

УДК 621.4

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2023.1\(490\).16](https://doi.org/10.15589/znп2023.1(490).16)**MATHEMATICAL MODEL OF THE HEAT STORAGE SYSTEM
AS PART OF A SURFACE SHIP POWER PLANT****МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ СИСТЕМИ
У СКЛАДІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ НАДВОДНОГО КОРАБЛЯ**

Heorhii V. Kuznetsov
kuznetsov_georgiy@ukr.net
ORCID: 0000-0002-1028-4102

Г. В. Кузнецов,
аспірант, інженер-конструктор

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv
State Research and Design Shipbuilding Centre, Mykolaiv*

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв
ДП Дослідно-проектний центр кораблебудування, м. Миколаїв*

Abstract. The article presents a mathematical model of a heat storage system as part of a ship's power plant and the results of calculations based on the proposed mathematical model in optimising the choice of heat storage material with regard to the phase transition during the heat storage process.

The purpose of the research is the developing of an applied methodology for a heat storage system as part of a ship's power plant, taking into account the use of the stored heat for the needs of thermal engines and ship-wide systems.

The object of research is the processes of utilisation, storage and use of heat from ship power plants by heat storage systems for the plant's own needs and ship-wide systems. The subject of the research is the parameters of the heat storage system processes during pre-start-up, start-up, loading and shutdown of the power plant.

The research method is the mathematical modelling of heat utilization processes of the heat engine working fluids for its accumulation and use in the ship power plant and for ship-wide needs.

As the result of the research, a mathematical model of the heat storage system was developed, which takes into account the peculiarities of using different thermal engines in the ship's power plant, its structure and operating conditions. This approach makes it possible to optimize, if necessary, the following: the structure of the heat storage system, taking into account consumption for general ship needs; promising directions and volumes of possible heat flows from the elements of the ship's power plant and their sources; the predicted technical result; taking into account possible fluctuations in heat demand during ship idle time; prediction of the influence of the thermal properties of heat storage materials on the duration of the components of the processes of storage, discharge, and charging of heat storage system. The practical significance of the work lies in the fact that the proposed mathematical model allows to substantiate the schematic solution of a power plant with a heat storage system, provided that its technical and economic characteristics meet the parameters of the ship's tactical and technical task.

Key words: thermal storage accumulator; waste heat; ship-wide needs; heat source; pre-heating of engine.

Анотація. У статті надано математичну модель теплоакumuлюючої системи у складі корабельної енергетичної установки та результати розрахунків за запропонованою математичною моделлю при оптимізації вибору теплоакumuлюючого матеріалу з урахуванням фазового переходу при процесі зберігання теплоти.

Метою дослідження є розроблення прикладної методології теплоакumuлюючої системи у складі корабельної енергетичної установки з урахуванням використання акумульованої теплоти на потреби теплових двигунів та загальнокорабельних систем.

Об'єктом дослідження є процеси утилізації, зберігання та використання теплоти корабельних енергетичних установок теплоакumuлюючими системами для власних потреб установки та загальнокорабельних систем.

Предметом дослідження є параметри процесів теплоакumuлюючої системи при передпусковій підготовці, запуску, навантаженні та зупинці енергетичної установки.

Метод дослідження – математичне моделювання процесів утилізації теплоти робочих середовищ теплового двигуна для її акумулювання та використання в корабельній енергетичній установці та на загальнокорабельні потреби.

В результаті дослідження розроблено математичну модель теплоакumuлюючої системи, що враховує особливості використання в складі корабельної енергетичної установки різних теплових двигунів, її структуру

і умови експлуатації. Даний підхід дозволяє оптимізувати за необхідністю: структуру теплоакumuлюючої системи з урахуванням споживання на загальнокорабельні потреби; перспективні напрямки та обсяги можливих теплових потоків від елементів корабельної енергетичної установки та їхніх джерел; прогнозований технічний підсумок з урахуванням можливих коливань попиту теплоти під час простою корабля; прогнозування впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів на тривалість складових процесів зберігання, розрядки, зарядки теплоти теплоакumuлюючої системи з урахуванням відбору на загальнокорабельні потреби. Практична значимість роботи полягає в тому, що запропонована математична модель дозволяє обґрунтувати схемне рішення енергетичної установки з теплоакumuлюючою системою при відповідності її техніко-економічних характеристик показникам тактико-технічного завдання корабля.

