

УДК 662.6.536.4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ РЕЧОВИН ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Демченко В.Г., канд. техн. наук, Фалько В.Ю.

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.9>

Основна увага в цій статті приділена вивченню речовин, які потенційно підходять для низькотемпературного зберігання теплової енергії в мобільних акумуляторах. Розглянуті особливості впливу теплофізичних властивостей та термічної стійкості різних речовин на теплообмін, теплопровідність, термін експлуатації та час зарядки/розрядки акумулятора. Проведено аналіз особливостей властивостей речовин для їх подальшого практичного застосування. Висновки та рекомендації спрямовані на висвітлення розбіжностей в існуючих дослідженнях в цій сфері.

Основное внимание в этой статье уделено изучению веществ, которые потенциально могут быть использованы для низкотемпературного хранения тепловой энергии в мобильных аккумуляторах. Рассмотрены особенности влияния теплофизических свойств и термической устойчивости различных веществ на теплообмен, срок эксплуатации и время зарядки/разрядки аккумулятора. Проведен анализ особенностей свойств веществ для дальнейшего практического применения. Выводы и рекомендации направлены на освещение разногласий в существующих исследованиях в этой сфере.

This article focuses on the study of substances that are potentially suitable for low-temperature storage of thermal energy in mobile storages. The features of the influence of thermophysical properties and thermal stability of various substances on heat transfer, thermal conductivity, specific and latent heat, lifetime and battery charge/discharge time are considered. The analysis of the features of the properties of substances for their further practical application was carried out. Finally, the presented conclusions and recommendations are aimed at highlighting discrepancies in existing research in this area.

Бібл. 15, табл. 1, рис. 1.

Ключові слова: зберігання теплової енергії, мобільний теплоакумулятор, стійкість, теплоакумуляуюча речовина. T – температура, °С; ΔT – різниця температур, °С; $T_{пл}$ – температура плавлення, °С; c_p – питома теплоємність, кДж/кг·К; ρ – густина, кг/м³; λ – теплопровідність, Вт/м·К; h – ентальпія, кДж/кг; τ – час, хв. v – швидкість, м/хв.

TES – акумулятор теплової енергії;

M-TES – мобільні накопичувачі теплової енергії;

ДСО – дискретна система опалення;

TAM – теплоакумуляуючий матеріал;

PCM – матеріал с фазовим перетворенням;

LHTES – зберігання латентної теплової енергії.

Вступ

Питанню розробки альтернативної системи теплопостачання населених пунктів та окремих об'єктів присвячено багато наукових робіт. Останніми роками активно розробляється TES – технологія, яка використовується для балансування попиту і пропозиції енергії на опалювання або охолодження. Аналіз багатьох публікацій показує, що науковий інтерес дослідників направлений на обґрунтування можливості створення мобільних накопичувачів теплової енергії M-TES, що дозволить значно зменшити споживання енергії, задовольнити потреби в теплі для розподілених користувачів та інтегрувати M-TES в систему комбінованої генерації та утилізації скидної теплоти промислових підприємств [1, 2, 3].

Технічна доцільність системи транспортування відпрацьованого тепла детально досліджена в [4].

Авторами також розробляється система дискретно-

го теплопостачання ДСО на базі мобільних акумуляторів теплоти, можливість впровадження якої наведено в [5].

Основною проблемою, яка гальмує впровадження мобільного транспортування теплоти залишається відсутність надійної теплоакумуляуючої речовини, яка повинна відповідати наступним критеріям: відповідність вимогам санітарної і пожежної безпеки, низька вартість, компактність, низька корозійна активність, висока щільність зберігання теплоти та тривалий термін експлуатації.

Слід зазначити, що ці питання остаточно не вирішені та залишаються дуже актуальними. Велику кількість речовин, призначених для акумуляування теплоти, можна поділити на три великих групи, а саме TAM наукового дослідження та майбутнього розвитку, TAM перспективного впровадження та TAM для комерційного використання. Остання група на жаль дуже обмежена.

