

10.31653/smf343.2021.223-233

Хлієва О. Я.<sup>1,2</sup>, Паскаль О. А.<sup>2</sup><sup>1</sup>Національний університет «Одеська морська академія»<sup>2</sup>Одеська національна академія харчових технологій

## **ВПЛИВ ПРИСУТНОСТІ АЛЮМІНІЄВОГО ВОЛОКНА НА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ ПАРАФІНУ ТА СТЕАРИНОВОЇ КИСЛОТИ ЯК МАТЕРІАЛІВ ЗА ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ ДЛЯ ТЕРМОАКУМУЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**

### **Вступ**

Останні роки у судноплавній промисловості все більше приділяється уваги енергозбереженню та зниженню викидів парникових газів. Доволі суттєва кількість палива споживається на судні під час його перебування у порту в очікуванні вантажних операцій для обігріву приміщень та паливних баків. У той же час, протягом знаходження судна у морі, теплота відпрацьованих газів двигунів не використовується у повної мірі через її надлишок. Згладити такі нерівномірності у надходженні теплової енергії та її споживанні на судні можна за допомогою термоакумуляторів [1, 2, 3]. Актуальним також є застосування термоакумуляторів в системах опалення та гарячого водопостачання з використанням відновлюваних джерел енергії (перш за все енергії сонця).

В роботі [1] проаналізоване застосування термоакумуляторної системи на торговому судні та показано, що встановлення термоакумуляторного водяного бака об'ємом 1000 м<sup>3</sup> може зменшити споживання палива опалювальними котлами на 80 %. В роботі [2] розглядаються перспективи застосування термоакумуляторів на круїзних судах для зменшення витрат на нагрів води для санітарно-побутових нужд та відзначена необхідність подальшої модернізації термоакумуляторних систем (ТАС) з можливістю використання матеріалів з фазовим перетворенням замість води.

Традиційні ТАС, у вигляді теплоізолюваних ємностей з водою певної температури, суттєво програють термоакумуляторам з термоакумуляторними матеріалами з фазовим переходом (ТАМФП). ТАС з ТАМФП володіють двома основними перевагами перед традиційними водяними термоакумуляторами:

- можливістю акумулювати більшу кількість енергії на одиницю об'єму (за рахунок акумулювання енергії як в явному вигляді, при

нагріві ТАМФП, так й в прихованому, при фазовому переході ТАМФП);

- суттєво меншою неізотермічність процесів зарядки (підводу теплоти) та розрядки (відводу теплоти) ТАС з ТАМФП з причини постійної (або такої, що несуттєво змінюється для багатокомпонентних ТАМФП) температури фазового переходу.

Використання капсул з ТАМФП, зібраних у вигляді ущільненого шару в ТАС, є одним з основних підходів при проектуванні термоаккумуляторів з ТАМФП, який забезпечує високу щільності зберігання теплової енергії, та, як наслідок, високу ефективність ТАС та усієї теплоенергетичної системи до складу якої входить ТАС [4].

На інтенсивність процесів теплообміну (швидкість зарядки та розрядки) в капсулах з ТАМФП впливає як конструкція капсул, так й матеріал ТАМФП (перш за все, його теплопровідність).

Представлене дослідження присвячене короткому огляду конструкцій капсул з ТАМФП та експериментальній оцінці доцільності використання простого та недорого підходу до інтенсифікації процесів теплообміну в капсулах з ТАМФП без ускладнення їх конструкції – додаванню алюмінієвого волокна до таких ТАМФП як технічний парафін та стеаринова кислота. Висновок о доцільності застосування запропонованого підходу планується отримати на основі аналізу експериментальних значень теплопровідності об'єктів дослідження.

