kad šilumos laidumas tarp sluoksnių nėra didelis, todėl manoma, kad stratifikacijos formavimuisi bei degradacijai neturi reikšmingos įtakos [13]. Stratifikacijos susiformavimą lemia temperatūros sluoksnių pasienio ruožo sąlytis su vidine talpyklos sienele. Dėl šio sąlyčio netenkama dalies energijos nuostolių būdu, todėl pasikeitus tankiui, pasienio sluoksniui migruoja į žemesnio potencialo zoną [17]. Teigiama, kad didžiausią įtaką skysčio stratifikacijai turi talpyklos sienelės, besiribojančios su talpyklos išore, šiluminės savybės [17, 19]. Naudojantis tyrimų duomenimis sudaryti daugiausiai matematiniai modeliai, leidžiantys modeliuoti stacionariusius ir pereinamuosius procesus talpyklose [20]. Literatūroje teigiama, kad srautų judėjimo pobūdis bei šilumos perdavimo koeficientas priklauso nuo talpyklos geometrinės formos [21] bei sienelės šiluminių savybių [20].

Tyrimais nustatyta, kad vertikaliuose cilindrinėse talpyklose skysčio stratifikacijos susiformavimas priklauso nuo talpyklos aukščio ir skersmens santykio. Teigiama, kad optimalus santykis stratifikacijai suformuoti turėtų būti $H/d = 3-4$ [21]. Esant šiam santykiui, susidaro plonas pereinamasis temperatūris sluoksnis, kuris suskirsto talpyklą į karštą ir šaltą susisluoksniavimo zonas, apibūdinamas stratifikacijos laipsniu [22]. Literatūroje analizuojamos alternatyvos, siekiant suformuoti

skysčio šiluminę stratifikaciją talpykloje. Šiam tikslui siūloma naudoti įvairias priemones ir naujus metodus [22, 23].

Pristatomi tyrimai, kurių autoriai kompleksiskai tyrė talpyklos geometrinių santykių, tūrio ir šiluminės izoliacijos storio įtaką talpyklos šilumos nuostoliams. Tyrimais nustatyta, kad ženkliai įtaką šilumos nuostoliams turi talpyklos sienelės bei šiluminės izoliacijos savybės. Teigiama, kad ekonomiškai optimalus šiluminės izoliacijos sluoksnio storis turėtų būti 5–10 cm [19]. Pastaruoju metu šilumos nuostoliams mažinti ieškoma naujų būdų. Tyrimai atlikti talpyklų atitvaroms, naudojant šilumai mažai laidžias sintetines medžiagas ir jų derinius [24]. Aptinkama mokslinių darbų, kuriuose pateikiami konceptualūs techniniai sprendimai. Literatūroje pristatomi eksperimentiniai tyrimai, atlikti akumuliacinės talpyklos išorinį paviršių padengiant fazinio virsmo medžiagų sluoksniu. Teigiama, kad talpyklos šilumos nuostolių koeficientą galima sumažinti iki $1,61 \text{ W/m}^2\text{K}$ [25]. Tyrimai vykdomi talpyklų viduje, patalpinant indus, užpildytus fazinio virsmo medžiagomis. Nustatyta, kad naudojant mišrią technologiją, akumuluojamos energijos kiekį galima ženkliai padidinti, sumažinant talpyklos tūrį [9, 11]. Tyrimai vykdomi tobulinant talpyklų įkrovimo ir iškrovimo technologijas bei taikant įvairias strategijas [7, 26]. Šiam tikslui naudojami įvairių konstrukcijų įdėklai, patalpinti talpyklų viduje. Teigiama, kad šiomis priemonėmis galima valdyti skysčio konvekcinius srautus talpykloje, veikiant skysčio konvekcinių šilumos atidavimo koeficientą talpyklos pasienio ruože [17, 24].

Šiame darbe pristatoma konceptualios konstrukcijos akumuliacinė talpykla saulės kolektoriaus sistemoje. Pateikiami energetinių charakteristikų tyrimų rezultatai.

Tyrimo tikslas – eksperimentiškai nustatyti naujos konstrukcijos akumuliacinės talpyklos saulės kolektorių sistemoje energetines charakteristikas energijos akumuliavimo metu.

2. TEORINIS MODELIS

Akumuliacinės talpyklos šilumos nuostoliai išreiškiami klasišine išraiška [8]:

$$Q = kA(T_{sm} - T_a) \cdot \tau. \quad (1)$$

Analizuojant (1) išraišką, daroma prielaida, kad tam tikru laiko momentu $\tau = 0$, temperatūra T_{sm} ir T_a yra pastovi. Esant šioms prielaidoms, šilumos nuostoliai priklauso nuo talpyklos sienelės šilumos perdavimo koeficiento ir paviršiaus ploto sandaugos. Akumuliacinės talpos sudarytos iš cilindrinų ir sferinių sienelių, kurios padengiamos šilumine izoliacija. Šilumos perdavimo koeficientas per daugiasluoksnių cilindrinę sienelę užrašomas [8]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \left(\frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_4}{d_3} + \dots \right) + \frac{1}{\alpha_2 d_{i+1}}}. \quad (2)$$

Iš lygtyje pateiktų dydžių santykių matyti, kad didinant šiluminės izoliacijos storį, padidėja šilumos mainų paviršiaus plotas, todėl padidėja šilumos nuostoliai. Nustatyta, kad

šilumos nuostoliai netiesiškai priklauso nuo šiluminės izoliacijos storio [1, 5].