З метою вибору TAM для практичного використання

було проведено дослідні порівняння теплофізичних властивостей, часу акумуляції і віддачі теплоти та термічної стійкості антифризів, а саме водних розчинів повареної солі та бішофіту, озокериту, котрий за рядом показників виявляє ознаки кристалогідрату, та РСМ – тригідрату ацетату натрію, які на наш погляд найбільш доступні та придатні для низькотемпературного зберігання теплоти.

Особливості теплообміну та експериментальні випробування

Більшість дослідників відмічають, що якість теплообміну залежить від конструкції М-ТЭС і точного вибору теплоакумулюючого матеріалу [6].

На даний час існує велика кількість конструкцій акумуляторів для зберігання теплової енергії. На жаль такі системи не знаходять широкого вжитку. Основна причина полягає в тому, що ряд властивостей ТАМ робить тепловий акумулятор досить дорогим у виробництві та складним в експлуатації. Наприклад, при використанні акумулюючої речовини в якості теплоносія процес розрядки протікає набагато швидше, ніж процес зарядки акумулятора. Це пояснюється явищем стратифікації, яка призводить до того, що при прямому контакті ТАМ з контуром нагріву зарядка акумулятора протікає дуже повільно. Інтенсифікація теплообміну та регулювання температури й часу процесу зарядки/розрядки може бути отримано шляхом збільшення швидкості потоку теплоносія. В акумуляторах з розділенням контурів теплоносія та акумулюючої речовини зарядка і розрядка займає майже однаковий час, а швидкість потоку теплоносія практично не впливає на ці процеси. Крім того в одноконтурній системі циркуляції теплоносія ТЭС демонструє кращий час проведення зарядки/розрядки, в порівнянні з багатоконтурною. Ці обставини були враховані авторами при створенні експериментального стенду. Загальний опис, вигляд та теплова схема експериментального стенду були наведені в роботі [7].

Стенд складається з електричного котла, кожухотрубного теплоізолюваного теплового акумулятора, контуру охолодження – радіатора опалення, циркуляційного насоса, арматури, теплового та електричного лічильників, концентратора вимірів з датчиками температури та тиску та комп'ютера. При проведенні експериментів лічильниками фіксується кількість теплової та електричної енергії термopарами – температурою прямої та зворотної води. Регулювання температури і швидкості теплоносія здійснюються відповідними блоками управління, протік теплоносія – краном балансування. Теплоносій (вода) нагрівався електричним котлом, передача теплоти акумулюючій речовині

здійснювалася крізь стінку спіральної оребреної труби. Швидкість проходження теплоносія можна змінювати в межах від 1,0 до 9,0 м/хв., але при проведенні серії експериментів, описаних в цій роботі, вона залишалася постійною і складала 1,0 м/хв.

Нагрів акумулюючих речовин відбувався до температури 90 °С, після чого котел відключали. В процесі зарядки/розрядки проводилися фіксація часу та зміни температури теплоносія й акумулюючої речовини при нагріві та охолодженні. Дані аналізували та знаходили теплофізичні показники розрахунковим методом. Вивчалися теплофізичні властивості та термічна стійкість обраних для дослідження зразків перспективних теплоакумулюючих речовин.

Огляд досліджуваних теплоакумулюючих речовин

Треба зазначити, що від типу речовини, що акумулює теплоту залежить конструкція М-ТЭС. Більшість властивостей теплоакумулюючих речовин і матеріалів достатньо добре вивчені та досліджені, їх детальний опис можна знайти в літературі [8, 9].

У цій роботі наведені результати експериментальних досліджень найбільш доступних речовин для М-ТЭС, призначених для застосування в діапазоні температур від 0 до 100 °С. Наші попередні дослідження, показали, що найкращі показники щодо акумуляції теплоти притаманні воді, соляним водним розчинам та матеріалам з фазовим перетворенням. Найбільше поширення в теплоенергетиці отримали рідкі теплоносії та антифризи, які широко застосовуються в системах опалювання та охолодження. Вода – найбільш доступний і дешевий теплоносій. При перепаді температур $\Delta T = 60$ °С (35...95 °С) вода акумулює приблизно 250 Мдж/м³. Це значення використовується як еталон для порівняння з іншими матеріалами ТЭС.

