

Ūilumos akumuliacinio kalcio chlorido heksahidrato kapsulio űkrovoje tyrimas

Ignas Œateikis, Stefa Lynikienė

*Lietuvos Œemės űkio universitetas,
Agroenergetikos katedra, Studentų g. 11,
Akademija, LT-53361 Kauno r.*

Tyrimo tikslas – nustatyti galimà akumuliuoti űiluminės energijos kiekà medŒiagos su faziniais virsmas (kalcio chlorido heksahidrato) kapsulio űkrovoje, kai űilumneŒis yra oras. Atlikti eksperimentiniai tyrimai. Nustatyta, kad, esant 21 mm skersmens kalcio chlorido heksahidrato kapsulio glaudumo rodikliui 30%, akumuliuojamas űilumos kiekis orui űildyti akumuliacinės űkrovos tūrio vienetu, kintant kapsulio temperatūrai nuo 15 iki 33°C, sudaro 92,3 MJ/m³, arba 4,6 karto daugiau negu granito skaldoje. Padidinus kapsulio glaudumo rodiklà 1,5 karto, tiek pat padidėto ir sukaupiamas űilumos kiekis. Nustatyta űio kapsulio űkrovos űsilydymo trukmės priklausomybė nuo oro debito.

RaktaŒodŒiai: űilumos akumuliacinimas, medŒiagos su faziniais virsmas, kalcio chlorido heksahidratas

1. űVADAS

Saulės energijos srauto intensyvumas kinta per parà. Todėl, naudojant saulės energijà űiluminiams reikalams, būtinas űiluminės energijos akumuliacinimas.

Seniai yra Œinomi űilumos akumuliaciniai, kurių űkrovos medŒiagose sukauptos űilumos kiekis yra proporcingas medŒiagos savitajai űilumai, medŒiagos kiekiui ir jos temperatūros pokyčiui.

Tàčiau maŒdaug nuo XX a. aŒtuntojo deŒimtmečio buvo pradėti űilumos akumuliacinimo, naudojant fazinio virsmo űilumà, tyrimai [1, 2]. MedŒiagos skystėjimo metu űiluma absorbuojama, o kietėjimo procese – űsiskiria. Tuo atveju, naudojant nedidelius temperatūros pokyčius, galima tame paėiame medŒiagos tūryje sukaupti didesnius űiluminės energijos kiekius. Todėl űilumos akumuliaciniai tampa kompaktiškesni. Be to, fazinio virsmo metu űilumà patvori akumuliacinės medŒiagos temperatūra.

Paprastai tokiuose űilumos akumuliaciniuose naudojamose medŒiagose yra neorganinio druskos kristalo hidratai ir organinės medŒiagos (parafinas, riebalinės rūgštys ir pan.).

DaŒniausiai naudojamos medŒiagos, kuriose fazinio virsmo űilumà űsiskiria pereinant medŒiagai ű skysto à kietà būvà, tàčiau yra organinio medŒiagos, kuriose fazinio virsmo űilumà űsiskiria ir kietose medŒiagose, nesikeičiant jŒ fiziniam būviui (pavyzdŒiui, neopentilglikolis).

Kristalo hidratŒ naudojimas űilumos akumuliacinimui turi ir trūkumŒ [2]. űilumos kaupimo (lydymosi) metu gali vykti druskos dekompozicija à vandeni ir druskas su maŒesniu vandens kiekiu. Œis procesas

kai kuriais atvejais yra negrąptamas medŒiagai kietėjant. Tam űdvengti űvedami specialūs homogenizavimo priedai arba mechaninis maišymas.

Kitas trūkumas yra vadinamasis „perŒalimo“ efektas, t. y. temperatūrai krentant Œemiau kietėjimo temperatūros medŒiaga űilumà skysta. Toks temperatūros kitimas gali siekti deŒimtis laipsniŒ ir tokios metastabilios skystos būklės medŒiaga gali űilikti ilgà laikà. Norint to űdvengti, naudojami kristalizacijos katalizatoriai, sudarantieji kristalizacijos centrus. Be to, űiam tikslui dar gali būti naudojamos vibracijos ir ultragarsas.