Talpyklos išorinių atitvarų visuminė šiluminė varža yra šilumos perdavimo koeficiento atvirkščias dydis ($R = 1/k$), todėl (2) išraiška įgauna šitokį pavidalą:

$$R = R_{st} + \sum_{i=1}^n R_s + R_{se}. \quad (3)$$

Pateiktoje išraiškoje matyti, kad talpyklos sienelės visuminė šilumos perdavimo varža priklauso nuo šilumos atidavimo terminės varžos (R_{sp} , R_{se}) bei sienelės šilumos laidumo terminės varžos R_s . Pastaroji varža priklauso nuo izoliacijos storio ir šiluminių savybių. Nustatyta, kad optimalus šiluminės izoliacijos storis turi būti apie 5–10 cm [5, 19]. Todėl siekiant mažinti talpyklos šilumos nuostolius, tikslinga ieškoti alternatyvių priemonių.

Šiame darbe pristatoma naujos konstrukcijos vertikali cilindrinė akumuliacinė talpykla. Ši talpykla padengta šilumine izoliacija bei papildomai patalpinta į uždarą šilumine izoliacija padengtą korpusą. Tarp korpuso ir talpyklos įrengtas oro tarpas. Naudojant šią šiluminės izoliacijos įrengimo schemą, šiluminės izoliacijos vientisumas nutraukiamas oro tarpu. Tokiu būdu šilumos perdavimas laidumu sumažėja. Bendruoju atveju naujos konstrukcijos talpyklos daugiasluoksnės sienelės visuminė šiluminė varža gali būti išreiškiama:

$$R = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_{s1} + (R_{sio} + R_{ot} + R_{sio}) + \sum_{i=1}^n R_{s2} + R_{se}. \quad (4)$$

Oro tarpas pasižymi geromis šiluminėmis savybėmis ($\lambda = 0,025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) bei yra visapusiškai ištirtas. Todėl naudojamas šiluminei izoliacijai statybinėse konstrukcijose bei kitose srityse. Oro tarpas akumuliacinių talpyklų šiluminei izoliacijai nebuvo taikytas.

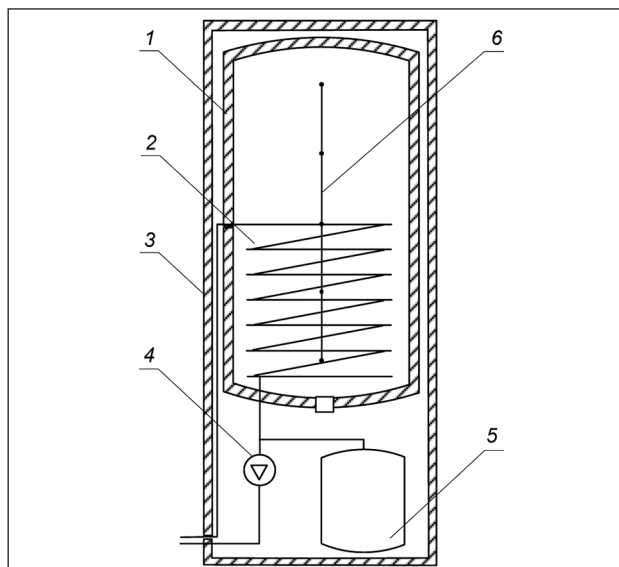
Talpyklų šilumos nuostolius analitiškai įvertinti pakankamai sudėtinga dėl konstrukcinių ypatumų [12, 19]. Nustatyta, kad ženklų įtaką šilumos nuostoliams turi jungiamieji sistemos vamzdžiai, jų skersmuo bei padėtis [28]. Todėl talpyklų šilumos nuostoliai nustatomi eksperimentiniu būdu, vadovaujantis aprobuotomis metodikomis [29].

3. TYRIMO OBJEKTAS

Eksperimentiškai tirta vertikali cilindrinė 160 litrų akumuliacinė talpykla (1 pav.), pagaminta iš 2 mm storio nerūdijančio plieno. Akumuliacinės talpyklos vertikalios sienelės aukštis 1 m, sferinių dugnų skersmuo 0,45 m. Talpykla padengta 50 mm storio akmens vatos šilumine izoliacija ($\lambda = 0,036 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) su aliuminio folijos sluoksniu. Talpyklos aukščio ir skersmens santykis $H/d = 2,22$.

Akumuliacinėje talpykloje įrengtas $0,28 \text{ m}^2$ paviršiaus ploto šilumos nuvedimo kontūras. Spiralinis 6,2 m ilgio šilumos nuvedimo kontūras pagamintas iš 15 mm skersmens ir 1 mm storio varinio vamzdelio.

Vertikali cilindrinė akumuliacinė talpykla sumontuota uždarame, šilumine izoliacija padengtame korpuse. Užda-



1 pav. Akumuliacinės talpyklos konstrukcija. 1 – cilindrinė akumuliacinė talpykla; 2 – spiralinis šilumos nuvedimo kontūras; 3 – uždaras korpusas; 4 – cirkuliacinis siurblys; 5 – išsiplėtimo indas; 6 – temperatūros jutikliai

