

УДК 621.4



Heorhii V. Kuznetsov
Кузнецов
Георгій
Валерійович



Yurii M. Kharytonov
Харитонов Юрій
Миколайович

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A SILENCER-THERMAL ENERGY STORAGE UNIT MODEL FOR MARINE POWER PLANTS

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК
МОДЕЛІ ШУМОГЛУШНИКА-ТЕПЛОАКУМУЛЯТОРА
ДЛЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).09](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).09)

Heorhii V. Kuznetsov Кузнецов Георгій Валерійович, аспірант
kuznetsov_georgiy@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1028-4102

Yurii M. Kharytonov Харитонов Юрій Миколайович,
докт. техн. наук, проф.
kharytonov888@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2425-1758

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
м. Миколаїв

Abstract. The aim of the research is to obtain experimental data to confirm the effective operability of thermal energy storage systems for surface ships and vessels. The research method is based on physical modeling of periodic waste heat recovery processes with heat accumulation from exhaust gases for diesel engine pre-start preparation and for meeting general ship heat demands, as well as on the comparison of experimental results with available calculated data. The operability of the experimental model was confirmed by determining the time intervals of phase change material melting, heat storage and subsequent heat release during crystallization. The reliability of the experimental data, when compared with the calculated results, is confirmed by measurement errors not exceeding 4% and by indirectly determined heat balance errors ranging from 12 to 20%. Transient heat conduction with phase change was investigated as a two-phase process with simultaneous heat transfer in both phases, taking into account their thermophysical properties and the measured temperature field within the phase change material layer. The generalized process of internal energy increase in the phase change material, using mannitol as an example, is presented as a function of the specific temperature underheating relative to the exhaust gas temperature during the heating stages: heating in the solid state up to the melting temperature, transition to the liquid state and superheating in the liquid state up to the boiling temperature. The scientific novelty of the work lies in the experimentally obtained characteristics of a silencer-thermal energy storage unit prototype integrated into the diesel engine exhaust system, the determination of the durations of the operating cycle stages and the conditions for reducing the charging time depending on the exhaust gas temperature. The practical significance of the results lies in the recommendations for the application of thermal energy storage systems within the power plants of ships and vessels of various classes, which made it possible to develop proposals for their use in the Rules of the Register of Ukraine.

Key words: thermal energy storage system; experiment; test bench; information and measurement system; charging; storage; discharging.

Анотація. Метою дослідження є отримання експериментальних даних для підтвердження ефективної працездатності теплоакумуючих систем надводних кораблів та суден. Методом дослідження є фізичне моделювання періодичних процесів утилізації з акумулюванням теплоти відпрацьованих газів для передпускової підготовки дизельного двигуна та забезпечення загальносуднових потреб, співставлення експериментальних результатів з наявними розрахунковими. Працездатність моделі дослідного зразка підтверджена визначенням інтервалів часу плавлення теплоакумуючого матеріалу, збереження у ньому теплоти з подальшою її віддачею при кристалізації. Достовірність експериментальних даних при порівнянні з розрахунковими підтверджується значеннями похибок вимірювання, які не перевищують 4%, та опосередкованого визначення балансів теплоти з 12 до 20%. Нестационарна теплопровідність із фазовим переходом досліджувалась, як двофазна з теплообміном в обох фазах одночасно з урахуванням їх теплофізичних властивостей та вимірюваннями показників температурного поля в шарі теплоакумуючого матеріалу. Узагальнений процес збільшення внутрішньої енергії теплоакумуючого матеріалу на прикладі манітолу представлений у вигляді залежності питомої різниці температур недогріву відносно температури відпрацьованих газів на ділянках нагріву в твердому стані до температури плавлення, перехід у рідкий стан та перегрівання у рідкому стані до температури кипіння. Наукова новизна роботи полягає в експериментально отриманих характеристиках моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора в складі газопускної системи дизельного двигуна, визначенні тривалості складових циклічності його роботи та умов зменшення часу зарядки в залежності від температури відпрацьованих газів. Практична значимість результатів полягає в рекомендаціях з використання теплоакумуючих систем в складі енергетичних установок кораблів різних класів та суден, які дозволили розробити пропозиції щодо правил Регістру України про їх використання.

Ключові слова: теплоакумуюча система; експеримент; стенд; інформаційно-вимірювальна система; зарядка; збереження; розрядка.

References

- [1] Frazzica, A., Manzan, M., Palomba, V. and Vaglieco, M.B. (2022). Experimental validation and numerical simulation of a hybrid sensible–latent thermal energy storage for hot water provision on ships. *Energies*, 15(7), 2596. <https://doi.org/10.3390/en15072596>
- [2] Pandiyarajana, V., Chinna Pandianb, M., Malana, E., Velraja, R., Seeniraj, R.V. (2011). Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system. *Applied Energy*, 88, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.023>
- [3] Raja, S.P., Rajavel, R., Navaneethakrishnan, D. (2014). Experimental Investigation of Heat Recovery from Diesel Engine Exhaust Using Compact Heat Exchanger and Thermal Storage Using Phase Change Material. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 3, spec. is. 3, 2663–2670.
- [4] Wilson John, M.R., Singh, A.K., Singh, A.K. and Subramanian Ganapathy, L.R. (2017). Waste heat recovery from diesel engine using custom designed heat exchanger and thermal storage system with nanoenhanced phase change material. *Thermal science*, vol. 21, №1B, 715–727. <https://doi.org/10.2298/TSCI160426264W>
- [5] Catapano, F., Frazzica, A., Freni A., Manzan, M., Micheli, D., Palomba, V., Sementa, P., Vaglieco, B.M. (2022). Development and experimental testing of a waste-heat recovery system for naval applications. *Applied Energy*, vol. 311, №1, 118673. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118673>
- [6] Subramanian, S.P., Pandiyarajan, V., Velraj, R. (2004). Experimental Analysis of a PCM Based I.C. Engine Exhaust Waste Heat Recovery System. *International Energy Journal*, vol. 5, №2, 81–92.
- [7] Rathod, A.C., Bandela, C.V., Rehman, A.R. (2017). Experimental Study on Phase Change Material based Thermal Energy Storage System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 04, is. 11, 1833–1838. <https://doi.org/10.4303/jfrea/R120314>
- [8] Verbovsky, V.S. (2021). *Udoskonalennia protsesu teplovoi pidhotovky statsionarnykh hazovykh dvyhuniv akumulovanoi enerhiiei* [Improvement of provision of thermal preparation of stationary gas engines using accumulated energy]. (Candidate's thesis). Ukrainian State University of Railway, Kyiv.