Daugelio medŒiagos su faziniais virsmas űilumos laidumas yra nedidelis. Todėl, siekiant padidinti űilumos mainŒ paviršio, medŒiagos su faziniais virsmas talpinamos à nedidelio skersmens kapsules, kurias apiplauna űilumneŒis.

Fazinio virsmo űilumos akumuliacinio privalumas űryškėja, kai űilumneŒis yra ne vanduo, bet oras [3]. Oro űildymas saulės kolektoriais su űilumos akumuliacinimu gali būti naudojamas produkcijai Œpiovinti, oro nusausinimo agentui regeneruoti, patalpoms űildyti.

Viena tinkamiausio Œematemperatūriam űilumos akumuliacinimui druskos yra kalcio chlorido heksahidratas (CaCl₂ · 6H₂O). Jis lydosi 28–30 °C temperatūroje. Fazinio virsmo (lydymosi) űilumà sudaro 171–192 kJ/kg, savitoji űilumà kietojoje fazėje – 1,42–1,46, skystojoje – 2,09–2,31 kJ/(kg · °C). Kalcio chlorido heksahidratas nekeičia savo savybiŒ net po 5650 lydymosi–kietėjimo ciklo. űilumos laidumas kietajame būvyje – apie 1,09, skystajame – 0,54 W/(m² · °C).

Taigi, pakėlus medžiagos temperatūrą nuo 15 iki 30°C, tame paėiame medžiagos tūryje kalcio chlorido heksahidratas sukaupia apie 5 kartus daugiau šilumos negu vanduo arba špybius, 8 kartus daugiau negu granitas.

Taėiau realiai ūilumos akumulatoriaus tūris, naudojant medžiagas su faziniais virsmiais, sumaėės maėiau, nes ūi medžiaga talpinama ū palyginti nedidelio skersmens kapsulės, kurios sudaro tam tikro glaudumo akumulatoriaus ūkrovà.

Tyrimø tikslas – nustatyti galimà akumuliuoti ūiluminės energijos kiekà kalcio chlorido heksahidrato kapsuliø ūkrovoje, kai ūilumneūis yra oras.

2. TYRIMØ METODIKA IR OBJEKTAS

Analizuojant ūilumos perdavimà medžiagose su faziniais virsmiais skystėjimo ir kietėjimo procesuose susiduriama su judanėios faziniø virsmø zonos problema, kartais vadinama Stefano problema [1, 3–5]. ūiuose procesuose medžiagoje susidaro trys zonos – skystoji, kietoji ir, tarp jø, pereinamoji judanti fazinio virsmo zona. ūiose zonose medžiagos ūiluminės fizikinės savybės yra skirtingos. Dėl to teorinis tikslus tokiø ūiluminiø procesø nagrinėjimas neámanomas, nes proceso netiesiøkumas neleidžia naudoti superpozicijos principo [6].

Problemiøkas ir vadinamojo kvazistacionaraus metodo taikymas, nes ūa metodà galima taikyti konvekciniuose ūilumos mainuose, kai Bio kriterijus $Bi \geq 10$. Taėiau, kai ūilumneūis yra oras, realiai Bio kriterijus tokios reikðmės nepasiekia [6].

Kai ūiluma medžiagos su faziniais virsmiais kapsulėms yra perduodama konvekcijos bũdu ūilumneūiu naudojant orà, tenka taikyti skaitmeninius metodus arba eksperimentinius tyrimus.

Temperatũros kitimo modeliavimas atskiroje vienoje cilindrinėje ir staėiakampėje kalcio chlorido heksahidrato kapsulėje pateiktas [3], o eksperimentiniai tyrimai – [6].