### **Конструкції капсул для термоаккумуляторів з фазовим переходом та методи інтенсифікації теплообміну в них**

Більшість ТАМФП для енергетики (наприклад, парафіни або стеаринова кислота, які мають придатну температуру плавлення для систем опалення, гарячого водопостачання та кондиціонування) мають низьке значення теплопровідності в рідкій і твердій фазах [5], що негативно сказується на інтенсивності теплообміну між ТАМФП та рідким теплоносієм (РТН) ТАС. Геометрія капсул та співвідношення розмірів капсули має не менш значний вплив на інтенсивність теплообміну, ніж властивості ТАМФП. Тобто, як теплофізичні властивості ТАМФП, так й форма та розмір капсули визначають час плавлення та застигання (зарядки та розрядки) ТАМФП у капсулах.

За геометричними характеристиками капсули (контейнери) з ТАМФП для ТАС, зазвичай діляться на [6]: циліндричні капсули (рис. 1), прямокутні/квадратні у вигляді плит, що омиваються РТН, та

сферичні капсули (рис. 2).

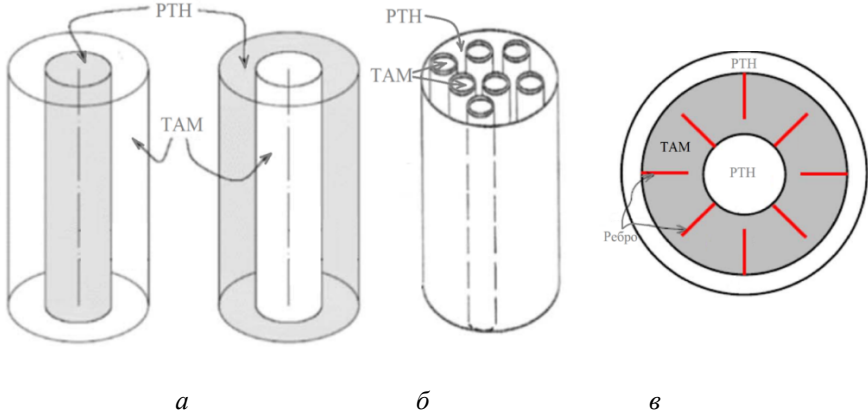


Рисунок 1 - Схематичне зображення циліндричних капсул (контейнерів) для ТАМФП [6]: *а* – контейнер типу труба, *б* – циліндричний контейнер, *в* – кожухотрубний контейнер, *г* – трьохтрубний контейнер з ребрами

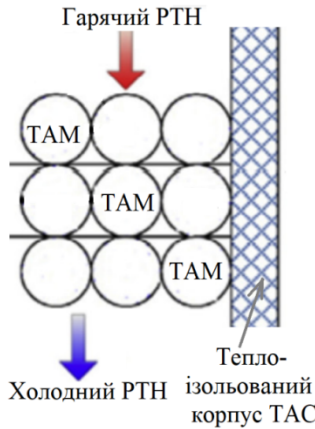


Рисунок 2 - Схематичне зображення сферичних капсул з ТАМФП у вигляді шару в ТАС [7]

З'являються роботи, де пропонується складна форма капсул з ТАМФП. Наприклад, в роботі [8] запропонована нова грушовидна форма капсул для ТАС с ТАМФП та показано, що процес плавлення ТАМФП майже вдвічі швидше, ніж в класичних капсулах циліндричної або сферичної форми. Але виготовлення таких капсул потребує додаткових затрат, а їх розміщення у корпусі ТАС не може бути

раціональним з точки зору частки зайнятого капсулами об'єму. Тобто, при більшій швидкості зарядки та розрядки таких капсул, масогабаритні характеристики ТАС з ними будуть доволі великими.

Вирішити завдання підвищення швидкості зарядки і розрядки термоакумулятора з ТАМФП можна двома методами. Перший з них спрямований на збільшення теплообмінної поверхні термоакумуляторів, у тому числі за рахунок використання ребрення [6, 9, 10]. Другий полягає у наповненні ТАМФП матеріалами з високою теплопровідністю: або введенні у склад ТАМФП високотеплопровідних вуглецевих наноструктур, таких як фулерен  $C_{60}$ , нанотрубки, терморозширений графіт [11-13], або в армуванні базових ТАМФП металевим волокном різного хімічного складу [9, 14, 15].