- [9] Korinchevska, T.V. (2017). *Teplofizychni vlastyivosti teploakumuluyuchykh materialiv z fazovym per-ekhodom na osnovi orhanichnykh spoluk* [Thermophysical properties of heat storage materials with phase change based on organic compounds]. (Candidate's thesis). Ukraine National Academy of sciences: Institute of Engineering Thermophysics, Kyiv.
- [10] Ametta, M., Sapienza, A. and Vasta, S. (2026). Analysis of an Advanced Adsorption-Based Thermal Energy Storage System for Large Cruise Ships. Retrieved from https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5970666
- [11] Tay, N.H.S., Belusko, M., Bruno, F. (2012). Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system. *Applied Energy*, 90(1), 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.026>
- [12] Agyenim, F., Eames, P., Smyth, M. (2010). Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array. *Renewable Energy*, 35(1), 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.010>
- [13] Medrano, M., Yilmaz, M.O., Nogués, M., Martorell, I., Roca, J., Cabeza, L.F. (2009) Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Applied Energy*, vol. 86(10), 2047–2055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.014>
- [14] Nallusamy, N., Sampath, S., Velraj, R. (2006). Study on performance of a packed bed latent heat thermal energy storage unit integrated with solar water heating system. *Journal of Zhejiang University Science A*, 7(8), 1422–1430. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A1422>
- [15] Park, S., Woo, S., Shon, J., Lee, K. (2017). Experimental study on heat storage system using phase-change material in a diesel engine. *Energy*, 119, 1108–1118. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.063>
- [16] Gil, A., Barreneche, C., Moreno, P., Solé, C., Fernández, A. I., F. Cabeza, L. (2013). Thermal behaviour of d-mannitol when used as PCM: Comparison of results obtained by DSC and in a thermal energy storage unit at pilot plant scale. *Applied Energy*, vol. 111, 1107–1113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.081>

Постановка задачі. Впровадження в проекти надводних кораблів і суден запропонованих конструктивних рішень теплоакумуючої системи (ТАС) потребує практичного підтвердження їх працездатності за техніко-економічними та масогабаритними характеристиками. Обмеженість за ресурсами та економічна доцільність вимагає отримання таких характеристик на фізичних моделях, що виконані у масштабі щодо натурного зразка. Це дозволяє з мінімальними похибками використати результати дослідження при розробці теплоакумуючої системи у складі суднової енергетичної установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У зарубіжних наукових публікаціях наведено результати експериментальних досліджень теплових акумуляторів (ТА) на основі матеріалів з фазовим переходом, призначених для використання в двигунах і енергетичних установках. При цьому результати експериментальних досліджень для суднових енергетичних установок (СЕУ) наразі представлені в обмеженій

кількості публікацій, тоді як більшість наявних експериментальних даних отримано для автомобільних і стаціонарних двигунів, що розглядаються як фізично та теплотехнічно близькі аналоги суднових двигунів.

У роботі [1] для суднових енергетичних систем експериментально вивчено гібридний ТА явної та прихованої теплоти для гарячого водопостачання суден. Конструкція включає бак об'ємом 0,1 м³ з макрокапсулами теплоакумуючого матеріалу (ТАМ) загальним об'ємом до 0,04 м³. Теоретична енергоемність гібридного накопичувача становила 3,62 кВт·год, тоді як для чутливої теплоти – 2,15 кВт·год, що відповідає зростанню густини запасу енергії з 20,5 до 35,2 кВт·год/м³.

Експериментальні дослідження комплексної системи утилізації теплоти для морського застосування наведені в [5]. Показано, що теплота, відновлена у вигляді гарячої води, становить близько 7,7% від енергії палива в умовах імітації круїзних профілів, тоді як електрична складова (ORC та двигун Стірлінга) забезпечує близько 1%. Для

ТА зафіксовано можливість досягнення питомих потужностей порядку 120-180 кВт/м³ та густину запасеної енергії порядку 29-52 кВт·год/м³ у діапазоні температур зарядження 65-80 °С.

У роботі [2] експериментально досліджено систему рекуперації скидної теплоти відпрацьованих газів дизельного двигуна з використанням оребреного кожухотрубного теплообмінника та теплового акумулятора з ТАМ – парафін. У якості теплоносія застосовано рицинову олію, а ТАМ мав температуру плавлення близько 60 °С та питому теплоту плавлення 213 кДж/кг. Отримані результати підтвердили можливість стабільного відбору теплоти від системи газів вихлопу двигуна і її накопичення в ТАС у робочому температурному діапазоні систем допоміжного теплопостачання.