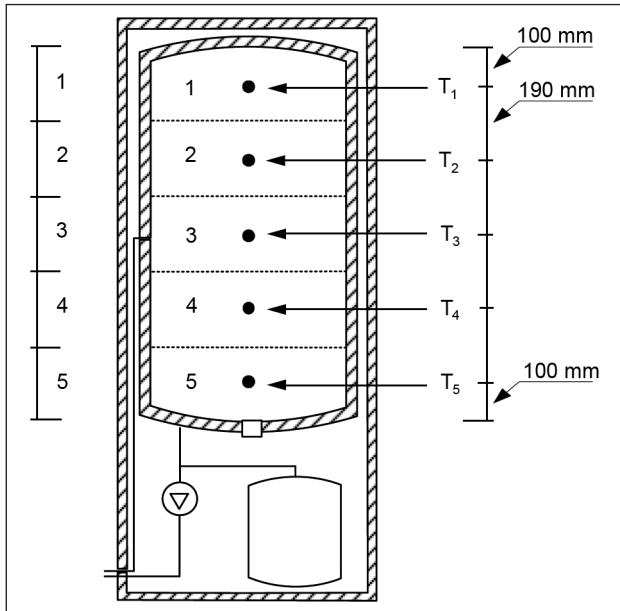
ras korpusas ($1750 \times 600 \times 600 \text{ mm}$) pagamintas iš 0,5 mm storio skardos. Korpuso vidinė pusė padengta 30 mm storio putų polistirolo šilumine izoliacija ($\lambda = 0,036 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) su plonu aliuminio folijos sluoksniu.

Uždarame korpuse po akumuliacine talpa sumontuoti saulės kolektoriaus sistemos cirkuliacinis siurblys, sistemos išsiplėtimo indas, debito matuoklis ir kiti elementai. Akumuliacinės talpyklos apačioje įrengti skysčio užpylimo, išleidimo bei sistemos jungiamieji vamzdžiai. Šilumos nuostoliams sumažinti jungiamieji vamzdžiai padengti akmens vatos šilumine izoliacija ($\lambda = 0,036 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$).

4. TYRIMO METODIKA

Eksperimentiniai akumuliacinės talpyklos energetinių charakteristikų tyrimai atlikti vadovaujantis standarto [28] reikalavimais. Tyrimai atlikti akumuliacinę talpyklą užpildžius 160 l vandens ir visiškai įkrovus. Vanduo visai sumaišomas pasiekiant vienodą ($60,5 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) temperatūrą talpykloje. Tyrimai atlikti esant pastoviai ($T_a = 20 \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$) aplinkos temperatūrai. Aušimo tyrimo metu (48 h) matuota vandens temperatūra akumuliacinėje talpykloje. Talpykla suskirstyta į penkis vienodus vertikalios sluoksnius. Sluoksniuose temperatūra matuota temperatūros jutikliais, sumontuotais talpykloje vertikalios centro ašies ($r = 0$) atžvilgiu (2 pav.). Temperatūros jutikliai sumontuoti plonasieniame vamzdyje, kuriame vienas nuo kito nutolę 190 mm atstumais.

Temperatūros jutikliais Pt 100 matuota vandens temperatūra akumuliacinėje talpykloje ($T_1 - T_5$) bei aplinkos temperatūra. Temperatūra matuota $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ tikslumu. Temperatūros jutikliai programuojama sąsaja M-90 sujungti su kompiuteriu, kuriame matavimo duomenys kaupiami nustatytais (1 min.) laiko intervalais.



2 pav. Akumuliacinės talpyklos eksperimentinių tyrimų schema. T_{1-5} – temperatūros jutikliai

Siekiant sumažinti aplinkos oro stratifikacijos įtaką šilumos nuostoliams, tyrimų metu talpykla apipučiama 2 m/s oro srautu. Oro srauto greitis matuotas $\pm 0,01$ m/s tikslumu, naudojant FVA 6152 anemometrą.

Akumuliacinės talpyklos lyginamieji šilumos nuostoliai U_s nustatyti vadovaujantis ISO 9459-2 standarto reikalavimais [28], pagal išraišką:

$$U_s = \frac{\rho_v c_p V}{\Delta \tau} \ln \left[\frac{T_{t,i} - T_{a,m}}{T_{t,f} - T_{a,m}} \right]. \quad (5)$$

Akumuliacinės talpyklos temperatūrinių sluoksnių lyginamieji šilumos nuostoliai U_{is} nustatyti pagal išraišką:

$$U_{si} = \frac{\rho_v c_p V i}{\Delta \tau} \ln \left[\frac{T_{(t,i)i} - T_{(a,m)i}}{T_{(t,f)i} - T_{(a,m)i}} \right]. \quad (6)$$

Talpyklos energetinėms charakteristikoms eksperimentiniu būdu nustatyti naudota:

a) akumuliacinė talpykla, padengta 50 mm storio šilumine izoliacija, be uždaro korpuso;