Слід відзначити, що застосування ребер призводить до збільшення матеріалоемності та маси ТАС, ускладнює конструкцію капсул з ТАМФП або самої ТАС, а вуглецеві наноструктури досить коштовні та ще мало вивчені у довгостроковій перспективі їх стабільності у різних системах, у тому числі у ТАМФП [16-18].

В роботі [9] було проведено експериментальне порівняння двох підходів до інтенсифікації теплообміну в ТАС з ТАМФП: встановлення алюмінієвих ребер в ТАС або наповнення ТАМФП (н-октадекан) металевим сталевим волокном. Хоча результати досліджень показали більшу ефективність застосування ребрення з метою інтенсифікації теплообміну, в той же час використання металевого волокна є більш дешевим та простим варіантом, який також дає суттєвий ефект у порівнянні з застосуванням чистого ТАМФП.

На думку авторів, застосування металевого волокна як добавки до ТАМФП з метою інтенсифікації теплообміну є найбільш дешевим та надійним варіантом з усіх розглянутих вище. З урахуванням високої теплопровідності та відносно невеликої вартості у якості добавки до ТАМФП парафін та стеаринова кислота (найбільш перспективні там для потреб гарячого водопостачання та опалення) в даному дослідженні було обране алюмінієве волокно.

### **Об'єкти дослідження**

Об'єктами дослідження були зразки технічного парафіну і стеаринової кислоти, а також композитні ТАМ на їх основі.

Для створення композитних ТАМ використовувалися наступні матеріали:

– парафін (очищений технічний Т-3, температура плавлення 53,5 °С, країна-виробник – Польща);

– стеаринова кислота ( $C_{18}H_{36}O_2$ , країна-виробник – Індонезія), йодне число за сертифікатом складає 8,26, що приблизно відповідає марці Т-10 за [19];

– алюмінієве волокно з середнім діаметром волокна 30 мкм (поставач – Ekksol, країна-виробник – Німеччина), теплопровідність (за даними виробника) 168 Вт/(м·К), вміст базового елемента – не менш ніж 92,2 мас. %.

Зразки композитних ТАМФП зі вмістом алюмінієвого волокна створювалися методом укладання певної кількості металевих волокон у спеціальну циліндричну комірку з фторопласту з наступним її заповненням розплавленим парафіном або стеариновою кислотою при температурі 70 °С та формуванням зразків у вигляді таблеток діаметром 23...25 мм та товщиною 4,5...5,5 мм – рис. 3 та 4.

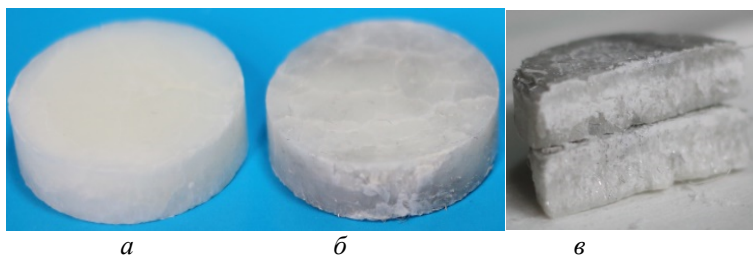


Рисунок 3 – Зображення зразків композитних ТАМ: *а* – стеаринова кислота, *б* – стеаринова кислота з вмістом  $0,0242 \pm 0,0028 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$  ( $0,00859 \pm 0,00101 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$ ) алюмінієвого волокна, *в* – той самий зразок у розрізі

