

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Кузнецов Георгій Валерійович

УДК 621.4

ДИСЕРТАЦІЯ

**Підвищення ефективності енергетичних установок надводних кораблів
застосуванням теплоакumuлюючих систем**

144 – Теплоенергетика

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Г.В. Кузнецов

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Харитонов Юрій Миколайович, д-р техн. наук, професор

Миколаїв – 2026

АНОТАЦІЯ

Кузнецов Г.В. Підвищення ефективності енергетичних установок надводних кораблів застосуванням теплоакumuлюючих систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 «Теплоенергетика». – Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2026.

Застосування утилізації теплоти є одним із перспективних напрямків підвищення ефективності енергетичної установки надводних кораблів. Одним із актуальних питань цього напрямку є використання низькопотенційної теплоти для потреб енергетичної установки, корабельних систем та екіпажу. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень в області теплоакumuлюючих засобів методологічні і технічні аспекти вирішення науково-прикладного завдання створення високоефективних теплоакumuлюючих систем в складі енергетичної установки надводних кораблів до теперішнього часу розроблені недостатньо.

Натурні дослідження процесів акумулювання теплоти різних джерел достатньо проблематичні у зв'язку з високою вартістю матеріальних та людських ресурсів, компактності машинних відділень кораблів, але за допомогою сучасних методів математичного моделювання та обчислювальної гідродинаміки у сукупності з фізичним моделюванням експериментального зразка такі завдання можуть розв'язуватися з достатньою достовірністю. Результати дослідження способів застосування теплоакumuлюючих систем з фазовим переходом для технічних та людських потреб, що забезпечують розв'язання завдання підвищення ефективності енергетичної установки надводних кораблів та суден, є актуальним і матиме техніко-економічний ефект.

Таким чином, актуальність дисертаційного дослідження визначається:

а) необхідністю розробки математичних моделей впливу температурного потенціалу різних джерел скидної теплоти на процеси її акумуляції, збереження і

використання в умовах різних експлуатаційних циклів енергетичних установок надводних кораблів та розробки механізму впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів на робочі процеси фазового переходу в складі їх модернізованих систем;

б) необхідністю досліджень рівнів енергозбереження теплоакumuлюючими системами теплоакumuляторів, що працюють в складі головних та допоміжних енергетичних установок, з урахуванням впливу вихідних даних різних класів кораблів та суден.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності енергетичних установок надводних кораблів застосуванням теплоакumuлюючих систем.

Новизна результатів, одержаних в дисертації, полягає в наступному.

1. Вперше обґрунтовано методологію визначення теплоакumuлюючого матеріалу, який забезпечує підвищення ефективності процесів акумуляції теплоти з фазовим переходом у теплоакumuлюючих системах енергетичних установок надводних кораблів та суден на підставі трьох інтегральних показників, які враховують за сукупністю теплофізичні властивості матеріалу (теплоту фазового переходу, густину, температуру плавлення і коефіцієнт теплопровідності), конструктивні обмеження (характерний розмір теплоакumuлятора), експлуатаційні цикли надводних кораблів (тривалість ходу і стоянки) з узагальненням властивостей матеріалів низькотемпературних від 80 до 120 °С, середньотемпературних від 130 до 200 °С та високотемпературних від 210 до 500 °С.

2. Вперше доведено можливість підвищення ефективності енергетичної установки надводних кораблів теплоакumuлюючою системою простої або гібридної структур при використанні джерел скидної теплоти з різними температурними потенціалами визначенням ефективності її застосування залежно від теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів, умов експлуатації кораблів та складу споживачів за наступними техніко-економічними показниками: часовим-енергетичним еквівалентом, показником ефективності використання ТАС, її показниками якості та теплової ефективності, що забезпечує для кораблів

різних класів зниження часу запуску головних дизельних двигунів від 2 до 7 хвилин, витрати палива на один запуск від 26 до 214 кг.

3. Вперше отримані експериментальні характеристики моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора з однією капсулою, яка вміщає 3 кг теплоакumuлюючого матеріалу – манітол, призначеного для роботи у 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 масових витратах і температурі відпрацьованих газів відповідно від 0,11 до 0,16 кг/с та від 440 до 650 К, а скорочення значення часу зарядки до 20 хвилин забезпечується на подальших циклах зарядки при температурах відпрацьованих газів на рівні 660 К.

4. Вдосконалено метод прогнозування процесів комплексної акумуляції теплоти різних джерел у гібридних системах з урахуванням впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючого матеріалу на процеси фазових переходів у теплоакumuлюючих пристроях, що заснований на числовому моделюванні їх характеристик на основі концепції ефективної теплоємності процесів фазового переходу, яка відрізняється від відомих тим, що враховує особливості теплопередачі за допомогою детальних механізмів енергозбереження в умовах взаємодії поверхонь фазового переходу з потоками зовнішніх теплоносіїв від запуску до номінальної потужності при її ступінчастому підвищенні.

5. Отримав подальший розвиток підхід до багаторівневого моделювання процесів суднових енергетичних установок у вигляді об'єктно-орієнтованих взаємопов'язаних процедур «Головний двигун», «Допоміжний двигун» та «Теплоакumuлююча система» за ієрархічними рівнями: теплопередавальна поверхня теплоакumuлятора, теплоакumuлятор як елемент підсистеми та теплоакumuлююча система як елемент енергетичної установки.

Наукове значення роботи полягає у розширенні уявлень про теплотехнічні механізми процесів акумуляції, збереження та використання різних джерел скидної теплоти в умовах різних експлуатаційних циклів енергетичних установок надводних кораблів і розробці механізму впливу теплофізичних властивостей

теплоакумуючих матеріалів на робочі процеси фазового переходу в складі теплоакмуляторів для реалізації концепції модернізації та створення корабельних енергетичних установок з теплоакмулюючими системами.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці практичних рекомендацій з використання теплоакмулюючих систем в складі енергетичних установок кораблів різних класів та суден, на підставі яких розроблено конструктивні схеми теплоакмулюючих систем у складі енергетичних установок кораблів потужністю для головних двигунів від 1 до 8 МВт та допоміжних – від 25 до 920 кВт, що працюють за відповідними експлуатаційними циклами і забезпечують потреби теплоти для енергетичної установки, корабельних систем та екіпажу.

Розроблена математична модель процесів комплексної акумуляції теплоти різних джерел у гібридних системах з урахуванням впливу теплофізичних властивостей теплоакмулюючих матеріалів, яка здатна прогнозувати енергетичні характеристики сучасних корабельних та суднових енергетичних установок з оптимізацією їх структури.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у сукупності з результатами науково-дослідної роботи 0126U000045 «Ефективність застосування теплоакмулюючих систем в складі енергетичної установки надводних кораблів», яка виконана в ТОВ «Дослідно-проектний центр кораблебудування» АТ «Укроборонпром» при обґрунтуванні проектних рішень корабельних енергетичних установок; при проектуванні суднових енергетичних установок, їх систем та елементів перспективних суден в ТОВ Zaliv Ship Design; в навчальному процесі аспірантів і магістрантів при підготовці здобувачів в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

У вступі дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми, показано її зв'язок з науковими програмами та темами, сформульовано мету, головні задачі, об'єкт і предмет дослідження, представлено методи розв'язання, обґрунтовано достовірність отриманих результатів, визначено наукову новизну та практичне значення результатів роботи, відображено повноту викладення результатів у

публікаціях та ступінь їх апробації на конференціях.

У першому розділі проаналізовано напрямки розвитку морського флоту, сучасні методи підвищення технічної ефективності його енергетичних установок шляхом утилізації скидної теплоти, стан організації робочих процесів теплоакumuлюючих систем у складі корабельних та суднових енергетичних установок, а також їх будову, способи роботи та результати досліджень.

Виконаний аналіз результатів попередніх досліджень дозволив обґрунтувати актуальність використання теплоакumuлюючих систем як одного з перспективних напрямів підвищення ефективності суднових енергетичних установок, визначити мету та сформулювати завдання дослідження.

Другий розділ дисертації присвячено опису методології та обґрунтуванню основних методів досліджень робочих процесів у корабельних енергетичних установках з теплоакumuлюючими системами. Запропоновано для аналізу методу математичного моделювання процесів утилізації, скидної теплоти використовувати основні рівняння математичної моделі теплопровідності, фазового переходу, що містять можливості урахування впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів на процеси зарядки, зберігання та використання теплоти. Приведено опис розробленої математичної моделі утилізації, накопичення та використання скидної теплоти теплоакumuлюючою системою корабельної енергетичної установки для розрахунку теплофізичних процесів підготовки головних і допоміжних двигунів та забезпечення загальнокорабельних потреб. Обґрунтовано вибір тривимірної моделі континуального типу, яка здатна прогнозувати основні процеси в елементах теплоакumuлятора та розроблено математичну модель процесів фазового переходу теплоакumuлюючих матеріалів у шумоглушниках-теплоакumuляторах різної будови.

Надано опис принципової схеми експериментального стенду для проведення досліджень моделі експериментального зразка шумоглушника-теплоакumuлятора з фазовим переходом, верифікації та валідації математичної моделі процесів перенесення теплоти в елементах теплоакumuлюючої системи.

Проведено верифікацію запропонованої математичної моделі відповідно експериментальним даним шумоглушника-теплоаккумулятора.

Третій розділ присвячено результатам тривимірних розрахунків термогідродинамічної структури газового потоку і теплоакumuлюючого матеріалу в теплоакumuляторах.

Виявлено основні особливості формування теплових потоків в елементах на режимах зарядки.

Отримано розподіли температур по перерізах капсул теплоакumuлятора, температури та границі розподілу фаз теплоакumuлюючого матеріалу з урахуванням його теплофізичних властивостей при послідовній роботі за циклом та різних співвідношеннях термінів часу цих процесів.

Отримані результати обґрунтували підвищення ефективності енергетичної установки надводних кораблів застосуванням теплоакumuлюючої системи при використанні джерел скидної теплоти з різними температурними потенціалами шляхом визначення рівня ефективності використання з урахуванням, умов експлуатації кораблів та складу споживачів наступними техніко-економічними показниками: часовим-енергетичним еквівалентом, показником ефективності використання теплоакumuлюючої системи, її показником якості та теплової ефективності.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням моделі шумоглушника-теплоакumuлятора фазового переходу. Проведено експериментальні дослідження нестационарних енергетичних характеристик моделі шумоглушника-теплоакumuлятора. Отримані характеристики моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоакumuлятора з однією капсулою, яка вміщає 3 кг теплоакumuлюючого матеріалу – манітол, призначеного для роботи в складі газовипускної системи дизельного двигуна. Визначена тривалість циклічності його роботи в режимі зарядки від запуску до «холостого ходу» і «холостого ходу» до часткового навантаження та умови зменшення значення часу зарядки. Отримані дані узагальнені за положеннями теорії подібності для їх використання при розробці натурних дослідних зразків.

У п'ятому розділі обґрунтовано впровадження результатів дослідження в проектування та створення енергетичних установок надводних кораблів та суден з теплоакumuлюючою системою. Розроблено конструктивну схему глушника-теплокумулятора фазового переходу та схеми енергетичних установок з теплоакumuлюючими системами різних класів кораблів: патрульний та ракетний катери, корвет та фрегат. Визначено рекомендації щодо їх впровадження на стадії дослідно-конструкторських робіт та модернізації енергетичних установок кораблів та суден.

Розроблено практичні рекомендації щодо вдосконалення конструктивних схем теплоакumuлюючих систем для використання різних джерел скидної теплоти: систем газовихлопу, охолодження та мастильної.

Ключові слова: енергетична установка, корабель, судно, експлуатаційний цикл, двигун, економія палива, утилізація, акумуляція, відпрацьовані гази, охолоджувальна рідина, мастило, передпускова підготовка, загальнокорабельні потреби.

Публікації, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1) Кузнецов Г. В. Математична модель теплоакumuлюючої системи у складі енергетичної установки надводного корабля. *Збірник наукових праць НУК*. 2023. №1 (490). С. 128–134;

2) Борисов В. Є., Кузнецов Г. В. Визначення раціональних структур схемних рішень енергетичних установок надводних кораблів при розкритті невизначеності цілі. *Збірник наукових праць НУК*. 2024. №3 (496). С. 51–58, автору належить схемні рішення для класів кораблів – патрульні та ракетні катери, корвети і фрегати для впровадження теплоакumuлюючих систем, які ґрунтовані на використанні способів акумуляції теплоти з фазовим переходом, в складі енергетичних установок;

3) Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М. Ефективність використання теплоакumuлюючих систем у складі енергетичних установок суден різного призначення. *Розвиток транспорту*. 2025. № 1(24). С. 20–30, автору належить обґрунтування ефективності теплоакumuлюючих систем шляхом використання

вибору теплоакумуючих матеріалів, що дозволяє отримати економію палива для круїзних лайнерів, балкерів та танкерів в складі раціональних схемних рішень теплоакумуючих систем та, як наслідок, поліпшення ефективності цих систем та техніко-економічних показників установок в цілому;

4) Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М. Експериментальні дослідження характеристик моделі шумоглушника-теплового акумулятора для суднових енергетичних установок. *Суднобудування та Морська інфраструктура*. 2026. №1(22). С. 93–104, автору належить результати експериментальних досліджень дизельного двигуна з моделлю шумоглушника-теплоаккумулятора, що підтвердили достовірність результатів математичного моделювання процесів акумулювання теплоти експериментального зразка, а отримана залежність безрозмірної температури від чисел Біо і Фур'є для нестационарної теплопровідності дає можливість раціонального їх використання при розробці повнорозмірного устаткування;

5) Кузнецов Г. В. Ефективність використання теплоакумуючих систем в складі енергетичної установки надводних кораблів та суден. *Збірник наукових праць НУК*. 2026. №1 (504). С. 171–179;

6) Кузнецов Г. В. Вибір матеріалу для теплоакумуючих систем енергетичних установок суден на основі інтегральних критеріїв. *Розвиток транспорту*. 2026. № 2(29). С. .

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1) Кузнецов Г. В. Використання теплових акумуляторів у судновій енергетиці. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: мат. XIII Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2022. С. 601–604;

2) Кузнецов Г. В. Аналіз існуючих рішень по утилізації теплоти для корабельних енергетичних установок. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування*: мат. 14 Міжнародної науково-технічної конференції. Херсон, 2023. С. 242–246;

3) Кузнецов Г. В. Визначення раціональних структур схемних рішень

енергетичних установок надводних кораблів з теплоакумуючими системами. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: мат. XIV Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2023. С. 658–661;

4) Коробко В. В., Кузнецов Г. В., Шевцов А. П. Ефективність утилізації скидної теплоти судових енергетичних установок при використанні процесів з фазовими переходами. *Marine Power Plants and Operation*: мат. V Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ. Одеса, 2024. С. 219–224;

5) Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М., Волошин А. Ю. Результати дослідження процесів утилізації скидної теплоти корабельної енергетичної установки теплоакумуючою системою. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування*: мат. 15 Міжнародної науково-технічної конференції. Херсон, 2024. С. 208–212;

6) Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М. Визначення ефективності використання теплоакумуючої системи в складі корабельної енергетичної установки. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: мат. XV Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2024. С. 886–889;

7) Кузнецов Г. В. Використання гібридних теплоакумуючих систем у складі корабельних енергетичних установок. *Сучасний стан та проблеми двигунобудування*: мат. VIII Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2024. С. 63–65;

8) Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М. Ефективність використання теплоакумуючих систем у складі енергетичних установок суден різного призначення. *Marine Power Plants and Operation*: мат. VI Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ. Одеса, 2025. С. 219–223;

9) Кузнецов Г. В., Волошин А. Ю. Результати математичного моделювання утилізації, накопичення та використання скидної теплоти теплоакумуючою системою корабельної енергетичної установки. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці*: мат. XVI Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2025 С. 1028–1030;

10) Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М. Програма дослідження моделі теплового акумулятора для дизельного двигуна. *Суднова енергетика: стан та проблеми*: мат. XII Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв: НУК, 2025. С. 296–300.

ABSTRACT

Kuznetsov H.V. Improving the Efficiency of Surface Ship Power Plants Using Thermal Energy Storage Systems. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 144 “Thermal Power Engineering”. – Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, 2026.

The utilization of waste heat is one of the promising approaches to improving the efficiency of surface ship power plants. One of the key issues within this field is the use of low-grade heat to meet the needs of the power plant, onboard systems and the crew. Despite a significant number of scientific studies in the field of thermal energy storage technologies, the methodological and technical aspects of solving the applied scientific problem of developing highly efficient thermal energy storage systems integrated into surface ship power plants remain insufficiently developed to date.

Full-scale experimental studies of heat accumulation processes from various sources are rather problematic due to the high cost of material and human resources and the limited space available in ship engine rooms. However, by applying modern methods of mathematical modeling and computational fluid dynamics in combination with physical modeling of an experimental prototype, such problems can be solved with sufficient accuracy and reliability. The results of research on the application of phase-change thermal energy storage systems for onboard and crew needs, aimed at improving the efficiency of power plants of surface ships and vessels, are relevant and are expected to provide a technical and economic benefit.

Thus, the relevance of the thesis research is determined by:

a) the need to develop mathematical models describing the influence of the temperature potential of various waste heat sources on the processes of heat accumulation, storage, and utilization under different operating cycles of surface ship power plants, as well as the need to develop a mechanism for assessing the influence of the thermophysical properties of thermal energy storage materials on phase-change processes within their advanced system configurations;

b) the need to investigate the levels of energy saving achieved by thermal energy storage systems operating as part of main and auxiliary power plants, taking into account the input data for different classes of ships and vessels.

The main aim of the research is to improve the efficiency of surface ship power plants by using thermal energy storage systems.

The novelty of research results obtained in the thesis is as follows.

1. For the first time, a methodology for selecting phase change materials has been substantiated to improve the efficiency of heat accumulation processes involving phase transition in thermal energy storage systems for the power plants of surface ships and vessels. The methodology is based on three integral parameters that collectively account for the thermophysical properties of the material (latent heat of fusion, density, melting temperature and thermal conductivity), design constraints (characteristic dimensions of the thermal energy storage unit) and the operational cycles of surface ships (voyage duration and lay-up periods). The methodology enables the classification of phase change materials into low-temperature (80–120°C), medium-temperature (130–200°C), and high-temperature (210–500°C) groups.

2. For the first time, the possibility of improving surface ship power plant efficiency by using simple or hybrid thermal energy storage systems has been demonstrated through the utilization of waste heat sources with different temperature potentials. Its effectiveness depends on the thermophysical properties of phase change materials, ship operating conditions and the composition of consumers, also it is evaluated using the following techno-economic parameters: time–energy equivalent, efficiency parameter, parameters of quality and thermal efficiency. This ensures, for different

classes of ships, a reduction in the start-up time of main diesel engines by 2 – 7 minutes, a reduction in fuel consumption per start by 26 – 214 kg.

3. For the first time, the experimental characteristics of a prototype silencer–thermal energy storage unit with a single capsule containing 3 kg of the phase change material – mannitol intended for integration into the exhaust system of diesel engines have been obtained. It has been established that the charging cycle duration does not exceed 30 minutes from engine start-up to idle operation and from idle to partial load at exhaust gas mass flow rates from 0.11 to 0.16 kg/s and exhaust gas temperatures from 440 to 650 K, respectively. Furthermore, a reduction in the charging time to 20 minutes is achieved during subsequent charging cycles at an exhaust gas temperature of approximately 660 K.

4. The method for predicting the processes of complex heat storage from various sources in hybrid systems has been improved by considering the influence of the thermophysical properties of phase change materials on phase transition processes and by using numerical modelling of their characteristics based on the concept of effective heat capacity. Unlike existing approaches, the proposed method accounts for the specific features of heat transfer associated with moving phase boundaries under the conditions of interaction between the phase transition surface and external heat-transfer media during engine start-up and stepwise loading to rated power.

5. The development of a multilevel modelling approach for the processes occurring in ship power plants has been further advanced through the identification of object-oriented interactions between the procedures “Main Engine”, “Auxiliary Engine”, and “Thermal Energy Storage System”, as well as through the establishment of a hierarchical relationship between the thermal energy storage surface, the thermal energy storage unit as a subsystem element, and the thermal energy storage system as an element of the power plant.

The scientific significance of the obtained results lies in expanding knowledge of heat engineering mechanisms governing waste heat accumulation, storage, and utilization under real operating cycles of surface ship power plants, as well as in developing a mechanism describing how the thermophysical properties of thermal energy storage

materials influence phase transition processes in advanced thermal energy storage systems and the design of ship power plants incorporating such systems.

Practical significance of the obtained results consists in the development of practical recommendations for the application of thermal energy storage systems as part of ship and vessel power plants of various classes. Based on these recommendations, design configurations of thermal energy storage systems for ship power plant engines have been developed for main engines with power ratings from 1 to 8 MW and auxiliary engines from 25 to 920 kW, operating under relevant duty cycles and providing heat supply for the power plant, onboard systems, and crew needs.

The developed mathematical model of integrated heat storage from multiple heat sources in hybrid systems, taking into account the influence of the thermophysical properties of phase change materials, enables the prediction of the energy performance of modern ship power plants while optimizing their configuration.

The results of the research have been implemented in conjunction with the outcomes of research project No 0126U000045 “Effectiveness of thermal energy storage systems in surface ship power plants” carried out at the LLC “Research and Design Shipbuilding Center” of JSC “Ukrainian defense industry” in the justification of design solutions for ship power plants. The results have also been applied in the design of marine power plants, their systems, and components for advanced vessels at Zaliv Ship Design LLC, as well as in the educational process of PhD candidates and Master’s students at Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

The introduction of the thesis substantiates the relevance of the research topic, demonstrates its connection with scientific programs and research projects, defines the object and subject of the study, states the aim and main research tasks, presents the research methods and the justification of the reliability of the obtained results, identifies the scientific novelty and practical significance of the work, and reflects the completeness of the presentation of results in publications and the extent of their validation at scientific conferences.

The first chapter analyzes the development trends of the maritime fleet and modern methods for improving the technical efficiency of ship power plants through waste heat

recovery. It also reviews the current state of thermal energy storage system operation within ship and vessel power plants, their design features, operating principles, and existing research results related to thermal energy storage systems.

The analysis of previous research findings made it possible to substantiate the relevance of thermal energy storage systems as one of the promising approaches to improving the efficiency and reliability of ship power plants, define the research aim, and formulate its objectives.

The second chapter describes the research methodology and substantiates the main methods used to investigate operating processes in ship power plants equipped with thermal energy storage systems. A mathematical modelling approach for analysing waste heat recovery processes based on the governing equations of heat conduction and phase transition is proposed. The model accounts for the influence of the thermophysical properties of thermal energy storage materials on heat charging, storage, and utilization. The developed mathematical model for waste heat recovery, storage, and utilization by a thermal energy storage system integrated into a ship power plant is presented to simulate the thermophysical processes involved in preparing main and auxiliary engines and supplying general ship services. The selection of a three-dimensional continuum model capable of predicting the main processes occurring within thermal energy storage units is substantiated, and a mathematical model describing phase transition processes in thermal energy storage materials used in phase-change silencer–thermal energy storage units of different configurations has been developed.

A schematic diagram of the experimental test bench for investigating a prototype model of a phase-change silencer–thermal energy storage unit is presented, intended for verification and validation of the mathematical model of heat transfer processes in the elements of the thermal energy storage system. The proposed mathematical model was verified against the experimental data obtained for the silencer–thermal energy storage unit.

The third chapter presents the results of three-dimensional calculations of the thermo-hydrodynamic structure of the gas flow and the phase change material in thermal energy storage units.

The main features of heat flux formation in structural elements under charging conditions have been identified. Temperature distributions across the cross-sections of thermal energy storage capsules, as well as the temperature and phase boundary distributions of the phase change material, were obtained taking into account its thermophysical properties during sequential cyclic operation and under different ratios of process time intervals.

The obtained results substantiated the improvement of the efficiency of surface ship power plants through the application of thermal energy storage systems utilizing waste heat sources with different temperature potentials by determining the efficiency of their application with due consideration of ship operating conditions and the composition of heat consumers using the following techno-economic indicators: time–energy equivalent, thermal energy storage system utilization efficiency parameter, quality parameter, and thermal efficiency.

The fourth chapter is devoted to experimental studies of a phase-change silencer–thermal energy storage unit model. Experimental investigations of the energy performance characteristics of the silencer–thermal energy storage unit model were carried out. Performance characteristics were obtained for a prototype model with a single capsule containing 3 kg of the phase change material mannitol, designed for operation within diesel engine exhaust systems. The cyclic charging duration from engine start-up to idle mode and from idle mode to partial load was determined, as well as the conditions enabling a reduction in charging time. The obtained experimental data were generalized using the principles of similarity theory for further application in the development of full-scale prototypes.

The fifth chapter substantiates the implementation of the research findings in the design and development of power plants for surface ships and vessels equipped with thermal energy storage systems. A structural design of a phase-change silencer–thermal energy storage unit and power plant configurations incorporating thermal energy storage systems for different classes of ships, including patrol boats, missile boats, corvettes, and frigates, have been developed. Recommendations for their implementation during the

design, development, and modernization of ship and vessel power plants have been formulated.

Practical recommendations have been developed for improving the design configurations of thermal energy storage systems intended to utilize waste heat from different sources, including exhaust, cooling and lube oil systems.

Key words: power plant, ship, vessel, operating cycle, engine, fuel economy, utilization, accumulation, exhaust gases, cooling liquid, lube oil, pre-start preparation, general ship needs.