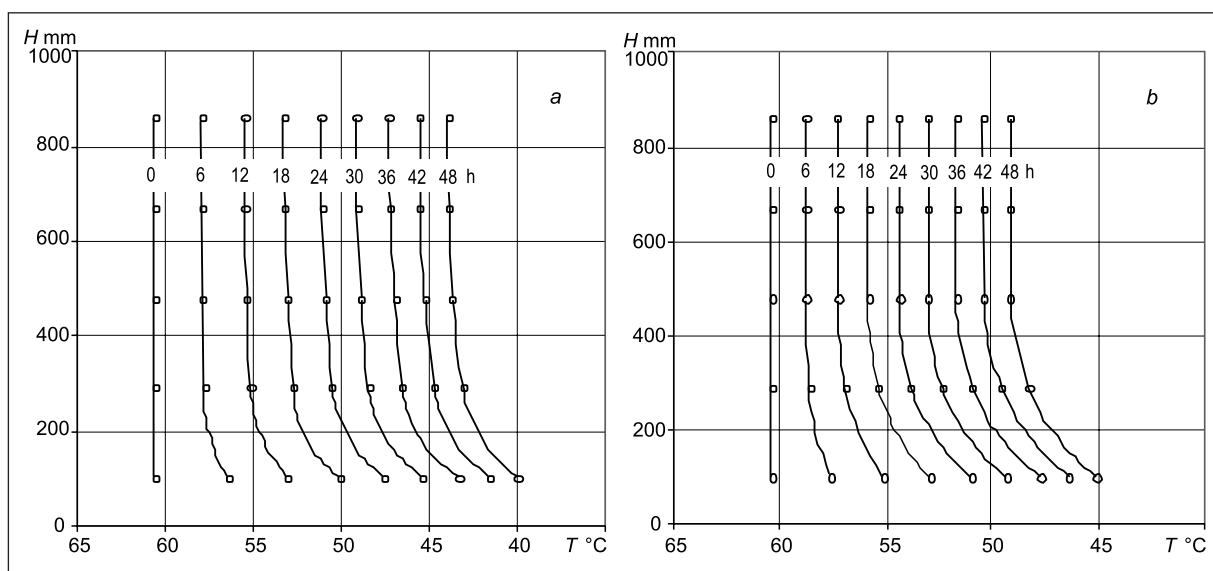
b) akumuliacinė talpykla, padengta 50 mm storio šilumine izoliacija bei patalpinta į uždarą, šilumine izoliacija padengtą, korpusą.

5. TYRIMO REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

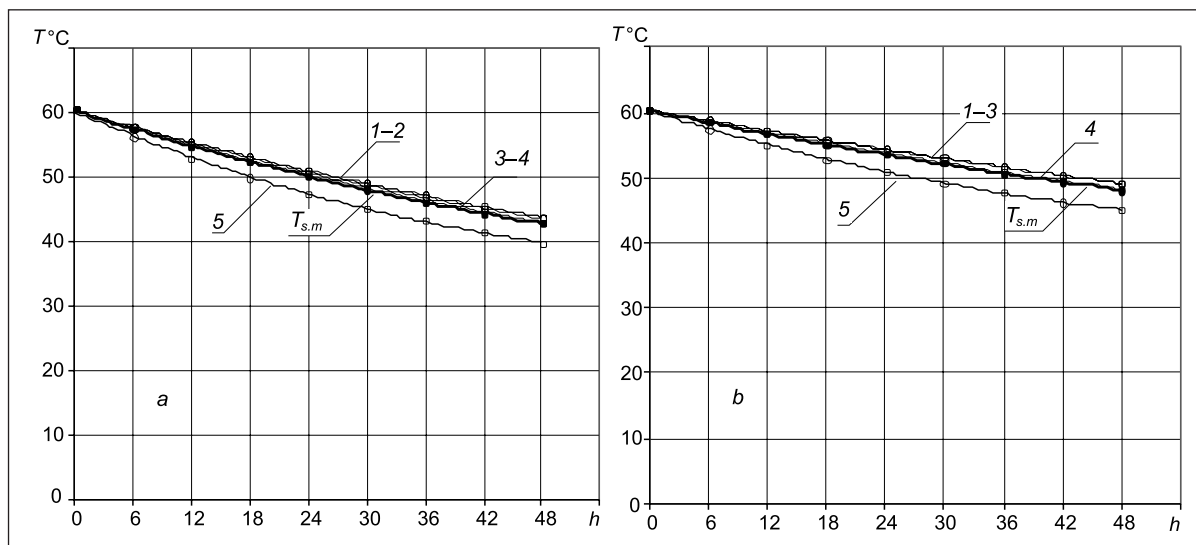
Pirmoje eksperimentinių tyrimų dalyje tirta akumuliacinė talpykla (a), padengta 50 mm storio akmens vatos šilumine izoliacija. Nustatyta, kad tyrimo metu (48 h) vidutinė vandens temperatūra ($T_{s,m}$) talpykloje (17,6 °C) sumažėjo nuo 60,5 iki 42,9 °C.

Talpykla suskirstyta į penkis vienodus vertikalia kryptimi išsidėsčiusius sluoksnius (2 pav.). Aušimo tyrimų metu matuota temperatūros pasiskirstymas sluoksniuose. Nustatyta, kad vandens temperatūriai sluoksniai talpykloje pasiskirstę vertikalia mažėjančia kryptimi (3 pav., a). Aukštesnės temperatūros (1) sluoksnis susiformavo viršutinėje talpyklos dalyje. Žemesnės temperatūros sluoksniai išsidėstę apatinėje talpyklos dalyje. Aušimo metu (2–3–4) sluoksnių temperatūra laipsniškai (0,3–0,7 °C) mažėjo viršutinio sluoksnio (1) atžvilgiu. Ženklus (3,6–3,9 °C) temperatūros mažėjimas matyti apatiniame sluoksnyje (5) (4 pav., a).

Literatūroje teigiama, kad energijos akumuliacijos metu temperatūrinių sluoksnių formavimasis ir pasiskirstymas talpykloje sąlygoja daugybę sudėtingų mechanizmų [13, 21]. Nustatyta, kad šilumos nuostoliai, susidarantys ploname pasienio ruože, formuoja temperatūrinių sluoksnių susidary-



3 pav. Temperatūros pasiskirstymas aukščio atžvilgiu akumuliacinėje talpykloje aušimo metu. a – talpykla, padengta šilumine izoliacija, be papildomo korpuso, b – talpykla, padengta šilumine izoliacija ir papildomai patalpinta į uždarą korpusą