Ключові слова: тепловий акумулятор; бросова теплота; загальнокорабельні потреби; джерело теплоти; передпускова підготовка двигуна.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Використання бросової теплоти корабельної енергетичної установки (КЕУ) є резервом скорочення витрати палива. Акумулювання частини цієї теплоти для загальнокорабельних і власних потреб КЕУ можливе з допомогою теплоакumuлюючої системи (ТАС) на основі теплового акумулятора з фазовим переходом. Джерелами теплоти для акумулювання є відпрацьовані гази, охолоджувальна вода і мастило головного та допоміжних двигунів. Споживачами акумульованої теплоти є система передпускової підготовки двигуна і загальнокорабельні системи для власних потреб екіпажу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Виконаний аналіз проведених наукових досліджень показав, що більшість з них в даному напрямку сконцентровані на визначенні та підборі ефективних теплоакumuлюючих матеріалів та подальшому визначенні масогабаритних показників та конструкції теплових акумуляторів при їх інтеграції у системи теплової підготовки двигуна. За результатами досліджень визначені час теплової підготовки двигуна внутрішнього згорання, показники паливної економічності та зменшення викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище двигуна, виконана розробка відповідних схемних рішень [1-6].

У роботах [7-9] на прикладі допоміжного двигуна 6Ч 12/14 з урахуванням температури оточуючого середовища при виконанні передпускового і післяпускового прогріву та забезпечення необхідного теплового стану двигуна при міжзмінній зупинці без його запуску чи постійній роботі в режимі холостого ходу визначено склад та налаштування системи теплової підготовки.

У роботах [10-12] за результатами проведених експериментальних досліджень продемонстровано можливість модернізації системи охолодження суднового двигуна MAN D2876 LE301 портового буксира за рахунок встановлення теплового акумулятора з фазовим переходом до системи охолодження. Акумулятор заряджається від відпрацьованих газів двигуна під час його роботи, а в проміжках часу стоянки

судна в порту або на рейді, використовується накопичена теплова енергія теплового акумулятора для підтримання системи охолодження в заданих температурних межах без використання стандартних способів підігріву суднового двигуна внутрішнього згорання. Доведено можливість використання технології передпускової теплової підготовки суднового двигуна буксира портового флоту для зменшення часу запуску двигуна та зменшення витрати палива у випадку коли судновий двигун внутрішнього згорання під час стоянки в порту не працює, а судно живиться електроенергією від берегової електромережі.

Результати цих досліджень підтверджують перспективність напрямку модернізації корабельних енергетичних установок з використанням в їх складі ТАС.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

При розгляді процесів зберігання та розрядки теплового акумулятора в неповній мірі досліджено вибір теплоакumuлюючого матеріалу, при сталих габаритних показниках з урахуванням процесів теплопередачі, складу теплоакumuлюючої системи та джерел теплових потоків з урахуванням теплофізичних властивостей теплоносіїв та гідравлічних втрат при їх переміщенні.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Розробити прикладну методологію, як сукупність принципів та підходів математичного моделювання теплоакumuлюючої системи у складі КЕУ з урахуванням використання акумульованої теплоти на потреби теплових двигунів та загальнокорабельних систем.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метод дослідження – математичне моделювання процесів утилізації теплоти робочих середовищ теплового двигуна для її акумулювання та використання в КЕУ та на загальнокорабельні потреби.

Об'єктом дослідження є процеси утилізації, зберігання та використання теплоти корабельних енергетичних установок теплоакumuлюючими системами для власних потреб установки та загальнокорабельних систем.

Предметом дослідження є параметри процесів теплоакumuлюючої системи при передпусковій підготовці, запуску, навантаженні та зупинці енергетичної установки.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Використання теплоакumuлюючих систем в складі КЕУ запропоновано виконувати шляхом комплексної утилізації бросової теплоти систем охолодження, змащення і відпрацьованих газів двигуна з використанням в процесах теплопередачі фазових переходів теплоакumuлюючих матеріалів з різними теплофізичними властивостями.

Математична модель оптимізації структури теплоакumuлюючої системи. На етапі аналізу потреб теплоти формується множина можливих для освоєння перспективних напрямів теплових потоків у аналізованій КЕУ та системі загальнокорабельних потреб для джерел відпрацьованих газів, охолоджуючої води, мастила головних і допоміжних двигунів.