ЗМІСТ

	Арк.
АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	11
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ ТА СКОРОЧЕНЬ	21
ВСТУП	26
РОЗДІЛ 1. НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НАДВОДНИХ КОРАБЛІВ УТИЛІЗАЦІЄЮ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ	36
1.1 Сучасний стан та перспективи розвитку надводного морського флоту та його енергетичних установок	36
1.2 Аналіз існуючих рішень підвищення технічної ефективності суднових енергетичних установок шляхом утилізації скидної теплоти	43
1.3 Сучасний стан використання теплоакumuлюючих систем у складі корабельних та суднових енергетичних установок	46
1.4 Результати досліджень теплоакumuлюючих систем з фазовим переходом	53
1.5 Визначення мети та постановка завдань дослідження	68
1.6 Висновки за розділом 1	69
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОРАБЕЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИМИ СИСТЕМАМИ	71
2.1 Методологія дослідження	71
2.2 Методи математичного моделювання процесів утилізації, накопичення та використання скидної теплоти теплоакumuлюючою системою в складі корабельної енергетичної установки	71

2.3	Математична модель ефективності енергетичної установки з ТАС	88
2.4	Методи фізичного моделювання процесів в елементах теплоакumuлюючої системи	98
2.5	Експериментальний стенд та програма досліджень дизельного двигуна з експериментальним зразком моделі шумоглушника-теплоакumuлятора	99
2.6	Верифікація та валідація математичної моделі процесів перенесення теплоти в елементах теплоакumuлюючої системи	103
2.7	Висновки за розділом 2	105
	РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ УТИЛІЗАЦІЇ, НАКОПИЧЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЮ СИСТЕМОЮ КОРАБЕЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ	107
3.1	Визначення інтегральних критеріїв вибору теплоакumuлюючого матеріалу для об'єктно-орієнтованого моделювання ефективності теплоакumuлюючої системи	107
3.2	Оцінка ефективності утилізації скидної теплоти корабельної енергетичної установки теплоакumuлюючою системою одного джерела	115
3.3	Визначення умов ефективного використання теплоакumuлюючих систем в складі енергетичних установок надводних кораблів	121
3.4	Підвищення ефективності теплоакumuлюючих систем в складі енергетичних установок різних класів кораблів з урахуванням технічних обмежень	132
3.5	Висновки за розділом 3	141
	РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДЕЛІ ШУМОГЛУШНИКА-ТЕПЛОАКУМУЛЯТОРА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ	144

4.1	Результати експериментальних досліджень дизельного двигуна з моделлю шумоглушника-теплоаккумулятора	144
4.2	Оцінка зниження рівня шуму суднових двигунів при використанні шумоглушника-теплоаккумулятора	148
4.3	Погодження результатів математичного і фізичного моделювання для різних теплоакуючих матеріалів	149
4.4	Висновки за розділом 4	152
	РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПРОЕКТУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НАДВОДНИХ КОРАБЛІВ ТА СУДЕН З ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЮ СИСТЕМОЮ	153
5.1	Розробка раціональних структур схемних рішень енергетичних установок надводних кораблів	153
5.2	Визначення показників ефективності енергетичних установок надводних кораблів та суден з теплоакуючою системою	169
5.3	Загальні рекомендації щодо формування теплоакуючої системи з фазовим переходом в складі енергетичних установок надводних кораблів та суден	179
5.4	Висновки за розділом 5	182
	ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ	184
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	187
	ДОДАТКИ	201
	ДОДАТОК А. Методологічна карта досліджень	202
	ДОДАТОК Б. Документи щодо впровадження результатів роботи	205

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ІНДЕКСІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

Умовні позначення:

$A_{\tau\psi i}$ – частка бюджету часу корабля;

c_p – питома масова теплоємність, Дж/(кг·К);

D – діаметр, м, дедвейт, т;

d – діаметр, м;

F – сума енергетичних витрат, Дж;

G – масова витрата, кг/с;

g_e – питома витрата палива, кг/(кВт·год);

H – питома ентальпія, Дж/кг;

k – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

l – довжина, м;

M – маса, кг;

$\bar{m}$ – питома маса, кг/кВт;

N – потужність, Вт;

n, i, j, k, l, ψ – змінні величини;

p – тиск, Па;

Q – тепловий потік, Вт;

Q_n^p – нижча теплота згоряння палива, кДж/кг;

q – питома витрата теплоти, кДж/(люд·год);

r – питома теплота фазового переходу, кДж/кг, радіус, м;

T – температура, К;

t – температура, °С;

U – кількість теплоти, Дж;

u – питомі витрати теплоти, кВт/кг;

V – об'єм, м³;

$\bar{v}$ – питомий об'єм, м³/кВт;

x – число теплових потоків;

w – швидкість потоку, м/с;

β – частка в загальному обсязі, масова частка рідкої фази;
 δ – відносна похибка, %;
 ε – ступінь стиснення;
 π_k – ступінь підвищення тиску в компресорі;
 λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К), ступінь підвищення тиску;
 ρ – густина, кг/м³, ступінь попереднього розширення;
 η – ефективний ККД;
 η_{ETAC} – показник ефективності використання ТАС;
 η_{TAC} – показник якості ТАС;
 ψ – напрям потоку;
 τ – час, с;
 E_t – показник теплової ефективності ТАС;
КО – критерій оптимальності;
ЧЕЕ – часовий-енергетичний еквівалент, кДж/год.

Індекси:

$ак$ – акумульований;
 $в$ – внутрішній;
 $вг$ – відпрацьовані гази;
 $вик$ – викиди;
 $вит$ – витрати;
 $вт$ – втрати;
 $вх$ – вхідний;
 $г$ – газ;
 $доб$ – добовий;
 $др$ – дрейф;
 $з$ – зовнішній;
 $зар$ – зарядка;
 $зов$ – зовнішній;
 $зп$ – зміна потужності;

зуп – зупинка;
ек – екіпаж;
еф – ефективний;
кап – капсула;
кін – кінцевий;
л – ламінарний;
м – мастило;
н.с. – навколишнє середовище;
нп – набір потужності;
охр – охолоджувальна рідина;
п – пуск;
пал – паливо;
пас – пасажери;
поб – побутові;
пов – повітря;
поч – початкова;
пл – плавлення;
пр – простій;
пот – потреби;
пп – передпускова підготовка;
р – річні;
рід – рідина;
с – стінка;
ст – стоянка;
т – технічні;
тв – твердий;
тур – турбулентний;
ход – ходовий;
Г – головний;
Д – допоміжний;

ЗД – зовнішні джерела;
ЗКП – загальнокорабельні потреби;
НП – набір потужності;
ПП – передпусковий підігрів;
ППЕ – побутові потреби екіпажу;
ТН – теплоносій;
ТПП – тепла передпускова підготовка;
 i – варіант компоновки КЕУ;
 j – призначення;
 m – тип двигуна;
 n – варіант джерела скидної теплоти.

Скорочення:

ГД – головний двигун;
ГТД – газотурбінний двигун;
ГТУ – газотурбінна установка;
ДГ – дизель-генератор;
ДД – дизельний двигун;
ДУ – дизельна установка;
КЕУ – корабельна енергетична установка;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
КПО – коефіцієнт «песимізму-оптимізму» Гурвіца;
КТА – контактний теплоаккумулятор;
КУ – котельна установка;
НМОТА – накопичувач моторної оливи з теплоаккумулятором;
НОРТА – накопичувач охолоджувальної рідини з теплоаккумулятором;
СВГ – система відпрацьованих газів;
СЕУ – суднова енергетична установка;
СЗКП – система загальнокорабельних потреб;
СОР – система охолоджувальної рідини;

СКП – система комбінованого прогріву;
СМ – система мастильна;
СП – система паливна;
СППД – система прискореного прогріву двигуна;
СППЕ – система побутових потреб екіпажу;
СТП – система теплової підготовки;
СТПП – система теплової передпускової підготовки;
СУТТА – підсистема утилізації теплової енергії відпрацьованих газів із теплоаккумулятором фазового переходу;
ТА – теплоаккумулятор;
ТАМ – теплоакмулюючий матеріал;
ТАС – теплоакмулююча система.
ШГТА – шумоглушник-теплоаккумулятор;
CODAD – комбінована дизельна і дизельна установка;
CODAG – комбінована дизельна і газотурбінна установка;
CODOG – комбінована дизельна або газотурбінна установка;
COGAG – комбінована газотурбінна і газотурбінна установка;
COGOG – комбінована газотурбінна або газотурбінна установка;
EEDI – індекс енергоефективності проєкту судна.

ВСТУП

Проблема енергозбереження та раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів на надводних кораблях, транспортних суднах та суднах портового флоту є актуальними для багатьох країн світу. Енергетичні потреби сучасних кораблів та суден задовольняються за допомогою їх головних та допоміжних енергетичних установок. Проте великий відсоток енергетичних установок, які зараз експлуатуються на суднах та кораблях, за своїми техніко-економічними показниками не відповідають сучасним вимогам з паливної економічності та екологічним показникам ІМО. Ці обставини роблять підвищення ефективності корабельних та суднових енергетичних установок актуальним науково-технічним завданням.

Перспективним напрямом удосконалення енергетичних установок кораблів і суден, спрямованим на зниження витрати палива та теплових викидів у навколишнє середовище, є впровадження сучасної технології акумулювання теплоти на основі фазового переходу.

Така технологія є ефективною для корабельних двигунів, коли потрібні значні витрати енергії для здійснення їх теплової підготовки, а саме, як передпусковий прогрів двигуна та його зберігання протягом тривалого часу в прогрітому стані для здійснення успішного подальшого пуску в холодних умовах. При цьому додатковими факторами, крім зручності експлуатації, є помірна низька вартість пристроїв для здійснення теплової підготовки двигунів, можливість швидкого отримання, порівняно з наявними блоками, необхідної потужності після пуску двигуна. Обмежуючими факторами цього напрямку є підвищення масогабаритних характеристик і компактності корабельної енергетичної установки (КЕУ). У зв'язку з цим, розробка і компоновка теплоакумуючих систем (ТАС) в складі енергетичної установки корабля є актуальним **запитом практики**.

Норми проєктування та експлуатації на рівні відомчих вимог визначають умови запиту практики, спрямованого на необхідність комплексного рішення питань удосконалення суднових енергетичних установок (СЕУ), що передбачає

створення принципово нових конструктивних схем шляхом включення ТАС до їх складу, які забезпечать підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів, за рахунок зниження витрат палива, і мінімізацію теплових викидів у навколишнє середовище, поліпшення показників енергоефективності головних і допоміжних двигунів різного цільового призначення з мінімізацією масогабаритних показників.

Розглядом різних аспектів розробки теплоакумуючих систем займаються численні наукові, проєктні та виробничі організації: Інститут технічної теплофізики НАН України, Інститут газу НАН України, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Національний технічний університет України КПІ імені Ігоря Сікорського, Вінницький національний технічний університет (ВНТУ), Одеський національний технологічний університет (ОНТУ), Одеський національний морський університет (ОНМУ), Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (НУК), Херсонська державна морська академія (Україна); SINTEF Ocean (Норвегія), NTNU (Norwegian University of Science and Technology) (Норвегія), RISE (Research Institutes of Sweden) (Швеція), Fraunhofer CML (Center for Maritime Logistics and Services) (Німеччина), EnergyNest (Норвегія/Німеччина), Wärtsilä Marine (Фінляндія), TU Delft + MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) (Нідерланди), VTT Technical Research Centre of Finland (Фінляндія), Technical University of Denmark (Данія), RWTH Aachen University (Німеччина), Aalto University (Фінляндія), University of Strathclyde (Великобританія) та інші.

Незважаючи на велику кількість наукових досліджень в області використання ТАС, а також процесів утилізації теплоти для акумулювання та використання в роботах Грицука І. В., Захарова Ю. В., Левенберга В. Д., Ткача М. Р., Трушлякова Є. І. та інших, науково-дослідницькі аспекти для виконання дослідно-конструкторських робіт при впровадженні ТАС в корабельну енергетику до теперішнього часу розроблені недостатньо, а можливості комплексного використання теплоакумуючих матеріалів (ТАМ) з фазовим переходом для покращення процесів акумуляції скидної теплоти різних

потенціалів в умовах експлуатаційних циклів різних класів кораблів і відповідним їм структур енергетичних установок не розглядались.

Таким чином, **актуальним науково-прикладним завданням** є створення вискоелективних ТАС в складі енергетичних установок надводних кораблів, що має значний практичний попит, а його вирішення забезпечить можливість створення мобільних, вискоелективних та конкурентоздатних вітчизняних енергетичних установок морського призначення, які будуть відповідати вимогам до енергетичних модулів нового покоління та зможуть працювати на об'єктах морської інфраструктури.

Актуальність дисертаційного дослідження визначається:

- необхідністю підвищення ефективності енергетичних установок утилізацією й акумуляцією теплоти різних джерел (відпрацьованих газів, охолоджуючої рідини та мастила);
- недостатньою кількістю теоретичних і експериментальних досліджень щодо раціональних методів організації робочих процесів у ТАС енергетичних установок різних класів кораблів;
- відсутністю даних з комплексного використання джерел теплоти різного потенціалу для інтенсифікації процесів теплоакумуляції та споживання;
- необхідністю вдосконалення визначення ТАМ за їх теплофізичними властивостями відповідно до призначення ТАС у складі енергетичних установок;
- необхідністю рекомендацій щодо конструктивних рішень елементів ТАС різної будови.

В основу роботи покладено **робочу гіпотезу** про те, що підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів при застосуванні ТАС у складі енергетичної установки досягається застосуванням теплоакумуляторів, вбудованих у наявні системи корабля, із теплоакуючими матеріалами, обраними з урахуванням сукупності їх характеристик: теплофізичних – температури плавлення, питомої масової теплоємності, питомої теплоти фазового переходу, густини та коефіцієнта теплопровідності; конструктивних – товщини шару та експлуатаційних – часів стоянки та ходу відповідно до експлуатаційного

циклу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні результати дисертаційної роботи отримано у відповідності до Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок за постановою Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2024 р. № 476, напрямок 3 «Енергетика та енергоефективність», складова - Системи генерації і транспортування електричної та теплової енергії, відповідно до тематичного плану науково-дослідних робіт ТОВ «ДПЦК»: 0126U000045 «Ефективність застосування теплоакumuлюючих систем в складі енергетичної установки надводних кораблів», 2024 – 2025 рр.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності енергетичних установок надводних кораблів застосуванням теплоакumuлюючих систем.

Задачі наукового дослідження:

1. Аналіз сучасних методів організації процесів утилізації теплоти в корабельних та суднових енергетичних установках з використанням ТАС.

2. Обґрунтування та вдосконалення математичної моделі процесів комплексної акумуляції теплоти різних джерел у гібридних ТАС з урахуванням впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючого матеріалу на процеси фазових переходів та особливостей теплопередачі в умовах їх взаємодії з потоками зовнішніх теплоносіїв в теплоакumuлюючих пристроях.

3. Експериментальне дослідження енергетичних характеристик моделі теплоакumuлятора фазового переходу з верифікацією запропонованої математичної моделі.

4. Визначення характеристик ТАС для енергетичних установок з розробкою практичних рекомендацій щодо їх впровадження в корабельну та суднову енергетику.

Об'єктом дослідження є утилізація скидної теплоти енергетичних установок надводних кораблів з теплоакumuляцією при фазовому переході.

Предметом дослідження є процеси, параметри та закономірності переносу скидної теплоти відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила

енергетичної установки при зміні агрегатного стану ТАМ в теплоаккумуляторі.

Методи дослідження. Методами дисертаційного дослідження є системний аналіз, математичне та фізичне моделювання процесів утилізації та використання теплоти різних джерел теплоакumuлюючим матеріалом з фазовим переходом, експериментальне дослідження енергетичних параметрів теплоаккумулятора, узагальнення результатів та синтез нових схемних та конструктивних рішень. Математичне моделювання процесів у елементах ТАС з урахуванням експлуатаційних циклів кораблів, складу енергетичних установок, теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів засновано на числовому розв'язанні систем диференціальних рівнянь, що описують основні закони збереження енергії та переносу теплоти з фазовим переходом за допомогою програмних продуктів SolidWorks та Mathcad.

Новизна результатів, одержаних в дисертації, полягає в наступному.

1. Вперше обґрунтовано методологію визначення теплоакumuлюючого матеріалу, який забезпечує підвищення ефективності процесів акумуляції теплоти з фазовим переходом у теплоакumuлюючих системах енергетичних установок надводних кораблів та суден на підставі трьох інтегральних показників, які враховують за сукупністю теплофізичні властивості матеріалу (теплоту фазового переходу, густину, температуру плавлення і коефіцієнт теплопровідності), конструктивні обмеження (характерний розмір теплоакumuлятора), експлуатаційні цикли надводних кораблів (тривалість ходу і стоянки) з узагальненням властивостей матеріалів низькотемпературних від 80 до 120 °С, середньотемпературних від 130 до 200 °С та високотемпературних від 210 до 500 °С.

2. Вперше доведено можливість підвищення ефективності енергетичної установки надводних кораблів теплоакumuлюючою системою простої або гібридної структур при використанні джерел скидної теплоти з різними температурними потенціалами визначенням ефективності її застосування залежно від теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів, умов експлуатації кораблів та складу споживачів за наступними техніко-економічними показниками:

часовим-енергетичним еквівалентом, показником ефективності використання ТАС, її показниками якості та теплової ефективності, що забезпечує для кораблів різних класів зниження часу запуску головних дизельних двигунів від 2 до 7 хвилин, витрати палива на один запуск від 26 до 214 кг.

3. Вперше отримані експериментальні характеристики моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора з однією капсулою, яка вміщає 3 кг теплоакumuлюючого матеріалу – манітол, призначеного для роботи у 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 масових витратах і температурі відпрацьованих газів відповідно від 0,11 до 0,16 кг/с та від 440 до 650 К, а скорочення значення часу зарядки до 20 хвилин забезпечується на подальших циклах зарядки при температурах відпрацьованих газів на рівні 660 К.

4. Вдосконалено метод прогнозування процесів комплексної акумуляції теплоти різних джерел у гібридних системах з урахуванням впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючого матеріалу на процеси фазових переходів у теплоакumuлюючих пристроях, що заснований на числовому моделюванні їх характеристик на основі концепції ефективної теплоємності процесів фазового переходу, яка відрізняється від відомих тим, що враховує особливості теплопередачі за детальними механізмами енергозбереження в умовах взаємодії поверхонь фазового переходу з потоками зовнішніх теплоносіїв від запуску до номінальної потужності при її ступінчастому підвищенні.

5. Отримав подальший розвиток підхід до багаторівневого моделювання процесів суднових енергетичних установок у вигляді об'єктно-орієнтованих взаємопов'язаних процедур «Головний двигун», «Допоміжний двигун» та «Теплоакumuлююча система» за ієрархічними рівнями: теплопередавальна поверхня теплоакumuлятора, теплоакumuлятор як елемент підсистеми та теплоакumuлююча система як елемент енергетичної установки.

Достовірність результатів досліджень забезпечується застосуванням сучасних розрахункових методів і засобів, адекватністю прийнятих припущень

математичної моделі й реальних процесів утилізації та акумуляції з фазовим переходом, задовільним узгодженням результатів розрахунків і експериментів, узгодженням з даними інших авторів, логікою отриманих результатів, які не суперечать практиці проектування сучасних енергетичних установок надводних кораблів.

Наукове значення роботи полягає у розширенні уявлень про теплотехнічні механізми процесів акумуляції, збереження та використання різних джерел скидної теплоти в умовах різних експлуатаційних циклів енергетичних установок надводних кораблів і розробці механізму впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючих матеріалів на робочі процеси фазового переходу в складі теплоакumuляторів для реалізації концепції модернізації та створення корабельних енергетичних установок з теплоакumuлюючими системами.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці практичних рекомендацій з використанням теплоакumuлюючих систем у складі енергетичних установок кораблів різних класів та суден, на підставі яких розроблено конструктивні схеми теплоакumuлюючих систем двигунів енергетичних установок кораблів потужністю для головних двигунів від 1 до 8 МВт і допоміжних – від 25 до 920 кВт, що працюють за відповідними експлуатаційними циклами та забезпечують потреби в теплоті енергетичної установки, корабельних систем та екіпажу.

Розроблена математична модель процесів комплексної акумуляції теплоти різних джерел в гібридних системах з урахуванням впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючого матеріалу здатна прогнозувати енергетичні характеристики сучасних суднових енергетичних установок з оптимізацією їх структури.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у сукупності з результатами науково-дослідної роботи 0126U000045 «Ефективність застосування теплоакumuлюючих систем в складі енергетичної установки надводних кораблів», яка виконана в ТОВ «Дослідно-проектний центр кораблебудування» АТ «Укроборонпром» при обґрунтуванні проектних рішень корабельних енергетичних

установок; при проєктуванні суднових енергетичних установок, їх систем та елементів перспективних суден в TOB Zaliv Ship Design; в навчальному процесі аспірантів і магістрантів при підготовці здобувачів в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, висновки та рекомендації, які наведені у дисертації та виносяться на захист, отримано автором самостійно та опубліковано у 6 наукових працях (з них 3 без співавторів).

В публікаціях без співавторів отримав подальший розвиток напряму створення інноваційного обладнання суднових енергетичних установок на основі акумуляції скидної теплоти процесами з фазовим переходом та розробки їх багаторівневої моделі в вигляді об'єктно-орієнтованих взаємопов'язаних процедур «Головний двигун», «Допоміжний двигун» та «Теплоакumuлююча система» з ієрархічними рівнями: теплопередавальна поверхня теплоакumuлятора, теплоакumuлятор як елемент підсистеми та теплоакumuлююча система як елемент енергетичної установки, реалізація яких забезпечує економію палива за рахунок оптимізації вибору теплоакumuлюючих матеріалів та шумоглушників-теплоакumuляторів в складі раціональних схемних рішень теплоакumuлюючих систем та, як наслідок, поліпшення ефективності цих систем та техніко-економічних показників установок в цілому.

У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить:

- схемні рішення для класів кораблів – патрульні та ракетні катери, корвети і фрегати для впровадження теплоакumuлюючих систем, які ґрунтуються на використанні способів акумуляції теплоти з фазовим переходом, в складі енергетичних установок; раціональні структури схемних рішень енергетичних установок в машинному відділенні на умовах технічних обмежень для надводних кораблів зі швидкістю повного переднього ходу від 25 до 60 вузлів, що обґрунтовує використання дизельної установки при швидкостях до 25 вузлів, газотурбінних і комбінованих установок CODOG, CODAG та COGAG при швидкостях від 30 до 44 вузлів, комбінованих установок CODOG, CODAG та COGAG при швидкостях більше 45 вузлів [5];

- результати експериментальних досліджень дизельного двигуна СМД-19 з моделлю шумоглушника-теплоакумулятора, що підтвердили достовірність результатів математичного моделювання процесів акумулювання теплоти експериментального зразка, а отримана залежність безрозмірної температури від чисел Біо і Фур'є для нестационарної теплопровідності дає можливість раціонального їх використання при розробці повнорозмірного устаткування [87];

- обґрунтування ефективності теплоакумуляюючих систем шляхом використання вибору теплоакумуляюючих матеріалів, що дозволяє отримати економію палива для круїзних лайнерів, балкерів та танкерів в складі раціональних схемних рішень теплоакумуляюючих систем та, як наслідок, поліпшення ефективності цих систем та техніко-економічних показників установок в цілому; характеристики показників ефективного використання теплоакумуляюючих систем для передпускової підготовки двигунів та санітарно-побутових потреб персоналу на борту судна в умовах різних експлуатаційних циклів круїзного лайнера, балкеру і танкеру, отримано базу даних для рекомендації оптимального вибору проектних рішень та експлуатаційних характеристик судових енергетичних установок з теплоакумуляюючими системами, що дозволяє отримати відносну економію палива [93].

Відомості про апробацію результатів дисертації. Основні положення і результати досліджень обговорювалися і отримали позитивні відгуки на таких заходах: XIII–XVI Міжнародних науково-технічних конференціях «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці» (Миколаїв, 2022–2025); 14 та 15 Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, 2023 та 2024); V та VI Міжнародних науково-практичних морських конференціях кафедри СЕУ І ТЕ MPP&O-2024 та MPP&O-2025 Одеського національного морського університету (Одеса, 2024 та 2025); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (Миколаїв, 2024); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» (Миколаїв, 2025).

Публікації. Основні положення та результати досліджень відображено в 18

друкованих наукових працях, з них 6 основних публікацій, у тому числі 5 у наукових фахових виданнях України (з них 3 без співавторів); 10 матеріалів доповідей на міжнародних конференціях (з них 4 без співавторів).

Структура роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел із 123 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 207 сторінок, у тому числі 46 рисунків і 30 таблиць.

РОЗДІЛ 1. НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НАДВОДНИХ КОРАБЛІВ УТИЛІЗАЦІЄЮ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ

1.1 Сучасний стан та перспективи розвитку надводного морського флоту та його енергетичних установок

Більш ефективне використання первинних енергетичних ресурсів залишається одним із ключових глобальних завдань для суден морського та річкового транспорту. Судноплавство, будучи найбільш економічним та ефективним видом транспорту для перевезення великогабаритних вантажів, забезпечує до 90% світового вантажообігу, а підвищення його енергоефективності безпосередньо впливає на сталий розвиток світової економіки та торгівлі [1–3]. Згідно з останніми звітами UNCTAD та Clarkson's Research [1, 2], на початок 2024 року світовий флот налічував близько 109000 судів сукупною вантажопідйомністю понад 2,35 млрд. т. дедвейту. При цьому основну частку від загального тоннажу – 42,7% складають балкери, 28,3% – танкери (включаючи нафтові та хімічні), 14% – контейнеровози та близько 0,4% – пасажирські та круїзні судна. На даний час балкери та танкери забезпечують понад 70% світової перевізної місткості, що підкреслює їхнє ключове значення у структурі глобальних морських перевезень. З урахуванням масштабів та енергоємності світового флоту саме судноплавство стає однією з ключових галузей, на яку спрямовані сучасні екологічні ініціативи. Вимоги ІМО спрямовані на зниження витрат палива, обмеження викидів парникових газів та підвищення енергоефективності СЕУ. Відповідно до IMO GHG Strategy 2023 [4], галузь має скоротити сукупні викиди CO₂ на 20–30% до 2030 року (щодо рівня 2008 р.) та досягти чистого нульового балансу (Net Zero) до 2050 року.