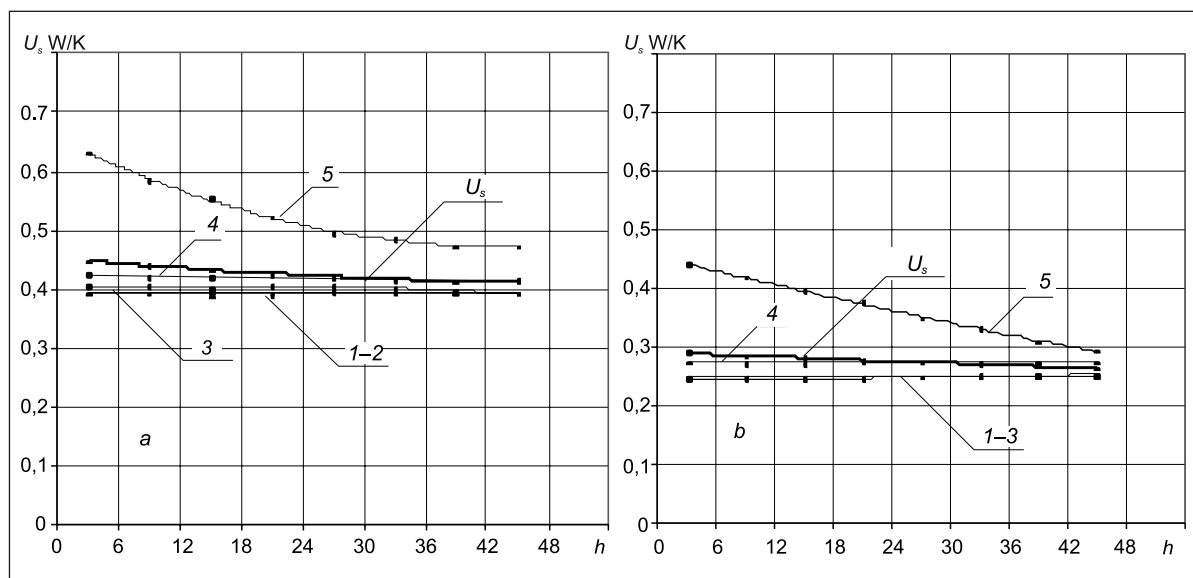


4 pav. Temperatūros pasiskirstymas sluoksniuose akumuliacinėje talpykloje aušimo metu, *a* – talpykla, padengta šilumini izoliacija, be papildomo korpuso, *b* – talpykla, padengta šilumine izoliacija ir papildomai patalpinta į uždara korpusą

mą talpykloje. Aušimo metu talpykloje vyksta konvekcinių srautų judėjimas. Talpyklos pasienio ruože šilumos nuostolių būdu netekęs dalies energijos srautas leidžiasi į apatinę talpyklos dalį. Tokiu būdu formuojasi apatinis, šaltesnis, sluoksnis. Literatūroje teigiama, kad temperatūrių sluoksnių maišymasis dėl mažo sluoksnių laidumo nėra didelis [17]. Teigiama, kad konvekcinių srautų migracijai didžiausią įtaką turi talpyklos atitvarų šiluminės savybės [17, 19]. Šiuo atveju talpyklos šilumos nuostoliai patiriami laidumo ir konvekcijos būdu [8].

Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad talpyklos, padengtos 50 mm storio akmens vatos šilumine izoliacija, lyginamieji šilumos nuostoliai sudarė 2,13 W/K. Viršutiniuose talpyklos sluoksniuose (1–2–3) lyginamieji šilumos nuosto-

liai sudarė 0,39 W/K, tuo tarpu žemesniame sluoksnyje (4) padidėjo iki 0,42 W/K. Didesni (0,52 W/K) lyginamieji šilumos nuostoliai nustatyti apatiniame talpyklos sluoksnyje (5) (5 pav., *a*). Akumuliacinės talpyklos viršutinis (1) ir apatinis (5) temperatūris sluoksnis ribojasi su vienodo (0,44 m²) vidinio ploto talpyklos atitvara (lentelė), todėl šilumos perdavimo koeficientas bei lyginamieji šilumos nuostoliai turėtų būti artimi. Eksperimentiškai nustatyta, kad lyginamųjų šilumos nuostolių skirtumas tarp apatinės ir viršutinės dalies talpykloje sudarė 0,21 W/K (6 pav., *a*). Šis skirtumas gali susidaryti dėl objektyvių veiksnių. Talpyklą užpildant viršutinėje talpyklos dalyje, tarp skysčio ir talpyklos viršutinės atitvaros susidaro oro tarpas. Taigi skystis su viršutine atitvara tiesiogiai nesiliečia, todėl keblu vertinti lyginamųjų šilumos nuostolių



5 pav. Lyginamieji šilumos nuostoliai akumuliacinėje talpykloje aušimo metu. *a* – talpykla, padengta šilumine izoliacija, be papildomo korpuso, *b* – talpykla, papildomai patalpinta į uždara korpusą

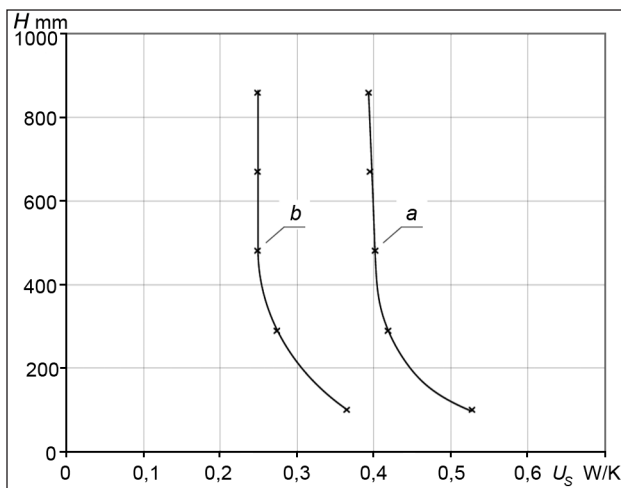
Lentelė. Akumuliacinės talpyklos palyginamieji šilumos nuostoliai