По кожному напрямку Ψ оцінюються прогнозовані значення обсягів потоків теплоти Q_{Ψ} та їх структура при перенесенні в залежності від джерела r – головні та допоміжні двигуни, і теплоносії – відпрацьовані гази, охолоджувальна вода та мастило:

$$Q_{\Psi r}; r = 1, R; Q_{\Psi} = \sum_{r=1}^R Q_{\Psi r}$$

де $Q_{\Psi r}$ – потік теплоти для теплоносія у напрямку від джерела r , R – кількість теплових потоків (рис. 1).

Як правило, прогнозування попиту здійснюється на базі регресійних моделей, що передбачає встановлення меж довірчого інтервалу для прогнозованих значень – $Q_{\Psi r \max}$, $Q_{\Psi r \min}$. Таким чином, $Q_{\Psi r \max}$ – максимально прогнозований обсяг потоку теплоти на

напрямку Ψ , $Q_{\Psi r \min}$ – мінімально прогнозований обсяг потоку теплоти на напрямку Ψ .

Структура КЕУ зумовлює розгляд τ типів теплових двигунів (дизельні, газотурбінні тощо).

КЕУ складається з N_i діючих теплових двигунів:

$$N_i = N_{\Gamma i} + N_{\Delta i} = \sum_{\tau=1}^2 N_{\Gamma \tau i} + \sum_{\tau=1}^2 N_{\Delta \tau i}$$

де $N_{\Gamma i}$, $N_{\Delta i}$ – відповідно кількість головних та допоміжних двигунів при τi , де $\tau = 1$ (для дизельного двигуна), $\tau = 2$ (для газотурбінного двигуна).

Якщо якийсь з типів теплових двигунів не присутній в структурі енергетичної установки, що розглядається, то вони розглядаються як потенційні для включення до неї.

Рівень енергетичних витрат на переміщення теплоносія при переносі теплоти від джерела r типу i у напрямку Ψ оцінюється як $f_{i \Psi r}$ на умовах корисності в рамках періоду часу T . Крім діючих теплових двигунів, можуть залучатися інші джерела (цистерни запасів палива, води та мастила) на умовах корисності для задоволення загальнокорабельних потреб в рамках періоду часу T , що розглядається, з енергетичними витратами $f_{i \delta r}$.

Період часу T_j визначається як сукупність тривалостей наступних процесів: передпускової підготовки, пуску, набору потужності, зміни потужності відповідно до поставленої мети, зупинка та простій двигуна:

$$T_j = T_{\text{підг}} + T_{\text{п}} + T_{\text{нп}} + T_{\text{зп}} + T_{\text{з}} + T_{\text{пр}}$$

Для кожного напрямку теплового потоку від джерела r відомі наступні техніко-експлуатаційні та економічні показники роботи КЕУ:

– річне напруження $p_{i \Psi r}$,

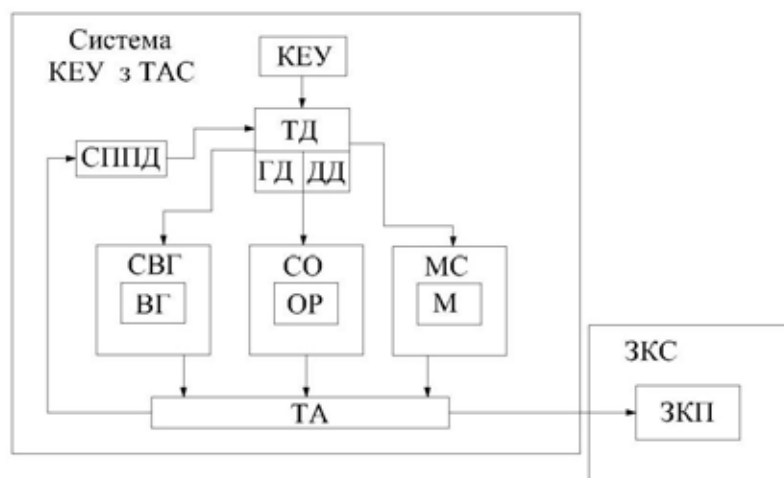


Рис. 1. Схема теплоакumuлюючої системи у складі енергетичної установки надводного корабля: КЕУ – корабельна енергетична установка, ТД – тепловий двигун, ГД – головний двигун, ДД – допоміжний двигун, СВГ – система відпрацьованих газів, СО – система охолодження, МС – масляна система, СППД – система передпускової підготовки двигуна, ТА – тепловий акумулятор, ЗКС – загальнокорабельна система, $\rightarrow$ – потік теплоти Q_{Ψ} теплоносія у напрямку від джерела r .