Подальший розвиток цього напрямку представлено в роботах [3, 4, 6], де досліджено компактні теплообмінники у поєднанні з ТА фазового переходу для утилізації теплоти відпрацьованих газів дизельних двигунів. Зокрема, у [4] показано, що застосування нанопосиленого ТАМ у ТА дозволяє підвищити інтенсивність теплопередачі та забезпечити стабільну роботу системи утилізації теплоти вихлопу при змінних режимах навантаження двигуна. У роботі [6] наведено результати експериментів, згідно з якими сумарна акумульована теплота в накопичувачі досягала 19,5 МДж, що забезпечило інтегральний ефект у вигляді 10–15% економії палива при використанні накопиченої енергії для допоміжних потреб двигуна.

Експериментальні роботи з фундаментальним дослідженням властивостей теплоакумулюючих матеріалів наведені у [7-9]. У роботі [7] для солегідратних ТАМ ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) визначено температури фазового переходу 29-32 °С та питому теплоту плавлення 190-267 кДж/кг, що підтверджує їх високу питому енергоємність при малих об'ємах. У дисертаційних дослідженнях [8, 9] експериментально підтверджено працездатність ТА у діапазоні температур 45-85 °С з урахуванням реальних теплофізичних властивостей органічних ТАМ.

Окремий напрям експериментальних досліджень теплових акумуляторів для суднових енергетичних систем представлений у роботі [10], де розглянуто адсорбційний тепловий акумулятор для великих круїзних суден. Запропонована система базується на парі silica gel–water та орієнтована на довготривале зберігання теплоти. Для лабораторного прототипу показано досягнути енергоємність порядку 800 Вт·год, що підтверджує експериментальну реалізованість адсорбційних ТАС як альтернативи або доповнення до ТАС з фазовим переходом у суднових умовах [10].

Додаткові експериментальні дослідження ТА з фазовим переходом наведено у роботах [11, 12, 14]. У роботі [11] експериментально досліджено процеси плавлення і кристалізації теплоакумулюючого матеріалу в трубчастому ТА, що дозволило оцінити динаміку теплопереносу під час фазового переходу. В експериментальних дослідженнях [12] показано інтенсифікацію теплообміну в ТА при використанні багатотрубною конфігурації теплообмінника, що сприяє скороченню тривалості зарядження системи. У роботі [14] експериментально досліджено packed-bed тепловий акумулятор з капсульованим теплоакумулюючим матеріалом та встановлено вплив витрати теплоносія на характеристики процесів зарядки та розрядки.

Порівняння розрахункових і експериментальних характеристик ТА на основі ТАМ з фазовим переходом є необхідним етапом верифікації математичних моделей теплопереносу та фазового переходу. У більшості відомих публікацій такі порівняння виконано для ТА, призначених для автомобільних і стаціонарних двигунів, які використовують теплоту відпрацьованих газів або допоміжних теплових контурів, однак отримані закономірності мають універсальний характер і можуть бути застосовані при моделюванні СЕУ.

У роботі [1] показано, що похибка експериментального визначення потужності та енергії не перевищує $\approx 3\%$ та $\approx 5\%$ відповідно, що забезпечує коректне зіставлення результатів із розрахунковими моделями.

Отримані результати також свідчать, що гібридна конфігурація *sensible-latent* забезпечує збільшення корисно відданої енергії приблизно на 30% порівняно з чутливою схемою, тоді як за неоптимальних температур зарядження приріст зменшується до 15–20%.

Експериментальні дані стендових випробувань [5] використано для масштабування на рівень суднової енергетичної системи. За тривалості експериментального профілю 168 хв та потужності двигуна 16 кВт отримано еквівалентно акумульовану енергію $\approx 500\text{--}520 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, що демонструє узгодженість експериментальних результатів із системними енергетичними розрахунками.

Результати порівняння експериментально визначених теплофізичних характеристик ТАМ із розрахунковими моделями наведено у роботах [7–9], при цьому відхилення між експериментальними та розрахунковими значеннями теплоємності та ентальпії фазового переходу не перевищило $\approx 5\%$.

У роботі [10] також виконано зіставлення експериментальних характеристик адсорбційного ТА з результатами розрахункового аналізу. Показано, що енергетичні показники лабораторного прототипу (енергоємність $\approx 800 \text{ Вт}\cdot\text{год}$) узгоджуються з теоретичними оцінками, отриманими на основі термодинамічної моделі адсорбційного циклу, що підтверджує коректність застосованих розрахункових підходів для оцінки процесів зарядки та збереження теплоти в TES адсорбційного типу [10].

Результати порівняння експериментальних і розрахункових характеристик теплових акумуляторів додатково підтверджено у роботах [13, 15]. Зокрема, за результатами експериментальної оцінки теплообмінників у складі ТА [13] встановлено узгодженість експериментальних даних з інженерними розрахунками процесів акумулювання теплоти. У роботі [15] експериментально підтверджено ефективність застосування теплового акумулятора з фазовим переходом у системах дизельних двигунів при різних режимах їх роботи, що свідчить про коректність використання розрахункових моделей для оцінювання енергетичних характеристик таких систем.

Таким чином, результати порівняння розрахункових і експериментальних характеристик підтверджують можливість використання верифікованих CFD- та інженерних моделей для аналізу процесів зарядки, збереження та розрядки теплових акумуляторів. Це створює методичну основу для подальшого застосування таких моделей при дослідженні теплоакumuлюючих систем у складі суднових енергетичних установок з урахуванням масштабування потужності, нестационарних режимів та особливостей експлуатаційного циклу судна.