Temperatūros sluoksnis	Atitvaros vidinis plotas A (m^2)	Tūris V (l)	Lyginamieji šilumos nuostoliai U_s (W/K)	
			a) talpykla	b) talpykla
1	0,44	32	0,392	0,248
2	0,28	32	0,394	0,248
3	0,28	32	0,401	0,249
4	0,28	32	0,418	0,273
5	0,44	32	0,527	0,363
Talpykla	1,72	160	2,13	1,38

dydį viršutinės atitvaros ploto atžvilgiu. Apatinio temperatūrio sluoksnio skysčio sąlytis su apatine talpyklos atitvara yra tiesioginis. Sistemos komunikaciniai vamzdžiai įrengti apatinėje talpyklos atitvaroje, todėl ženklų lyginamųjų šilumos nuostolių padidėjimą apatiniame sluoksnyje gali sąlygoti šiluminiai tilteliai, susidarantys dėl jungčių. Literatūroje pateikiami tyrimų rezultatai, bylojantys, kad komunikacinės jungtys lyginamuosius šilumos nuostolius gali padidinti nuo 0,32 iki 0,6 W/K [11, 27]. Tyrimų autoriai nustatė, kad šilumos nuostolių dydis priklauso nuo jungčių skaičiaus, skersmens, formos, konstrukcijos, jungiamųjų vamzdžių įrengimo vietos bei polinkio kampo [11, 27].

Antroje eksperimentinių tyrimų dalyje tirta akumuliacinė talpykla (b), padengta 50 mm storio akmens vatos šilumine izoliacija bei patalpinta į uždara apšiltintą korpusą. Talpyklą nuo išorinio korpuso skiria uždaras oro tarpas.

Nustatyta, kad aušimo metu vidutinė temperatūra ($T_{s,m}$) talpykloje (12,4 °C) sumažėjo nuo 60,5 iki 48,1 °C. Aušimo metu aukštesnės temperatūros sluoksniai (1–2–3) išsidėstę viršutinėje talpyklos dalyje (3 pav., b). Šių sluoksnių temperatūrų skirtumo nenustatyta. Todėl viršutinių sluoksnių (1–2–3) temperatūra mažėjo vienodai. Temperatūrų skirtumas tarp sluoksnių stebimas apatinėje talpyklos dalyje. Tyrimo metu sluoksnio (4) temperatūra sumažėjo 0,9 °C. Apatiniame sluoksnyje (5) stebimas ženklus (4,1 °C) temperatūros mažėjimas viršutinių, karštesnių, sluoksnių atžvilgiu (4 pav., b).



6 pav. Lyginamieji šilumos nuostoliai akumuliacinėje talpykloje. a – talpykla, padengta šilumine izoliacija, be papildomo korpuso, b – talpykla, papildomai patalpinta į uždara korpusą

Nustatyta, kad talpyklos, padengtos 50 mm storio akmens vatos šilumine izoliacija bei patalpintos į uždara apšiltintą korpusą, lyginamieji šilumos nuostoliai sudarė 1,38 W/K. Lyginamieji šilumos nuostoliai viršutiniuose talpyklos sluoksniuose (1–2–3) sudarė 0,25 W/K, o žemesniame (4) sluoksnyje – 0,27 W/K. Nustatyta, kad apatiniame sluoksnyje (5) lyginamieji šilumos nuostoliai sudarė 0,36 W/K.

Naujos konstrukcijos akumuliacinėje talpykloje lyginamieji šilumos nuostoliai ženkliai sumažėjo visuose vertikalios talpyklos sluoksniuose aukščio atžvilgiu (5 pav., b). Tyrimo metu šilumos nuostoliai ženkliai (0,15 W/K) sumažėjo viršutiniuose talpyklos sluoksniuose (1–2–3). Didesnių lyginamųjų šilumos nuostolių nepavyksta išvengti apatiniame talpyklos sluoksnyje (5) (6 pav., b). Šilumos nuostoliai, patiriami apatinėje talpyklos dalyje, didina uždaro oro tarpo, esančio tarp talpyklos ir išorinio korpuso, temperatūros potencialą. Akumuliacinę talpyklą įkraunant, šilumos nuostoliai patiriami nuo sistemoje naudojamos įrangos išilusių paviršių. Todėl šiuos sistemos elementus tikslinga įrengti uždarame korpuso po akumuliacinę talpyklą (1 pav.). Tokiu būdu energijos kiekis, prarandamas šilumos nuostolių būdu, taip pat didina uždaro oro tarpo temperatūros potencialą.

Literatūroje teigiama, kad uždarame oro tarpe vyrauja konvekciniai šilumos mainai, šilumos mainai laidumu nepasireiškia arba yra nedideli [8]. Laisvosios konvekcijos veikiami didesnį šilumos potencialą turintys oro sluoksniai kyla į viršutinę oro tarpo dalį. Tokiu būdu sumažėjus temperatūrų skirtumui talpyklos viršutinėje dalyje skysčio ir aplinkos šilumos mainai, vykstantys laidumu per talpyklos atitvarą, sumažėja. Todėl temperatūros skirtumas talpyklos viršutiniuose sluoksniuose (1–2–3) kinta vienodai. Analogiški konvekciniai srautai pasireiškia akumuliuojamame skystyje ir uždarame oro tarpe [8]. Literatūroje teigiama, kad skysčio konvekcinių šilumos srautų migracija talpyklos pasienio ruože intensyviau pasireiškia esant didesniai temperatūrų skirtumui [14, 17, 18]. Šis reiškinys stebimas apatiniuose talpyklos sluoksniuose (4–5), kuriuose nustatyti didesni lyginamieji šilumos nuostoliai (6 pav.).