Для надводних кораблів класів патрульний корабель, корвет та фрегат зі стандартною водотоннажністю від 100 до 6650 т, спущених на воду з 2000 року зі швидкістю повного переднього ходу до 25 вузлів, включно, основним типом

установки є дизельна. Для корветів і фрегатів загальний відсоток дизельних або комбінованих дизельних установок CODAD складає відповідно 32% та 70%, а для патрульних кораблів кількість дизельних і комбінованих дизельних установок CODAD становить близько 80% від загальної кількості. Кораблі зі швидкістю повного переднього ходу від 25 до 30 вузлів можуть мати як дизельну так і комбіновану енергетичні установки (CODOG, CODAG та CODAD). Сумарна потужність більшості дизельних двигунів у комбінованих установках становить від 20 до 45% від потужності газотурбінних двигунів.

Для кораблів швидкість повного переднього ходу, яких становить від 30 до 44 вузлів – найбільш поширеними типами установок є газотурбінні і комбіновані установки, що працюють за схемами CODOG, CODAG та COGAG. При цьому сумарна потужність більшості дизелів у комбінованих установках становить від 20 до 27% від потужності газотурбінних двигунів [5].

Для кораблів швидкість повного переднього ходу, яких становить понад 45 вузлів – найбільш поширеними типами установок є комбіновані установки, що працюють за схемами CODOG, CODAG та COGAG. Сумарна потужність більшості дизелів у комбінованих установках становить від 20 до 25% від потужності газотурбінних двигунів.

Слід також відзначити зростання дизель-електричних і електричних установок різних схем, що намітилося за останні 20 років, в діапазоні швидкостей від 20 до 35 вузлів [5].

У складі Військово-морських сил Збройних сил України на озброєнні перебували 1 фрегат, 5 корветів, 3 тральщики, 2 десантні кораблі, 1 підводний човен і 49 допоміжних кораблів [6].

На початку грудня 2018 року командувачем Військово-морських сил було затверджено Стратегію розвитку Військово-морських сил України до 2035 року [7]. Станом на 2025 рік Військово-морські сили налічували 90 кораблів та катерів [8].

Раціональна структура КЕУ при розташуванні в машинному відділенні базується на умовах живучості, енергетичної ефективності та компактності. Наведені умови мають певні протиріччя і потребують обґрунтування

оптимізаційного рішення шляхом розкриття невизначеностей при технічних обмеженнях внаслідок класу надводного корабля.

За структурою KEY можливо представити як прості схеми – дизельні енергетичні установки та комбіновані енергетичні установки (CODOG, CODAG, COGOG, COGAG). Згідно з класифікацією енергетичних установок використовують наступні літерні символи: D – дизельна установка, G – газотурбінна, S – котлотурбінна, N – ядерна, L – електрична передача потужності на гребний вал, CO – комбінована, O – з розподіленою роботою установки економічного ходу та A – з сумісною роботою двигунів на усіх режимах [9].

На рисунках 1.1–1.3 приведені результати аналізу існуючих типів головних пропульсивних установок KEY [5, 10].

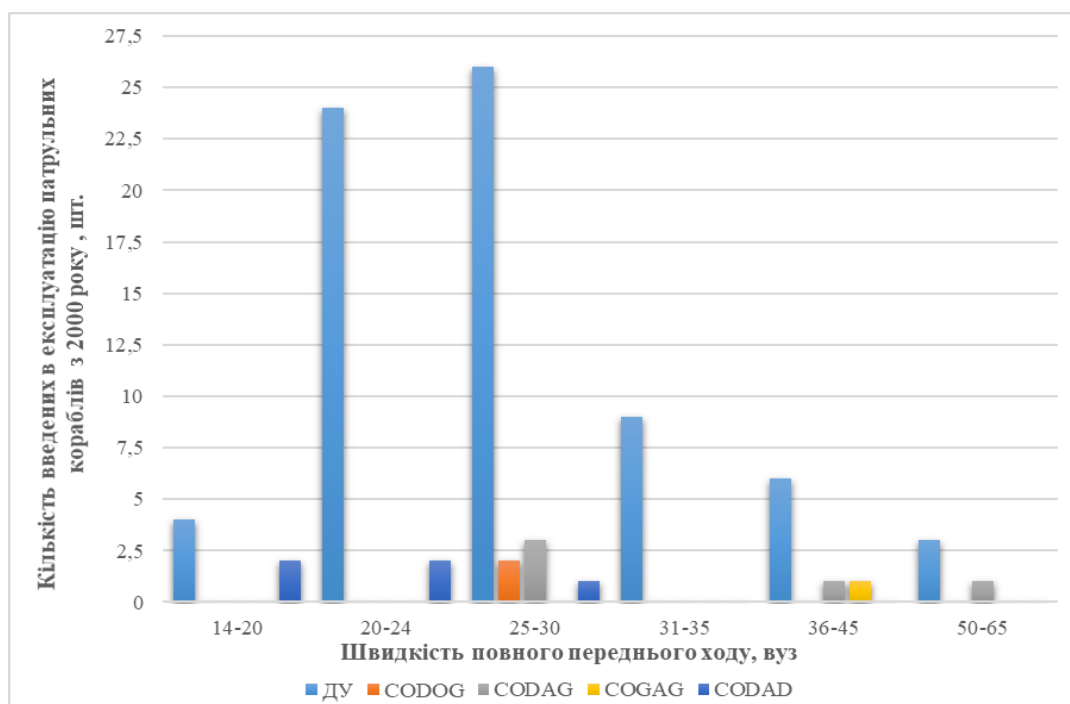


Рисунок. 1.1 – Застосування різних типів головних енергетичних установок залежно від швидкості повного переднього ходу для патрульних кораблів згідно класифікації енергетичних установок: ДУ – дизельна установка; CODOG – комбінована дизельна або газотурбінна установка; CODAG – комбінована дизельна і газотурбінна установка; COGAG – комбінована газотурбінна і газотурбінна установка; CODAD – комбінована дизельна і дизельна установка

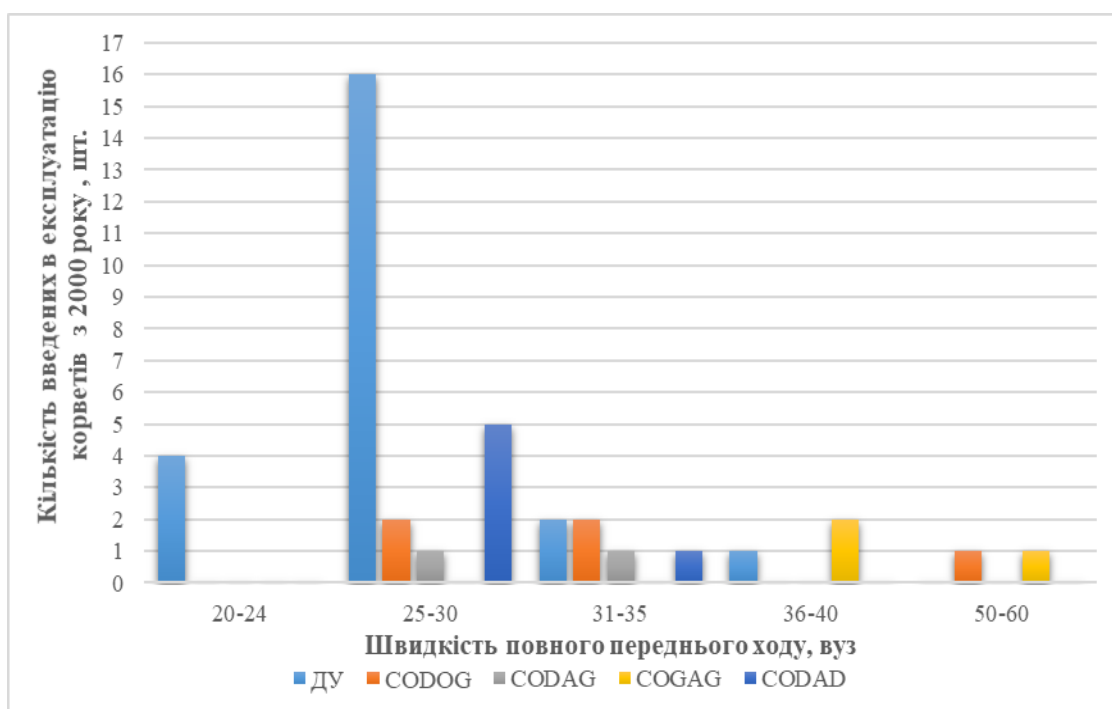


Рисунок 1.2 – Застосування різних типів головних енергетичних установок залежно від швидкості повного переднього ходу для корветів. Позначення типів КЕУ наведені на рисунку 1.1

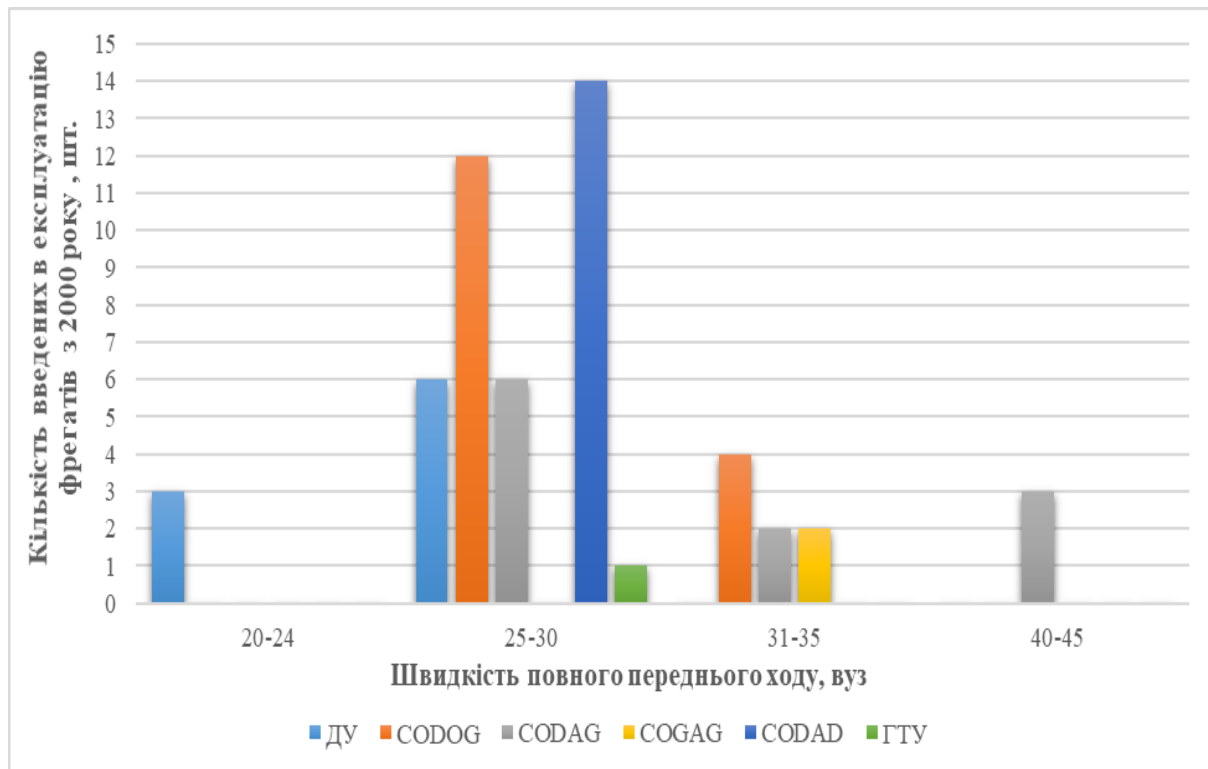


Рисунок 1.3 – Застосування різних типів головних енергетичних установок залежно від швидкості повного переднього ходу для фрегатів. ГТУ – газотурбінна установка. Позначення типів КЕУ наведені на рисунку 1.1

Приведені результати узагальнюють дані для 85 проектів патрульних кораблів, 39 проектів корветів та 53 проектів фрегатів [5, 10].

Показники енергетичної ефективності та масогабаритних характеристик КЕУ наведені на рисунках 1.4–1.6 [10–13].

В якості показників компактності енергетичних установок (рисунки 1.5 та 1.6) прийняті: питома маса $\bar{m} = \frac{M_y}{N_e}$, кг/кВт, і об'єм $\bar{v} = \frac{V_y}{N_e}$, м³/кВт, де M_y та V_y – відповідно загальна маса і об'єм основних елементів установки; N_e – її ефективна потужність.

Підвищення відносної маси для суднових енергетичних установок з малообертовими двигунами при застосуванні утилізації теплоти в утилізаційних котлах складає до 10%, відносного об'єму – до 8%. Показники суднових газопаротурбінних установок залежать від їх кількості та компонування у складі установки.

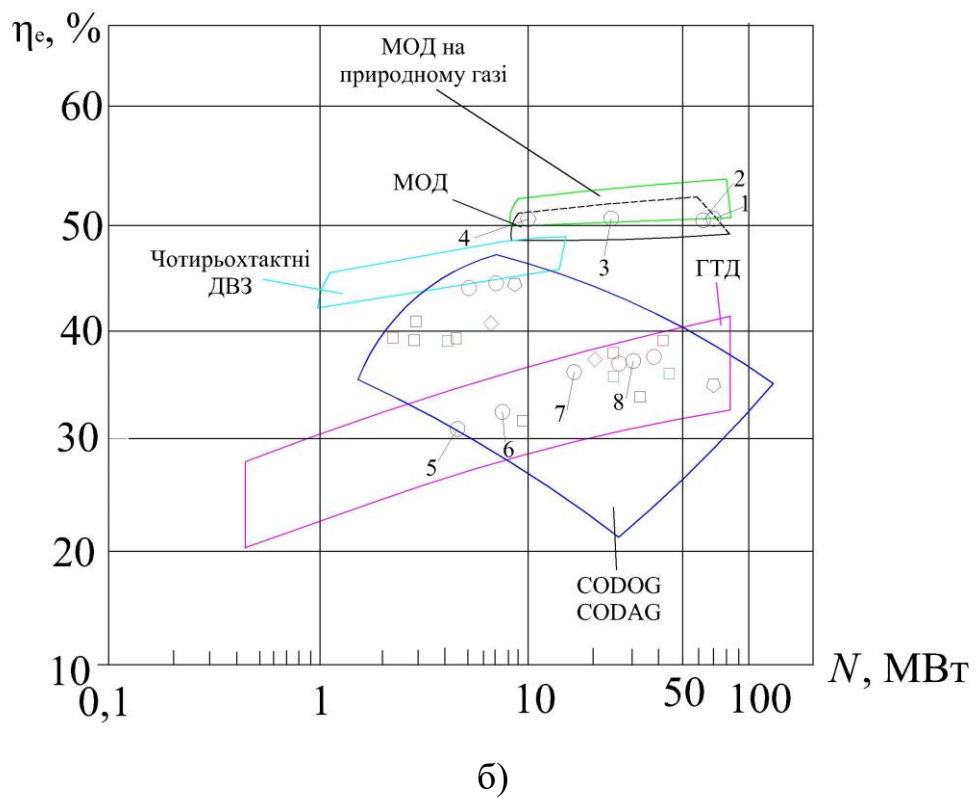
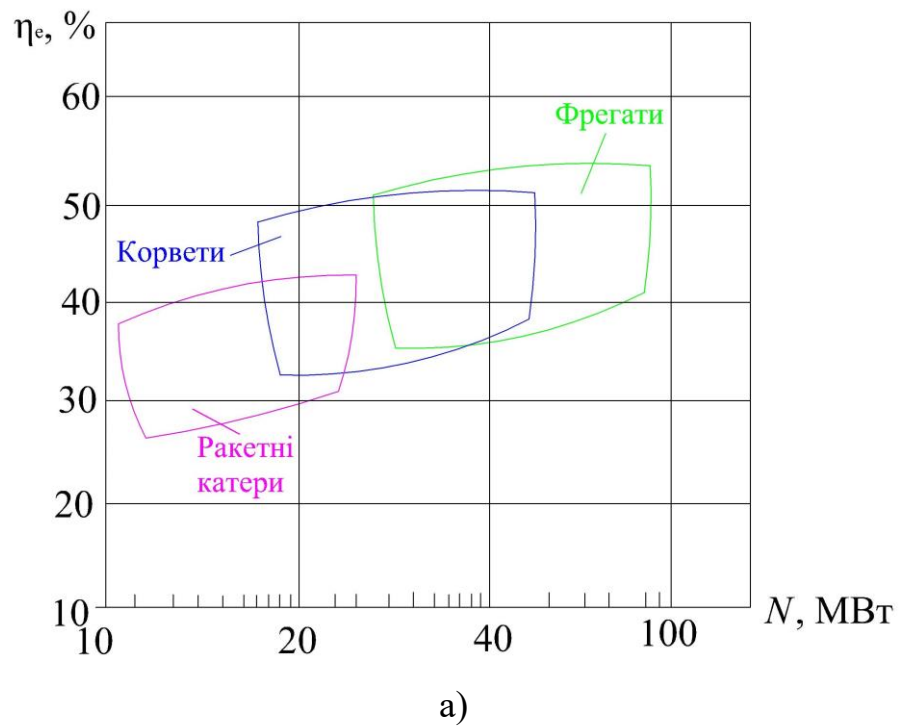


Рисунок 1.4 – Ефективний ККД головних двигунів енергетичних установок:

а) корабельних, б) суднових

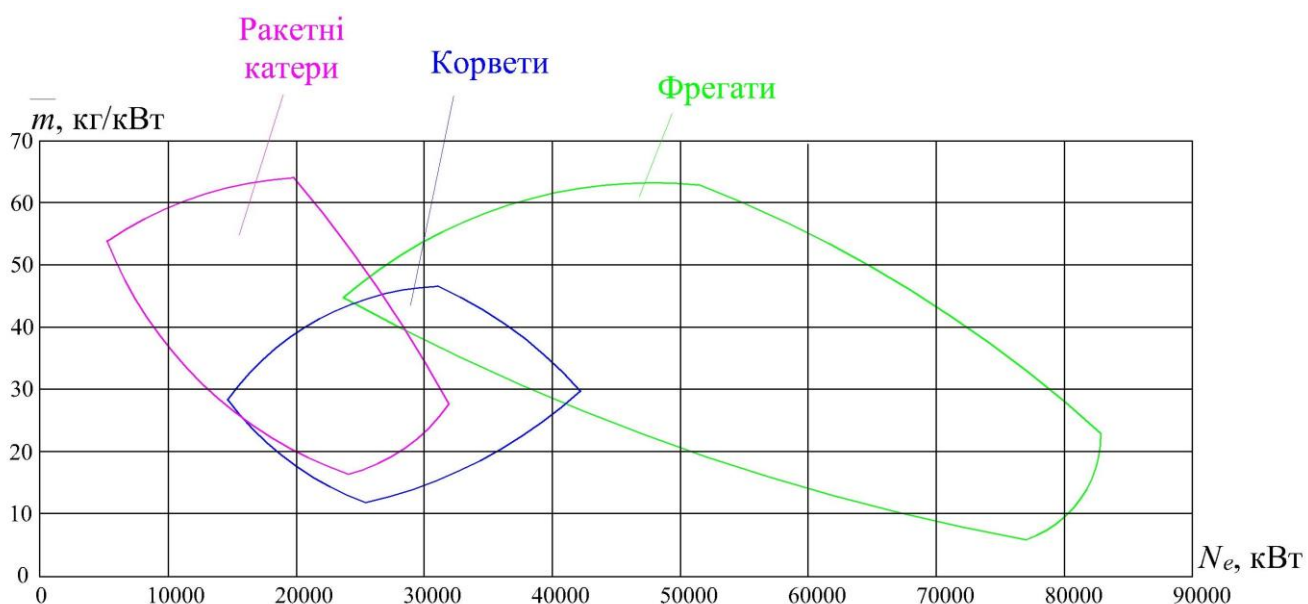


Рисунок 1.5 – Залежність питомої маси енергетичних установок кораблів класів катери, корвети та фрегати від встановленої потужності

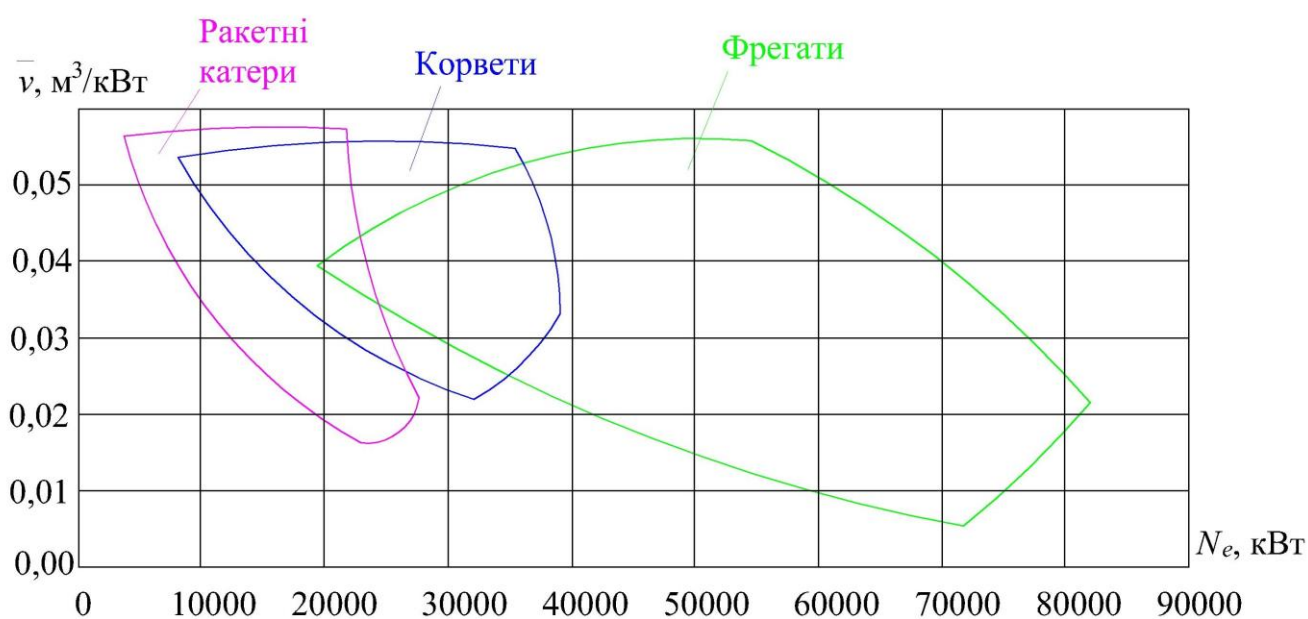


Рисунок 1.6 – Залежність питомого об'єму енергетичних установок кораблів класів катери, корвети та фрегати від їх потужності

1.2 Аналіз існуючих рішень підвищення технічної ефективності суднових енергетичних установок шляхом утилізації скидної теплоти

Забезпечення енергетичних потреб сучасних надводних кораблів та суден виконується за допомогою складного комплексу функціонально взаємопов'язаних елементів енергетичного устаткування, машин та механізмів, що складають КЕУ або СЕУ.

Робота енергетичних установок супроводжується утворенням теплових викидів, які можна застосувати як вторинні енергетичні ресурси. Використання вторинних енергетичних ресурсів підвищує ефективність енергетичних установок за рахунок зменшення споживання первинного палива та зниження теплових і шкідливих викидів у навколишнє середовище.

У результаті роботи СЕУ, близько 30% енергії первинних енергоресурсів використовується на її потреби та екіпажу судна. Решту енергії (приблизно 50%) складають вторинні енергетичні ресурси різних температурних рівнів, а близько 20% становлять безповоротні втрати.

Використання вторинних енергетичних ресурсів здійснюється за рахунок процесів утилізації, регенерації та акумуляції. Питання споживання теплових викидів з температурами, які нижче за 300 °С, що становить 89% від загального обсягу, є складною проблемою на даний час, оскільки потребує урахування наявних технологій та потреб споживачів [14]. Обмежуючими факторами в таких роботах є масогабаритні характеристики пристроїв і компактне їх розміщення у складі сучасних енергетичних установок корабля або судна.

Технології енергозбереження є найбільш доцільним рішенням для використання у корабельній та судновій енергетиці, оскільки вони сприяють вирішенню низки проблем пов'язаних з підвищенням ефективності кораблів та суден, а також зменшують їх шкідливий вплив на довкілля.

Згідно даних обставин, енергозберігаючі технології можливо поділити на декілька груп [15, 16].

До однієї з груп входять енергогенеруючі технології, до яких відносяться когенераційні та тригенераційні засоби. У цих засобах використовується устаткування, яке здатне перетворювати потенціал низькотемпературних вторинних енергетичних ресурсів у механічну роботу. Дані машини можуть бути реалізовані на основі різних термодинамічних циклів таких як цикл А. Kalina [17], цикл Ренкіна [18] та інші.