Узагальнення результатів експериментальних досліджень та розрахунково-експериментальної верифікації, наведених у роботах [1–10], дозволяє обґрунтувати доцільність застосування теплових акумуляторів на основі матеріалів з фазовим переходом у складі ТАС для двигунів і енергетичних установок. Отримані експериментальні дані підтверджують, що такі системи забезпечують ефективне акумулювання теплоти вторинних теплових джерел та її подальше використання в періоди часткового навантаження або зупинки двигуна.

На основі аналізу експериментальних і розрахункових досліджень [1–10] можна зробити висновок про доцільність застосування ТА у складі систем утилізації відпрацьованої теплоти двигунів і енергетичних установок.

Для дизельних двигунів застосування ТА із температурою фазового переходу $45\text{--}60^\circ\text{C}$ [2, 6, 8] дозволяє ефективно використовувати низькопотенційну теплоту відпрацьованих газів, що підтверджується досягненням 10–15% економії палива [6].

В СЕУ теплові акумулятори забезпечують покриття теплових навантажень типу «hotel load» та зменшують потребу у роботі допоміжних котлів. Експериментальні результати [5] показують, що частка теплоти, утилізованої у вигляді гарячої води, може досягати $\approx 7,7\%$ енергії палива, а високі питомі показники ($120\text{--}180 \text{ кВт}/\text{м}^3$) роблять такі системи придатними для обмежених суднових об'ємів.

Гібридні теплові акумулятори явної та прихованої теплоти [1], а також перспек-

тивні сорбційні системи зберігання теплоти [10], які характеризуються енергоємністю прототипів порядку 800 Вт·год, демонструють потенціал подальшого розвитку теплоакumuлюючих систем для великих круїзних суден.

Узагальнення результатів робіт [11–15] додатково підтверджує, що конструкція теплообмінника та режимні параметри теплоносія є визначальними для інтенсивності зарядження/розрядження ТА і ефективності їх застосування у системах дизельних двигунів.

Таким чином, результати експериментальних досліджень і їх узагальнення дозволяють сформулювати обґрунтовані пропозиції щодо застосування теплових акумуляторів у складі теплоакumuлюючих систем для двигунів і енергетичних установок, а також створюють науково-технічну основу для подальших досліджень і розробки судових теплоакumuлюючих систем з урахуванням реальних експлуатаційних циклів.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. З метою застосування в ТАС теплових акумуляторів з фазовим переходом необхідно для трьох джерел бросової теплоти – відпрацьовані гази, охолоджуюча рідина та мастило визначити потенціал резервів для задоволення загальносуднових потреб; обґрунтувати достовірність наукових результатів для застосування зразків теплових акумуляторів у складі ТАС; сформулювати пропозиції для Регістру України щодо застосування ТАС у складі СЕУ.

Метою даного дослідження є отримання експериментальних даних щодо підтвердження ефективної працездатності моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоакumuлятора в складі ТАС надводних кораблів та суден.

Досягнення даної мети зводиться до вирішення наступних завдань:

- експериментально підтвердити працездатність моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоакumuлятора шляхом визначення інтервалів часу плавлення теплоакumuлюючого матеріалу, збереження у

ньому теплоти з подальшою її віддачею при кристалізації для забезпечення загальносуднових потреб;

- обґрунтувати відповідність отриманих експериментальних і розрахункових характеристик дослідного зразка шумоглушника-теплоакumuлятора в умовах експлуатаційних циклів судна;

- розробити пропозиції щодо правил Регістру України про використання ТАС в складі енергетичних установок суден.

Методом дослідження є фізичне моделювання періодичних процесів утилізації з акумулюванням теплоти відпрацьованих газів для передпускової підготовки дизельного двигуна та забезпечення загальносуднових потреб, співставлення експериментальних результатів з наявними розрахунковими.

Об'єкт дослідження є процеси утилізації скидної теплоти дизельного двигуна, її акумуляції та споживання при фазових переходах з визначенням енергоефективності шумоглушника-теплоакumuлятора (ШГТА) ТАС в СЕУ.

Предмет дослідження є параметри та закономірності процесів утилізації та акумуляції скидної теплоти з урахуванням експлуатаційного циклу дизельного двигуна та показники ефективності використання ШГТА в залежності від конструкції його елементів.

Основний матеріал. З метою економії матеріальних ресурсів проведення випробувань експериментальної моделі системи виконано в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова в лабораторії кафедри Двигунів внутрішнього згоряння, установки та технічної експлуатації на стенді з дизельним двигуном СМД-19. Для цього на ділянці газоходу відпрацьованих газів за турбіною газотурбокомпресора через проставку встановлена повнорозмірна частина дослідного зразка ШГТА. Схема та загальний вигляд експериментального зразка моделі ШГТА у складі стенду наведені на рис. 1.

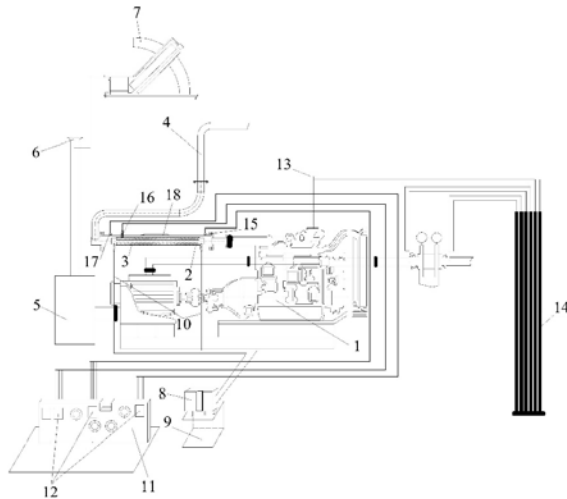
Програма проведення експерименту включає:

- обґрунтування обсягу експерименту при експлуатаційній потужності двигуна при

числі дослідів 3 для повного розплавлення теплоакумуючого матеріалу – манітол;

– опис проведення експерименту щодо плавлення теплоакумуючого матеріалу, збереження у ньому теплоти з подальшою її віддачею при кристалізації;

– обґрунтування засобів вимірювань при визначенні розподілу температур відпрацьованого газу та манітолу за часом;



а)



б)

Рис. 1. Стенд з експериментальним зразком моделі ШГТА: 1 – дизельний двигун СМД-19; 2 – модель дослідного зразка ШГТА; 3 – теплоакумуючий матеріал; 4 – газохід; 5 – заспокійливий бак; 6 – звужувальний пристрій; 7 – мікроманометр ММН-240; 8 – ємність термостату; 9 – насос; 10 – трубопроводи; 11 – пульт інформаційно-вимірювальної системи; 12 – багатофункціональний двоканальний вимірювач-регулятор ОВЕН2ТРМ1; 13 – лемніската; 14 – п'єзометри; 15, 16, 17 – гребінка термопар ТХК 5-ти точкова, 18 – термометр

– обґрунтування способів обробки та аналізу результатів експерименту для визна-

чення нестационарних залежностей полів температур та рідинної складової манітолу.

Крім перерахованих вище пунктів, програма експерименту включає: план факторного експерименту, список приладів, їх метрологічних характеристик та опис стенду.

Значення похибок прямих вимірювань приведені у таблиці 1. Похибки опосередкованого визначення значень оцінювались за виразами:

– витрат повітря

$$\Delta G_{\text{па}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial B} \Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial h} \Delta h\right)^2},$$

– витрат палива

$$\Delta G_{\text{па}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial h} \Delta h\right)^2},$$

– балансу теплоти

$$\Delta Q = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial G} \Delta G\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial T} \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial c} \Delta c\right)^2}.$$

Відносні значення, яких відповідно склали $\delta G_{\text{пов}} = 2,3\%$, $\delta G_{\text{пал}} = 2,0\%$ та $\delta Q = 8,4\%$.

Особливість випробувань характеризується проведенням досліджень в умовах реальної експлуатації ТАС, починаючи від запуску двигуна і його прогріву, виходу на експлуатаційний режим і роботи при квазі-стабілізованих показниках. Тому загальний процес випробувань представлений у вигляді ділянок нестационарних від запуску до «холостого ходу» і «холостого ходу» до часткового навантаження приводу роторно-лопатевого компресора для охолоджувача надувного повітря і стаціонарного – роботи на привід.

Загальний час випробувань склав 45 хвилин і включав 11 хвилин – частковий нагрів ТАМ в твердому стані від початкової температури $6,8^\circ\text{C}$ до температури нижче температури плавлення 132°C ; 26 хвилин – нагрівання ТАМ у твердому стані до температури плавлення і його перехід у рідкий стан з 8 хвилин – перегрівання ТАМ у рідкому стані до температури кипіння $280\text{--}285^\circ\text{C}$ (рис. 2).

Збереження теплоти в ШГТА з подальшою її віддачею при кристалізації для забезпечення потреб в теплоті пов'язано з

визначенням питомого значення потоку теплових втрат для розрахунку товщини прошарку теплової ізоляції. За умови безпеки при температурі поверхні ізоляції ШГТА на рівні 45 °С значення потоку теплових втрат повинно бути на рівні близько 400 Вт/м², що досягається прошарком теплової ізоляції товщиною 50 мм з матеріалу Rockwool SeaRox WM 640.

Перевірка за балансом теплоти визначалась відповідністю теплового потоку на вході сумі

теплових потоків до ТАМ і втрат з поверхні. Відносна похибка розрахована за виразом

$$\delta = \frac{Q_{TAM} + Q_{вт} - Q_{ex}}{Q_{ex}} \cdot 100\%.$$

Баланси теплоти для трьох ділянок випробувань процесів підведення теплоти в капсулі з ТАМ представлені у таблиці 2, а відповідні значення показників ефективності ТАС у таблиці 3.