Stacionariniame reėime akumuliuojamas šilumos kiekis W medžiagoje su faziniais virsmiais analitiniu bũdu gali bũti apskaiėiuotas pagal formulà

$$W = mc_k (T_f - T_1) + mr + mc_s (T_2 - T_p);$$

ėia m – akumuliacinės medžiagos masė kg; c_k, c_s – ūkrovos medžiagos savitoji ūiluma kietajame ir skystajame bũvyje $J/(kg \cdot ^\circ C)$; T_f – fazinio virsmo (lydymosi) temperatũra $^\circ C$; r – fazinio virsmo (lydymosi) savitoji šiluma J/kg ; T_1, T_2 – medžiagos pradinė ir galutinė temperatũra $^\circ C$.

Eksperimentai buvo atlikti naudojant laboratorinà akumuliacinės ūkrovos kamerà. ūkrovai naudotos cilindrinės gofruotos polipropileno kapsulės, kuriø vidinis skersmuo 19 mm, iðorinis – 23 mm (vidutinis – 21 mm). Sielės storis – 0,15 mm. Kapsuliø padėtis kameroje – horizontali. Kapsulės uėpildytos

kalcio chlorido heksahidratu su specialiais priedais. Eksperimentuose buvo matuojama ūtekanėio ū ūkrovà ir iðtekanėio oro temperatũra bei temperatũra kapsulės centre (keturiuose taėkuose). Temperatũri matuoti naudotos 0,2 mm skersmens ChA(K) termoporos su prietaisu ALMEMO 2290-8. Eksperimentai buvo atlikti su kalcio chlorido heksahidrato ūkrova ir, palyginimui, su 14–26 mm granito skalda. ūkrovos plotas 0,24 m², aukštis – 0,245 m. Oro per ūkrovà debitas 0,032–0,195 kg/s. Iðcentrinio ventiliatoriaus sudaromas oro debitas keiėiamas kreipiamuoju aparatu. Tiekiamo oro temperatũra reguliuojama tirstoriniu reguliatoriumi, kuris keiėia elektrinio oro ūildytuvo galià. Tirtø ūkrovø duomenys pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Tirtø ūkrovø duomenys

Pavadinimas	Granito skalda	Kalcio chlorido kapsulės
Akumuliacinės medžiagos masė kg	25,0	28,2
Akumuliacinės medžiagos tūris dm ³	10,4	15,1
Suminis kapsuliø tūris dm ³	–	17,4
Ūkrovos tūris kameroje dm ³	19,2	58,7
Ūkrovos kameroje tankis kg/m ³	1300	480
Akumuliacinės medžiagos dalis ūkrovos tūryje %	54	26
Kapsuliø glaudumo rodiklis %	–	30

Eksperimentuose ūkraunant termoakumuliatoriø ūilumneūio (oro) temperatũra buvo keliamo palaipsniui pagal sinusoidės dėsna

$$T_1 = 16 + 30 \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\Delta t}{360}\right);$$

ėia Δt – laikas nuo proceso pradėios min.

Tokiu bũdu apytikriai buvo imituojamas ið saulės kolektoriaus iðtekanėio ir ū termoakumulatoriaus ūkrovà tiekiamo oro temperatũros kitimas, kai dienos trukmė yra 12 h.

ūilumos srautas buvo apskaiėiuotas pagal oro debità, savitjà ū oro ūilumà bei temperatũros perkrità.

Ėinant sudaromà ūilumos srautà akumulatoriaus iðkrovimo metu, ūkrovoje sukaupias energijos kiekis W apskaiėiuojamas pagal formulà:

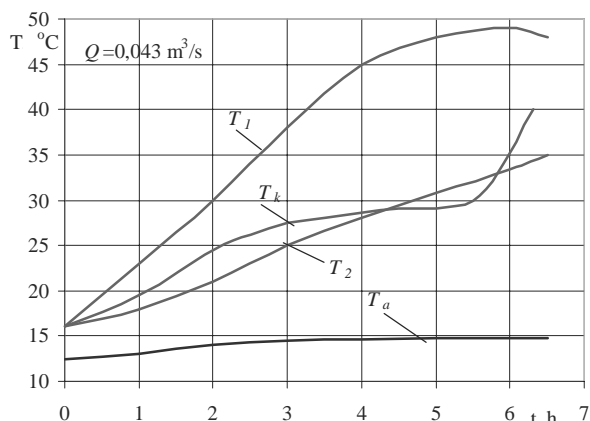
$$W = \sum P_i \Delta t_i - \sum P_i \Delta t_i ;$$