На даний час одним з перспективних напрямів удосконалення енергетичних установок є утилізація скидної теплоти. При виборі технології утилізації скидної теплоти важливим фактором є загальносуднові потреби, потреби екіпажу та пасажирів в конкретних видах енергії: механічній, електричній та тепловій.

Основними джерелами скидної теплоти у судновій або корабельній енергетичній установці є система газовахлопу, система охолодження та мастильна головних та допоміжних двигунів. Розподіл теплових викидів за температурами представлено на рисунку 1.7 [19], а характеристики джерел та теплоносіїв у таблиці 1.1 [20–22].

Відпрацьовані гази є одним з головних носіїв скидної теплоти у суднових двигунах. Після згоряння відпрацьовані гази виходять з циліндрів двигуна при температурах від 300 °С до 500 °С в залежності від навантаження на двигун і типу палива. Ці гази володіють значною теплотою завдяки своїй високій ентальпії, що становить приблизно від 25% до 35% від загальної кількості енергії, отриманої з палива.

Температурний потенціал відпрацьованих газів створює значні можливості для утилізації теплоти. Впровадження теплоутилізуючих систем, дозволяє використати теплоту для виробництва пари, електроенергії та гарячої води.

Суднові дизельні двигуни потребують ефективних систем охолодження для відведення надлишкової теплоти, що утворюється під час роботи, і підтримання компонентів двигуна в безпечних температурних межах. Первинні системи охолодження включають охолодження «водяної сорочки» та надувного повітря, обидві з яких поглинають значну кількість теплоти з двигуна [23].

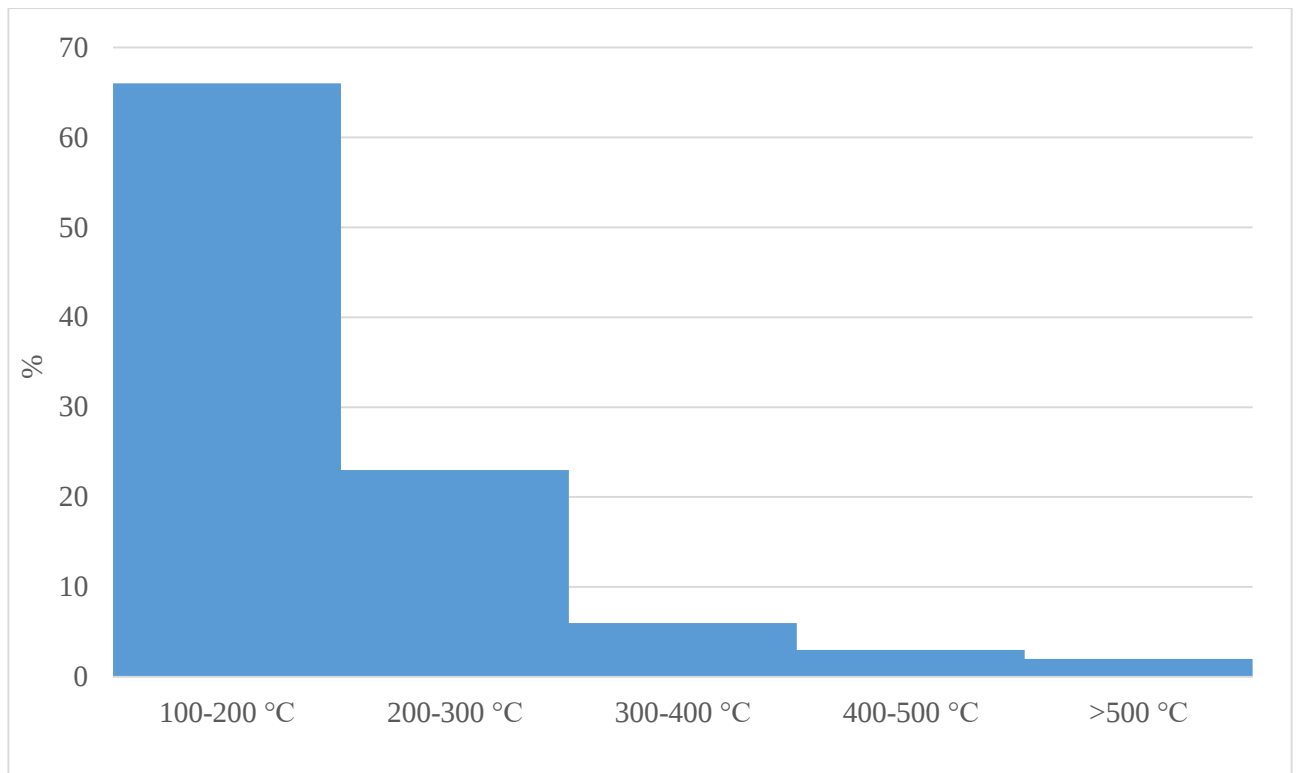


Рисунок. 1.7 – Склад скидних теплових ресурсів в залежності від температури

Таблиця 1.1 – Джерела скидної теплоти у судновій енергетичній установці

Джерело скидної теплоти	Теплоносій	Середній діапазон температур (°C)	Частка загальних тепловтрат
Система газовихлопу: - головний двигун - допоміжний двигун	Відпрацьовані газы	300–500 200–400	25–35% 10–20%
Система охолодження: - головний двигун - допоміжний двигун	Охолоджувальна рідина	60–90 60–85	15–25% 15–20%
Масильна система: - головний двигун - допоміжний двигун	Масило	60–95 60–90	5–10% 4–8%

Скидна теплота, що виділяється системами охолодження, є значним тепловим ресурсом, який можна утилізувати для виробництва прісної води, опалення приміщень та забезпечення побутовою гарячою водою.

Додатковим джерелом скидної теплоти у суднових дизельних двигунах є мастильна система. Мастило відводить теплоту від нагрітих елементів двигуна – підшипників, поршневої групи та інших вузлів тертя і зазвичай має робочі температури в діапазоні 60–95 °С. Частка теплоти, що відводиться мастильною системою, становить орієнтовно 5–10% від загального теплового балансу двигуна. Незважаючи на нижчий температурний потенціал порівняно з відпрацьованими газами, ця теплота може бути ефективно використана для потреб попереднього підігріву, гарячого водопостачання та низькотемпературних теплоутилізаційних контурів [22, 23].

В КЕУ під час роботи є надлишок теплоти для впровадження енергоощадного заходу – утилізації та переносу теплоти з одного енергетичного процесу до другого, або до споживача безпосередньо. Необхідною умовою останнього є збіг у часі процесу генерації надлишкової теплоти та потреби в ній у споживача, що у більшості випадків не є можливим. Для вирішення даної проблеми застосовують ТАС, що дозволяють накопичувати теплоту, зберігати її певний проміжок часу та потім віддавати споживачу за потребою.

1.3 Сучасний стан використання теплоакумуючих систем у складі корабельних та суднових енергетичних установок

Акумуляція скидної теплоти є актуальною для використання в передпусковому та після пусковому прогріві двигуна, зберіганні прогрітого двигуна при здійсненні експлуатації в холодних умовах, а також для загальнокорабельних потреб. При цьому до вирішальних факторів, крім економічної доцільності додаються обмеження за масогабаритними та експлуатаційними ознаками.

Потреби цієї теплоти для споживачів відповідають характеристикам дизельних двигунів (ДД) та газотурбінних двигунів (ГТД) у складі СЕУ та залежать від кліматичних умов, характерних для різних пір року та місця знаходження корабля або судна.

Аналіз використання ТАС у складі корабельних та суднових енергетичних установок показав, що більшість з них в даному напрямку сконцентровані на визначенні, підборі ефективних теплоакумуючих матеріалів та подальшому визначенні масогабаритних показників та конструкції теплоаккумуляторів (ТА) при їх інтеграції у системи установок. За результатами досліджень визначені час теплової підготовки двигуна внутрішнього згоряння, показники паливної економічності та зменшення викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище двигуна, виконана розробка відповідних схемних рішень [24–29].

У роботах [30–32] на прикладі допоміжного двигуна 6Ч 12/14 з урахуванням температури навколишнього середовища під час виконання передпускового та післяпускового прогріву і забезпечення необхідного теплового стану двигуна під час міжзмінної зупинки без його запуску чи постійної роботи в режимі холостого ходу визначено склад і налаштування системи теплової підготовки.

За результатами експериментальних досліджень [24, 33–35] підтверджено можливість модернізації системи охолодження суднового двигуна MAN D2876 LE301 портового буксиру за рахунок встановлення ТА з фазовим переходом до системи охолодження з можливістю використання технології передпускової теплової підготовки суднового двигуна. 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 ТА для підтримання системи охолодження в заданих температурних межах без використання стандартних способів підігріву суднового двигуна внутрішнього згоряння.

Прикладом використання ТАС у складі СЕУ є впровадження компанією Kotug International BV у 2016 році такої системи на одному зі своїх буксирів ZP Bison (проект Damen Azimuth Tractor Drive Tug 2412) (рисуюнок 1.8) [36]. Дана ТАС

містить матеріал з фазовим переходом та утилізує теплову енергію від системи охолодження двигунів.

Хоча система акумуляції теплової енергії ускладнює енергетичну установку, проте, у порівнянні з використовуваними на судах електроакумуляторними батареями, теплоакумулятори мають більш низьку вартість і вплив числа циклів «зарядка-розрядка» на їх енергоємність, для деяких теплоакумуляуючих матеріалів, незначний.

Особливістю експлуатації суден портового та прибережного флоту є часта зміна режимів роботи СЕУ. При цьому більшу частину часу головні двигуни експлуатуються на часткових режимах, де ефективність роботи ДД нижча, а питомі показники теплових та шкідливих викидів вищі, ніж на номінальному режимі. Підвищення економічності та екологічності для таких суден може бути досягнуте застосуванням в них гібридних судових енергетичних установок, які дозволяють на режимах, що не потребують тривалої великої потужності, використовувати електричну енергію, що запасається в електроакумуляторах. Заряджання електроакумуляторів здійснюється від генераторів із приводом від головних двигунів (ГД) або дизель-генераторів (ДГ), що працюють на режимах близьких до номінальних або від берегового живлення. Приклад такого судна з гібридною енергетичною установкою є азимутальний буксир проекту ASD 2810 [37]. Заявлено, що гібридна версія цього буксиру дозволяє знизити споживання палива до 30% та скоротити викиди в атмосферу на 40% порівняно із звичайною енергетичною установкою для такого судна. Схема гібридної енергетичної установки представлена на рисунку 1.9 [37, 38]. У даній гібридній енергетичній установці використовуються електроакумулятори фірми Valence марки U 27-36XP у кількості двох модулів ємністю по 1,92 кВт·год кожен. Дані акумулятори мають наступні питомі показники по запасній електричній енергії [39]: на одиницю маси – 102 Вт·год/кг; на одиницю об'єму – 162 Вт·год/літр.



Рисунок 1.8 – Розміщення елементів теплоакumuлюючої системи на буксирі
ZP Bison [36]

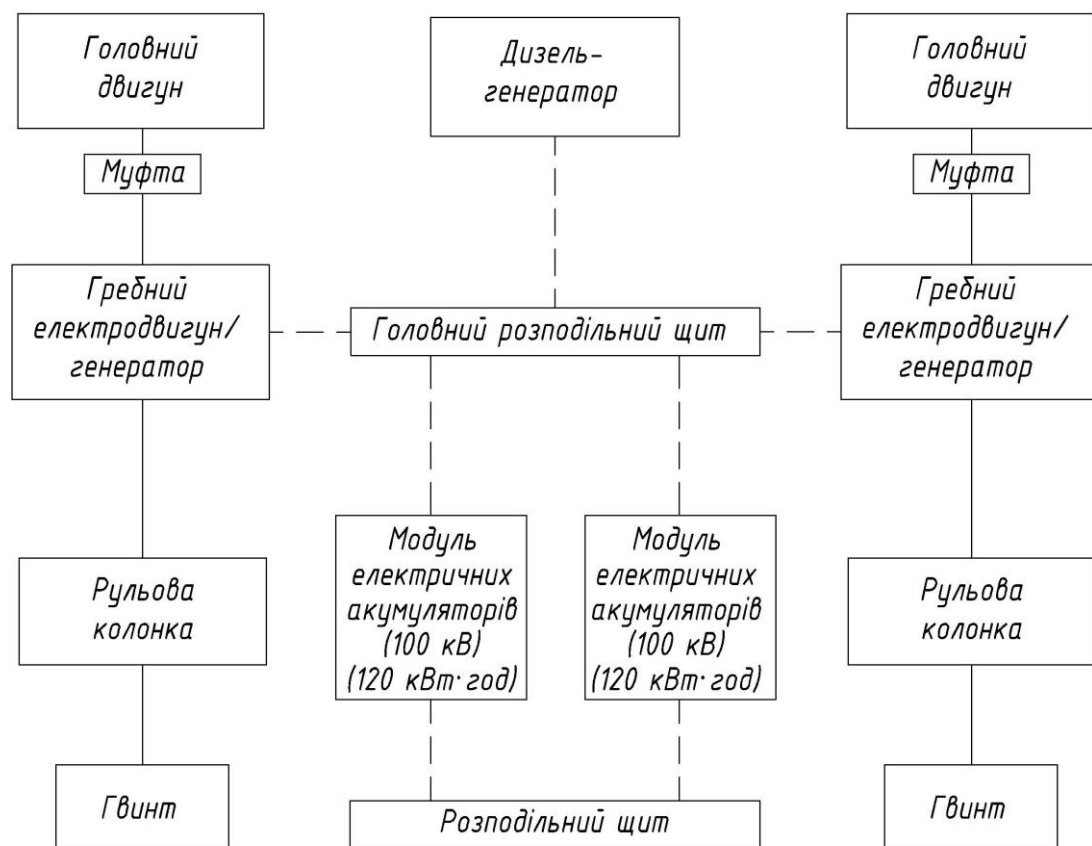


Рисунок 1.9 – Схема гібридної енергетичної установки буксира
проекту ASD 2810 [38]

Наразі в університеті розробляються перспективні схемні і конструктивні рішення щодо застосування та проектування ТАС на суднах портофлоту, як для звичайних, так і для гібридних енергетичних установок [40, 41]. Паралельно проводяться експериментальні дослідження та створюються дослідні зразки ТА для подальшого їх патентування [42, 43].

При експлуатації суден з такою гібридною енергетичною установкою в холодних кліматичних умовах покриття потреб в тепловій енергії може здійснюватися: за рахунок роботи котельної установки, що споживає паливо; шляхом отримання теплової чи електричної енергії від працюючих ДД або за рахунок використання електричної енергії, запасеної електроакумуляторами [42]. Кожен із перелічених варіантів має недоліки. Вони більшою чи меншою мірою збільшують споживання палива, викиди в атмосферу та знижують переваги гібридної енергетичної установки перед традиційною. Витрати електричної енергії, накопиченої в електроакумуляторах, для отримання теплової енергії дозволяє скоротити час їх використання на характерних режимах, що нівелює переваги гібридної СЕУ. Збільшення енергоємності акумуляторних батарей призводить до суттєвого підвищення вартості гібридної СЕУ. Як показують результати попередніх досліджень, одним з ефективних рішень для експлуатації гібридних СЕУ в холодних кліматичних умовах може бути включення до їх складу ТАС, яка утилізуватиме теплоту від працюючих ГД і ДГ. Це дозволить зберегти переваги гібридної СЕУ перед штатною. Застосування ТАС конструктивно ускладнює гібридну СЕУ, проте, порівняно з електроакумуляторними батареями, теплоакумулятори мають нижчу вартість, при цьому, вплив на їх енергоємність числа циклів для деяких теплоакумуляуючих матеріалів відсутній.

Для створення ТАС для суден, одним з конструктивних рішень, є ТА, які засновані на фазових переходах. В них накопичення енергії відбувається в результаті плавлення та кристалізації, випаровування та конденсації ТАМ, що супроводжуються поглинанням та виділенням прихованої теплоти. Порівняно з акумуляторами явної енергії, ТА з фазовим переходом мають менші обсяги.

Класифікація ТА для СЕУ наведена на рисунку 1.10 [44–46].

У СЕУ застосування акумуляторних батарей розглядають як ефективний засіб згладжування навантаження та зниження експлуатаційних витрат у гібридних схемах. Зокрема, для морських застосувань наведено такі орієнтовні параметри літій-іонних батарей: питома енергоємність становить близько 206 (Вт·год)/кг для батарей типу NMC та 96 (Вт·год)/кг для LTO, а вартість – відповідно близько 150€/кВт·год і 380€/кВт·год, що демонструє суттєвий техніко-економічний компроміс між енергоємністю та вартістю батарейних рішень [47].

У цьому контексті ТАС, що базуються на утилізації скидної теплоти суднових двигунів, можуть виступати більш економічно доцільним рішенням для покриття теплових навантажень, особливо у складі суден з простими енергетичними установками. Згідно з оглядом [48], значна частина енергії палива суднових дизелів (до 50%) втрачається з відпрацьованою теплою, а впровадження технологій її утилізації здатне забезпечити зниження витрат палива суднових енергетичних установок орієнтовно на 5–15% залежно від конфігурації системи.

Додатково у фундаментальних оглядових роботах з акумуляування теплоти фазозмінними матеріалами підкреслюється їх висока енергетична щільність та ефективність для систем утилізації низькопотенційної теплоти [49]. Крім того, на відміну від електричних накопичувачів енергії, ТАС можуть бути конструктивно інтегровані в існуючі елементи СЕУ (глушники, ємності мастила або палива), що зменшує потребу у додатковому об'ємі та спрощує їх впровадження.

Аналіз існуючих рішень у судновій енергетиці показав, що перспективним напрямом підвищення ефективності енергетичних установок корабля та судна є застосування в їх складі ТА фазового переходу.

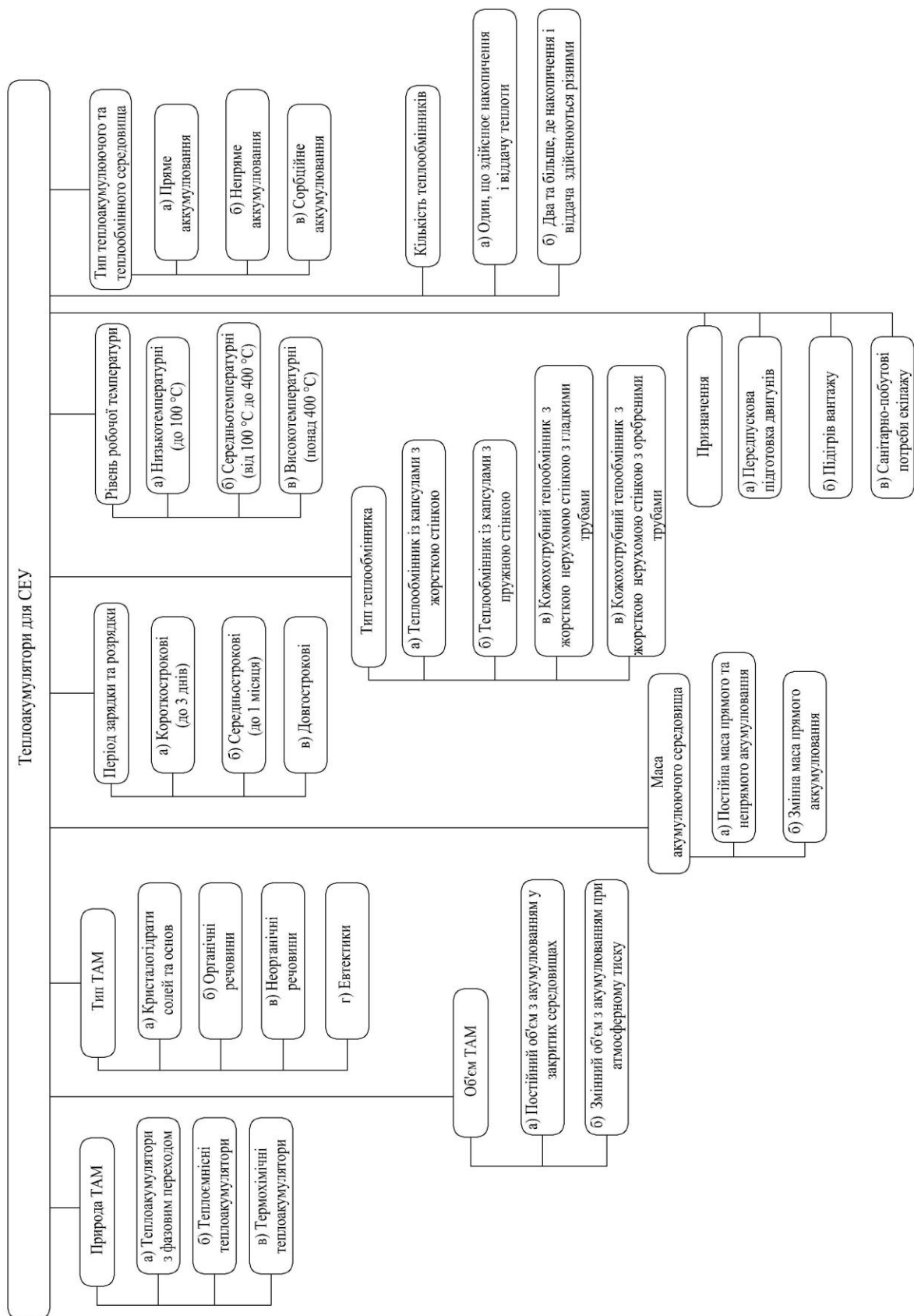


Рисунок 1.10 – Класифікація теплоаккумуляторів для СЕУ

1.4 Результати досліджень теплоакumuлюючих систем з фазовим переходом

Використанню теплоакumuляторів з фазовим переходом та інших систем акumuлювання теплоти в суднових, транспортних і стаціонарних енергетичних установках присвячено значну кількість публікацій, в яких отримано наступні результати [50–78].

Запропоновано використання великооб'ємних ТА (1000–2500 м³), що утилізують теплоту відпрацьованих газів, у складі енергетичної установки торгового судна [50]. Було проаналізовано вплив основних параметрів конструкції на продуктивність системи. Залежно від ємності резервуара система дозволяє скоротити споживання палива котлом від 60% до 90% і забезпечити річну економію близько 0,25 млн доларів.

Для підвищення енергоефективності круїзних лайнерів під час рейсу досліджено можливість застосування гібридних теплоакumuлюючих систем з теплоакumuляторами фазового переходу для отримання гарячої питної та технічної води для екіпажу і пасажирів [51, 52]. Випробування на експериментальному стенді бака з ТАМ об'ємом 0,1 м³ дозволили продемонструвати підвищення енергоемності з ~20 до більш ніж 35 кВт·год/м³ і здатність ТАС згладжувати піки споживання гарячої води. У роботі [53] наведено оптимізовану конструкцію капсульованого ТАМ, яка забезпечує стійкий тепловий режим при тривалих циклах, що актуально для круїзних лайнерів.

Питанню розробки компактних модульних ТАС для суден присвячено дослідження плоско-пластинчастого теплоакumuлятора [54]. Розглянуто конструкцію пластин з ТАМ, що працюють у складі ТАС від відпрацьованих газів. Отримана питома енергоемність 45–46 кВт·год/м³, що підтверджує придатність модулів для суднових енергетичних установок з обмеженими масогабаритними параметрами машинного відділення. Аналогічні результати використання плоских пластин представлені і в роботі [55], де показані переваги рівномірного прогріву ТАМ, зниження теплового опору і поліпшення динаміки процесів зарядка-

розрядка.

Використання ТАС для систем HVAC, гарячого водопостачання та опалення розглянуто в роботі [56], де проаналізовано вплив ТАС на роботу теплоенергетичних контурів судна на типовому семиденному круїзі. Показано, що інтеграція ТАС в СЕУ дозволяє знизити навантаження на ДГ на стоянках і зменшує споживання палива. Окремий аналіз можливостей ТАС для систем кондиціонування та вентиляції представлений також в проектних матеріалах SINTEF і CruizE [57].

У роботі [58] експериментально досліджена інтегрована система утилізації теплоти, що об'єднує двигун Стірлінга, ORC-установку і теплоаккумулятор (SE–ORC–TES) для застосування на круїзних суднах. Показано, що така система здатна покривати потреби судна в гарячій воді без використання допоміжних котлів. В експериментальних умовах величина акумульованої теплоти склала близько 8,7 кВт·год (7,7% від загальної витрати енергії палива), а сумарне виробництво електроенергії установками ORC і Stirling досягало близько 1% палива. Додатково питання інтеграції ТАС в системи СЕУ аналізуються в [59], де розглянуто перспективи ТАС як буферного елемента гібридних судових силових установок.

Суміжні дослідження в галузі автомобільного транспорту дозволяють розглянути отримані рішення для використання відпрацьованої теплоти охолоджувальної рідини або мастила на суднах. У роботі [60] експериментально досліджено ефективність ТАС для прискореного прогрівання двигуна після стоянки. Показано, що найбільш ефективні моделі (В-1 і В-2) скорочують час досягнення температури 70°C на 24,4% після 4-годинного простою і зберігають помітний ефект навіть через 24 години. Незважаючи на збільшену масу, така система забезпечує більш швидкий вихід двигуна на робочий режим, що призводить до зниження витрати палива і зменшення викидів.