– річні загальнокорабельні потреби теплоти (змінні) $c_{i\psi r}$.

Крім того, для кожного двигуна відомі річні напруження p_{in} та може бути оцінена величина c_{inp} – добові витрати теплоти по кораблю, коли він не задіяний на переходах (по суті, витрати під час простою корабля).

Вводяться в розгляд наступні параметри управління:

– $x_{i\psi r}$ – число теплових потоків типу i на напрямку Ψ , від джерел r ;

– x_i^- – число теплових потоків типу i , спрямованих для забезпечення загальнокорабельних потреб у рамках розглядуваного періоду T ;

– x_i^+ – число теплових потоків типу i , отриманих поза КЕУ в рамках розглядуваного періоду T .

Сума енергетичних витрат на організацію теплових потоків від елементів КЕУ на всіх розглянутих напрямках складе:

$$F = \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I p_{i\psi r} \cdot f_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} + \sum_{i=1}^I f_{i\delta p} \cdot T \cdot x_i^- \quad (1)$$

Витрати теплоти: експлуатаційні змінні на умовах навантажувальних періодів і постійні, становлять:

$$C = \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^I c_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} + \sum_{i=1}^I f_{i\delta p} \cdot T \cdot x_i^+ + \sum_{i=1}^I c_{in} \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R x_{i\psi r} \quad (2)$$

Плануючи на перспективу, слід врахувати можливі відхилення попиту на теплоту від прогнозованого значення, що тягне за собою витрати, пов'язані з простоєм КЕУ і корабля загалом. Таким чином, до (2) додається ще один доданок:

$$C_{np} = \sum_{i=1}^I c_{inp} \cdot T \cdot \alpha_i, \quad (3)$$

де α_i – частка бюджету часу корабля, яка може припасти на простої, у зв'язку з поставленим завданням.

Величини α_i можуть бути оцінені або за допомогою директивних даних, або розрахунковим шляхом, для чого може бути використаний пропонується далі підхід.

Участь КЕУ в забезпеченні теплових потоків на напрямку Ψ визначається як частка, що припадає на КЕУ в загальному обсязі потоків теплоти під час руху корабля:

$$\beta_{i\psi} = \left(\sum_{r=1}^R p_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} \right) / \left(\sum_{r=1}^R \sum_{\psi=1}^{\Phi} p_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} \right), \text{ при } \sum_{r=1}^R \sum_{\psi=1}^{\Phi} p_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} > 0;$$

$$\beta_{i\psi} = 0, \text{ при } \sum_{r=1}^R \sum_{\psi=1}^{\Phi} p_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} = 0; \quad (4)$$

Відповідно, при зменшенні загального обсягу потоку теплоти на конкретному напрямі, пропорційно зменшується фактична участь кожного елемента КЕУ в даних потоках (у скільки разів може зменшитися обсяг потоку при виконанні задачі, у стільки разів зменшиться участь елементів КЕУ в них):

$$\alpha_{i\psi} = \beta_{i\psi} \left(1 - \sum_{r=1}^R Q_{\psi r} \min / \sum_{r=1}^R Q_{\psi r} \max \right), i = 1, I; \Psi = 1, \Phi. \quad (5)$$

Відповідно:

$$\alpha_i = \sum_{\psi=1}^{\Phi} \alpha_{i\psi} \quad (6)$$

При цьому зменшення потоку спричинить зменшення суми енергетичних витрат на переміщення теплоносіїв на величину:

$$\Delta F = \sum_{i=1}^I \alpha_i \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R p_{i\psi r} \cdot f_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} \quad (7)$$

Також зменшуватимуться експлуатаційні (змінні) витрати на величину:

$$\Delta C = \sum_{i=1}^I \alpha_i \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R c_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} \quad (8)$$

Кожен із розглянутих елементів КЕУ має забезпечувати під час експлуатації рівень часового-енергетичного еквівалента, інакше його експлуатація на кораблі недоцільна. Як відомо, часовий-енергетичний еквівалент являє собою добовий прибуток енергії без урахування постійних витрат на кораблі. Цю умову можна записати як:

$$\left[(1 - \alpha_i) \cdot \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R (p_{i\psi r} \cdot f_{i\psi r} - c_{i\psi r}) \cdot x_{i\psi r} - c_{inp} \cdot T \cdot \alpha_i \right] / T \geq f_{invc} \cdot \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R x_{i\psi r},$$

при $i = 1, I$. (9)

Вираз (9) відображає умову для елементів конкретного типу.