Literatūroje pristatomi įvairių konstrukcijų akumuliacinių talpyklų tyrimai. Teigiama, kad talpyklų atitvaroms naudojant ploną polikarbonatą bei talpyklą padengiant šilumine izoliacija, lyginamieji šilumos nuostoliai sudaro 2,9 W/K [24]. Kiti autoriai tyrė akumuliacines talpyklas, pagamintas pramoniniu būdu. Nustatė, kad talpyklos, pagamintos iš nerūdijančio plieno ir padengtos šilumine izoliacija, lyginamieji šilumos nuostoliai sudaro 2,94–3,06 W/K [12, 19].

Šių eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad talpyklos, padengtos 50 mm storio akmens vatos šilumine izoliacija, lyginamieji šilumos nuostoliai sudarė 2,13 W/K. Nustatyta, kad akumuliacinę talpyklą patalpinus į uždarą korpusą, lyginamieji šilumos nuostoliai sumažėja iki 1,38 W/K.

6. IŠVADOS

1. Eksperimentinių tyrimų metu nustatyta, kad talpyklos, padengtos 50 mm storio akmens vatos šilumine izoliacija, lyginamieji šilumos nuostoliai sudarė 2,13 W/K.

2. Eksperimentiškai nustatyta, kad akumuliacinę talpyklą patalpinus į uždarą korpusą, lyginamieji šilumos nuostoliai sumažėja (35 %) iki 1,38 W/K.

3. Akumuliacinės talpyklos unikali konstrukcija sudaro galimybes nuo saulės kolektoriaus sistemos įkautusių paviršių (cirkuliacinio siurblio, išsiplėtimo indo, sklendžių ir kt.) šilumos nuostolių būdu prarandamą šiluminę energiją panaudoti mažinant talpyklos šilumos nuostolius.

4. Inovacinės akumuliacinės talpyklos šilumos energijos akumuliacinio potencialas yra ženkliai didesnis nei tipinės talpyklos, naudojamos saulės kolektorių sistemoje. Taigi galima daug efektyviau panaudoti saulės energijos potencialą Lietuvoje.

Žymėjimai

Q – šilumos nuostoliai W,

k – šilumos perdavimo koeficientas, $W/(m^2 \cdot K)$,

A – vidinis paviršiaus plotas m^2 ,

T – temperatūra $^{\circ}C$,

d – skersmuo m,

R – terminė varža, $(m^2 \cdot K)/W$,

U_s – lyginamieji šilumos nuostoliai, W/K ,

c_p – savitoji šiluma, $J/(kg \cdot K)$,

V – vandens rezervuaro talpa l,

τ – laikas s,

α – šilumos atidavimo koeficientas, $W/(m^2 \cdot K)$,

λ – šilumos laidumo koeficientas, $W/(m \cdot K)$,

ρ – vandens tankis kg/m^3 ,

$\Delta\tau$ – vėsimo trukmė s.

Indeksai

sm – vidutinė,

a – aplinkos,

si – vidinio paviršiaus,

se – išorinio paviršiaus,

o – oro,

ot – oro tarpas,

$t.i$ – pradinė,

$t.f$ – galutinė,

$s.i$ – i -ojo sluoksnio.

Literatūra

1. Kologirou S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Elsevier Inc., USA, 2009.
2. Paksoy H. et al. CO₂ mitigation with thermal energy storage. *International Journal of Global Warming*. 2009. Vol. 1. No. 1–3. P. 253–269.
3. Omer A. M. Energy use and environmental impact: A general review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2009. Vol. 1. No. 5. P. 053101.1–053101.29.
4. Dovi V. G., Friedler F., Huisingh D., Klemeš J. J. Cleaner energy for sustainable future. *Journal of Cleaner Production*. 2009. Vol. 17. No. 10. P. 889–895.
5. Thirugnanasambandama M., Iniyamb S., Goicc R. A review of solar thermal technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. No. 1. P. 312–322.
6. Ogueke N. V., Anyanwu E. E., Ekechukwu O. V. A review of solar water heating systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 2009. Vol. 1. No. 4. P. 043106.1–043106.21.
7. Kulkarni G. N., Kedare S. B., Bandyopadhyay S. Optimization of solar water heating systems through water replenishment. *Energy Conversion and Management*. 2009. Vol. 50. No. 3. P. 837–846.
8. Jiji L. M. *Heat Convection*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
9. Nallusamy N., Velray R. Numerical and experimental investigation on a combined sensible and latent heat storage unit integrated with solar water heating system. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2009. Vol. 131. No. 4. P. 041002.1–041002.8.
10. N'Tsoukpoe K. E., Liu H., Pierres N. L., Luo L. A review on long-term sorption solar energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. No. 9. P. 2385–2396.
11. Furbo S., Andersen E. Heat storage for solar heating systems – Now and in the future. *Proceedings of Conference on Thermal Storage. March 14, 2008. Prague, Czech Republic*. P. 33–40.
12. Cruickshank C. A. *Evaluation of a Stratified Multi-tank Thermal Storage for Solar Heating Applications*. PhD Thesis. Queen's University, Kingston, Canada, 2009.
13. Han Y. M., Wang R. Z., Dai Y. J. Thermal stratification within the water tank. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13. No. 5. P. 1014–1026.
14. Barzegar A., Dehghan A. A. Transient thermal behavior of a vertical solar storage tank with a mantle heat exchanger during no-flow operation. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2009. Vol. 2. No. 1. P. 55–69.
15. Bendranz T. P., Lei Ch., Petterson J. C. An experimental study of unsteady natural convection in a reservoir model subject to periodic thermal forcing using PIV and PIT techniques. *Experiments in Fluids*. 2009. Vol. 47. No. 1. P. 107–117.
16. Aviv A., Morad S., Ratzon Y., Ziskind G., Letan R. Experimental and numerical study of mixing in a hot-water storage tank. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2009. Vol. 131. No. 1. P. 011011.1–011011.8.