У промисловості ТАС використовуються для згладжування теплових навантажень і підвищення ефективності систем теплопостачання. Робота [61] з оптимізації роботи парових акумуляторів показує, що адаптивне управління режимами зарядки і розрядки дозволяє зменшити необхідний обсяг

теплоаккумулятора на 15–25%. У роботах по ТАС на мастильних теплоносіях [62] представлені рішення для утилізації скидної пари і підвищення коефіцієнту корисної дії (ККД) технологічних процесів. Додаткові дані щодо динаміки роботи циліндричних ТАМ-сховищ представлені в роботі [63], де проаналізовано вплив розміру капсул і властивостей ТАМ на тривалість та ефективність акумулювання.

Фундаментальні дослідження ТАМ і систем узагальнені в [64], де розглянуто матеріали (парафіни, гідрати солей, органічні ТАМ), методи математичного моделювання фазового переходу і проблеми деградації при циклуванні. У сучасних оглядах з інтенсифікації теплопередачі в ТАС [65, 66] аналізується вплив ребрення, пористих структур, графітових і металевих матриць, наноаповнювачів на прискорення процесів плавлення і затвердіння ТАМ, що є ключовим напрямком підвищення ефективності суднових ТАС.

У роботі [51] для суднових енергетичних систем експериментально вивчено гібридний ТА явної та прихованої теплоти для гарячого водопостачання суден. Конструкція включає бак об'ємом $0,1 \text{ м}^3$ з макрокапсулами ТАМ загальним об'ємом до $0,04 \text{ м}^3$. Теоретична енергоємність гібридного накопичувача становила $3,62 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, тоді як для чутливої теплоти – $2,15 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, що відповідає зростанню густини запасу енергії з $20,5$ до $35,2 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$.

Експериментальні дослідження комплексної системи утилізації теплоти для морського застосування наведені в [58]. 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 $120\text{--}180 \text{ кВт} / \text{м}^3$ та густину запасеної енергії порядку $29\text{--}52 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$ у діапазоні температур зарядження $65\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$.

У роботі [67] експериментально досліджено систему рекуперації скидної теплоти відпрацьованих газів дизельного двигуна з використанням ребреного кожухотрубного теплообмінника і теплоаккумулятора з ТАМ – парафін. У якості теплоносія застосовано рицинову олію, а ТАМ мав температуру плавлення близько $60 \text{ }^\circ\text{C}$ та питому теплоту плавлення $213 \text{ кДж} / \text{кг}$. Отримані результати підтвердили

можливість стабільного відбору теплоти від системи газовихлопу двигуна і її накопичення в ТАС у робочому температурному діапазоні систем допоміжного теплопостачання.

Подальший розвиток цього напрямку представлено в роботах [68–71], де досліджено компактні теплообмінники у поєднанні з ТА фазового переходу для утилізації теплоти відпрацьованих газів дизельних двигунів. Зокрема, у [69] показано, що застосування нанопосиленого ТАМ у теплоаккумуляторі дозволяє підвищити інтенсивність теплопередачі та забезпечити стабільну роботу системи утилізації теплоти вихлопу при змінних режимах навантаження двигуна. У роботі [70] 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 ТАМ наведені у [30, 71, 72]. У роботі [71] 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 енергоемність при малих об'ємах. У дисертаційних дослідженнях [30, 72] експериментально підтверджено працездатність ТА у діапазоні температур 45–85 °С з урахуванням реальних теплофізичних властивостей органічних ТАМ.

Окремий напрям експериментальних досліджень ТА для суднових енергетичних установок представлений у роботі [73], де розглянуто адсорбційний ТА для великих круїзних суден. Запропонована система базується на парі *silica gel*–*water* та орієнтована на довготривале зберігання теплоти. Для лабораторного прототипу показано досягну енергоемність порядку 800 Вт·год, що підтверджує експериментальну реалізованість адсорбційних ТАС як альтернативи або доповнення до ТАС з фазовим переходом у суднових умовах [73].

Додаткові експериментальні дослідження ТА з фазовим переходом наведено у роботах [74–76]. У роботі [74] експериментально досліджено процеси плавлення і кристалізації ТАМ в трубчастому теплоаккумуляторі, що дозволило оцінити

динаміку теплопереносу під час фазового переходу. В експериментальних дослідженнях [75] показано інтенсифікацію теплообміну в ТА при використанні багатотрубною конфігурації теплообмінника, що сприяє скороченню тривалості зарядження системи. У роботі [76] експериментально досліджено packed-bed ТА з капсульованим ТАМ та встановлено вплив витрати теплоносія на характеристики процесів зарядки та розрядки.

Результати порівняння експериментальних і розрахункових характеристик ТА додатково підтверджено у роботах [77, 78]. Зокрема, за результатами експериментальної оцінки теплообмінників у складі ТА [77] встановлено узгодженість експериментальних даних з інженерними розрахунками процесів акумулювання теплоти. У роботі [78] експериментально підтверджено ефективність застосування ТА 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.

Для дизельних двигунів застосування ТА з температурою фазового переходу 45–60 °C [30, 67, 70] дозволяє ефективно використовувати низькопотенційну теплоту відпрацьованих газів, що підтверджується досягненням 10–15% економії палива [67].

В СЕУ теплоаккумулятори забезпечують покриття теплових навантажень типу «hotel load» та зменшують потребу у роботі допоміжних котлів. Експериментальні результати [58] показують, що частка теплоти, утилізованої у вигляді гарячої води, може досягати $\approx 7,7\%$ енергії палива, а високі питомі показники (120–180 кВт/м³) роблять такі системи придатними для обмежених суднових об'ємів.

Гібридні ТА явної та прихованої теплоти [51], а також перспективні сорбційні системи зберігання теплоти [52], які характеризуються енергоемністю прототипів порядку 800 Вт·год, демонструють потенціал подальшого розвитку теплоакуючих систем для великих круїзних суден.

Узагальнення результатів робіт [73–77] додатково підтверджує, що конструкція теплообмінника та режимні параметри теплоносія є визначальними

для інтенсивності зарядки/розрядки ТА і ефективності їх застосування у системах дизельних двигунів.

У зв'язку з цим перспективним напрямом підвищення ефективності використання енергії СЕУ є впровадження у їх склад ТАС, які являють собою конструктивно інтегровані елементи теплоенергетичного обладнання та забезпечують накопичення, зберігання й використання теплової енергії різного призначення [78].

Аналіз досліджень щодо акумулювання енергії в ТА фазового переходу для транспортних засобів достатньо повно представлений у роботі [79].

Одним із ключових питань організації передпускового та післяпускового прогріву двигуна до температури, що забезпечує можливість приймання навантаження після пуску, є вибір раціональних режимів роботи системи теплової підготовки (СТП) [80]. Ці режими повинні відповідати експлуатаційним вимогам до регламентів функціонування суднового двигуна і СЕУ в цілому. З огляду на першочергову важливість забезпечення прискореного пуску суднового двигуна для реалізації руху та виконання заданої роботи, доцільно як базові режими теплової підготовки для дослідження прийняти розроблений цикл передпускового і післяпускового прогріву двигуна, оснащеного СТП. Формування СТП доцільно здійснювати на основі ТА фазового переходу. Схему системи теплової підготовки суднового двигуна на основі ТА фазового переходу наведено на рисунку 1.11.

Для систем теплової підготовки суднових ДД використовується комбінація теплоаккумуляторів фазового переходу, поєднаних за функціональним призначенням відповідно до встановлених вимог.

У роботі [81] наведено основні складові процесу формування СТП транспортного двигуна. Для забезпечення необхідного температурного стану під час передпускового та післяпускового прогріву ДД у холодних умовах експлуатації схема та склад СТП формуються на основі штатних систем суднового двигуна.

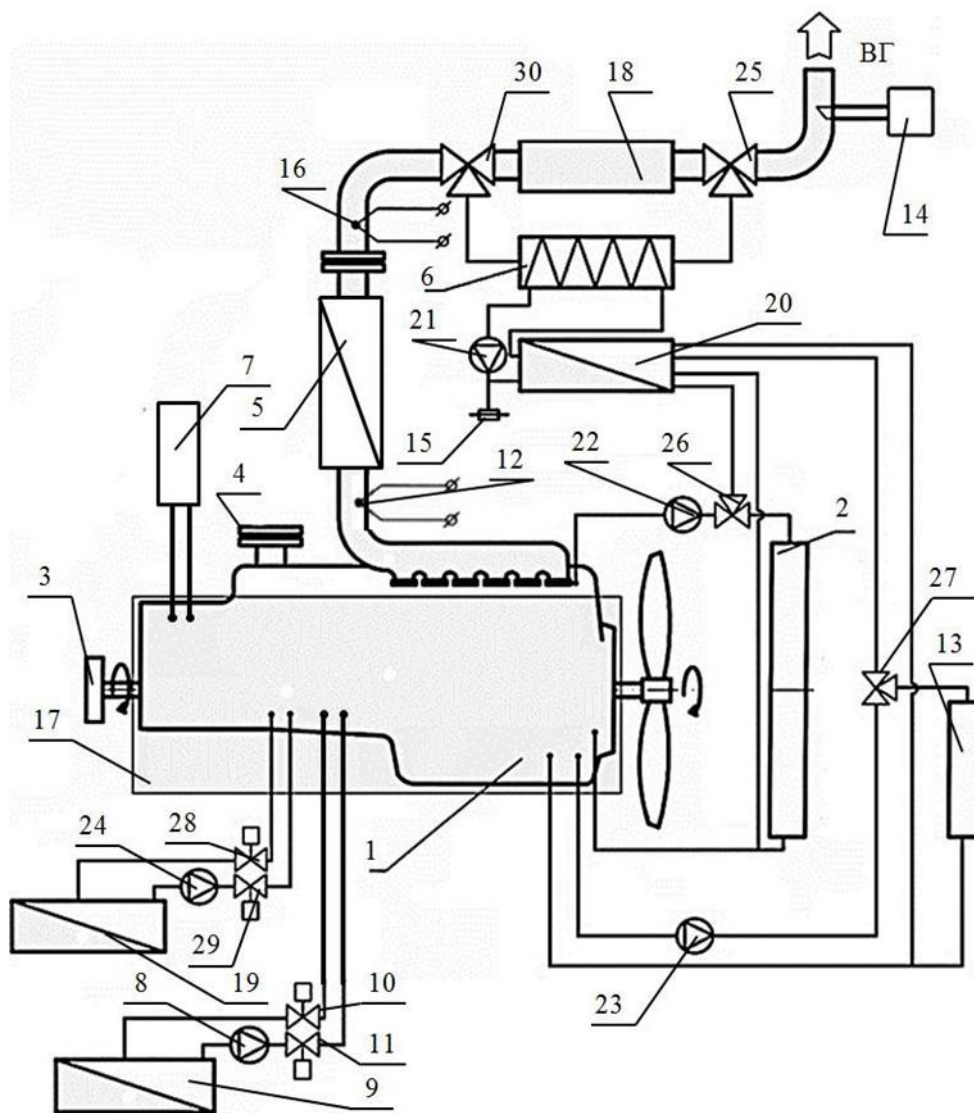


Рисунок 1.11 – Схема системи теплової підготовки суднового двигуна на основі теплоаккумуляторів фазового переходу:

1 – судновий двигун, 2 – радіатор системи охолодження, 3 – вихідний вал двигуна, 4 – впускний колектор, 5 – глушник, 6 – утилізаційний теплообмінник, 7, 8 – циркуляційний насос, 9 – теплоаккумулятор, 10 і 11 – електромагнітні рідинні клапани, 12 – датчик температури, 13 – радіатор системи мащення, 14 – газоаналізуюча апаратура, 15 – бачок для розширювання теплоносія, 16 – датчик температури, 17 – контактний теплоаккумулятор, 18 – глушник, 19 – теплоаккумулятор накопичувача моторної оливи, 20 – теплоаккумулятор фазового переходу, 21, 22, 23 і 24 – циркуляційний насос, 25 – електромагнітний газовий клапан, 26, 27, 28 і 29 – електромагнітні рідинні клапани

Запропонована СТП суднового двигуна включає такі підсистеми: систему прискореного прогріву двигуна (СППД), підсистему утилізації теплової енергії відпрацьованих газів із теплоаккумулятором фазового переходу (СУТТА), контактний теплоаккумулятор (КТА), накопичувач моторної оливи з теплоаккумулятором (НМОТА), накопичувач охолоджувальної рідини з теплоаккумулятором (НОРТА) та теплоаккумулятор системи нейтралізації відпрацьованих газів. СТП конструктивно інтегрується до систем охолодження, мащення та відпрацьованих газів транспортного двигуна, виконуючи частину їх функцій і суттєво впливаючи на перебіг робочого процесу суднового двигуна [79–81]. При цьому вона забезпечує передпусковий і прискорений післяпусковий прогрів охолоджувальної рідини та моторної оливи до температури, що допускає приймання навантаження, подальше доведення до робочої температури та підтримання необхідного температурного рівня під час зупинки двигуна в межах, обумовлених його робочим процесом і конструкцією.

Елементи системи комбінованого прогріву (СКП), зокрема підсистеми прискореного прогріву двигуна, утилізації теплової енергії відпрацьованих газів із теплоаккумулятором фазового переходу, контактного теплоаккумулятора та накопичувача охолоджувальної рідини з теплоаккумулятором, входять до складу системи охолодження двигуна. До системи мащення двигуна інтегруються відповідні елементи СКП, зокрема підсистеми прискореного прогріву двигуна, утилізації теплової енергії відпрацьованих газів із теплоаккумулятором фазового переходу, контактного теплоаккумулятора та накопичувача моторної оливи з теплоаккумулятором. Зазначені підсистеми можуть функціонувати як спільно у складі СКП відповідно до заданого алгоритму роботи, так і автономно, виконуючи притаманні їм функції [79–81].

Дослідження впливу варіантів комплектації СТП на основі теплоаккумуляторів фазового переходу на показники теплової підготовки суднового двигуна проводилося для визначених режимів його експлуатації як в усталених, так і в перехідних умовах. При цьому оцінювалися часові показники (тривалість передпускової та післяпускової теплової підготовки і збереження двигуна у

прогрітому стані), економічні показники (витрата палива на здійснення передпускової та післяпускової теплової підготовки і підтримання двигуна у прогрітому стані) та екологічні параметри (викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах під час передпускової і післяпускової теплової підготовки та збереження двигуна у прогрітому стані) [82].

Основні результати дослідження теплової підготовки суднового двигуна К-164М1 розмірності 6ЧН 12/14 в умовах експлуатації отримано за допомогою математичної моделі для варіанта прогріву ДД у режимі холостого ходу [50, 53]. Під час оцінювання роботи СТП у різних варіантах комплектації виходили з таких положень.

СТП із застосуванням перспективних засобів теплової підготовки являє собою поєднання п'яти незалежних підсистем: СУТТА, СППД, КТА, НМОТА та НОРТА. Перші дві підсистеми при спільній роботі фактично забезпечують функціонування ТА фазового переходу з прискореною циркуляцією охолоджувальної рідини та моторної оливи у штатних системах суднового двигуна розмірності 6ЧН 12/14 під час передпускового і післяпускового прогріву. КТА забезпечує тривале збереження накопиченої теплової енергії в охолоджувальній рідині та моторній оливі в блоці циліндрів за рахунок теплоізолюваної контактної оболонки з теплоаккумулятором фазового переходу. Підсистеми НМОТА і НОРТА забезпечують тривале збереження накопиченої теплової енергії відповідно для моторної оливи та охолоджувальної рідини в окремих теплоізолюваних ємностях із теплоаккумуляторами фазового переходу.

В проведеному дослідженні оцінювались і порівнювались результати передпускового і післяпускового прогріву суднового двигуна в залежності від комплектацій СТП за окремими варіантами або в їх поєднанні за відповідними комбінаціями варіантів [82].

За результатами розрахунку показників передпускового та післяпускового прогріву охолоджувальної рідини і моторної оливи суднового двигуна в часі для відповідних варіантів комплектації СТП встановлено, що застосування запропонованих засобів прогріву за розробленими алгоритмами роботи забезпечує

як передпусковий, так і прискорений післяпусковий прогрів суднового двигуна (на прикладі 6ЧН 12/14), а також збільшення тривалості періоду його зупинки без роботи в режимі холостого ходу.

При цьому двигун перебуває у стані передпускової готовності за температурними показниками охолоджувальної рідини та моторної оливи, що відповідають тепловому рівню, необхідному для приймання навантаження.

Порівняльний аналіз результатів дослідження теплового стану ДД під час передпускового прогріву охолоджувальної рідини та моторної оливи суднового двигуна із СТП від температури навколишнього середовища до 50 °С показав, що найбільше скорочення тривалості прогріву досягається у варіантах комплектації 3, 7–11, 14–19 для всіх розглянутих температур навколишнього середовища (20; 0; -20 °С).

Зазначені варіанти характеризуються одночасним використанням ТА фазового переходу та підсистеми прискореного прогріву двигуна. За цих умов тривалість прогріву скорочується до 14,4 (24/33,3) хв для охолоджувальної рідини та до 14,2 (25/35) хв для моторної оливи порівняно з варіантом штатних систем двигуна, для якого відповідні значення становлять 22,8 (31/47,5) і 24,2 (33,3/50,5) хв. У результаті тривалість прогріву зменшується на 8,4 (7,1/14,2) хв, або на 36,9 (22,9/29,9)% для охолоджувальної рідини, та на 10 (8,3/15,5) хв, або на 41,3 (25/30,8)% для моторної оливи [82].

Результати дослідження прискореного післяпускового прогріву охолоджувальної рідини та моторної оливи суднового двигуна із СТП у діапазоні температур від 50 до 8 °С показали, що найбільше скорочення тривалості прогріву досягається у варіантах комплектації 3, 7–11, 14–19 для всіх розглянутих температур навколишнього середовища (20; 0; -20 °С).

Зазначені варіанти характеризуються одночасним використанням ТА фазового переходу та підсистеми прискореного прогріву двигуна. За цих умов тривалість прогріву зменшується до 9,7 (19,2/26,2) хв для охолоджувальної рідини та до 10,5 (21,2/28,2) хв для моторної оливи порівняно з варіантом штатних систем двигуна, де відповідні значення становлять 22,8 (31/47,5) і 24,2 (33,3/50,5) хв. У

результаті тривалість прогріву скорочується на 13,1 (11,8/21,3) хв, або на 57,5 (38/44,8)% для охолоджувальної рідини, та на 13,7 (12,1/22,3) хв, або на 57 (36/44,2)% для моторної оливи.

Рациональний вибір теплової потужності ТА 20 забезпечує швидкий попередній прогрів ДД від низької температури навколишнього середовища (від -20 °С, дослідний варіант) до температур охолоджувальної рідини та моторної оливи на рівні +40...60 °С.

Необхідну теплову потужність ТА, що визначається масою ТАМ, обґрунтовують на основі розрахунку теплового балансу двигуна із СКП. Такий розрахунок дозволяє встановити потрібну кількість теплової енергії для прогріву охолоджувальної рідини та моторної оливи, блока і головки циліндрів, з'єднувальних патрубків і трубопроводів з урахуванням теплових втрат [80–82].

Отримуючи теплову енергію від охолоджувальної рідини та моторної оливи, елементи транспортного двигуна передають її до камери згоряння, що позитивно впливає на процес пуску суднового ДД. Запуск двигуна здійснюється після фіксації датчиками СТП температури охолоджувальної рідини та моторної оливи на рівні +40...60 °С, що забезпечує можливість приймання навантаження.

Після пуску ДД СТП продовжує функціонування, забезпечуючи прискорений та ефективний прогрів працюючого двигуна до температури охолоджувальної рідини і моторної оливи на рівні +85 °С. Це досягається за рахунок подальшого використання акумульованої теплоти в ТА і надходження теплової енергії від згоряння палива в працюючому двигуні.

Після досягнення температури +85 °С СТП переходить у режим її підтримання в заданих межах (85 ± 5 °С), після чого до роботи підключається штатна система двигуна, а СКП відключається.

Функціонування розробленої СТП суднового ДД базується на аналізі температурних параметрів теплоносіїв – охолоджувальної рідини та моторної оливи [80–82].

В інших дослідженнях процесів теплообміну під час нагрівання та охолодження ТАМ з фазовим переходом було використано програмний пакет

COMSOL Multiphysics (версія 4.4). Це потужне інтерактивне середовище призначене для моделювання та розрахунку широкого кола наукових і інженерних задач, що ґрунтуються на розв'язанні диференціальних рівнянь у частинних похідних методом скінченних елементів [83, 84].

Можливість розв'язання задач у середовищі реалізована у вигляді спеціалізованих прикладних режимів, під час завантаження яких автоматично обирається відповідна система рівнянь, для якої необхідно задати лише коефіцієнти та граничні умови. Коефіцієнти диференціальних рівнянь задаються у вигляді фізичних властивостей середовища, зокрема теплопровідності, теплоємності, коефіцієнта теплопередачі тощо залежно від обраного фізичного інтерфейсу. Під час розв'язання систем диференціальних рівнянь пакет COMSOL Multiphysics використовує метод скінченних елементів [84]. Програмне забезпечення виконує скінченно-елементний аналіз разом із побудовою розрахункової сітки, застосовуючи широкий набір числових методів, а також забезпечує ефективну графічну візуалізацію результатів.

Як зазначалося вище, для моделювання процесів теплообміну розглядається окремий теплоакumuлюючий елемент, виконаний у вигляді тонкостінної сталеві труби, заповненої органічною сумішшю на основі 85% парафіну та 15% буровугільного воску. Геометрія моделі відповідає дослідному зразку та реалізована у двовимірній постановці.

Відомо, що в системах акумулювання теплоти з використанням матеріалів фазового переходу процеси теплообміну відбуваються за рахунок теплопередачі під час плавлення-кристалізації, а також теплопровідності і конвекції.

Для побудови математичної моделі введено наступні припущення:

- конвекція в рідкій фазі відсутня, тобто теплопередача здійснюється тільки за рахунок теплопровідності;
- теплові втрати в навколишнє середовище від ТАМ відсутні;
- внутрішні джерела теплоти відсутні;
- початкова температура по всьому об'єму ТАМ та контейнера однакова;
- границі розташування ТАМ незмінні.

За цих умов математичну модель процесів теплообміну під час фазових переходів ТАМ описують рівнянням теплопровідності у двовимірних циліндричних координатах із відповідними початковими та граничними умовами.

Чисельну реалізацію математичної моделі в пакеті COMSOL Multiphysics виконано методом скінченних елементів, сутність якого полягає у визначенні температури в кожному ступені вільності у вузлах розрахункової сітки.

Для імітації фазового переходу використано принцип ефективної теплоємності [85], який дозволяє врахувати температурний інтервал і теплоту фазового переходу. Застосування цього підходу дає змогу коректно відтворювати фазовий перехід у програмних пакетах математичного моделювання за умови, що питома теплоємність задається як функція температури.

Розглядалися різні режими процесу нагрівання, що відповідають умовам експерименту. Граничні умови задавалися відповідно до режимів нагрівання ТАМ до 80 °C: контакт зовнішньої стінки металевої капсули з теплоносієм (водою), нагрітим до 80 °C; контакт з теплоносієм, який нагрівається від 22 до 80 °C зі швидкістю 0,35; 0,77 та 1,17 K/хв.

Порівняння результатів теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень теплообміну в системі при контакті зовнішньої стінки металевої капсули з ТАМ і теплоносієм, нагрітим до 80 °C, за різних швидкостей нагрівання та під час охолодження в повітряному середовищі при 22 °C в умовах природної конвекції наведено на рисунках 1.12 і 1.13.

Максимальна розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними становить 5,5%. Отримані результати свідчать, що математична модель забезпечує достатньо точне визначення часу нагрівання.

Розрахований і експериментально визначений час охолодження ТАМ до 25 °C відрізняється не більше ніж на 5%, що також підтверджує можливість коректного прогнозування тривалості розрядження.

Це підтверджує доцільність застосування методу ефективної теплоємності для розрахунку теплообміну під час фазового переходу та дає змогу з достатньою точністю прогнозувати фактичну тривалість циклу нагрівання–охолодження.

Прийняті припущення щодо відсутності вільної конвекції в ТАМ і об'ємного розширення матеріалу під час фазового переходу істотно не впливають на результати розрахунку.

Експериментальні дослідження показали, що під час нагрівання недоцільно застосовувати надмірно високі швидкості нагрівання. Потужність нагрівача слід підбирати таким чином, щоб наприкінці процесу температури ТАМ і теплоносія були близькими. Це узгоджується з результатами теоретичних розрахунків, які свідчать, що за високих швидкостей нагрівання спостерігається значна неоднорідність температурного поля в поперечному перерізі.

Отримані результати підтвердили, що при використанні капсул невеликого об'єму конвективною складовою в рівнянні теплопровідності можна знехтувати.

Порівняння результатів експериментальних і теоретичних досліджень підтверджує можливість застосування методу ефективної теплоємності для розрахунку теплообміну під час фазового переходу та дає змогу з достатньою точністю прогнозувати фактичну тривалість циклу нагрівання–охолодження.