Поліпшити теплоакумуляційні властивості води можливо зміною її щільності. Окрім того експлуатація М-ТЭС припускає їх використання при низьких температурах доквілля, у зв'язку з чим було проведено вивчення теплофізичних властивостей води, насиченого водного розчину NaCl у співвідношенні 19 % солі та 81 % води, та водного розчину бішофіту MgCl₂·6H₂O у співвідношенні 20 % на 80 % та порівняння результатів інших дослідників [10].

Наступна велика та перспективна група – це матеріали з фазовим переходом (PCM), які поділяються на органічні (парафіни, жирні кислоти, складні ефіри, цукрові спирти, поліетиленгліколи та ін.) і неорганічні (гідрати солей і металів), а також евтектичні суміші неорганічних і/або органічних речовин [11, 12].

Органічні матеріали РСМ добре вивчені та широко застосовуються в промисловості. Зазвичай їх поділяють на парафіни та непарафіни. Парафін або парафінові воски відносяться до вуглеводнів з лінійним ланцюгом, що складається з n-алканів. Непарафіни зазвичай відносять до великої групи представленої в основному жирними кислотами, складними ефірами, цукровими спиртами, гліколем та інші. Їх характеризує конгруентне плавлення, яке протікає без розподілу фаз. Вони широко використовуються в якості РСМ завдяки їхнім властивостям: щільності накопичення теплоти (приблизно 200 кДж/кг і 150 МДж/м³), конгруентному плавленню, затвердінню при незначному переохолодженні, високій хімічній стабільності без фазової сегрегації, невеликій зміні об'єму, нетоксичності та доступності за ціною. Також вони не викликають корозії металів.

В системах теплопостачання широко використовуються матеріали, які застосовуються при робочих температурах до 120 °С. Це кристалогідрати неорганічних сполук і деякі органічні сполуки (парафіни, жирні кислоти). Для досліджень нами було обрано озокерит, який є продуктом нафтового походження. Він являє собою суміш твердих вуглеводнів парафінового ряду з більшою або меншою домішкою рідких, газоподібних вуглеводнів, що входять до складу нафти. Озокерит за своєю консистенцією нагадує віск, його колір залежить від кількості смол, що містяться в ньому. Озокерит має високу теплоємність і низьку теплопровідність. Густина – від 0,85 до 0,97, частіше 0,91...0,95, температура плавлення – від 58 до 100 °С, за звичай близько 62 °С. Хімічний склад озокериту наступний: віск – 69...80%,

парафін – 3...7 %, мінеральна олива – 1...2 %, нафтові смоли – 8...10 %, асфальтени – 0,5...5 %, механічні домішки 3...8 % [13].

Група солегідратів найбільш перспективна для розробки конкурентоспроможних теплоакуючих матеріалів. Гідрати солей – це неорганічні сполуки, що містять кристалізаційну воду. Вони мають вищу теплопровідність в порівнянні з органічними матеріалами для застосування при низьких і помірних температурах, орієнтовно вона складає 350 МДж/м³ і 0,5 Вт/м К, відповідно. Також вони негорючі й дешевші за парафіни. Селегідрати мають недоліки, які обмежують їх застосування, такі як низька термостійкість при тривалих періодах експлуатації, сегрегація фаз, переохолодження та корозійна активність. Для досліджень нами було обрано тригідрат ацетату натрію [14].

Кристалогідрати широко поширені в природі та стали об'єктом численних наукових досліджень. Вони мають відносно високі значення питомої теплоти плавлення й задовільні теплофізичні властивості, проте їх головним недоліком є нестабільність фізико-хімічних показників при багатократних циклах плавлення-кристалізації. Перехід в тверду фазу часто відбувається з переохолодженням, спостерігається розділення фаз і поступова зміна хімічного складу. Внаслідок цього кристалогідрати мають невеликий ресурс роботи. Переваги та недоліки органічного і неорганічного РСМ приведені в роботі [15].

Теплофізичні показники ТАМ добре вивчені, деякі данні наведені в таблиці 1.