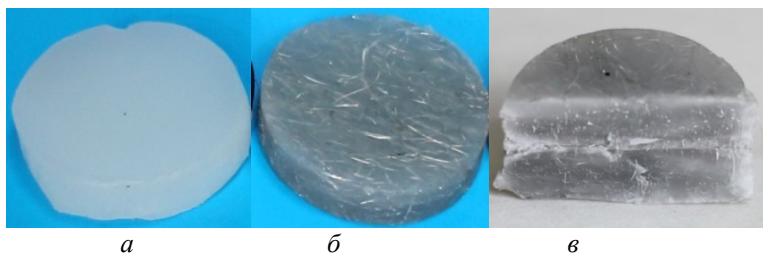


Рисунок 4 – Зображення зразків композитних ТАМ: *а* – парафін, *б* – парафін з вмістом  $0,0285 \pm 0,0011 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$  ( $0,00968 \pm 0,00038 \text{ м}^3 \cdot \text{м}^{-3}$ ) алюмінієвого волокна, *в* – той самий зразок у розрізі

Визначення масової частки металевого волокна в зразку здійснювалося після проведення вимірювань теплопровідності. При цьому композитний ТАМФП витримувався на фільтрувальному папері при температурі 70 °С з періодичною заміною паперу на чистий. Таким чином, увесь розплавлений парафін або стеаринова кислота були віддалені від наповнювача (металевого волокна), металеве волокно було зважено та розрахована його частка у кожному зразку композитного ТАМФП. Маса компонентів була виміряна з використанням електронних аналітичних ваг GR 300 з інструментальною похибкою 0,5 мг.

### **Дослідження теплопровідності термоакумулювальних речовин з фазовим переходом**

Для вимірювання теплопровідності досліджуваних зразків композиційних ТАМ використовувався прилад Hot Disk TPS 2500 S (центр сонячної енергетики CICenergiGUNE, Іспанія у рамках співпраці) [20]. При виконанні вимірювань був застосований сенсор All Karton діаметром 2 мм, який призначений для проведення вимірювань в об'ємі ізотропних зразків. Методика експерименту відповідала стандарту ISO 22007-2. Невизначеність вимірювань теплопровідності не перевищує 5%. Усі вимірювання були виконані при температурі 22 °С для різних комбінацій зразків одного й того ж ТАМФА: використовувалося два зразка однакового ТАМФП при кожному вимірюванні, при цьому датчик розташовувався між зразками. Особливо важливо при вимірюванні було комбінувати різні зрізки та різні сторони зразків композитного ТАМФП з металевим волокном, тому що ці композитні матеріали володіють анізотропією теплопровідності в силу своєї структури.

Результати вимірювання теплопровідності твердої фази для усіх об'єктів дослідження наведено в табл. 1.

Таблиця 1 - Теплопровідність композитних ТАМФП з металевим волокном в твердій фазі при 22 °С

Композитний ТАМ	Парафін	Парафін зі вмістом алюмінієвого волокна	Стеаринова кислота	Стеаринова кислота зі вмістом алюмінієвого волокна
Масова частка металевого волокна, кг/кг	0	0,0285	0	0,0242
$\sigma$ , кг/кг	0	0,0011	0	0,0028
Об'ємна частка металевого волокна, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0	0,00968	0	0,00859
$\sigma$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0	0,00037	0	0,0010
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,256	0,455	0,249	0,450
$\sigma$ , Вт/(м·К)	0,0030	0,034	0,0070	0,063

В таблиці 1 наведені осереднені за усіма зразками значення теплопровідності та частки алюмінієвого волокна. Для вимірювань використовувалося по 3-4 зразка у вигляді таблеток з різної їх комбінацією та з декілька різним вмістом алюмінієвого волокна у кожному зразку. Така особливість експерименту пояснює отримані доволі великі значення середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  (табл. 1), але не впливає на висновки за отриманими результатами.

### Аналіз отриманих результатів

При визначенні маси металевого волокна у стеариновій кислоті було отримано не очікуваний результат. При виплавленні стеаринової кислоти з композитного ТАМФП після трьох місяців з моменту створення зразків спостерігалися візуальні зміни у її кольорі – рис. 5. Було зроблено висновок, що стеаринова кислота при контакті з алюмінієвим волокном вступає в хімічну реакцію, що є небажаним в довгостроковій перспективі застосування цього композитного ТАМФП.