èia P_i – ákrovos (kapsuliø ar granito skaldos) sudaromas ūilumos srautas laiko intervale Δt_i ;

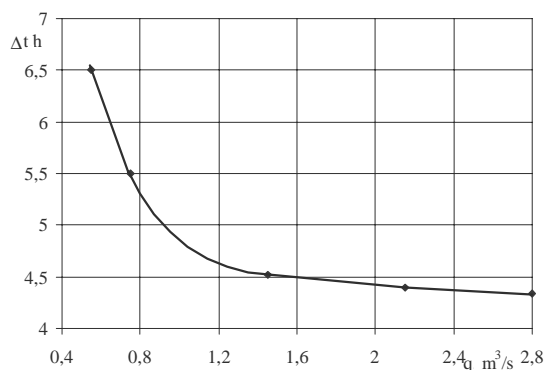
P_i – tuðèio ūilumos akumulatoriaus sudaromas ūilumos srautas laiko intervale Δt_i ;

Eksperimento metu kapsuliø glaudumo rodiklis buvo apie 30%. Skaièiavimai rodo, kad ða rodiklá, specialiai konstruojant, galima padidinti apie 1,5 karto, t. y. iki 45%.

3. TYRIMO REZULTATAI IR JØ ANALIZÈ



1 pav. Temperatūros T kitimas laiko t atþvilgiu kalcio chlorido kapsuliø ákrovoje, vykstant ákrovimui oro srautu, kurio debitas $0,043 \text{ m}^3/\text{s}$. (T_1, T_2 – átekanèio ir iðtekanèio oro temperatūra, T_k – temperatūra kapsulès centre, T_a – aplinkos temperatūra)



2 pav. Kapsulès iðsilydymo trukmès Δt priklausomybè nuo ūilto oro debito q (skaièiuojant 1 m^3 ákrovos tūrio)

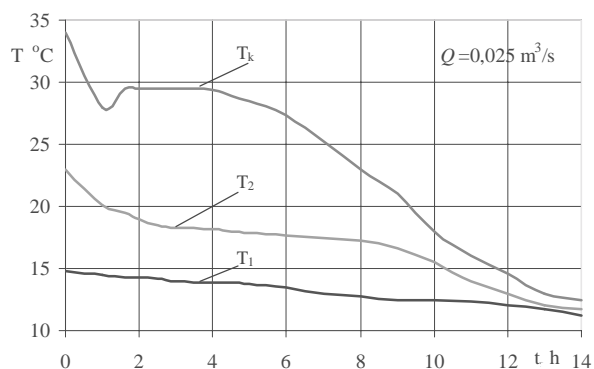
Termoakumulatoriaus su kalcio chlorido kapsuliø ákrova temperatūros kitimas ákrovos metu, esant oro debitui $0,043 \text{ m}^3/\text{s}$, kai átekanèio oro temperatūra kinta pagal sinusoidès dèsná, parodytas 1 pav.

Kapsuliø lydymosi metu temperatūros kritimas ákrovoje yra maksimalus ir siekia 18°C . Esant didesniems debitams ðis skirtumas maþèja.

Kada átekanèio oro temperatūra kyla pagal sinusoidès dèsná nuo 16 iki 45°C kapsuliø iðsilydymo trukmè priklauso nuo oro debito (2 pav.).