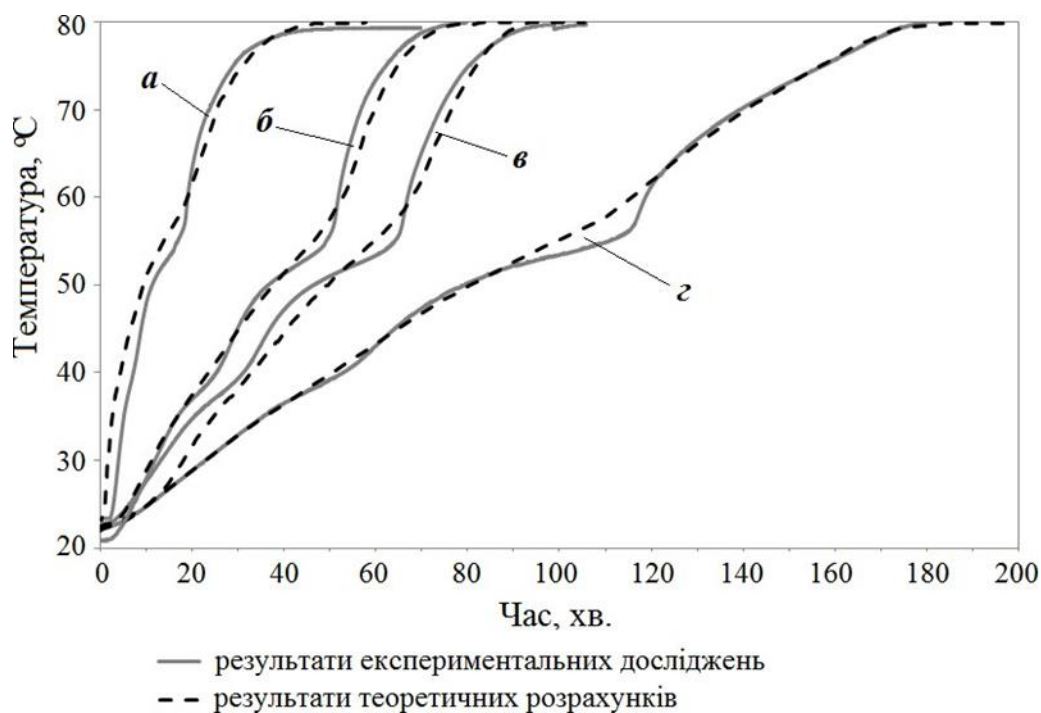


Рисунок 1.12 – Порівняння результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень теплообміну в системі при контакті зовнішньої стінки металевої капсули з ТАМ та теплоносієм, нагрітим до 80 °C (а) та з теплоносієм, що нагрівається зі швидкістю 0,35 (б), 0,77 (в), 1,17 (г) К/хв

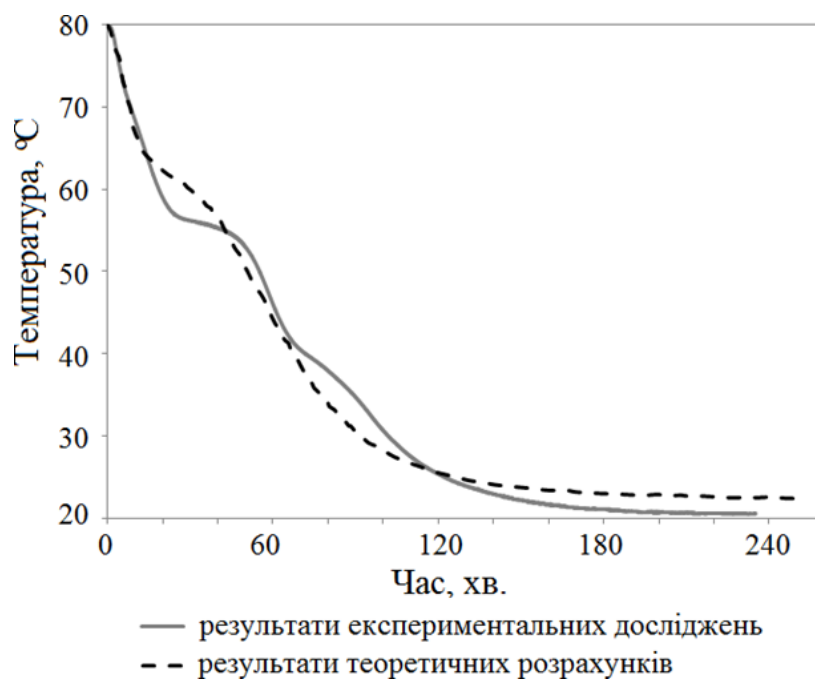


Рисунок 1.13 – Порівняння результатів теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень теплообміну при охолодженні капсули з ТАМ в повітряному середовищі при 22 °C в умовах природної конвекції

1.5 Визначення мети та постановка завдань дослідження

Не зважаючи на чисельні публікації, присвячені питанням накопичення теплової енергії в складі стаціонарних енергетичних установок і установок транспортних засобів, до теперішнього часу не вирішені питання вибору раціональних схем ТАС енергетичних установок кораблів, транспортних суден та суден портового флоту з урахуванням особливостей режимів їх експлуатації, габаритних розмірів машинних відділень тощо.

Використання КЕУ супроводжується утворенням теплових викидів, близько 50–60% яких зазвичай відводяться у навколишнє середовище і не можуть бути використані на потреби морського флоту. Використання скидних енергетичних ресурсів дозволило б підвищити ефективність використання КЕУ, зменшити споживання первинного палива, знизити теплові та шкідливі викиди у навколишнє середовище.

Ці обставини обґрунтовують важливість вирішення проблеми підвищення ефективності енергетичних установок надводних кораблів застосуванням теплоакumuлюючих систем.

Аналіз практичних запитів та наукових досліджень показав, що одним з перспективних шляхів модернізації КЕУ є використання в їх складі ТАС на основі теплоакumuлятора з фазовим переходом.

З урахуванням виконаних досліджень при застосуванні ТАС є невирішені питання щодо особливостей КЕУ, а саме їх спектрів ходів, умов комплексної утилізації теплоти, її зберігання, використання для КЕУ та на загальнокорабельні потреби.

У зв'язку з цим, розробка і компоновка ТАС в складі енергетичної установки корабля є актуальними запитом практики.

Таким чином, актуальне науково-прикладне завдання створення високоефективних ТАС в складі енергетичних установок надводних кораблів має значний практичний інтерес, а його вирішення забезпечить можливість створення мобільних, високоефективних та конкурентоздатних вітчизняних енергетичних

установок морського призначення, які будуть відповідати вимогам до енергетичних модулів нового покоління та зможуть працювати на об'єктах морської інфраструктури.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності використання скидної теплоти енергетичних установок надводних кораблів шляхом використання теплоакumuлюючих систем.

Задачі наукового дослідження:

1. Аналіз сучасних методів організації процесів утилізації теплоти в корабельних енергетичних установках з можливим використанням ТАС.

2. Обґрунтування та вдосконалення математичної моделі процесів комплексної акумуляції теплоти різних джерел в гібридних ТАС з урахуванням впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючого матеріалу на процеси фазових переходів та особливостей теплопередачі в умовах їх взаємодії з потоками зовнішніх теплоносіїв в теплоакumuлюючих пристроях.

3. Експериментальне дослідження енергетичних характеристик моделі шумоглушника-теплоакumuлятора фазового переходу з верифікацією запропонованої математичної моделі.

4. Визначення характеристик теплоакumuлюючих систем для енергетичних установок кораблів різних класів та суден з розробкою практичних рекомендацій щодо їх впровадження.

1.6. Висновки за розділом 1

1. Розглянуто сучасний стан з перспективами розвитку надводного морського флоту, його енергетичних установок та встановлено, що:

- вимоги ІМО спрямовані на зниження витрат палива, обмеження викидів парникових газів та підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок;

- за результатами експлуатації суднових енергетичних установок, близько 30% енергії первинних енергоресурсів використовується на її потреби та екіпажу

судна, решту енергії (приблизно 50%) складають вторинні енергоресурси різних температурних рівнів, а близько 20% становлять безповоротні втрати;

- питання споживання теплових викидів з температурами, які нижче за 300 °С, що становить 89% від загального обсягу, є складною проблемою на даний час, оскільки потребує створення ефективних технологій для задоволення потреб споживачів.

2. Визначена актуальність науково-технічного завдання щодо створення вискооефективних теплоакumuлюючих систем в складі енергетичних установок надводних кораблів, яка пояснюється потребою використання скидних енергетичних ресурсів для підвищення ефективності використання корабельних енергетичних установок, зменшення споживання первинного палива, зниження теплових та шкідливих викидів у навколишнє середовище.

3. Виконано аналіз результатів наукових досліджень для енергетичних установок та виявлено, що одним з напрямів використання скидних енергетичних ресурсів низького потенціалу, що дозволяє підвищити економічну, екологічну, ресурсну та масогабаритну ефективність використання КЕУ є теплоакumuлюючі системи з фазовим переходом.

4. На основі огляду вітчизняної та зарубіжної науково-технічної літератури розглянутий сучасний стан використання теплоакumuлюючих систем у складі корабельних та суднових енергетичних установок потребує вдосконалення теплопередачі з фазовим переходом та раціональних схемних рішень для створення вискооефективних теплоакumuлюючих засобів в складі систем цих установок.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [5, 24, 86–88].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КОРАБЕЛЬНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИМИ СИСТЕМАМИ

2.1 Методологія дослідження

Головними методами вирішення завдань дисертації є математичне та фізичне моделювання процесів утилізації, накопичення та використання скидної теплоти ТАС, а також узагальнення результатів з визначенням нових схемних та конструктивних рішень із розробкою рекомендацій з підвищення ефективності процесів в складі КЕУ.

З огляду на складну структуру ТАС КЕУ, наукові дослідження здійснювалося з використанням методологічної карти дослідження, структура якої приведена на рисунку 2.1, а сама карта в Додатку А.

Розроблена методологічна карта дисертаційного дослідження дозволила розв'язати наявні задачі в найбільш раціональний спосіб, отримати нові знання відносно процесів, які визначають ефективність застосування ТАС для енергозбереження.

2.2 Методи математичного моделювання процесів утилізації, накопичення та використання скидної теплоти теплоакumuлюючою системою в складі корабельної енергетичної установки

Розроблена математична модель ТАС у складі енергетичної установки надводного корабля враховує особливості використання в складі КЕУ різних теплових двигунів, її структуру і умови експлуатації [24]. Даний підхід дозволяє оптимізувати за необхідністю: структуру ТАС з урахуванням споживання на загальнокорабельні потреби; перспективні напрямки та обсяги можливих теплових

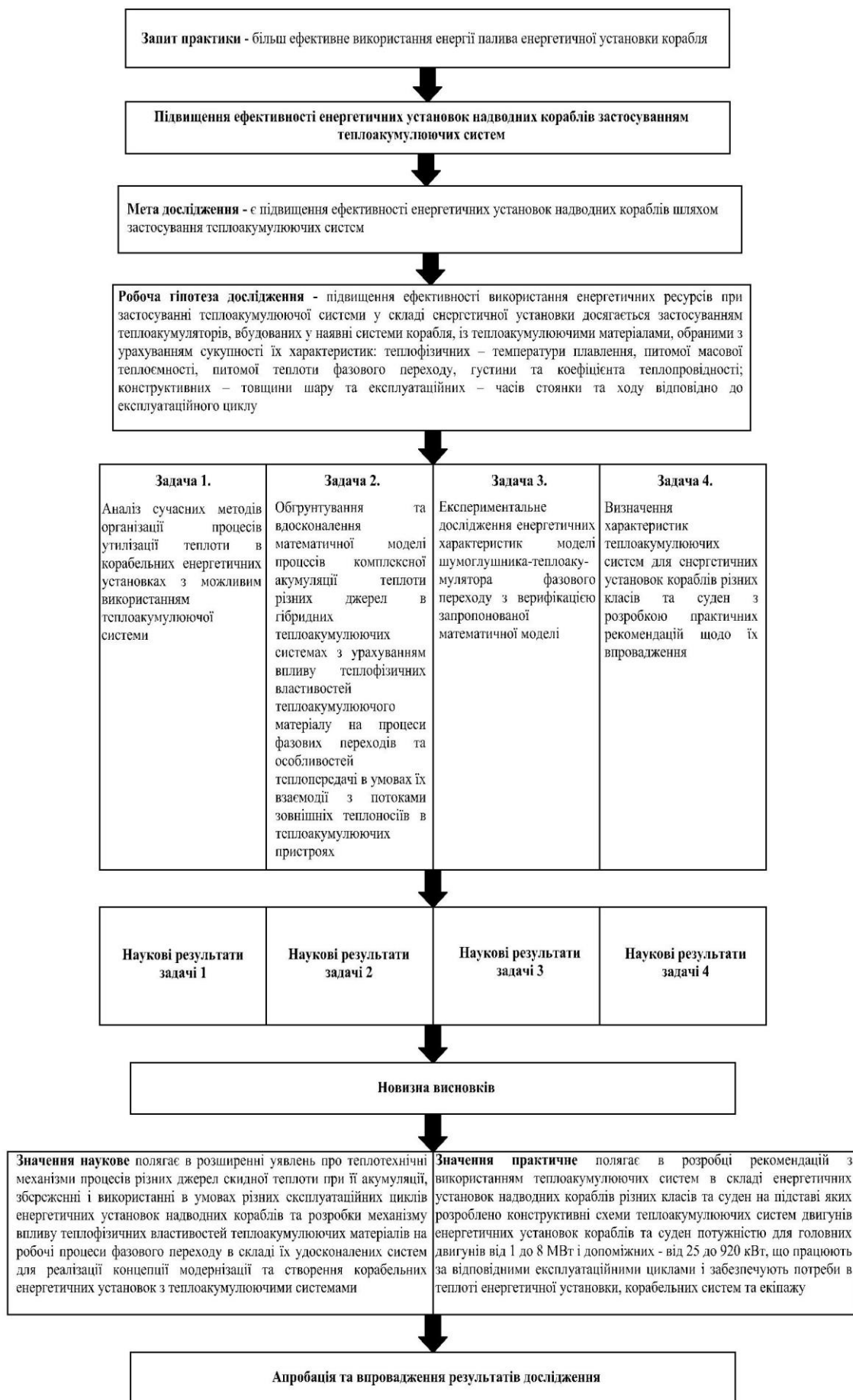


Рисунок 2.1 – Структура методологічної карти досліджень

потоків від елементів КЕУ та їхніх джерел; прогнозований технічний підсумок з урахуванням можливих коливань попиту теплоти під час простою корабля; прогнозування впливу теплофізичних властивостей ТАМ на тривалість складових процесів зберігання, розрядки, зарядки ТАС з урахуванням відбору на загальнокорабельні потреби.

Запропонована математична модель дозволяє обґрунтувати схемне рішення енергетичної установки з ТАС при відповідності її техніко-економічних характеристик показникам тактико-технічного завдання корабля.

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, охолоджувальної рідини та мастила головних і допоміжних двигунів [24].

Тепловий потік залежить від структури КЕУ з урахуванням призначення (головна та допоміжна), типу теплових двигунів (дизельні, газотурбінні) та їх зв'язків, де i – варіант компоновки КЕУ, j – призначення двигуна, m – тип двигуна (рисунок 2.2).

Прогнозовані значення обсягів потоків теплоти для кожного теплоносія у напрямку від джерела теплоти до споживача Q_{ψ} в залежності від кількості джерел дорівнює

$$Q_{\psi} = \sum_{n_{kin}}^{n_{kin}} Q_{n\psi},$$

де $Q_{n\psi}$ – тепловий потік у напрямку від n -го джерела скидної теплоти до ψ -го споживача; n_{kin} – кількість джерел скидної теплоти.

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

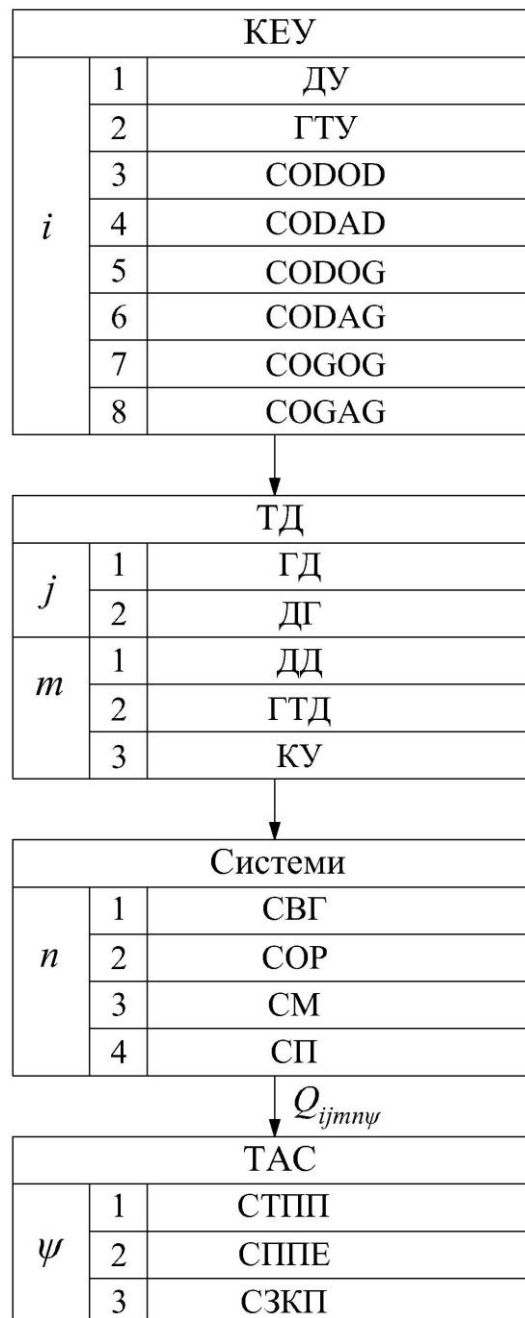


Рисунок. 2.2 – Схема енергетичної установки надводного корабля з ТАС: KEY – корабельна енергетична установка, ДУ – дизельна установка, ГТУ – газотурбінна установка, CODOD... – комбіновані установки, ТД – тепловий двигун, ГД – головний двигун, ДГ – дизель-генератор, КУ – котельна установка, ДД – дизельний двигун, ГТД – газотурбінний двигун, СВГ – система відпрацьованих газів, СОР – система охолоджувальної рідини, СМ – система мастильна, СП – система паливна, СТПП – система теплової передпускової підготовки, СППЕ – система побутових потреб екіпажу, СЗКП – система загальнокорабельних потреб, ТА – теплоаккумулятор, $Q_{ijmnp\psi}$ – потік теплоти теплоносія

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

Рівень витрат теплоносія при переносі теплоти від джерела у напрямку оцінюється як $G_{ijm\eta\psi}$ на умовах корисності в рамках періоду часу. Крім діючих теплових двигунів, можуть залучатися інші джерела (циркуляційні цистерни запасів палива, охолоджувальної рідини та мастила) на умовах корисності для задоволення загальнокорабельних потреб в рамках періоду часу, що розглядається, з витратами $G_{ijm\eta\psi\epsilon}$.

Час роботи двигуна τ_{ijm} визначається як сукупність тривалостей окремих процесів:

$$\tau_{ijm} = \tau_{nnijm} + \tau_{nijm} + \tau_{nnijm} + \tau_{znijm} + \tau_{зунijm} + \tau_{nrijm},$$

де τ_{nnijm} – час передпускової підготовки, τ_{nijm} – час пуску, τ_{nnijm} – час набору потужності, τ_{znijm} – час зміни потужності відповідно до поставленої мети, $\tau_{зунijm}$ – час зупинки та τ_{nrijm} – час простою двигуна.

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

$$F = \sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{j=1}^{j_{кін}} \sum_{m=1}^{m_{кін}} \sum_{n=1}^{n_{кін}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кін}} u_{ijm\eta\psi} \cdot G_{ijm\eta\psi} \cdot \tau_{ijm} + \sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{j=1}^{j_{кін}} \sum_{m=1}^{m_{кін}} \sum_{n=1}^{n_{кін}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кін}} u_{ijm\eta\psi\epsilon} \cdot G_{ijm\eta\psi\epsilon} \cdot \tau_{ijm\epsilon}, \quad (1)$$

де $u_{ijm\eta\psi}$ – питомі витрати теплоти.

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

τ_{rijm} – річне напрацювання,

$u_{rijm\eta\psi}$ – річні загальнокорабельні витрати теплоти (змінні).

Крім того, для кожного двигуна відомі річні напрацювання τ_{rijm} та може бути оцінена величина $u_{d\psi}$ — добові витрати теплоти по кораблю, коли він не задіяний

на переходах (тобто витрати під час простою корабля).

Вводяться в розгляд наступні параметри управління:

$x_{ijmn\psi}$ – число теплових потоків на напрямку від джерел;

$x_{CT\Pi ijmn}$ – число теплових потоків, спрямованих для забезпечення теплової підготовки двигунів;

$x_{EP\Pi ijmn}$ – число теплових потоків, спрямованих для забезпечення екіпажу;

$x_{ЗК\Pi ijmn}$ – число теплових потоків, спрямованих для забезпечення загальнокорабельних потреб.

Експлуатаційні витрати теплоти змінні в умовах навантажувальних періодів та постійні, становлять:

$$U = \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} U_{ijmn\psi} \cdot x_{ijmn\psi} + \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} U_{ijmn\psi/e} \cdot x_{ijmn\psi/e} + \\ + \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} U_{2ijmn} \cdot x_{ijmn\psi}. \quad (2)$$

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:

$$U_{pri} = \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} U_{pri\psi} \cdot A_{\tau i \psi}, \quad (3)$$

де $U_{pri\psi}$ – витрати теплоти при простої КЕУ, $A_{\tau i \psi}$ – частка бюджету часу корабля в експлуатаційному циклі, яка може припасти на простої, у зв'язку з поставленим завданням.

Величини $A_{\tau i \psi}$ можуть бути оцінені або за допомогою директивних даних, або розрахунковим шляхом, для чого може бути використаний пропонований далі підхід.

Участь КЕУ в забезпеченні теплових потоків на напрямку визначається як

частка, що припадає на КЕУ в загальному обсязі потоків теплоти під час руху корабля:

$$\beta_{i\psi} = \left(\sum_{j=1}^{j_{кін}} \sum_{m=1}^{m_{кін}} \sum_{n=1}^{n_{кін}} Q_{ijmn\psi} \cdot \tau_{ijm} \cdot x_{ijmn\psi} \right) / \left(\sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{j=1}^{j_{кін}} \sum_{m=1}^{m_{кін}} \sum_{n=1}^{n_{кін}} Q_{ijmn\psi} \cdot \tau_{ijm} \cdot x_{ijmn\psi} \right),$$

$$\text{при } \sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{j=1}^{j_{кін}} \sum_{m=1}^{m_{кін}} \sum_{n=1}^{n_{кін}} Q_{ijmn\psi} \cdot \tau_{ijm} \cdot x_{ijmn\psi} > 0; \quad (4)$$

$$\beta_{i\psi} = 0, \quad \text{при } \sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{j=1}^{j_{кін}} \sum_{m=1}^{m_{кін}} \sum_{n=1}^{n_{кін}} Q_{ijmn\psi} \cdot \tau_{ijm} \cdot x_{ijmn\psi} = 0.$$

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):

$$A_{\tau i\psi} = \beta_{i\psi} \cdot \left(1 - \sum_{n=1}^{n_{кін}} Q_{in\psi \min} / \sum_{n=1}^{n_{кін}} Q_{in\psi \max} \right). \quad (5)$$

Відповідно:

$$A_{\tau\psi} = \sum_{i=1}^{i_{кін}} A_{\tau i\psi} \quad (6)$$

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

$$\Delta F = \sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кін}} A_{\tau i\psi} \cdot \sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{j=1}^{j_{кін}} \sum_{m=1}^{m_{кін}} \sum_{n=1}^{n_{кін}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кін}} u_{ijmn\psi} \cdot G_{ijmn\psi} \cdot \tau_{ijm} +$$

$$+ \sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кін}} A_{\tau i\psi} \cdot \sum_{i=1}^{i_{кін}} \sum_{j=1}^{j_{кін}} \sum_{m=1}^{m_{кін}} \sum_{n=1}^{n_{кін}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кін}} u_{ijmn\psi\delta} \cdot G_{ijmn\psi\delta} \cdot \tau_{ijm\delta}. \quad (7)$$

Також зменшуватимуться експлуатаційні (змінні) витрати на величину:

$$\begin{aligned} \Delta U = & \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} A_{\tau i \psi} \cdot \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} U_{ijmn\psi} \cdot x_{ijmn\psi} + \\ & + \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} A_{\tau i \psi} \cdot \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} U_{ijmn\psi\psi} \cdot x_{\psi ijmn\psi\psi} + \\ & + \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} A_{\tau i \psi} \cdot \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} U_{2ijmn} \cdot x_{\psi ijmn}. \end{aligned} \quad (8)$$

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:

$$\left[\sum_{i=1}^{i_{кин}} (1 - A_{\tau i \psi}) \cdot \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} U_{ijmn\psi} \cdot x_{ijmn\psi} - \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} u_{ijmn\psi} \cdot G_{ijmn\psi} \cdot \tau_{ijm} \right] / \tau_{доб} \geq \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} Q_{ijmn\psi} \cdot x_{ijmn\psi} \quad (9)$$

де $\tau_{доб}$ – час доби.

Вираз (9) відображає умову для елементів конкретного типу в напрямку ψ .