Рисунок 5 – Зображення сірих слідів на фільтрованому папері біля частково розплавленого зразка стеаринової кислоти зі вмістом алюмінієвого волокна через три місяця після створення зразків

З отриманий результатів вимірювання теплопровідності (табл. 1) видно, що додавання алюмінієвого волока як до парафіну, так й до стеаринової кислоти призводить до суттєвого збільшення теплопровідності: приблизно на 78 % для ТАМФП на основі парафіну та на 80 % для ТАМФП на основі стеаринової кислоти при вмісті алюмінієвого волока не більше 1 % за об'ємом в обох композитних ТАМФП.

На основі отриманих результатів з хімічної сумісності стеаринової кислоти та алюмінієвого волока на даному етапі дослідження такий композитний ТАМФП не можна рекомендувати для застосування на практиці. Але, питання хімічної стабільності потребує подальшого більш детального вивчення.

На основі отриманих результатів можна рекомендувати композитний ТАМФП на основі парафіну та алюмінієвого волока для подальшого вивчення та розгляду доцільності застосування в термоаккумуляторах з фазовим перетворенням для низькотемпературного застосування (гаряче водопостачання та опалення) з метою підвищення ефективності таких термоаккумуляторів. Слід відзначити, що додатковою перевагою використання парафіну як ТАМФП з додаванням до 1 % за об'ємом алюмінієвого волока є менша питома маса, у порівнянні з водяними термоаккумуляторами (густина парафіну складає приблизно  $900 \text{ кг/м}^3$ , а алюмінію, одного з самих легких металів, -  $2700 \text{ кг/м}^3$ ). А з урахуванням ще й більшої кількості акумульованої теплоти на одиницю об'єму ТАС (за рахунок теплоти фазового переходу), масогабаритні розміри таких термоаккумуляторів



будуть суттєво меншими, ніж водяних. Цей фактор завжди важливий, особливо для проектування ТАС для морських судів.

### Висновки

Додавання алюмінієвого волока як до парафіну, так й до стеаринової кислоти призводить до суттєвого збільшення теплопровідності: приблизно на 78 % для ТАМФП на основі парафіну та на 80 % для ТАМФП на основі стеаринової кислоти при вмісті алюмінієвого волока не більше 1 % за об'ємом в обох композитних ТАМФП.

Не було підтверджено довгострокову хімічну стабільність композитного ТАМФП на основі стеаринової кислоти з вміст алюмінієвого волокна, тому на даному етапі дослідження зазначений ТАМФП не можна розглядати як перспективний для практичного застосування.

Композитний ТАМФП на основі парафіну та алюмінієвого волока можна рекомендувати для подальшого вивчення та розгляду доцільності застосування в термоакумуляторах з фазовим перетворенням для низькотемпературного застосування (гаряче водопостачання та опалення). Акумулятори з розглянутими ТАМФП будуть мати менші масогабаритні розміри у порівнянні з традиційними водяними баками-термоакумуляторами.

### Подяка

Автори висловлюють вдячність Національному фонду досліджень України, проект № 2020.02/0125 за фінансову підтримку наведеного дослідження.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Baldi F., Gabrielli C., Melino F., Bianchi M. A preliminary study on the application of thermal storage to merchant ships. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 75. P. 2169-2174.
2. Manzan M., Pezzi A., de Zorzi E. Z., Freni A., Frazzica A., Vaglieco B. M., ... Claudio D. Potential of thermal storage for hot potable water distribution in cruise ships. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 1105-1112.
3. Fang S., Wang H. Multi-energy Management of Maritime Grids. Optimization-Based Energy Management for Multi-energy Maritime Grids. *Springer, Singapore*. 2021. P. 149-171.
4. Regin A. F., Solanki S. C., Saini J. S. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: a review. *Renewa-*

*ble and Sustainable Energy Reviews*. 2008. Vol. 12, Issue 9. P. 2438-2458.