Цикл-експерименти для тестування термічної

Табл. 1. Технічні показники акумуляційних речовин

Речовина	Температура плавлення, $T_{пл.}, ^\circ\text{C}$	Густина, $\rho, \text{кг/м}^3$	Теплопровідність, $\lambda, \text{Вт/м К}$	Питома теплоємність $c_p, \text{кДж/кг К}$	Ентальпія $h, \text{кДж/кг}$
Вода H_2O при 20 °С	0,0	1000	0,6	4,19	334
$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ (19 % + 81 %)	-10,0	1163	0,57	3,4	283
Озокерит $\text{C}_{36}\text{H}_{74}$ до $\text{C}_{55}\text{H}_{112}$	66,0...68,0	930	0,38	2,1	189
Тригідрат ацетату	58,0	1450	0,6	2,79	226
Бішофіт $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ (20 % + 80 %)	-20,0	1250	0,54	3,2	132,3

стабільності РСМ, при повторному плавленні і кристалізації, виявили зниження прихованої теплоти та зміну температури фазового переходу під час циклування.

Результати та обговорення

Рисунок 1 узагальнює результати проведених досліджень циклів нагріву/охолодження п'яти теплоакумулюючих матеріалів. Конкретні результати надані на рис. 1 (а, б, в, г, д). Як можна бачити, матеріали зі зміною фаз (РСМ) більш привабливі для зберігання теплової енергії. Завдяки високій щільності та густині зберігання теплоти ці матеріали більш підходять для застосування у мобільному акумуляторі. Однак, проведені дослідження показали, що при зміні температури від 20 до 100 °С озокерит виявляє ознаки аморфної речовини (відсутній фазовий перехід), при цьому об'єм зразка в негерметичній ємності зменшується на 5...7 %. Слід зазначити, що кристалогідрати неорганічних сполук не втрачають свої властивості й термічну стабільність навіть після 1000...2000 теплових циклів.

Озокерит та подібні йому матеріали мають низьку теплопровідність ($\approx 0,2...0,38$ Вт/м К), що знижує швидкість теплообміну під час процесу плавлення і затвердіння. Низька теплопровідність може бути усунена шляхом введення в кристалогідрати неорганічних сполук а також структур з металевою матрицею, застосуванням металевих ребер теплообмінної поверхні і розробкою композиційних матеріалів на їх основі. Варто пам'ятати, що вони проявляють помірну займистість і можуть хімічно взаємодіяти з деякими пластмасами, особливо зі поліолефінами, що призводить до їх інфільтрації та розм'якшення. Враховуючи отримані експериментальні дані, використання озокериту можна вважати недоцільним.

В результаті експерименту виявлено, що тригідрат ацетату натрію, без наявності центрів кристалізації, може досить довго (кілька діб) знаходитися в стані переохолодженої рідини. При переході з рідкої фази у тверду зменшується його теплопровідність, що значно ускладнює конструкцію теплоаккумулятора. Після 20...30 циклів нагріву-охолодження речовина поступово втрачає свої властивості внаслідок зміни її хімічного складу. Тому використання тригідрату ацетату натрію можливе тільки після розв'язання питання стабілізації його хімічного складу протягом часу експлуатації. Деякі з вищевказаних недоліків тригідрату ацетату натрію, можуть бути усунені або значно зменшені. Одним з основних методів запобігання сегрегації та осадження є додавання загусників. Шляхом додавання полімерних або целюлозних гелеутворюючих матеріалів, таких як

дерев'яні волокна або аттапульгітові та палигорськітові глини, термін служби гідратів солей може бути збільшений до 1000 циклів за рахунок значного зменшення теплоакумулюючих властивостей. Інші методи засновані на додаванні до гідрату води в кількості, що трохи перевищує стехіометричне співвідношення при механічному перемішуванні суміші.

Ступінь переохолодження рідини при температурі нижче температури кристалізації, може бути зменшено за допомогою домішок, які прискорюють кристалізацію пересичених розчинів, таких як бура або вуглець, але вони знижують теплопровідність солегідратів. Що стосується корозійних властивостей сольових гідратів, то нержавіюча сталь сумісна з усіма солями, а вуглецеві сталі слабо схильні до корозії. Кольорові метали, особливо алюміній, мідь і латунь застосувати не рекомендується в наслідок активної хімічної і електрохімічної корозії. Для промислового застосування в системах опалення на сьогодні найбільш придатною є теплоакумулююча речовина на основі води з домішкою антифризу.