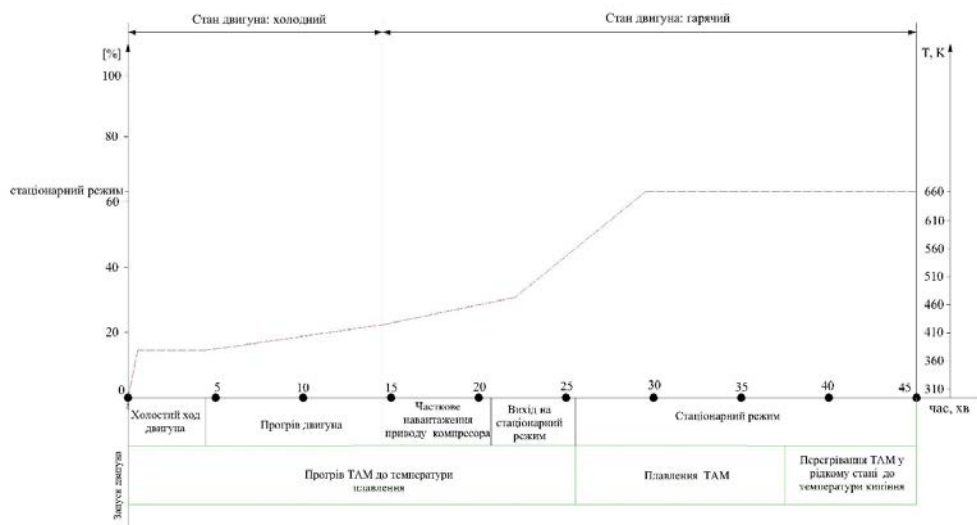


Рис. 2. Схема проведення дослідження ШГТА

Таблиця 1. Значення основних похибок засобів вимірювання

Середовище	Параметр, одиниця виміру	Діапазон	Прилад	Відносна похибка, %
Повітря	Температура, °С	15...20	Термометр ТЛ-4	±0,3
Газ до ГТА		250...270	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±2,5
Газ після ГТА		240...260	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±2,5
Манітол		20...170	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±4,0
Охолоджувальна рідина		20...50	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±6,0
Атмосферне повітря	Тиск, кПа	100...110	Барометр-анероїд БАММ-1	±0,5
Повітря на вході в дизель		80...150	Манометр зразковий	±1
Паливо	Рівень, мм	0...200	Водяний U-образний п'єзометр	±1
Поверхня зразка	Температура, °С	0...200	Рівнемірна колонка	±0,5
Теплофізичний процес	Час, с	0...3600	Термометр ТЛ	±1
			Секундомір	±1

Таблиця 2. Баланси теплоти для ділянок випробувань процесів підведення теплоти в капсулі з ТАМ

Час, с	780	960	1140	1320	1560	2160
Тепловий потік, кВт						
Вхідний	4,61	4,72	4,76	2,68	2,43	3,87
Утилізований	15,59	14,82	13,98	—	—	—
Нагрів твердого ТАМ	5,04	5,19	5,23	—	—	—
Плавлення ТАМ	—	—	—	2,93	2,51	—
Перегрів рідкого ТАМ	—	—	—	—	—	4,41
Втрат	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4
Похибка балансу, %	13,7	14,2	14,1	20,5	19,8	12,2

Таблиця 3. Показники ефективності моделі ТАС

Час, с	780	960	1140	1320	1560	2160
$\eta_{\text{ТАС}}$	0,323	0,350	0,374	0,223	0,197	0,450
$E_{\text{Т}}$	0,136	0,147	0,157	0,094	0,083	0,189

Обґрунтування відповідності отриманих експериментальних і розрахункових характеристик дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора в умовах експериментального дослідження виконано для підтвердження достовірності математичної моделі. Розрахункове обґрунтування інтервалів часу плавлення теплоакуюлюючого матеріалу виконано методами обчислювальної гідродинаміки. Результати порівняння експериментальних і розрахункових температур ТАМ дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора надані на рис. 3.

Результати випробування експериментальної моделі ТАС з ШГТА підтвердили її відповідність Правилам класифікації та побудови морських суден Регістру судноплавства України в розділі 11 Газовипускна система. Для оцінки зниження рівня шуму судових двигунів при використанні ШГТА відповідно ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги.

Сумарне зниження рівня шуму визначалося за рахунок розширення потоку відпрацьованих газів та зниження його температури за рахунок теплообміну. Ці величини ослаблення шуму визначаються для третьо-

ктивних полос зі стандартизованими значеннями середньгеометричних частот: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц.

Розрахункова величина ослаблення рівня шуму $\Delta L_{\text{гш}}$ за залежністю

$$\Delta L_{\text{гш}} = 10 \lg \left[1 + 0.25 \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \bar{f} \right) \right],$$

де $m = S_{\text{к}}/S_{\text{тр}}$ – коефіцієнт розширення, що характеризує відношення площі проходного перерізу розширювальної камери $S_{\text{к}}$ до площі перерізу трубопроводу газовипускної системи $S_{\text{тр}}$; $\bar{f} = f/f_m$ – безрозмірна частота, яка являє собою відношення середньгеометричних частот третьоктавних полос f до характеристичної частоти глушника $f_m = c/4l_{\text{к}}$; $c = \sqrt{kRT}$ – швидкість звуку у відпрацьованих газах, м/с; $k=1,34$; $R = 287$ Дж/(кг·К); T – температура газів на вході у глушник, К; $l_{\text{к}}$ – довжина розширювальної камери, м.

Для розрахунку швидкості звуку температура потоку приймається як $T_1 = T_{\text{г}} - \Delta T$, де $T_{\text{г}}$ – температура газів після двигуна, К; ΔT – значення охолодження газів у випускному тракту, в залежності від довжини випускного тракту.

Використання запропонованої конструкції ШГТА без інтенсификаторів теплопередачі дозволяє одночасно з акумуляцією

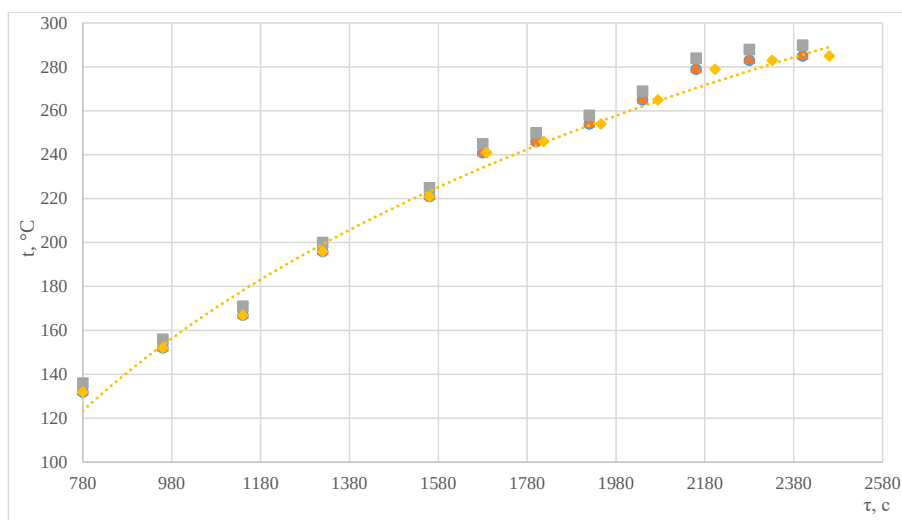


Рис. 3. Результати порівняння експериментальних і розрахункових температур ТАМ дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора в умовах експериментального дослідження: ●, ▲, ■ – виміряні, ◆ – розрахункові