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

$$\sum_{n=1}^{n_{кин}} Q_{n\psi} \leq Q_{\psi \max}, \quad (10)$$

$$\sum_{n=1}^{n_{кин}} Q_{n\psi} \geq Q_{\psi \min}. \quad (11)$$

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:

$$\sum_{n=1}^{n_{кин}} x_{n\psi} \leq x_{\psi \max}, \quad (12)$$

$$\sum_{n=1}^{n_{кин}} x_{n\psi\epsilon} \leq x_{\psi\epsilon \max}, \quad (13)$$

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

$$\sum_{n=1}^{n_{кин}} \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} x_{ijn\psi} = x_{ijm} + x_{ijm\epsilon}, \quad (14)$$

Обмеження (9) – (14) відображають множину 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:

$$\begin{aligned} KO = & \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} \sum_{i=1}^{i_{кин}} (1 - A_{ci\psi}) \cdot \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} U_{ijn\psi} \cdot x_{ijn\psi} + \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} U_{ijn\psi\epsilon} \cdot x_{ijn\psi\epsilon} - \\ & - \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} u_{ijn\psi} \cdot G_{ijn\psi} \cdot \tau_{ijm} - \sum_{\psi=1}^{\psi_{кин}} \sum_{i=1}^{i_{кин}} \sum_{j=1}^{j_{кин}} \sum_{m=1}^{m_{кин}} \sum_{n=1}^{n_{кин}} u_{ijn\psi\epsilon} \cdot G_{ijn\psi\epsilon} \cdot \tau_{ijm\epsilon} \rightarrow \max \end{aligned} \quad (15)$$

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:

$$x_{ijmny} \geq 0; \quad (16)$$

Визначення залежності ефективності використання ТАС у складі КЕУ від теплофізичних властивостей ТАМ, умов експлуатації кораблів та складу споживачів визначається наступними техніко-економічними показниками: часовим-енергетичним еквівалентом, показником ефективності використання ТАС, її показником якості та теплової ефективності [88].

Часовий-енергетичний еквівалент ($ЧЕЕ$) – це добовий приріст теплоти в ТАС, який дорівнює різниці між утилізованою теплотою від джерел теплоти та витрат на транспортування теплоносіїв з урахуванням енергії від зовнішніх джерел:

$$ЧЕЕ = \frac{(U_{ТАМ\Sigma 1} + U_{ТАМ\Sigma 2} + U_{ТАМ\Sigma 3}) - (F_{1ход} + F_{2ход} + F_{3ход} + F_{1др} + F_{2др} + F_{3др} + F_{3Д})}{\tau_{доб}},$$

де $U_{ТАМ\Sigma 1}$, $U_{ТАМ\Sigma 2}$, $U_{ТАМ\Sigma 3}$ – кількість теплоти, яка акумульована від різних джерел КЕУ, $F_{1ход}$, $F_{2ход}$, $F_{3ход}$ – витрати теплоти на ходу корабля, $F_{1др}$, $F_{2др}$, $F_{3др}$ – витрати теплоти при дрейфі корабля, $F_{3Д}$ – витрати теплоти, пов'язані з простоєм КЕУ і корабля загалом при використанні зовнішніх джерел.

Показник ефективності використання ТАС ($\eta_{ЕТАС}$), який дорівнює відношенню теплоти, що споживається від ТАС на корабельні потреби на теплоту, що утилізується ТАС від джерел КЕУ [88]:

$$\eta_{\text{ETAC}} = \frac{n_1 \cdot (U_{\text{ПІМГДД}} + U_{\text{ППОхрГДД}}) + n_2 \cdot (U_{\text{ПІМДГ}} + U_{\text{ППОхрДГ}}) + n_3 \cdot U_{\text{ПІМГТД}}}{n_1 \cdot U_{\text{ТАСГД}} + n_2 \cdot U_{\text{ТАСДГ}} + n_4 \cdot U_{\text{ТАСГТД}}},$$

де n_1 – кількість ДД, n_2 – кількість ДГ, n_3 – кількість ГТД, n_4 – кількість циркуляційних мастильних цистерн, $U_{\text{ПІМГДД}}$ – кількість теплоти, що необхідна для передпускового підігріву мастила головного ДД, $U_{\text{ППОхрГДД}}$ – кількість теплоти, що необхідна для підігріву охолоджувальної рідини головного ДД, $U_{\text{ПІМДГ}}$ – кількість теплоти, що необхідна для передпускового підігріву мастила ДГ, $U_{\text{ППОхрДГ}}$ – кількість теплоти, що необхідна для підігріву охолоджувальної рідини ДГ, $U_{\text{ПІМГТД}}$ – кількість теплоти, що необхідна для підігріву цистерни мастила ГТД, $U_{\text{ТАСГД}}$ – кількість теплоти, що акумульована у теплоаккумуляторі головного двигуна, $U_{\text{ТАСДГ}}$ – кількість теплоти, що акумульована у теплоаккумуляторі ДГ, $U_{\text{ТАСГТД}}$ – кількість теплоти, що акумульована у цистерні мастила ГТД.

Показник якості ТАС ($\eta_{\text{ТАС}}$), який дорівнює відношенню утилізованої теплоти ТАС від джерел КЕУ до сумарної кількості теплових викидів КЕУ

$$\eta_{\text{ТАС}} = \frac{n_1 \cdot U_{\text{ТАСГД}} + n_2 \cdot U_{\text{ТАСДГ}} + n_4 \cdot U_{\text{ТАСГТД}}}{U_{\text{вГД}} + U_{\text{вГДГ}} + U_{\text{мГД}} + U_{\text{мДГ}} + U_{\text{охрГД}} + U_{\text{охрДГ}}},$$

де $U_{\text{вГД}}$ – кількість теплоти, що можуть передати відпрацьовані гази головного двигуна, $U_{\text{вГДГ}}$ – кількість теплоти, що можуть передати відпрацьовані гази ДГ, $U_{\text{мГД}}$ – кількість теплоти, що викидається за борт від мастила ГД, $U_{\text{мДГ}}$ – кількість теплоти, що викидається за борт від мастила ДГ, $U_{\text{охрГД}}$ – кількість теплоти що викидається за борт від охолоджувальної рідини ГД, $U_{\text{охрДГ}}$ – кількість теплоти що викидається за борт від охолоджувальної рідини ДГ.

Показник теплової ефективності ТАС ($E_{\text{т}}$), який характеризує загальну економію палива енергетичної установки для ТАС в залежності від джерел акумульованої теплоти та розраховується за виразом:

$$E_T = \eta_{\text{ETAC}} \cdot \eta_{\text{KEU}},$$

де η_{KEU} – ефективний ККД КЕУ.

Результатом оптимізації є:

- структура ТАС 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 ТАМ на тривалість складових процесів зберігання, розрядки, зарядки ТАС з урахуванням відбору на загальнокорабельні потреби [24].

Теплофізичні показники процесів утилізації скидної теплоти енергетичної установки надводних кораблів з ТАС розраховано шляхом математичного моделювання за алгоритмом, який складається з вихідних даних, двох процедур першої – розрахунку частки бюджету часу корабля, яка припадає на простої за заданий проміжок часу та другої – маси ТАМ та кількості теплоти фазового переходу, а також алгоритму визначення критеріїв оптимальності ТАС у складі показників ефективності використання, теплової ефективності і якості, які реалізовані у програмному середовищі Mathcad.

Для зручності алгоритмізації розрахунків теплофізичних процесів утилізації скидної теплоти КЕУ вихідні дані систематизовано як наведено нижче.

За правилом систематизації прийнято порядок визначений на рисунку 2.2.

Процедура розрахунку частки бюджету часу корабля, яка припадає на простої за рік виглядає наступним чином.

1. Частка, що припадає на КЕУ в загальному обсязі потоків теплоти під час руху корабля:

$$\beta U_{KEY} = \frac{\sum_1^{n_1} (U_{i111} + U_{i112} + U_{i113}) + \sum_1^{n_2} (U_{i211} + U_{i212} + U_{i213}) + \sum_1^{n_3} U_{ij31}}{\sum_1^{n_1} (U_{i111} + U_{i112} + U_{i113}) + \sum_1^{n_2} (U_{i211} + U_{i212} + U_{i213}) + \sum_1^{n_3} U_{ij31} + \sum_1^{n_{TAC}} U_{TAC\psi}};$$

де n_1 – кількість головних ДД; n_2 – кількість ДГ, n_3 – кількість допоміжних котлів, n_{TAC} – кількість теплоаккумуляторів ТАС_j

2. Зменшення загального обсягу потоку теплоти на напрямку: U

$$A_{KEY} = \beta U_{KEY} \cdot \left(1 - \frac{\left(\sum_1^{n_1} (U_{i111} + U_{i112} + U_{i113}) + \sum_1^{n_2} (U_{i211} + U_{i212} + U_{i213}) + \sum_1^{n_3} U_{ij31} + \sum_1^{n_{TAC}} U_{TAC\psi} \right)_{\min}}{\left(\sum_1^{n_1} (U_{i111} + U_{i112} + U_{i113}) + \sum_1^{n_2} (U_{i211} + U_{i212} + U_{i213}) + \sum_1^{n_3} U_{ij31} + \sum_1^{n_{TAC}} U_{TAC\psi} \right)_{\max}} \right);$$

3. Частка бюджету часу корабля, яка припадає на простої за рік:

τ_i – час простою у i -ому місяці, $i = 1 \dots 12$

$$\tau_p = \frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 + \tau_5 + \tau_6 + \tau_7 + \tau_8 + \tau_9 + \tau_{10} + \tau_{11} + \tau_{12}}{12}.$$

Процедура розрахунку маси та кількості теплоти, яка необхідна для фазового переходу ТАМ в ТА для головних та допоміжних двигунів має наступний вигляд.

1. Довжина капсули з ТАМ – $l_{кан}$, кількість капсул ТА – $n_{кан}$, внутрішній діаметр капсули з ТАМ – $D_{кан}$, зовнішній діаметр трубки по якій тече допоміжний теплоносій – $d_{кан}$, задаються враховуючи задані габаритні розміри ТА;

2. Підбирається ТАМ з необхідними теплофізичними властивостями згідно температурному потенціалу джерела скидної теплоти;

3. Маса ТАМ k -го варіанту у капсулі визначається як

$$M_{TAMkank} = \rho_{TAMk} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot (D_{kan}^2 - d_{kan}^2) \cdot l_{kan} \right),$$

де ρ_{TAMk} – густина ТАМ.

4. Маса ТАМ k -го варіанту у ТА визначається як

$$M_{TAMk\Sigma} = M_{TAMkank} \cdot n_{kan},$$

5. Кількість теплоти, яка необхідна для фазового переходу ТАМ k -го варіанту визначається як

$$U_{TAMk} = r_{TAMk} \cdot M_{TAMk\Sigma}.$$

Алгоритм розрахунку характеризується наступною послідовністю.

1. Оцінка прогнозованого значення обсягів потоків утилізованої теплоти, (Q_{ijmn}) в залежності від джерела

$$Q_{ijmn} = c_{rijmn} \cdot G_{ijmn} \cdot (T_{почijmn} - T_{кінijmn}).$$

2. Оцінка прогнозованого значення обсягів кількості утилізованої теплоти ($U_{TAMkijmn}$), яка може бути передана ТАМ k -го варіанту

$$U_{TAMkijmn} = Q_{ijmn} \cdot \tau_{зарk} \cdot \eta_{ТАС\psi},$$

де $\tau_{зарk}$ – час заряджання ТА, $\eta_{ТАС\psi}$ – коефіцієнт втрат теплоти при транспортуванні теплоносія до елементів ТАС.

3. Оцінка прогнозованого значення обсягів кількості утилізованої теплоти, ($U_{ТППijmn\psi}$), яка може бути передана до елемента теплової передпускової підготовки

$$U_{ТППijmn\psi} = U_{ТАМkijmn} \cdot \eta_{ТПП\psi},$$

де $\eta_{ТПП\psi}$ – коефіцієнт втрат теплоти при транспортуванні теплоносія до елемента теплової передпускової підготовки.

4. Оцінка прогнозованого значення обсягів кількості утилізованої теплоти, ($U_{ППЕijmn\psi}$), яка може бути передана до елемента побутових потреб екіпажу

$$U_{ППЕijmn\psi} = U_{ТАМkijmn} \cdot \eta_{ППЕ\psi},$$

де $\eta_{ППЕ\psi}$ – коефіцієнт втрат теплоти при транспортуванні теплоносія до елемента потреб побутових потреб екіпажу.

5. Оцінка прогнозованого значення обсягів кількості утилізованої теплоти, ($U_{ЗКПijmn\psi}$), яка може бути передана до елемента загальнокорабельних потреб

$$U_{ЗКПijmn\psi} = U_{ТАМkijmn} \cdot \eta_{ЗКП\psi},$$

де $\eta_{ЗКП\psi}$ – коефіцієнт втрат теплоти при транспортуванні теплоносія до елемента загальнокорабельних потреб.

6. Оцінка прогнозованого значення загального обсягу кількості утилізованої теплоти, ($U_{ТАМ\Sigma n}$) від різних теплоносіїв за рівнем температурного потенціалу

$$U_{ТАМ\Sigma 1} = U_{ТАМij11\Sigma} + U_{ТАМij21\Sigma} + U_{ТАМij31\Sigma};$$

$$U_{ТАМ\Sigma 2} = U_{ТАМij12\Sigma} + U_{ТАМij22\Sigma};$$

$$U_{ТАМ\Sigma 3} = U_{ТАМij13\Sigma} + U_{ТАМij23\Sigma}.$$

7. Оцінка рівня енергетичних витрат при втраті тиску на переміщення теплоносія при переносі теплоти від джерела n у напрямку ψ до елемента ТАС

$$N_{ijmn\psi} = \frac{G_{ijmn\psi} \cdot \Delta p_{ijmn\psi}}{\rho_n \cdot \eta_{ijmn}},$$

де $\Delta p_{ijmn\psi}$ – повний опір при русі теплоносія.

8. Загальний час при визначенні обсягу кількості утилізованої теплоти протягом одного експлуатаційного циклу корабля задається як:

$$\tau_a = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{31} + \tau_{32} + \tau_{33} + \tau_{34} + \tau_4 + \tau_5,$$

де τ_1 – час виходу з бази, τ_2 – час переходу до місця служби, τ_{31} – загальний час руху з економічним ходом при патрулюванні, τ_{32} – загальний час руху з максимальним ходом при патрулюванні, τ_{33} – загальний час у дрейфі при патрулюванні, τ_{34} – швартові операції, τ_4 – час переходу з місця служби, τ_5 – час входу на базу.

9. Сума енергетичних витрат на організацію теплових потоків від елементів КЕУ F_i , на всіх розглянутих напрямках складе

$$F_1 = N_{ij11\Sigma} + N_{ij21\Sigma} + N_{ij31\Sigma};$$

$$F_2 = N_{ij12\Sigma} + N_{ij22\Sigma};$$

$$F_3 = N_{ij13\Sigma} + N_{ij23\Sigma}.$$

10. Часовий-енергетичний еквівалент ЧЕЕ

$$\text{ЧЕЕ} = \frac{(U_{\text{ТАМ}\Sigma 1} + U_{\text{ТАМ}\Sigma 2} + U_{\text{ТАМ}\Sigma 3}) - (F_{1\text{ход}} + F_{2\text{ход}} + F_{3\text{ход}} + F_{1\text{др}} + F_{2\text{др}} + F_{3\text{др}} + F_{3\text{Д}})}{\tau_{\text{доб}}},$$

11. Умова раціонального використання елементів КЕУ відповідає тому, що добовий приріст теплоти в ТАС більший або дорівнює витраті теплоти на потреби енергетичних установок, екіпажу та загальнокорабельних систем.

$$\frac{U_{TAM\Sigma 1} + U_{TAM\Sigma 2} + U_{TAM\Sigma 3}}{\tau_{доб}} \geq ЧЕЕ.$$

12. Умови раціонального використання теплових потоків ТАС за однієї передпускової підготовки двигуна відповідає тому, що запас теплоти у ТАС більше або дорівнює кількості теплоти необхідної для однієї передпускової підготовки головного чи допоміжного двигунів

$$U_{ак1} \geq U_{ПП1};$$

$$U_{ак2} \geq U_{ПП2};$$

$$U_{ПП1} = U_{пал1} + U_{м1} + U_{охр1};$$

$$U_{ПП2} = U_{пал2} + U_{м2} + U_{охр2},$$

де $U_{палі}$ – кількість теплоти необхідна для підігріву палива, $U_{мі}$ – кількість теплоти необхідна для підігріву мастила, $U_{охрі}$ – кількість теплоти необхідна для підігріву охолоджувальної рідини.

13. Оцінка ефективності використання ТАС проводиться за трьома критеріями оптимальності, які характеризують співвідношення теплоти утилізованої, використаної та теплоти сумарних викидів:

$$\eta_{ETAC} = \frac{U_{спож}}{U_{ymTAC}}; \quad \eta_{TAC} = \frac{U_{ymTAC}}{U_{вик.KEV}}; \quad E_T = \eta_{ETAC} \cdot \eta_{KEV}.$$

14. Індекс енергоефективності проєкту судна (EEDI) [89]:

$$EEDI = \frac{CO_2 emission}{Transport \ work} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\left(\prod_{j=1}^n f_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}} + \\
&+ \frac{\left(\left(\prod_{j=1}^n f_i \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref}},
\end{aligned}$$

де P_{ME} – індивідуальна потужність головного двигуна (як правило, приймається $\sim 75\%$ від номінальної потужності); P_{AE} – сумарна встановлена потужність допоміжних двигунів (ДГ); P_{PTI} – потужність валового електродвигуна, приймається як 75% від номінальної; P_{eff} – зменшення потужності головного двигуна за рахунок впровадження енергоефективних технологій; P_{AEeff} – зменшення потужності допоміжних двигунів за рахунок енергоефективних технологій; SFC_{ME} – питомі витрати палива i -го головного двигуна; SFC_{AE} – питомі витрати палива допоміжних двигунів; $C_{FME(i)}$ – коефіцієнт викидів CO_2 для i -го головного двигуна; C_{FAE} – коефіцієнт викидів CO_2 для допоміжних двигунів; $Capacity$ – дедвейт судна; V_{ref} – референтна швидкість судна; f_i – коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості судна; f_w – коефіцієнт впливу погодних умов; f_l – коефіцієнт обмеження вантажопідйомності; f_c – коефіцієнт корекції вантажного об'єму (LNG, хімовози, Ro-Rax); $f_{eff}(i)$ – коефіцієнт доступності енергоефективних технологій (дорівнює 1 при постійній роботі).

2.3 Математична модель ефективності енергетичної установки з ТАС

Дослідження впливу теплофізичних властивостей теплоносіїв та ТАМ на процеси утилізації теплоти, розподіл температури, твердої та рідкої фаз при заданих конструктивних та експлуатаційних показниках елементів ТАС виконано за допомогою багаторівневої математичної моделі СЕУ, достовірність результатів якої обґрунтована зіставленням з результатами чисельного експерименту. Математична модель включає сукупність математичних процедур, що враховують

елементи ТАС з урахуванням процесів теплообміну та гідродинаміки. На рисунках 2.3 та 2.4 представлено блок-схему математичної моделі комплексної ефективності енергетичної установки з ТАС.

Об'єктно-орієнтована побудова моделі у вигляді процедур дозволила використати апробовані методики розрахунку параметрів робочого тіла, характеристик двигунів та енергетичних установок, що визначило коректність та ефективну достовірність отриманих результатів. Вихідними даними для розрахунку моделі є: потужність двигуна – N_d , питома витрата палива двигуном – g_e , параметри навколишнього середовища – температура та тиск – $T_{н.с.}, p_{н.с.}$.

Процедури «Головний двигун» та «Допоміжний двигун» реалізують розрахунки процесів ДД і ГТД з використанням апробованих методів і алгоритмів, що дозволило обґрунтувати достовірність результатів розрахунків. Процедура «ТАС» включає наступні ієрархічні рівні: теплопередавальна поверхня теплоаккумулятора; теплоаккумулятор як елемент підсистеми ТАС і підсистема ТАС, як елемент енергетичної установки. Перший рівень реалізується методами обчислювальної гідродинаміки, другий – імітаційними методами процесів зарядки та розрядки ТА; третій – термодинамічним розрахунком експлуатаційного циклу енергетичної установки. Моделювання процесів перенесення теплоти і фазового переходу в ТА виконано за допомогою інструментарію обчислювальної гідромеханіки Computation Fluid Dynamic у програмі SolidWorks.

Математична модель процесів конвективного теплообміну та фазового переходу для досліджуваних процесів представлена системою таких рівнянь [90, 91]:

- рівняння нерозривності

$$\frac{\partial \rho_{TH}}{\partial \tau} + \nabla (\rho_{TH} \cdot \vec{w}) = 0, \quad (2.1)$$

де ρ_{TH} та w – густина та вектор швидкості потоку теплоносія;

- рівняння імпульсу

$$\frac{\partial(\rho_{TH} \cdot \vec{w})}{\partial \tau} + \nabla(\rho_{TH} \cdot \vec{w} \cdot \vec{w}) = -\nabla p + \nabla \left[\mu_{ef} \left(\nabla \vec{w} + (\nabla \vec{w})^T \right) \right] + \rho_{TH} \cdot g, \quad (2.2)$$

де p – статичний тиск; $\mu_{ef} = \mu_l + \mu_{тур}$ – сума ламінарної та турбулентної динамічних в'язкостей; $\rho_{TH} g$ – об'ємна гравітаційна сила;

- рівняння збереження енергії

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho_{TH} \cdot H) + \nabla(\rho_{TH} \cdot \vec{w} \cdot H) = \nabla(\lambda \cdot \nabla T), \quad (2.3)$$

де H – питома ентальпія, λ – коефіцієнт теплопровідності;

- рівняння теплопровідності з урахуванням фазового переходу

$$\frac{\partial(\rho_{mv} \cdot H)}{\partial \tau} = \nabla(\lambda_{mv} \cdot \nabla T_{mv}), \quad (2.4)$$

де ρ_{mv} та T_{mv} – густина та температура твердого тіла; індекс: mv – тверде;

- повна питома ентальпія

$$H(T) = \int_{T_{ef}}^{T_{кін}} c_p(\theta) d\theta + \beta(T) \cdot r, \quad (2.5)$$

де c_p – ізобарна масова теплоємність теплоакумуючого матеріалу;
 β – масова частка рідкої фази;

- ефективна теплоємність

$$c_{ef}(T) = \begin{cases} c_p(T) + r/\Delta T, & T_{nl} - \Delta T/2 \leq T \leq T_{nl} + \Delta T/2, \\ c_p(T), & \text{поза зоною плавлення.} \end{cases} \quad (2.6)$$

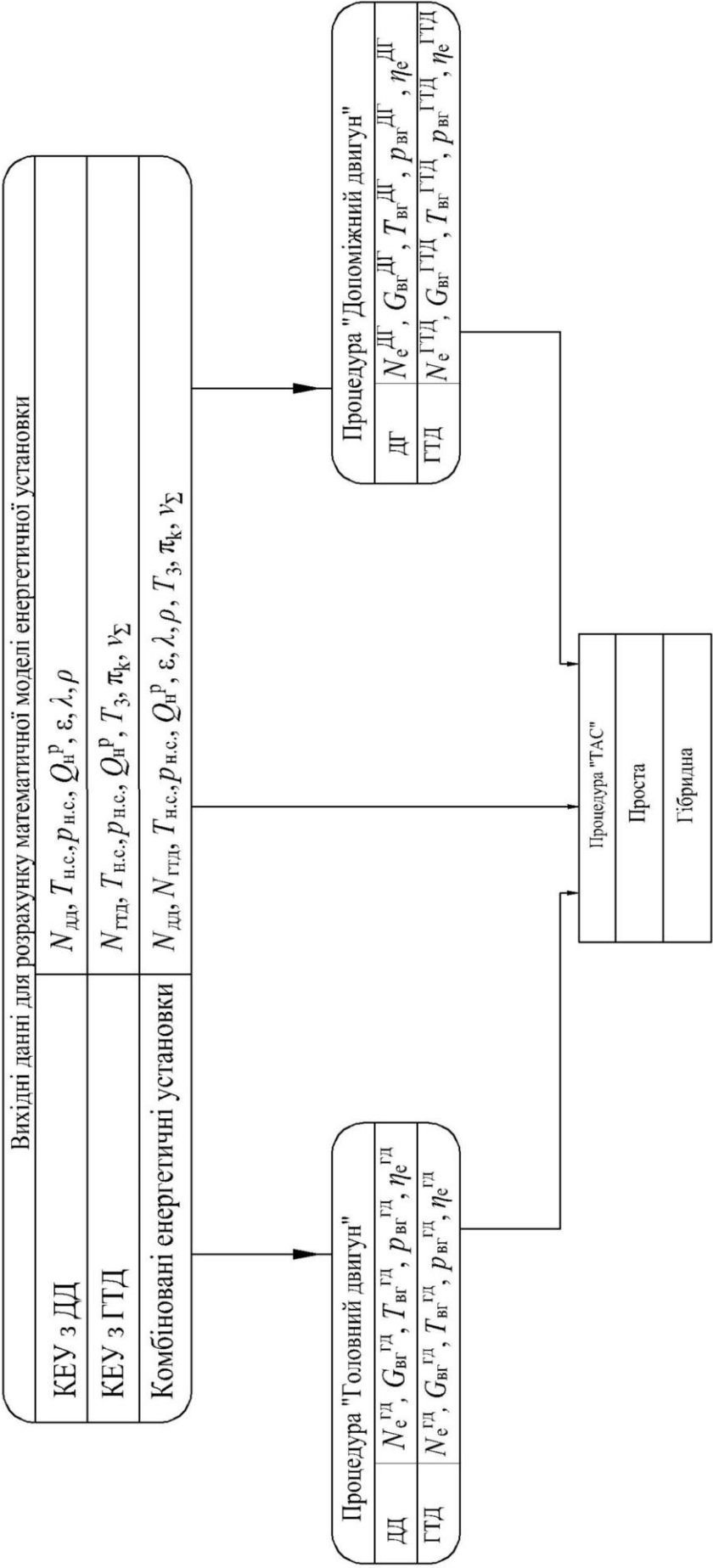


Рисунок 2.3 – Блок-схема математичної моделі енергетичної установки з ТАС

Процедура "ТАС"				
КЕУ	Ієрахічні рівні реалізації	Вихідні дані	Джерела скидної теплоти	Результати
	Теплопередавальна поверхня теплоаккумулятора	$G_{\text{вг}}, T_{\text{вг}}$	Відпрацьовані гази Охолоджувальна рідина Масило	$T_{\text{вг}} = f_1(\tau, l, r);$ $T_{\text{ТАМ}} = f_2(\tau, l, r);$ $\beta_{\text{ТАМ}} = f_3(\tau, l, r);$ $T_{\text{от}} = f_4(\tau, l, r)$
		$m_{\text{ТАМ}}, \rho_{\text{ТАМ}},$ $\lambda_{\text{ТАМ}}, r_{\text{ТАМ}}$		
		$G_{\text{от}}, T_{\text{от}}$		
	Теплоаккумулятор як елемент підсистеми ТАС	$D_{\text{ТА}}, L_{\text{ТА}},$ $d_{\text{кан}}, l_{\text{кан}}, n_{\text{кан}}$		$M_{\text{ТАМкан}}, M_{\text{ТАМ}\Sigma},$ $\Delta p_{\text{ТА}},$ $Q_{\text{м}}, Q_{\text{охр}}, Q_{\text{поб}}$
		$G, T_{\text{поч}}, \Delta T, c_p$		
	ТАС як підсистема енергетичної установки	$\rho_{\text{ТАМ}}, r_{\text{ТАМ}}$		$\chi_{\text{ЕЕ}}, \eta_{\text{ЕТАС}}, \eta_{\text{ТАС}}, E_{\text{т}},$ $\Delta g, \text{EEDI}$
		структура та показники КЕУ експлуатаційний цикл корабля структура ТАС		

Рисунок 2.4 – Структурна схема процедури ТАС

де $c_{ef}(T)$ – ефективна ізобарна масова теплоємність ТАМ; $T_{пл}$ – температура плавлення; ΔT – чисельно заданий інтервал згладжування зони плавлення (зазвичай 0,5 – 2 К у SolidWorks Flow Simulation); індекси: ef – ефективна, $пл$ – плавлення;

масова частка рідкої фази

$$\beta(T) = \frac{T - \left(T_{пл} - \frac{\Delta T}{2}\right)}{\Delta T}, \quad \begin{matrix} T_{пл} - \frac{\Delta T}{2} \leq T \leq T_{пл} + \frac{\Delta T}{2}, \\ T \leq T_{пл} - \frac{\Delta T}{2}, \\ T \geq T_{пл} + \frac{\Delta T}{2}, \end{matrix} ; \quad \frac{d\beta}{dT} = \begin{cases} 0, & \text{поза зоною} \\ 1/\Delta T & \text{в зоні плавлення} \end{cases} \quad (2.7)$$

маса рідкої фази ТАМ

$$M_{pid}(\tau) = \int_{\Omega} \rho_{pid} \cdot \beta(T(x, \tau)) dV, \quad (2.8)$$

де індекс: pid – рідке;

швидкість зміни маси рідкої фази

$$\frac{dM_{pid}}{d\tau} = \int_{\Omega} \rho_{pid} \frac{\partial \beta}{\partial \tau} dV = \int_{\Omega} \rho_{pid} \frac{\partial \beta}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} dV. \quad (2.9)$$

Умови однозначності для даної системи рівнянь згідно з геометричною моделлю, представленою на рисунку 2.5а, яка виконана в масштабі з дотриманням рівності безрозмірних критеріїв подібності досліджуваних процесів, нестационарності та осьової симетрії, мають такий вигляд.