Висновки

1) Таблиця 1 демонструє деякі протиріччя, які виникають при роботі з даними з літератури. Теплофізичні властивості ТАМ мають великі розбіжності в різних літературних джерелах. На властивості ТАМ впливає його якість та спосіб виготовлення. Це може призвести до помилок при проектуванні систем зберігання теплової енергії LHTEs.

2) Аналіз результатів експерименту, наведених на рис. 1, показує, що нагрівання та охолодження теплоносія у всіх експериментах проходило в однакових умовах. Додавання солі NaCl та бішофіту до складу ТАМ практично не впливає на швидкість нагріву та охолодження теплоносія.

3) Додавання бішофіту погіршує теплофізичні властивості води та зменшує щільність акумуляції теплоти. Експериментально встановлено, що після 3...4 циклів нагріву/охолодження з розчину технічного бішофіту випадає темно-жовтий нерозчинний осад, що вимагає застосування додаткових фільтрів в системі циркуляції теплоносія та постійного їх обслуговування.

4) Суттєве підвищення часу розрядки TES отримано при випробуванні озокериту. Крім тригідрату ацетату натрію всі означені речовини показали стабільний стан після 30 циклів нагріву/охолодження.

5) Тригідрат ацетату натрію показує нестабільні результати при термоциклованні і після 20-30 циклів нагрівання/охолодження поступово втрачає свої властивості.