Більш того, повинні бути виконанні умови по використанню теплових потоків:

$$\sum_{i=1}^I p_{i\psi r} \cdot f_{i\psi r} \leq Q_{\psi r} \max, \text{ при } \Psi = 1, \Phi; r = 1, R, \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^I p_{i\psi r} \cdot f_{i\psi r} \geq Q_{\psi r} \min, \text{ при } \Psi = 1, \Phi; r = 1, R, \quad (11)$$

У даному випадку умови по використанню теплових потоків сформульовані для ситуації, коли є необхідним обов'язкова участь в забезпеченні на розглянутих напрямках. В інших випадках, достатньо використати умову (11).

Загальна кількість теплових потоків не повинна перевищувати задану величину:

$$\sum_{i=1}^I x_i^+ \leq N_i^+ \max, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I x_i^- \leq N_i^- \max, \quad (13)$$

Наступне обмеження є балансовим щодо кількості елементів КЕУ, які розподіляються за напрямками роботи, що входять до складу КЕУ та зовнішніх джерел:

$$\sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R x_{i\psi r} = N_i + x_i^+ - x_i^-, \quad \text{при } i = 1, I \quad (14)$$

Обмеження (9) – (14) відображають множини умов, що виникають у процесі планування експлуатаційної діяльності корабля у рамках річного проміжку часу. Критерієм оптимальності повинен бути підсумковий результат корабля при вирішенні поставлених завдань:

$$P = \sum_{i=1}^I (1 - \alpha_i) \cdot \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R p_{i\psi r} \cdot f_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} + \sum_{i=1}^I f_{imc} \cdot T \cdot x_i^- - \sum_{i=1}^I (1 - \alpha_i) \cdot \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R c_{i\psi r} \cdot x_{i\psi r} - \sum_{i=1}^I c_{in} \sum_{\psi=1}^{\Phi} \sum_{r=1}^R x_{i\psi r} - \sum_{i=1}^I c_{imp} \cdot T \cdot \alpha_i \rightarrow \max \quad (15)$$

Вираз (15) являє собою кількість теплоти завдяки використанню теплоакumuлюючої системи з урахуванням впливу зниження обсягів роботи КЕУ.

Вираз (15) можна використовувати як ще одне обмеження, а за цільову функцію в цьому разі слід узяти кількість теплоти без урахування ризику зниження функціональності КЕУ.

У такому разі структуру теплоакumuлюючої системи встановлюють з огляду на оптимістичні прогнози, а можливий ризик ураховують під час завдання мінімально допустимої межі функціонування.

Умови невід'ємності та цілочисельності параметрів керування дає змогу остаточно сформувати структуру моделі:

$$x_{i\psi r} \geq 0, x_i^- \geq 0, x_i^+ \geq 0 - \text{цілочисельні}, i = 1, I; \Psi = 1, \Phi; r = 1, R. \quad (16)$$

Результатом оптимізації є:

- структура теплоакumuлюючої системи з урахуванням споживання на загальнокорабельні потреби;
- перспективні напрямки та обсяги можливих теплових потоків від елементів КЕУ та їхніх джерел;
- прогнозований технічний підсумок з урахуванням можливих коливань попиту теплоти під час простою корабля.
- прогнозування впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів на тривалість складових процесів зберігання, розрядки, зарядки теплоакumuлюючої системи з урахуванням відбору на загальнокорабельні потреби.

Обговорення отриманих результатів. Приклад результатів розрахунків за запропонованою мате-

матичною моделлю при оптимізації вибору теплоакumuлюючого матеріалу з урахуванням фазового переходу надано в таблиці при сталих габаритних показниках теплового акумулятору, складу теплоакumuлюючої системи та джерел теплових потоків, теплофізичних властивостей теплоносіїв та гідрравлічних втрат. Об'єм теплового акумулятору визначався конструктивно за умов його компоновки в складі ТАС КЕУ.