теплоти для загальносуднових потреби знизити рівень акустичного тиску. Результати оцінки зміни акустичного тиску при використанні ШГТА представлені у таблиці 4. Отримані результати свідчать, що завдяки використанню ТАС можливе додаткове зниження рівня акустичного тиску.

Таблиця 4. Зниження рівня шуму при використанні ШГТА

Рівень звукового тиску, дБ	Середньгеометричні частоти октавних ділянок f , Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_{\text{доп}}$	95	87	82	78	75	73	71	69
$\Delta L_{\text{ШГТА}}$	1,26	0,82	1,45	0,02	0,09	0,32	0,97	1,37

Для впровадження ТАС в складі СЕУ доцільна пропозиція щодо доповнення Правил класифікації та побудови морських суден Регістру судноплавства України шляхом, розділу 11 Газовипускна система, підрозділу 11.2 Глушники та іскрогасники умовами безпечного використання ШГТА.

Обговорення отриманих результатів.

Методологічною базою моделювання процесів в експериментальному зразку теплоакумлюючої системи є теорія подібності, яка дозволяє використовувати отримані результати експериментів для розробки повнорозмірних систем.

Критеріями якими забезпечувалася подібність окремих процесів в умовах експерименту були наступні: числа Рейнольдса, Нусельта і Прандтля для теплообміну те-

плоносіїв джерел теплоти – відпрацьовані газу; числа Біо і Фур'є для нестационарної теплопровідності без фазового переходу ТАМ.

Нестационарна теплопровідність із фазовим переходом розглядалась як двофазна, коли теплообмін відбувається в обох фазах одночасно, з урахуванням їх теплофізичних властивостей на підставі прямих вимірювань показників температурного поля в шарі ТАМ. Тому узагальнений процес збільшення внутрішньої енергії ТАМ при фазовому переході на прикладі манітолу представлений у вигляді залежності питомої різниці температур недогріву відносно температури відпрацьованих газів на ділянках нагріву в твердому стані до температури плавлення, перехід у рідкий стан та перегрівання у рідкому стані до температури кипіння має вигляд, що представлений на рисунку 4.

Залежності такого вигляду для різних ТАМ дають можливість раціонального їх використання при розробці повнорозмірного устаткування.

Метою виконаних експериментальних дослідження було отримання достовірних даних щодо підтвердження ефективної працездатності моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора в складі ТАС надводних кораблів та суден. Загальна достовірність результатів обґрунтовувалася балансами теплоти для ділянок випробувань процесів підведення теплоти в капсу-

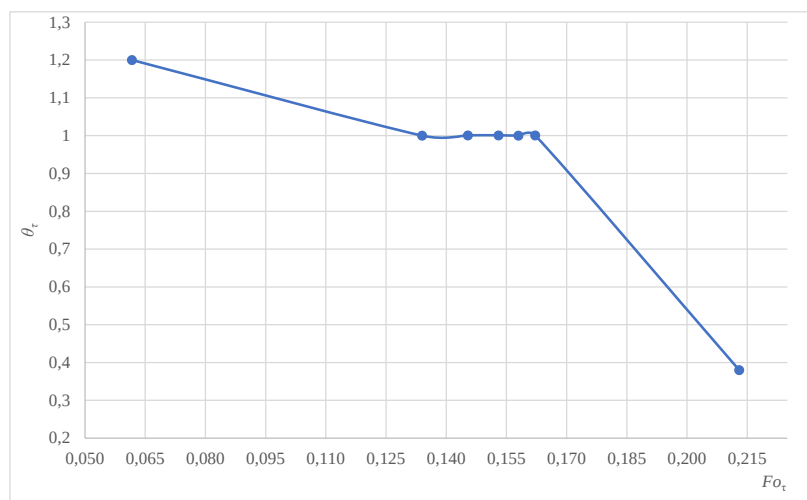


Рис. 4. Узагальнений процес збільшення внутрішньої енергії ТАМ при фазовому переході на прикладі манітолу ($\theta_{\tau} = f(R, Bi, Fo_{\tau})$)

лі з ТАМ. Отримані значення відносної похибки балансу складала від 12 до 20%, хоча за попередніми розрахунками в програмі проведення експерименту оцінка балансу теплоти не перевищувала 12%. Однією з причин такої різниці може бути відхилення дійсних значень теплофізичних властивостей манітолу від довідникових даних на рівні до 20%, а іноді вище [16].

Для впровадження ТАС в складі СЕУ доцільно доповнення Правил класифікації та побудови морських суден Регістру судноплавства України шляхом, розділу 11 Газовипускна система, підрозділу 11.2 Глушники та іскрогасники умовами безпечного використання ШГТА.

Висновки

1. Оцінка інтервалу часу повного розплавлення 3 кг теплоакumuлюючого матеріалу манітола з початкової температури 8 °С до 166 °С отримана починаючи від запуску двигуна і його прогріву, виходу на експлуатаційний режим і роботи при квазістабілізованих показниках до потужності 0,63 від номінальної склав 37 хвилин з подальшим 8 хвилин – перегрівання теплоакumuлюючого матеріалу у рідкому стані до температури кипіння 280–285 °С.