6) Цикл-експерименти проведені для аналізу

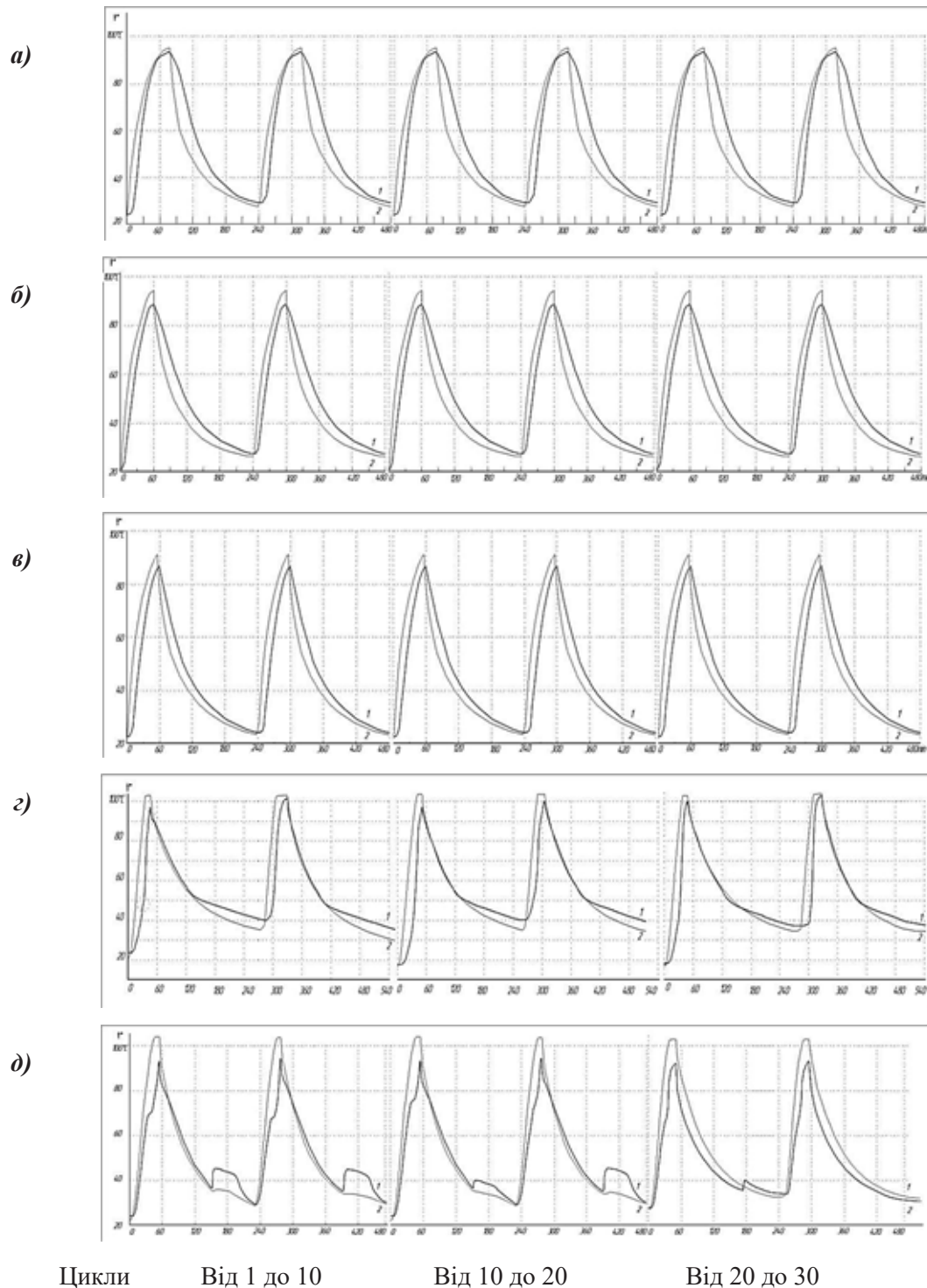


Рис. 1. Експерименти тестування термічної стабільності акумулюючих речовин:
а: вода (акумулювальний контур) – 1, вода (нагрівальний контур) – 2;
б: розчин NaCl – 1, вода – 2 (нагрівальний контур);
в: бішофіт – 1, вода – 2 (нагрівальний контур);
г: озокерит – 1 вода – 2 (нагрівальний контур);
д: тригідрат ацетату натрію – 1, вода – 2 (нагрівальний контур).

стабільності ТАМ показали, що висока щільність акумуляції енергії досягається при застосуванні речовин з фазовим переходом.

7) Теплові характеристики системи зберігання теплової енергії TES на базі PCM можуть бути підвищені шляхом застосування ефективної поверхні теплообміну та створенням нових композитних матеріалів.

8) З проведеного дослідження випливає, що температура теплоносія на вході має найбільший вплив на зарядку TES. Проте, збільшення швидкості вигідно лише тоді, коли температура теплоносія на вході вище температури фазового переходу PCM. Температура подачі теплоносія від TES до споживача повинна бути не нижча за 50 °C.

9) У випадку коли температура теплоносія на вході в акумулятор нижче температури ТАМ, ефект збільшення швидкості потоку пригнічується більш високим температурним потенціалом руху теплоносія і температурою зміни фази PCM.

10) За одиничною вартістю та способом накопичення енергії для промислового застосування в системах M-TES, на сьогодні, найбільш придатною є теплоакуюча речовина на основі води з домішкою антифризу.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Storch G., Hauer A.* Economic efficiency of the system of distribution of thermal energy on the basis of mobile storage units: two examples; Proceedings of the Conference EKOSTIK; Stockton, NJ, USA. May 31 – June 2, 2006

2. *M. Deckert, R. Scholz, S. Binder, A. Hornung.* Economic efficiency of mobile latent heat storages, – Energy Procedia, 2014 – Elsevier, pp. 171–177

3. *Weilong Wang, Shaopeng Guo, Hailong Li, Jinyue Yan, Jun Zhao, Xun Li, Jing Ding.* Experimental study on the direct/indirect contact energy storage container in mobilized thermal energy system (M-TES), Applied Energy Volume 119, 2014, Pages 181–189

4. *Miró L., Gasia J., Cabeza L.F.* Thermal Power Storage (TES) Industrial Waste Heat Recovery (IWH): Review. Appl. Energy. 2016; 179: pp. 284–301