Процеси нестационарної теплопередачі розраховувалися при використанні теплової ізоляції з термічним опором на рівні 2,9 (м²·К)/Вт при температурі оточуючого середовища 288 К та кінцевої температури нагріву теплоакumuлюючого матеріалу – 573 К. Визначення часу цього процесу виконувалося по відомим виразам, аналогічним, що використані у роботі [7].

Розрахований час зберігання теплоти для поліетилену високої густини при кінцевій температурі нагріву теплоакumuлюючого матеріалу 423 К був порівняний з результатами теоретичних та експериментальних досліджень у роботі [7], який склав 57 годин. Розбіжність отриманих результатів викликана різницею температурою відпрацьованих газів, масо-габаритних показників та будовою теплового акумулятора.

ВИСНОВКИ

Методологія запропонованої математичної моделі теплоакumuлюючої системи враховує особливості використання в складі корабельної енергетичної установки різних теплових двигунів, її структуру і умови експлуатації.

Такий підхід дозволяє оптимізувати за необхідністю:

- структуру теплоакumuлюючої системи з урахуванням споживання на загальнокорабельні потреби;
- перспективні напрямки та обсяги можливих теплових потоків від елементів КЕУ та їхніх джерел;
- прогнозований технічний підсумок з урахуванням можливих коливань попиту теплоти під час простою корабля;
- прогнозування впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів на тривалість складових процесів зберігання, розрядки, зарядки теплоти теплоакumuлюючої системи з урахуванням відбору на загальнокорабельні потреби.

Таблиця 1. До оптимізації вибору теплоакumuлюючих матеріалів для ТАС КЕУ

№	Теплоакumuлюючий матеріал ТАС	Час зберігання теплоти, год	Потенціал від використаної теплоти, кДж	Температурний потенціал, К
1	Гідроксид натрію	93,6	$2,1 \cdot 10^5$	572
2	Поліетилен високої густини	43,2	$4,6 \cdot 10^4$	408
3	Нітрат літія	44,6	$1,9 \cdot 10^5$	525
4	Нітрит натрію	31,5	$1,7 \cdot 10^5$	544