2. Час збереження теплоти в шумоглушнику-теплоакumuляторі забезпечується його конструктивними властивостями двошарової ізоляцією Rockwool SeaRox WX 640.

3. Достовірність експериментальних даних для порівняння з розрахунковими значен-

нями математичної моделі підтверджується значеннями похибок вимірювання, які не перевищують 4% та похибок опосередкованого визначення балансів теплоти з 12 до 20%.

4. Вперше експериментально отримані характеристики моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоакumuлятора з однією капсулою, яка вміщає 3 кг теплоакumuлюючого матеріалу манітол, призначеного для роботи в складі газовипускної системи дизельних двигунів, та визначено, що тривалість циклічності його роботи в режимі зарядки не перевищує 30 хвилин часу від запуску до «холостого ходу» і «холостого ходу» до часткового навантаження при витратах і температурі відпрацьованих газів відповідно від 0,11 до 0,16 кг/с та від 440 до 650 К, а зменшення значення часу зарядки до 20 хвилин забезпечується на подальших циклах зарядки при температурах відпрацьованих газів на рівні 660 К.

5. Отримані результати є вихідними даними для подальших досліджень в напрямі узагальнення нестационарних процесів теплопровідності з фазовими переходами методом теорії подібності з використанням концепції ефективної теплоємності для теплоакumuлюючих матеріалів з різними теплофізичними властивостями, яка відрізняється тим, що враховує особливості теплопередачі за допомогою детальних механізмів енергозбереження в умовах взаємодії зон фазового переходу з потоками зовнішніх теплоносіїв.

Список літератури

- [1] Frazzica, A., Manzan, M., Palomba, V., Vaglieco, M.B. (2022). Experimental validation and numerical simulation of a hybrid sensible–latent thermal energy storage for hot water provision on ships. *Energies*, 15(7), 2596. <https://doi.org/10.3390/en15072596>.
- [2] Pandiyarajana, V., Chinna Pandianb, M., Malana, E., Velraja, R., Seeniraj, R.V. (2011). Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system. *Applied Energy*, 88, 77–87. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.023>.
- [3] Raja, S.P., Rajavel, R., Navaneethakrishnan, D. (2014). Experimental Investigation of Heat Recovery from Diesel Engine Exhaust Using Compact Heat Exchanger and Thermal Storage Using Phase Change Material. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 3, spec. is. 3, 2663–2670.
- [4] Wilson John, M.R., Singh, A.K., Singh, A.K. and Subramanian Ganapathy, L.R. (2017). Waste heat recovery from diesel engine using custom designed heat exchanger and thermal storage system with nanoenhanced phase change material. *Thermal science*, vol. 21, №1B, 715–727. <https://doi.org/10.2298/TSCI160426264W>.

- [5] Catapano, F., Frazzica, A., Freni, A., Manzan, M., Micheli, D., Palomba, V., Sementa, P., Vaglieco, B.M. (2022). Development and experimental testing of a waste-heat recovery system for naval applications. *Applied Energy*, vol. 311, №1, 118673. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118673>.
- [6] Subramanian, S.P., Pandiyarajan, V., Velraj, R. (2004). Experimental Analysis of a PCM Based I.C. Engine Exhaust Waste Heat Recovery System. *International Energy Journal*, vol. 5, №2, 81–92.
- [7] Rathod, A.C., Bandela, C.V., Rehman, A.R. (2017). Experimental Study on Phase Change Material based Thermal Energy Storage System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 04, is. 11, 1833–1838. <https://doi.org/10.4303/jfrea/R120314>.
- [8] Вербовський, В.С. (2021). *Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових двигунів акумульованою енергією*. (Дис. канд. техн. наук). Український державний університет залізничного транспорту, Київ.
- [9] Корінчевська, Т.В. (2017). *Теплофізичні властивості теплоакumuлюючих матеріалів з фазовим переходом на основі органічних сполук*. (Дис. канд. техн. наук). Національна академія наук України: Інститут технічної теплофізики, Київ.
- [10] Ametta, M., Sapienza, A. and Vasta, S. (2026). Analysis of an Advanced Adsorption-Based Thermal Energy Storage System for Large Cruise Ships. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5970666.
- [11] Tay, N.H.S., Belusko, M., Bruno, F. (2012). Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system. *Applied Energy*, 90(1), 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.026>.
- [12] Agyenim, F., Eames, P., Smyth, M. (2010). Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array. *Renewable Energy*, 35(1), 198–207. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.010>.
- [13] Medrano, M., Yilmaz, M.O., Nogués, M., Martorell, I., Roca, J., Cabeza, L.F. (2009) Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Applied Energy*, vol. 86(10), 2047–2055. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.014>.
- [14] Nallusamy, N., Sampath, S., Velraj, R. (2006). Study on performance of a packed bed latent heat thermal energy storage unit integrated with solar water heating system. *Journal of Zhejiang University Science A*, 7(8), 1422–1430. <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A1422>.
- [15] Park, S., Woo, S., Shon, J., Lee, K. (2017). Experimental study on heat storage system using phase-change material in a diesel engine. *Energy*, 119, 1108–1118. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.063>.
- [16] Gil, A., Barreneche, C., Moreno, P., Solé, C., Fernández, A. I., F. Cabeza, L. (2013). Thermal behaviour of d-mannitol when used as PCM: Comparison of results obtained by DSC and in a thermal energy storage unit at pilot plant scale. *Applied Energy*, vol. 111, 1107–1113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.081>

© Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М.

Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 12.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0