5. *Демченко В.Г, Трубочев А.С., Гронь С.С.* Оцінка впровадження дискретної системи опалення населеного пункту експрес-методом «3Е», Теплофізика та теплоенергетика, Том 41, № 1, 2019, С. 43–53

6. *Getu Nailu, Seasonal Solar. Thermal Energy Storage,* 2018 Reviewed, p. 22. DOI:10.5772/intechopen.79576

7. *Демченко В.Г, Фалько В.Ю., Гронь С.С.* Мобільні акумулятори для дискретних систем теплохолодопостачання. Частина 1, Пром. теплотехніка, 2018, Т. 40, № 2, С. 20–26, ISSN 56 0204-3602

8. *Tatsidjodoung P, Le Pierrès N, Luo, L.* (2013) A review of potential materials for thermal energy storage in building applications. Renew. Sustain. Energy Rev. 18, pp. 327–349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>

9. *Alva, G. Liu L. Huang X., Fang, G.* (2017) Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. Renew. Sustain. Energy Rev. 68, pp. 693–706. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.021

10. *ДСТУ ISO 2479-2001* Натрій хлористий технічний. Визначення вмісту речовини, нерозчинної у воді чи кислоті і приготування основних розчинів для інших визначень та ГОСТ 4209-77, Реактиви. Магній хлористий 6-водний. Технічні умови

11. *Pielichowska K., Pielichowski, K.* (2014) Phase change materials for thermal energy storage. Prog. Mater. Sci. 30, p.p. 67–123. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.03.005

12. *Thermal Energy Storage, Technology Brief, IEA-ETSAP and IRENA© Technology,* 2013, pp. 10–13

13. *Лазаренко С. К., Винар О. М.* Мінералогічний словник, Київ. Наукова думка, 1975, С.774

14. *Й. Онейда, О. Швайка.* Глосарій термінів з хімії, Донецьк: Вебер, 2008, ISBN 978-966-335-206-0, С. 758

15. *J.Lizanaa, R. Chacarteguib, A. Barrios-Paduraa, J. M. Valverdec, C. Ortizc.* Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings, *Materiales de Construction*, Vol. 68, Issue 331, July–September 2018, p.160, ISSN-L:0465-2746, DOI:10.3989/mc.2018.10517

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THERMAL STABILITY OF SUBSTANCES FOR THERMAL ENERGY STORAGE

Demchenko V.G., Falco V.Yu.

Institute of Technical Thermophysics the National Academy of Sciences Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2019.9>

Optimizing the storage methods for excess heat energy and associated technical and technological solutions has a significant impact on the development of LHTES systems. New technologies for storing thermal energy are increasingly an alternative to the classic methods of providing thermal infrastructure facilities. In this paper we analyze the results of experimental studies of heat-storage materials for their further integration into the Smart Grid heating system of infrastructure objects and use in the M-TES. The conducted literary review showed that the thermophysical parameters of the investigated substances for the conservation of heat from different authors are very different. We conclude that this is due to the quality of the materials being studied and the errors of laboratory measurements. This negatively affects the design of LHTES systems and greatly complicates the calculation and modeling of heat transfer processes. It is especially important to correctly determine the amount of heat that can be obtained during the charging and discharge cycles of TES, as well as the lifetime of the material that accumulates heat. Therefore, the purpose of this work is to identify the appropriate material for energy storage applications between 0 °C and 115 °C and evaluate it, depending on the thermophysical properties and the time of stable operation. Taking into account the economic aspects, only the available technical materials are considered within the framework of this study, since the choice of material is aimed at the use of M-TES in real conditions of operation. Figure 1 summarizes the results of research on heating and cooling cycles of heats of heat storage substances. High thermal power and, hence, high thermal conductivity are important for the storage efficiency of PCM, especially in the process of solidification, because in a heat transfer predominant solid layer that grows continuously. However, both PCMs are not suitable for mobile thermal storage systems in this form. The huge disadvantages are the emergence of different values of the melting point, the high retention time of both candidates, as well as their prices. Therefore, further research should be directed to eliminate these negative effects. Despite the relatively low density of heat storage with aqueous solutions of antifreeze, they