17. Rodriguez I., Oliva A., Perez-Segarra C. D., Lehmkuhl O. On the turbulent natural convection in thermal storage tanks submitted to heat losses to the environment. *Proceedings of 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) and 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008)*. June 30–July 4, 2008. Venice, Italy. CD-ROM.
18. Patterson J. C., Lei Ch., Armfield S., Lin W. Scaling of unsteady natural convection boundary layers with a non-instantaneous initiation. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009. Vol. 48. No. 10. P. 1843–1852.
19. Cruickshank C. A., Harrison S. J. Heat loss characteristics for a typical solar domestic hot water storage. *Proceedings of 4th Canadian Solar Buildings Conference*. June 25–27, 2009. Toronto, Ontario, Canada. P. 102–110.
20. Ievers S., Lin W. Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. No. 12. P. 2604–2614.
21. Aloui H., Bouden C. Numerical study of the aspect ratio effects on the stratification in water storage tanks. *Proceedings of 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) and 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2008)*. June 30–July 4, 2008. Venice, Italy. CD-ROM.
22. Haller M. Y., Streicher W. Comparative analysis of thermal energy storage stratification efficiency – a new method combines advantages of previous approaches. *Proceedings of 11th International Conference on Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability (EffStock 2009)*. June 14–17, 2009. Stockholm, Sweden. CD-ROM.
23. Haller M. Y. Et al. Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – review and theoretical comparison. *Solar Energy*. 2009. Vol. 83. No. 10. P. 1847–1860.
24. Haltivanger J. F., Davidson J. H. Discharge of a thermal storage tank using an immersed heat exchanger with an annular baffle. *Solar Energy*. 2009. Vol. 83. No. 2. P. 193–201.
25. Quinlan P., Smyth M., Griffiths P. Novel integrated collector storage solar water heaters utilising phase change materials. *Proceedings of 10th World Renewable Energy Congress*. July 19–25, 2008. Glasgow, UK. P. 1753–1758.
26. Jack M. W., Wrobel J. Thermodynamic optimization of a stratified thermal storage device. *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29. No. 11–12. P. 2344–2349.
27. Anderson E., Fan J., Furbo S. Heat losses from pipes connected to hot water storage tanks. *Proceedings of ISES World Congress*. September 18–21, 2007. Beijing, China. Vol. V. P. 1998–2002.
28. ISO 9559-2: 1995(E). Solar Heating. Domestic Water Heating Systems.

Antanas Kavolynas, Ignas Šateikis, Kęstutis Navickas

RESEARCH ON ENERGY CHARACTERISTICS OF AN INNOVATIVE ACCUMULATIVE CONTAINER IN A SOLAR COLLECTOR SYSTEM

Summary

Accumulative containers are used in most of the solar collector systems installed in Lithuania. Research on building up mechanisms of heat losses allows creating more efficient accumulative containers in the systems of solar collectors.

The article presents experimental research on energy characteristics of a vertical cylindrical accumulative container of a new construction in the solar collector system. Static processes of energy accumulation in an innovative container were studied. The unique qualities of the accumulative container and energy characteristics provide for accumulating heat energy in a more efficient way in the solar collector system. In order to reduce heat losses, a close air gap was used in the construction of the accumulative container. Comparative heat losses during the time of accumulation of energy can be reduced by 35%.

Key words: vertical cylindrical accumulative container, comparative heat losses, accumulation of energy, close air gap, layers of temperature

Антанас Каволинас, Игнас Шатейкис, Кястутис Навицкас

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИННОВАЦИОННОГО АККУМУЛЯЦИОННОГО РЕЗЕРВУАРА В СИСТЕМЕ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА

Резюме

Аккумуляционные резервуары используются в большинстве систем коллекторов солнечной энергии, устанавливаемых в Литве. Исследования механизмов образования потерь тепловой энергии позволили разработать более эффективные аккумуляционные резервуары в системах солнечных коллекторов.

В статье описаны экспериментальные исследования энергетических параметров вертикальных цилиндрических аккумуляционных резервуаров новой конструкции в системе коллекторов солнечной энергии. Были изучены стационарные процессы аккумуляции энергии инновационным резервуаром. Уникальные свойства и энергетические параметры аккумуляционного резервуара дают возможность эффективно накапливать тепловую энергию в системе солнечных коллекторов. В целях сокращения потерь тепловой энергии в конструкции аккумуляционного резервуара предусмотрен закрытый воздушный зазор. Было установлено, что сравнительные потери тепловой энергии резервуара во время аккумуляции энергии могут быть снижены до 35 %.

Ключевые слова: вертикальный цилиндрический аккумуляционный резервуар, сравнительные потери тепловой энергии, аккумуляция энергии, закрытый воздушный зазор, температурные слои