REFERENCES

- [1] Trifonov, D.M. (2015) Vykorystannya teplovoho akumulyatora fazovoho perekhodu dlya zabezpechennya pusku kholodnoho dvyhuna ta yoho prohrivannya za rakhunok polipshennya sumishoutvorenniya [Use of the thermal storage accumulator with a phase transition to ensure cold engine starting and warming up by improving mixture formation]. *Zbirnyk naukovykh prats'*. Seriya: *haluzeve mashynobuduvannya, budivnytstvo* – Collection of scientific papers. Series: Industrial Engineering, Construction., vyp. 3 (45), 18-27 [in Ukrainian].
- [2] Lunyaka, K.V., Klyuyev, O.I., Rusanov, S.A., Klyuyeva, O.O. (2020) Doslidzhennya roboty teplovoho akumulyatora systemy peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishn'oho z'horyannya [Research of the operation of the thermal storage accumulator of the internal combustion engine preheating system]. *Teplofizyka ta teploenerhetyka* – Thermophysics and Thermal Power Engineering, t. 42, № 3, 76-83 [in Ukrainian].
- [3] Hrytsuk, I.V., Adrov, D.S., Prylepsy, Y.V., Doroshko, V.I., Shchypak, Y.V., Stokov, M.M. (2013) Vykorystannya bezpalynoyi enerhetychnoyi ustanovky na osnovi bahatosektsiynoho teplovoho akumulyatoru fazovoho perekhodu dlya prohrivu dyzel'-poyizdu D1 [Use of a fuel-free power plant based on the thermal storage accumulator with a multi-sectional phase transition for heating a diesel train D1]. *Zbirnyk naukovykh prats' DonIYT* – Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport, № 29, 123-135 [in Ukrainian].
- [4] Hrytsuk, I.V. (2014) Formuvannya vymoh i pokaznykiv efektyvnosti teplovykh akumulyatoriv fazovoho perekhodu u skladi kompleksnoyi systemy kombinovanoho prohrivu dvyhuna i transportnoho zasobu [Formation of requirements and performance parameters for thermal storage accumulators with phase transition as part of an integrated system for combined engine and vehicle heating]. *Visnyk Donets'koyi akademiyi avtomobil'noho transportu* – Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport, № 3, 58-66 [in Ukrainian].
- [5] Hrytsuk, Y.V., Symonenko, D.S., Symonenko, R.V., Bylay, A.V. (2020) Osobennosti teplovoy podgotovky transportnoho dvyhatela, oborudovanoho systemoy pytannya hazovym toplyvom, s yspol'zovanyem teplovoho akumulyatora [Features of thermal preparation of a transport engine equipped with a gas fuel supply system using the thermal storage accumulator]. *NAUKOVI PRATSI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi prysvyachenoyi 90-richchyu Kharkivs'koho avtomobil'no-dorozhn'oho universytetu ta 90-richchyu avtomobil'noho fakul'tetu «Suchasni tendentsiyi rozvytku avtomobil'noho transportu ta haluzevoho mashynobuduvannya»* – THE PROCEEDINGS of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th Anniversary of Kharkiv Automobile and Highway University and the 90th Anniversary of the Faculty of Automobile «Modern Trends in the Development of Road Transport and Industrial Engineering». Kharkiv [in Russian].
- [6] Hrytsuk, I.V., Pohorletsky, D.S., Symonenko, R.V., Bilay, A.V. (2020) Teplova pidgotovka hazomotornoho transportnoho zasobu, obladnannoho teplovym akumulyatorom fazovoho perekhodu [Thermal preparation of a gas-powered vehicle equipped with a thermal storage phase transition accumulator]. *MATERIALY 11-yi Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohiyi ta obladnannya dlya yikh obsluhovuvannya SEUTTOO-2020* – MATERIALS OF THE 11th International Scientific and Practical Conference Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for their Maintenance SEUTTOO-2020. Kherson [in Ukrainian].
- [7] Verbovsky V.S. (2021) Udoshkonalennya protsesu teplovoyi pidgotovky statsionarnykh hazovykh dvyhuniv akumul'ovanoyu enerhiyeu [Improvement of provision of thermal preparation of stationary gas engines using accumulated energy]. (Extended abstract of candidate's thesis). Ukrayinsky derzhavny universitet zaliznychnoho transportu, Kyiv [in Ukrainian].
- [8] Hrytsuk, I.V., Pohorletsky, D.S., Verbovsky, V.S., Volska, O.M., Verbovsky, O.V., Simahin, A.F. (2019) Zabezpechennya teplovoyi pidgotovky dvyhuna enerhetychnoyi ustanovky za dopomohoyu systemy prohrivu z fazoperekhidnymy teplovymy akumulyatoramy [Ensuring thermal preparation of a power plant engine using a heating system with phase-transfer thermal storage accumulators]. *Materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi, prysvyachenoyi pam'yati profesoriv Fomina YU.YA. i Semenova V.S.* – Proceedings of the International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Professors Y. Fomin and V. Semenov, Odessa, ONMU [in Ukrainian].
- [9] Verbovsky, V.S. (2019) Otsinka dotsil'osti zastosuvannya systemy teplovoyi pidgotovky statsionarnoho hazovoho dvyhuna na osnovi akumul'ovanoyi enerhiyi [Evaluation of the feasibility of using a thermal preparation system for a stationary gas engine based on accumulated energy]. *MATERIALY 10-yi Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohiyi ta obladnannya dlya yikh obsluhovuvannya* – MATERIALS OF THE 10th International Scientific and Practical Conference Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for Their Maintenance. Kherson [in Ukrainian].