are beneficial candidates for waste heat transfer systems within the framework of this study. Addition of NaCl salt practically does not affect the speed of heating and cooling of the coolant. The addition of bischofite worsens the thermophysical properties of water and shows a small density of heat accumulation. It has been experimentally established that after 3...4 cycles of heating and cooling from a solution of technical bischofite, a dark yellow, insoluble precipitate forms, which creates problems during the operation. Significant increase in TES discharge time was obtained when testing ozokerite. All of the above substances have shown a stable state after 30 cycles of heating / cooling and indicate overcooling below the melting point by about 30 °C. Trihydrate sodium acetate shows no stable results. Subsequently, after 20 cycles of heating and cooling, it loses its properties.

References 15, figures 1, table 1.

Keywords: storage of thermal energy, mobile heat storage, stability, heat-accumulating substance.

1. *Storch G., Hauer A.* Economic efficiency of the system of distribution of thermal energy on the basis of mobile storage units: two examples; Proceedings of the Conference EKOSTIK; Stockton, NJ, USA. May 31 – June 2, 2006

2. *M. Deckert, R. Scholz, S. Binder, A. Hornun.* Economic efficiency of mobile latent heat storages, – Energy Procedia, 2014 – Elsevier, pp. 171–177

3. *Weilong Wang, Shaopeng Guo, Hailong Li, Jinyue Yan, Jun Zhao, Xun Li, Jing Ding.* Experimental study on the direct/indirect contact energy storage container in mobilized thermal energy system (M-TES), Applied Energy Volume 119, 2014, pp. 181–189

4. *Miró L., Gasia J., Cabeza L.F.* Thermal Power Storage (TES) Industrial Waste Heat Recovery (IWH): Review. Appl. Energy. 2016; 179: pp. 284–301

5. *Demchenko V.G., Trubachev A.S., Hron S.S.* [Rating installation of the discrete heating system of the settlement using the express method 3e], Prom. Teplotekhnika [Ind. Heat engineering], 2018, vol. 41, № 1, 2019, p. 43–53. (Ukr.).

6. *Getu Hailu, Seasonal Solar.* Thermal Energy Storage, 2018 Reviewed, p. 22. DOI:10.5772/intechopen.79576

7. *Demchenko V.G., Falco V.U., Hron S.S.* [Mobile accumulators for discrete systems of heat-supplying. Part 1.], Prom. Teplotekhnika [Ind. Heat engineering], 2018, vol. 40. № 3, pp. 56– 68, ISSN 56 0204-3602, (Ukr.)

8. *Tatsidjodoung P., Le Pierrès N., Luo L.* (2013) A review of potential materials for thermal energy storage in

building applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 18, pp. 327–349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.025>)

9. *Alva G., Liu L., Huang X., Fang G.* (2017) Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68, pp. 693–706. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.021

10. *DSTU ISO 2479-2001* Sodium chloride technical. Determination of the substance content insoluble in water or acid and preparation of basic solutions for other definitions and GOST 4209-77, Reagents. GOST 4209-77 Magnesium chloride 6-water. Specifications (Ukr.)

11. *Pielichowska K., Pielichowski K.* (2014) Phase change materials for thermal energy storage. *Prog. Mater. Sci.* 30, pp. 67–123. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2014.03.005

12. *Thermal Energy Storage*, Technology Brief, IEA-ETSAP and IRENA© Technology, 2013, pp. 10–13

13. *Lazarenko Ye.K., Vinar O.M.* Mineralogical Dictionary, Kyiv, Naukova Dumka, 1975, p.774, (Ukr.)

14. *Y. Opeida, O. Schwaika.* Glossary of Chemistry, Donetsk: Weber, 2008, ISBN 978-966-335-206-0, p. 758, (Ukr.)

15. *J. Lizanaa, R. Chacarteguib, A. Barrios-Paduraa, J. M. Valverdec, C. Ortizc.* Identification of best available thermal energy storage compounds for low-to-moderate temperature storage applications in buildings, *Materials de Construction*, Vol. 68, Issue 331, July–September 2018, p. 160, ISSN-L:0465-2746, DOI:10.3989/mc.2018.10517

Отримано 26.04.2019

Received 26.04.2019