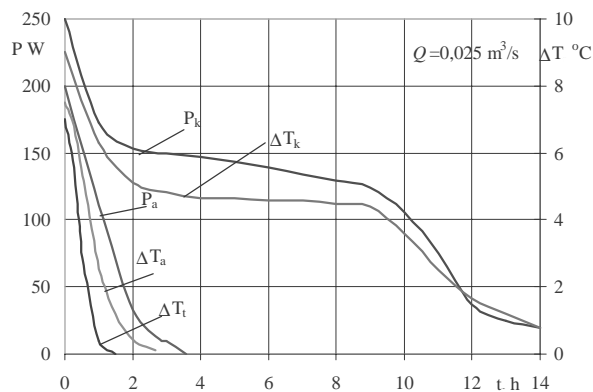
Lyginamajam debitui didèjant nuo $0,54$ iki $2,8 \text{ m}^3/\text{s}$ (skaièiuojant 1 m^3 ákrovos tūriui) ákrovos kapsuliø iðsilydymo trukmè trumpèja nuo $6 \text{ h } 30 \text{ min}$ iki $4 \text{ h } 45 \text{ min}$. Paþymètina, kad didinant lyginamàjà oro debità daugiau kaip $1,5\text{--}1,7 \text{ m}^3/\text{s}$ kapsuliø iðsilydymo trukmè maþèja neþymiai. Todèl didinti debità labiau uþ nurodytas reikðmes bûtø netikslinga.

Kaip kinta kalcio chlorido heksahidrato kapsuliø ákrovos temperatūra iðkrovimo metu, matyti 3 pav.



3 pav. Kalcio chlorido kapsuliø ákrovos temperatūros kitimas laiko t atþvilgiu (T_k – kapsulès centro temperatūra; T_1 – tiekiamo ákrovà oro temperatūra; T_2 – iðeinanèio ið ákrovos oro temperatūra)

Praèjus apytikriai vienai valandai nuo proceso pradþios kapsulèje prasideda neþymus „perðalimo“ efektas, po to apie $2,5 \text{ h}$ kapsulè, atiduodama ūilumą, iðlaiko beveik pastovià temperatūrà.



4 pav. Iðkrovimo metu sudaromo ūilumos srauto bei oro temperatūros perkrièio kitimas laiko t atþvilgiu (P_k, P_a – kalcio chlorido ir skaldos sudaromas šilumos srautas; $\Delta T_k, \Delta T_a$ ir ΔT_i – kalcio chlorido kapsuliø, granito skaldos ákrovos bei tuðèio termoakumulatoriaus sudaromas oro temperatūrø perkritis)

Termoakumulatoriaus ákrovos (kalcio chlorido heksahidrato ir granito skaldos) sudaromas ūilumos srautas bei temperatūrø perkritis iðkrovimo metu parodytas 4 pav.

Matyti, kad kalcio chlorido heksahidrato kapsulių sudaromas šilumos srautas per 6 valandas sumažėjo nuo 150 W tik iki 125 W.

Škrovoje sukauptos šiluminės energijos kiekio skaičiavimo rezultatai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. **Kalcio chlorido heksahidrato kapsulių ir granito skaldos škrovoje akumuliuojamas šiluminės energijos kiekis**

Parametras	Kalcio chlorido heksahidrato kapsulių škrova	Granito skaldos škrova
Maksimali temperatūra	33	33
Minimali temperatūra	15	15
Akumuliuojamas šilumos kiekis MJ	5,42	0,38
Akumuliuojamas šilumos kiekis škrovos tūrio vienetu MJ/m ³	92,27	19,84
Akumuliuojamas šilumos kiekis škrovos masės vienetu kJ/kg	192,24	15,12
Analitiniu būdu apskaičiuotas akumuliuojamas šilumos kiekis škrovos masės vienetu kJ/kg	212,4	16,56

Kalcio chlorido heksahidrato kapsulių škrova akumuliuo 5,42 MJ šiluminės energijos, arba, perskaičiavus škrovos tūrio vienetą, 92,27 MJ/m³, t. y. apie 4,65 karto daugiau negu granito skalda. Jei kapsulių glaudumo rodiklis būtų padidintas iki 45%, tai akumuliuojamos energijos kiekis kapsulių škrovos tūrio vienetu padidėtų iki 138,4 MJ/m³.

IŠVADOS

1. Esant 21 mm skersmens kalcio chlorido heksahidrato kapsulių glaudumo rodikliui 30%, akumuliuojamos šilumos kiekis orui šildyti akumuliacinės škrovos tūrio vienetu, kintant kapsulių temperatūrai nuo 15 iki 33 °C, sudaro 92,3 MJ/m³, arba 4,6 karto daugiau negu granito skaldyje. Padidinus kapsulių glaudumo rodiklį 1,5 karto, tiek pat padidėtų ir sukauptos šilumos kiekis.