- [10] Hrytsuk, I.V., Pohorletsky, D.S., Khudyakov, I.V., Bilay, A.V. (2021) Teplova pidgotovka sudnovoho dvyhuna za dopomohoyu teplovoho akumulyatora fazovoho perekhodu [Thermal preparation of a marine engine using a phase transition thermal storage accumulator]. *Materialy 12-yi Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohiyi ta obladnannya dlya yikh obsluhovuvannya SEUTTOO-2021* – Materials of the 12th International Scientific and Practical Conference Modern Power Plants on Transport, Technologies and Equipment for their Maintenance SEUTTOO-2021. Kherson [in Ukrainian].
- [11] Pogorletskiy, D.S., Khudyakov, I.V., Hrytsuk, I.V., Manzheley, V.S. (2019) Teplovaya podgotovka dvigatelya sudovoy energeticheskoy ustanovki dlya uluchsheniya toplivnoy ekonomichnosti [Heat treatment of a ship's power plant engine to improve fuel efficiency]. *Nauchnyye trudy Azerbaydzhanskoys gosudarstvennoy morskoy akademii* – Scientific Proceedings of the Azerbaijan State Maritime Academy. № 3. ISSN 2220-1025 [in Russian].
- [12] Hrytsuk, I.V., Pohorletsky, D.S., Khudyakov, I.V., Dzyhar, A.K., Volkov, V.V. (2020) Teplova pidgotovka dvyhuna enerhetychnoyi ustanovky sudna portovoho flotu [Thermal preparation of the power plant engine of a port fleet vessel]. *Materialy XI Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi suchasni pidkhody do vysokoelektyvnoho vykorystannya zasobiv transportu (DI NU «OMA» – 2020)* – Materials of the XI International Scientific and Practical Conference Modern Approaches to the Highly Efficient Use of Vehicles (SI NU «OMA» – 2020). Izmayil [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Трифонов, Д.М. (2015) Використання теплового акумулятора фазового переходу для забезпечення пуску холодного двигуна та його прогрівання за рахунок поліпшення сумішоутворення. *Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво*. Вип. 3 (45), 18-27.
- [2] Луняка, К.В., Ключев, О.І., Русанов, С.А., Ключева, О.О. (2020) Дослідження роботи теплового акумулятора системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згоряння. *Теплофізика та теплоенергетика*. т. 42, № 3, 76-83.
- [3] Грицук, І.В., Адров, Д.С., Прилепський, Ю.В., Дорошко, В.І., Щипак, Є.В., Строков, М.М. (2013) Використання безпаливної енергетичної установки на основі багатосекційного теплового акумулятору фазового переходу для прогріву дизель-поїзду Д1. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. № 29, 123-135.
- [4] Грицук, І.В. (2014) Формування вимог і показників ефективності теплових акумуляторів фазового переходу у складі комплексної системи комбінованого прогріву двигуна і транспортного засобу. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. № 3, 58-66.
- [5] Грицук, І.В., Погорлецкий, Д.С., Симоненко, Р.В., Білай, А.В. (2020) Особенности тепловой подготовки транспортного двигателя, оборудованного системой питания газовым топливом, с использованием теплового аккумулятора. НАУКОВІ ПРАЦІ Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету «Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту та галузевого машинобудування». Харків.
- [6] Грицук, І.В., Погорлецкий, Д.С., Симоненко, Р.В., Білай, А.В. (2020) Тепловая подготовка газомоторного транспортного средства, оборудованного тепловым аккумулятором фазового перехода. МАТЕРІАЛИ 11-ї Міжнародної науково-практичної конференції Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2020. Херсон.
- [7] Вербовський, В.С. (2021) Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових двигунів акумуляованою енергією. (Автореф. Дис. канд. техн. наук). Український державний університет залізничного транспорту, Київ.
- [8] Грицук, І.В., Погорлецкий, Д.С., Вербовський, В.С., Вольська, О.М., Вербовський, О.В., Сімагін, А.Ф. (2019) Забезпечення теплової підготовки двигуна енергетичної установки за допомогою системи прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. Одеса, ОНМУ.
- [9] Вербовський, В.С. (2019) Оцінка доцільності застосування системи теплової підготовки стаціонарного газового двигуна на основі акумуляованої енергії. МАТЕРІАЛИ 10-ї Міжнародної науково-практичної конференції Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування. Херсон.
- [10] Грицук, І.В., Погорлецкий, Д.С., Худяков, І.В., Білай, А.В. (2021) Тепловая подготовка судового двигателя за допомогою теплового аккумулятора фазового перехода. Матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2021. Херсон.
- [11] Погорлецкий, Д.С., Худяков, І.В., Грицук, І.В., Манжелей, В.С. (2019) Тепловая подготовка двигателя судовой энергетической установки для улучшения топливной экономичности. *Научные труды Азербайджанской государственной морской академии*. № 3. ISSN 2220-1025.
- [12] Грицук, І.В., Погорлецкий, Д.С., Худяков, І.В., Дзигар, А.К., Волков, В.В. (2020) Тепловая подготовка двигателя энергетической установки судна портового флота. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ «ОМА» – 2020). Ізмаїл.

© Г. В. Кузнецов

Дата надходження статті до редакції: 14.03.2023

Дата затвердження статті до друку: 27.03.2023