5. Wu S., Yan T., Kuai Z., Pan W. Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review. *Energy Storage Materials*. 2020. Vol. 5. P. 251-295.

6. Abdulateef A. M., Mat S., Abdulateef J., Sopian K., Al-Abidi A. A. Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol.82. P. 1620-1635.

7. Elfeky K. E., Ahmed N., Wang Q. Numerical comparison between single PCM and multi-stage PCM based high temperature thermal energy storage for CSP tower plants. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 139. P. 609-622.

8. Mohaghegh M. R., Alomair Y., Alomair M., Tasnim S. H., Mahmud S., Abdullah, H. Melting of PCM inside a novel encapsulation design for thermal energy storage system. *Energy Conversion and Management: X*. 2021. Vol. 11. P. 100098.

9. Gasia J., Maldonado J. M., Galati F., De Simone M., Cabeza L. F. Experimental evaluation of the use of fins and metal wool as heat transfer enhancement techniques in a latent heat thermal energy storage system. *Energy Convers. Manage.* 2019. Vol. 184. P. 530-538.

10. Nie C., Deng S., Liu J. Effects of fins arrangement and parameters on the consecutive melting and solidification of PCM in a latent heat storage unit. *J. Energy Storage*. 2020. Vol. 29. P. 101319.

11. Tariq S. L., Ali H. M., Akram M. A., Janjua M. M., Ahmad-louydarab M. Nanoparticles enhanced phase change materials (NePCMs) - A recent review. *Appl. Therm. Eng.* 2020. Vol.176. P. 115305.

12. Shaikh S., Lafdi K., Hallinan K. Carbon nanoadditives to enhance latent energy storage of phase change materials. *J. Appl. Phys.* 2008. Vol. 103 (9). P. 094302.

13. Kibria M. A., Anisur M. R., Mahfuz M. H., Saidur R., Metselaar I. H. S. C. A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials. *Energy Convers. Manage.* 2015. Vol. 95. P. 69-89.

14. Prieto C., Lopez-Roman A., Martínez N., Morera J. M., Cabeza L. F. Improvement of phase change materials (PCM) used for solar process heat applications. *Molecules*. 2021. Vol. 26(5). P. 1260.

15. Pan M., Lai W. Cutting copper fiber/paraffin composite phase change material discharging experimental study based on heat dissipation

capability of Li-ion battery. *Renewable Energy*. 2017. Vol. 114. P. 408–422.

16. Zhelezny V., Khliyeva O., Lukianov M., Motovoy I., Ivchenko D., Faik A., ... Moreira A. L. Thermodynamic properties of isobutane/mineral compressor oil and isobutane/mineral compressor oil/fullerenes C60 solutions. *International Journal of Refrigeration*. 2019. Vol. 106. P. 153-162.

17. Motovoy I. V., Zhelezny V. P., Khliyeva O. Y., Melnik Y. Y., Diachenko I. A., Dmitriev Y. D. Density, specific heat capacity and viscosity of fullerene C60 solutions in tetralin. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1683, No. 3. P. 032027.

18. Khliyeva O.Ya., Zhelezny V.P., Nikulin A.G., Lapardin M., Ivchenko D.O., Palomo del Barrio E. Paraffin wax enhanced with carbon nanostructures as phase change materials: preparation and thermal conductivity measurement. *2021 IEEE 11th International Conference on "Nanomaterials: Applications & Properties" (NAP-2021)*. Odesa, Ukraine, Sept. 5-11, 2021.

19. ГОСТ 6484-96 Кислота стеариновая техническая (стеарин), 1996.

20. Khliyeva, O.Ya., Nikulin, A.G., Zhelezny, V.P., Paskal, A.A., Semenyuk, Yu.V. Thermal conductivity of metal wool armored phase change materials for thermal energy storage. Int. conf. "Functional materials for innovative energy", Kyiv, May, 2021. P. 8.