2. 21 mm skersmens kalcio chlorido heksahidrato kapsulių, esant škrovos glaudumo rodikliui 30%, išsilydymo trukmė trumpėja neįymiai, kai lyginamas šilto oro debitas, skaičiuojant 1 m³ škrovos tūrio, didinamas daugiau kaip 1,5–1,7 m³/s.

PADEKA

Autoriai dėkoja Lietuvos valstybiniam mokslo ir studijų fondui už paramą vykdant mokslo programą „Saulės energijos konversija ir naudojimas“.

Gauta 2004 08 16

Literatūra

- Zalba B., Marin J. M., Cabeze L. F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications // Applied Thermal Engineering. 2003. No. 23. P. 251–283.
- Kenisarin M. M. Short-term storage of solar energy. Low temperature phase-change materials // Applied Solar Energy. 1993. Vol. 29. No. 2. P. 48–65.
- Zivkovic B., Fujii I. An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers // Solar Energy. 2001. Vol. 70. No. 1. P. 51–61.
- Hasnain S. M. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part 1: Heat storage materials and techniques // Energy Conversion Management. 1998. Vol. 39. No. 11. P. 1127–1138.
- Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. Ленинград: Энергия, 1976. 351 с.
- Dėteikis I., Lynikienė S. Kalcio chlorido heksahidrato lydymosi proceso vertikalioje oru apipučiamoje kapsulėje tyrimai // Pėmės ūkio inžinerija / LPŪU PŪI instituto ir LPŪ universiteto mokslo darbai. 2003. Nr. 35(3). P. 69–79.

Ignas Dėteikis, Stefa Lynikienė

INVESTIGATION OF HEAT STORAGE IN STORAGE CHARGE OF CALCIUM CHLORIDE HEXAHYDRATE CAPSULES

Summary

The objective of the investigation was thermal energy storage using phase change material (calcium chloride hexahydrate) capsules for air heating. The results of the investigation showed that the amount of stored thermal energy calcium chloride hexahydrate in capsules (diameter 21 mm), when temperature changed from 15 to 33 °C and the index of close-set of capsules was 30%, reached 92.3 MJ/m³, i.e. was 4.6 times higher than that in granite macadam. The close-set index of capsules increased 1.5 times, as did also the amount of stored heat. The dependence of the melting time of the storage charge of these capsules on a specific air flow rate was established.

Key words: heat storage, phase change materials, calcium chloride hexahydrate

Игнас Шатейкис, Стефа Линикене

ИССЛЕДОВАНИЕ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛА В ЗАГРУЗКЕ КАПСУЛ ГЕКСАГИДРАТА ХЛОРИДА КАЛЬЦИЯ

Резюме

Цель настоящей работы – определить возможное количество тепловой энергии, аккумулируемой в

zaugruke teploakumuliatoria kapsulami heksahidrata chlorida kalcija, kada v kachestve teplonositelja ispolzuetsja vozduh. Provodeny eksperimentalnyje issledovanija. Ustanovleno, chto pri pokazatele splochnosti kapsul heksahidrata chlorida kalcija diametrom 21 mm kolichestvo akumuliruемого tepla iz rascheta na 1 m³ naugruzki pri izmenenii temperatury ot 15 do 33 °C sostavljat 92,3 MDž/

m³, ili v 4,6 raza bol'she, chem v granitnom šebne. Pri uveličenii pokazately splochnosti kapsul v 1,5 raza na stol'ko že uveličitsja i kolichestvo akumuliruемого tepla. Opredelena zavisimost' prodolžitel'nosti plavlenija kapsul ot kolichestva produvaeмого teplogo vozduha.

Ēēř-āāŭā nēī āā: āēēōī ōēēđī āāī ēā ōāī ēā, ī āōāđēāēŭ ñ ōāçī āŭī ē ī āđāōī āāī ē, āāēñāāēāđāō ōēī đēāā ēāēŭōēŭ