Геометричні параметри для кожної труби: l – довжина, D – зовнішній діаметр, d – внутрішній діаметр, δ – товщина шару ТАМ.

Теплофізичні параметри: ρ – густина, c_p^{ef} – ефективна ізобарна масова

теплоємність, r і $T_{пл}$ – теплота і температура фазового переходу, λ – коефіцієнт теплопровідності.

Початкові умови для фізичних середовищ при $\tau = \tau_0$: ρ_0 і w_0 – густина та швидкість, p_0 – статичний тиск, T_0 – температура; β_0 – масова частка рідкої фази; M_0 – маса.

Граничні умови для радіальної та осьової координат (r, x) відповідають значенням на вході та виході відповідно при $r = 0, r = r_i$ і $x = 0, x = l$, де $i = 1, 2, 3$ – номер труби.

На вході: $w(\tau, r, 0) = w_0, T(\tau, r, 0) = T_0, p(\tau, r, 0) = p_0$.

На виході: $p(\tau, r, l) = p_l; \partial T_{TH} / \partial n = 0$.

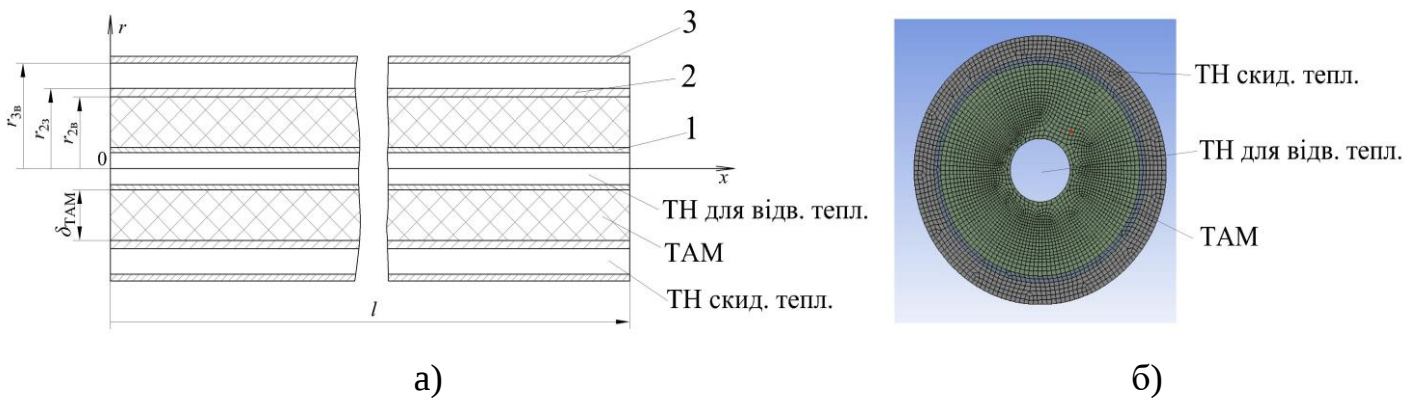


Рисунок 2.5 – Геометрична модель для розрахунку конвективного теплообміну та фазового переходу в ТАС: ТН схв. тепл. – теплоносій схидної теплоти; ТН для відв. тепл. – теплоносій для відведення теплоти; ТАМ – теплоакумулюючий матеріал з фазовим переходом; в – внутрішній; з – зовнішній

На межі теплоносій – зовнішня стінка труби 2: $w(\tau, r_{23}, x) = 0, T_{TH}(\tau, r_{23}, x) = T_c(\tau, r_{23}, x)$ та

$$-\lambda_{TH} \cdot \frac{\partial T_{TH}(\tau, r_{23}, x)}{\partial n} = -\lambda_c \cdot \frac{\partial T_c(\tau, r_{23}, x)}{\partial n}.$$

На межі стінка труби 2 – ТАМ: $T_c(\tau, r_{2в}, x) = T_{ТАМ}(\tau, r_{2в}, x)$ та

$$-\lambda_c \cdot \frac{\partial T_c(\tau, r_{2B}, x)}{\partial n} = -\lambda_{TAM} \cdot \frac{\partial T_{TAM}(\tau, r_{2B}, x)}{\partial n}.$$

На зовнішній поверхні труби 3, оскільки теплообмін із навколишнім середовищем не враховується, приймається адіабатична умова:

$$-\lambda_c \cdot \frac{\partial T_c(\tau, r_{3B}, x)}{\partial n} = 0.$$

У граничних умовах використано наступні позначення: n – нормаль до поверхні.

Фізичні властивості середовища та тіла для моделі й реального об'єкта були ідентичними.

Для розв'язання системи диференціальних рівнянь (2.1–2.9) використано метод кінцевих елементів [92], який включає такі етапи: дискретизація розрахункової області шляхом побудови розрахункової сітки, яка зображена на рисунку 2.5б; інтегрування системи диференціальних рівнянь у контрольних об'ємах з метою отримання алгебраїчних рівнянь для невідомих параметрів – швидкості, тиску, температури, густини тощо; лінеаризація дискретизованих рівнянь і розв'язання отриманої системи лінійних рівнянь.

Математичний опис алгоритму, що моделює процеси зарядки та розрядки теплоакумулятора, представлено у вигляді послідовності рівнянь.

Величина обсягів потоків теплоти, що утилізується

$$Q_{jn} = c_{pk} \cdot G_{jn} \cdot (T_{почjn} - T_{кінjn}),$$

де індекси: j – призначення двигуна головний чи ДГ; n – джерело теплоти (відпрацьовані гази, охолоджувальна рідина та мастило); індекси *поч*, *кін* відповідно початкова та кінцева.

Кількість акумульованої теплоти в ТАС

$$U_{TAC} = M_{m\epsilon TAM} \cdot c_{pm\epsilon TAM} \cdot (T_{nlTAM} - T_{почTAM}) + \\ + M_{pi\delta TAM} \cdot r_{TAM} + M_{pi\delta TAM} \cdot c_{ppri\delta TAM} \cdot (T_{кинTAM} - T_{nlTAM}).$$

Кількість споживаної теплоти:

- для передпускової підготовки двигунів:

$$U_n = c_{pn} \cdot M_n \cdot (T_{кин} - T_{поч});$$

- для загальносуднових та санітарно-побутових потреб:

$$U_{зспот} = q_{зс} \cdot D \cdot \tau, \\ U_{сбпот} = (n_{ек} + n_{пас}) \cdot (q_{м.в.} + q_{к.п.}) \cdot \tau_{ст};$$

де q – питома витрата теплоти, D – дедвейт судна; індекси: $ек$ та $пас$ – відповідно екіпаж та пасажери; $м.в.$, $к.п.$ і $зс$ – відповідно вода мильна, кип'ячена та загальносуднові; $ст$ – стоянка.

У термодинамічному розрахунку експлуатаційного циклу енергетичної установки моделі СЕУ подаються у вигляді балансових рівнянь теплоти з урахуванням ККД на втрати.

Розроблена модель ТАС відтворює структуру енергетичної установки та функціональні зв'язки комплексу: «Джерела – Скидна теплота – ТАС – Споживачі» і складається з трьох взаємозалежних підсистем: високого потенціалу – джерела скидної теплоти суднових двигунів; ТАС; низького потенціалу (стік теплоти) – споживачі.

Застосування ТАС дозволяє утилізувати непряму теплоту різних потенціалів $U_{пот}$ для розподілу потреб споживачів:

$$U_{пот} = U_n \cdot \eta_n + U_{сбпот} \cdot \eta_{сбпот} + U_{зспот} \cdot \eta_{зспот},$$

де η – коефіцієнт корисного використання теплоти. У першому наближенні потік теплоти ТАС, що акумулюється, можна оцінити виходячи з потенціалу наявних теплових викидів і експертно визначених параметрів ТАС

$$Q_{TAC} = Ne_i \cdot (1 - \eta_i) \cdot \eta_{iCarno},$$

де Ne_i – потужність двигуна, η_i – індикаторний ККД двигуна, η_{iCarno} – ККД Карно джерела теплоти. Прийнято, що енергетична установка конкретного судна має загальну потужність, яка залежить від режиму експлуатації, працюючого обладнання та параметрів навколишнього середовища, і може бути подана у вигляді суми:

$$Ne_{CEV} = Ne_{ГД} + Ne_{ДГ}.$$

Згідно з прийнятими умовами, судова енергетична установка може бути представлена системою балансових рівнянь потенціалу температур та маси робочого тіла, потоків енергії та ексергії:

$$\begin{cases} T_i = f(Ne_i, T_{н.с.}, \tau_j \dots) \\ G_i = f(Ne_i, T_{н.с.}, \tau_j \dots) \\ Ne_{CEV} = Ne_{ГД} + Ne_{ДГ} \\ Ex_i = Q_i \cdot (1 - T_{н.с.}/T_i) \end{cases},$$

а оцінка ефективності використання ТАС:

$$\eta_{ETAC} = \frac{U_{nom}}{U_{TAC}}; \quad \eta_{TAC} = \frac{U_{TAC}}{U_{вик}}; \quad E_T = \eta_{ETAC} \cdot \eta_{CEV}.$$

Вхідні дані для математичної моделі [93] визначені як такі: склад енергетичної установки, тип двигунів, їх техніко-економічні показники,

обладнання системи газовихлопу, кількість екіпажу та пасажирів, експлуатаційні цикли СЕУ [94–100]; теплофізичні показники теплоакумуючих матеріалів [101].

2.4 Методи фізичного моделювання процесів в елементах теплоакумуючої системи

Метою експериментального дослідження є отримання достовірних даних щодо підтвердження ефективної працездатності моделі дослідного зразка шумоглушника-теплоакмулятора (ШГТА) в складі ТАС надводних кораблів та суден.

Досягнення даної мети зводиться до вирішення наступних завдань:

- експериментально підтвердити працездатність моделі дослідного зразка ШГТА шляхом визначення інтервалів часу плавлення ТАМ, збереження у ньому теплоти з подальшою її віддачею при кристалізації для забезпечення загальносуднових потреб;
- обґрунтувати відповідність отриманих експериментальних і розрахункових характеристик дослідного зразка ШГТА в умовах експлуатаційних циклів судна;
- розробити пропозиції щодо правил Регістру України про використання ТАС в складі енергетичних установок суден.

Методологічною базою моделювання процесів в експериментальних зразках ТАС є теорія подібності, яка дозволяє використовувати отримані результати експериментів для розробки повнорозмірних систем.

Критеріями якими забезпечена подібність окремих процесів в умовах експерименту є наступні: числа Рейнольдса, Нусельта і Прандля для теплообміну теплоносіїв джерел теплоти – газ і рідина; числа Біо і Фур'є для нестационарної теплопровідності без фазового переходу ТАМ.

Нестационарна теплопровідність із фазовим переходом моделювалась як двофазна, коли теплообмін відбувається в обох фазах одночасно, з урахуванням їх теплофізичних властивостей на підставі прямих вимірювань показників

температурного поля в шарі ТАМ. Результати моделювання узагальнюються в вигляді залежності зміни внутрішньої енергії:

$$U_{\tau} = U_{\Pi} (1 - \theta_{\tau} (R, Bi, Fo_{\tau})), \quad (2.10)$$

де U_{τ} – кількість теплоти, що характеризує зміну внутрішньої енергії;
 U_{Π} – повна кількість теплоти, що може бути накопичена ТАМ при заданих умовах;
 θ_{τ} – безрозмірна відносна температура, що залежить від геометричного параметра $R=r/r_0$, критеріїв Біо та Фур'є.

2.5 Експериментальний стенд та програма досліджень дизельного двигуна з експериментальним зразком моделі шумоглушника-теплоаккумулятора

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 (а) та загальний вигляд експериментального зразка моделі ШГТА у складі стенду (б) наведені на рисунку 2.6 [87].

Програма проведення експерименту включає:

- обґрунтування обсягу експерименту при експлуатаційній потужності двигуна при числі дослідів 3 для повного розплавлення теплоакуючого матеріалу – манітол;
- опис проведення експерименту щодо плавлення теплоакуючого матеріалу, збереження у ньому теплоти з подальшою її віддачею при кристалізації;
- обґрунтування засобів вимірювань при визначенні розподілу температур відпрацьованого газу та манітолу за часом;

- обґрунтування способів обробки та аналізу результатів експерименту для визначення 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 2.1.

Похибки опосередкованого визначення значень оцінювались за виразами:

- витрат повітря

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

- витрат палива

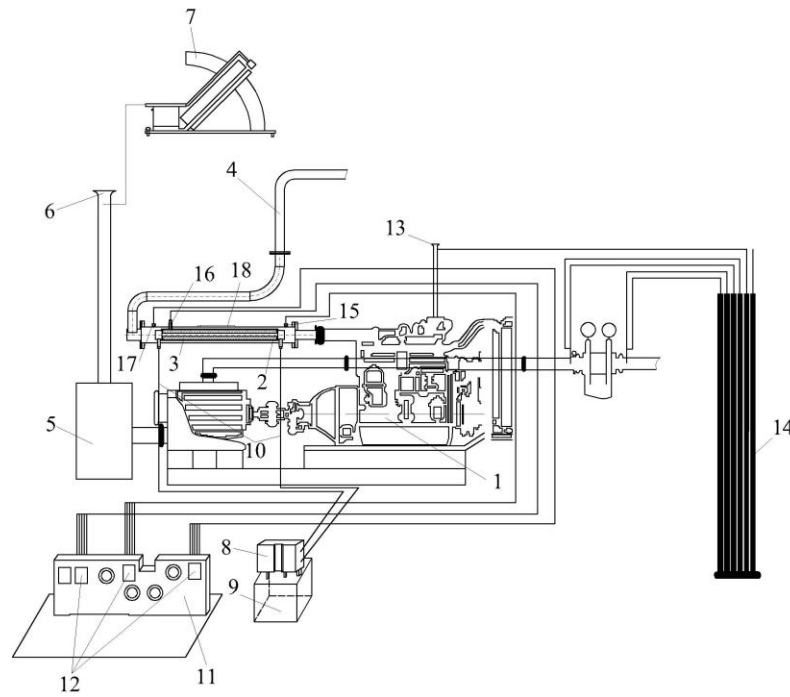
$$\Delta G_{\text{пал}} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial m} \Delta m\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial h} \Delta h\right)^2},$$

- 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 складали $\delta G_{\text{пов}}=2,3\%$, $\delta G_{\text{пал}}=2,0\%$ 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 квазістабілізованих показниках.



а)



б)

Рисунок 2.6 – Стенд з експериментальним зразком моделі ШГТА: 1 – дизельний двигун СМД-19; 2 – модель дослідного зразка ШГТА; 3 – теплоакumuлюючий 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

Таблиця 2.1 – Значення основних похибок засобів вимірювання

Середовище	Параметр, одиниця виміру	Діапазон	Прилад	Відносна похибка, %
Повітря	Температура, °C	15...20	Термометр ТЛ-4	±0,3
Газ до ШГТА		250...270	Термопара ХК, пристрій контролю температури «ОВЕН» УКТ38-Щ4	±2,5
Газ після ШГТА		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
		0,5...0,7	Водяний U-образний п'єзометр	±1
Паливо	Рівень, мм	0...200	Рівнемірна колонка	±0,5
Поверхня зразка	Температура, °C	0...200	Термометр ТЛ	±1
Теплофізичний процес	Час, с	0...3600	Секундомір	±1

На рисунку 2.7 наведено загальний вигляд експериментального зразка ШГТА загальною довжиною 1290 мм та зовнішнім діаметром 133 мм, із вбудованою капсулою, що містить 3 кг манітолу, довжиною 965 мм і зовнішнім діаметром 95 мм.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд експериментального зразка шумоглушника-теплоаккумулятора

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.

2.6 Верифікація та валідація математичної моделі процесів перенесення теплоти в елементах теплоакумуючої системи

Визначення достовірності обробки експериментальних результатів проводилося за балансами теплоти для окремих ділянок випробувань процесів нестационарної теплопровідності в капсулі з ТАМ - без фазового переходу твердого стану, із фазовим переходом твердого стану в рідину та без фазового переходу

рідини за наступними рівняннями.

Тепловий потік від відпрацьованих газів

$$Q_z = c_{pz} \cdot G_z \cdot (T_{zпоч} - T_{zкін}).$$

Тепловий потік від зовнішньої поверхні

$$Q_{от} = \alpha_{зов} \cdot F_{зов} \cdot (T_{нов} - T_{н.с.}),$$
$$\alpha_{зов} = \frac{\lambda}{D_{ек}} \cdot 0,50 \cdot (Gr_{нов} \cdot Pr_{нов})^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{нов}}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

Тепловий потік к ТАМ

$$Q_{ex} = \alpha_{вн} \cdot F_{вн} \cdot (T_{зпоч} - T_{зкін}),$$
$$\alpha_{зов} = \frac{\lambda}{d} \cdot 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

або для ділянки нагріву ТАМ до плавлення

$$U_{ТАМ} = c_{р\tau в} \cdot M_{твТАМ} \cdot (T_{кін} - T_{поч})$$

та для ділянки кипіння ТАМ

$$U_{ТАМ} = c_{р\tau в} \cdot M_{твТАМ} \cdot (T_{кін} - T_{поч}) + r_{ТАМ} \cdot M_{рідТАМ} + c_{ррід} \cdot M_{рТАМ} \cdot (T_{кін} - T_{пл}).$$

Перевірка за балансом теплоти визначалась відповідністю теплового потоку на вході сумі теплових потоків до ТАМ і втрат з поверхні. Відносна похибка розрахована за виразом

$$\delta = \frac{Q_{TAM} + Q_{em} - Q_{ex}}{Q_{ex}} \cdot 100\%. \quad (2.10)$$

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 теплоакumuлюючого матеріалу виконано методами обчислювальної гідродинаміки. Результати порівняння експериментальних і розрахункових температур ТАМ дослідного зразка ШГТА наведено на рисунку 4.2.

2.7 Висновки за розділом 2

1. Розроблена математична модель процесів ТАС енергетичної установки надводного корабля, що враховує особливості використання в складі КЕУ різних теплових двигунів, її структуру і умови експлуатації та дозволяє оптимізувати за необхідністю: структуру ТАС 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 ТАМ на тривалість складових процесів зберігання, розрядки, зарядки теплоти теплоакumuлюючої системи з урахуванням відбору на загальнокорабельні потреби.

2. Розроблена багаторівнева математична модель ефективності енергетичної установки з ТАС як сукупність математичних процедур, що враховують структуру ТАС та особливості процесів теплообміну та гідродинаміки, впливу теплофізичних властивостей теплоносіїв та ТАМ на процеси утилізації теплоти, розподіл температури, твердої та рідкої фаз при заданих конструктивних та експлуатаційних показниках елементів системи.

3. Об'єктно-орієнтована побудова моделі у вигляді процедур «Головний

двигун» та «Допоміжний двигун» дозволила використати апробовані методики розрахунку параметрів робочого тіла, характеристик двигунів та енергетичних установок, що визначило коректність та достовірність отриманих результатів, а процедура «Теплоакumuлююча система» включає наступні ієрархічні рівні: теплопередавальна поверхня теплоакumuлятора; теплоакumuлятор як елемент підсистеми теплоакumuлюючої системи та підсистема теплоакumuлююча система як елемент енергетичної установки, де перший рівень реалізується методами обчислювальної гідродинаміки, другий – імітаційними методами процесів зарядки та розрядки теплоакumuлятора; третій – термодинамічним розрахунком експлуатаційного циклу енергетичної установки.

4. Обґрунтовано вирішення завдань підвищення ефективності використання скидної теплоти енергетичних установок надводних кораблів з ТАС шляхом використання поряд з теоретичними методами також експериментальних за теорією подібності, яка дозволяє використовувати отримані результати експериментів щодо підтвердження ефективної працездатності моделі дослідного зразка ШГТА для розробки повнорозмірних ТАС надводних кораблів та суден.

5. Достовірність експериментальних результатів підтверджується наступними рівнями відносних похибок: прямих засобів вимірювання – 0,3...6%, непрямих – 2...8%, а верифікація та валідація розрахункових даних за математичною моделлю процесів перенесення теплоти в елементах ТАС забезпечена припустимою розбіжністю з результатами фізичного експерименту автора і наявними даними інших дослідників.

Основні результати розділу опубліковані в [24, 87, 88].

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ УТИЛІЗАЦІЇ, НАКОПИЧЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ СКИДНОЇ ТЕПЛОТИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЮ СИСТЕМОЮ КОРАБЕЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

3.1 Визначення інтегральних критеріїв вибору теплоакumuлюючого матеріалу для об'єктно-орієнтованого моделювання ефективності теплоакumuлюючої системи

Комплексна ефективність енергетичних установок кораблів та суден визначається повнотою задоволення їх енергетичних потреб, екіпажу та пасажирів за умови обмеження витрат енергоресурсів. При цьому більш ефективна КЕУ або СЕУ за фіксованих енергоресурсів забезпечує потреби в більшому обсязі. Це можливо в результаті забезпечення ширшої сукупності потреб окремих цілей, визначених квантифікацією. Таке послідовне виокремлення підцілей дозволяє отримати багаторівневу ієрархічну структуру елементів енергетичних установок кораблів та суден з відповідними повними наборами вихідних даних для їх задоволення.

У загальному випадку система ТАС утилізує теплоту відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила головних і допоміжних двигунів, використовуючи ТАМ з відповідними теплофізичними властивостями.

Головною особливістю енергетичних ресурсів на кораблі та судні є їхня автономна обмеженість. Кількісним виразом цієї обмеженості є умова максимальної енергоємності EE у вигляді

$$EE = \frac{E}{V} \rightarrow \max ,$$

де E – сумарна енергія джерел (паливо, електроенергія, теплота), V – обсяг джерел енергії.

Стосовно i -го елемента акумулювання теплоти в КЕУ та СЕУ значення енергоємності виражається як

$$\frac{U_i}{V_i} = \frac{q_i \cdot M_i}{V_i} = q_i \cdot \rho_i \rightarrow \max,$$

де q_i – питома кількість теплоти, M_i – маса, ρ_i – густина матеріалу, $q_i = c_{p_{тв}} \cdot \Delta T_{тв} + r + c_{p_{рідТAM}} \cdot \Delta T_{рід}$ – сума зміни енергії внутрішнього та фазового переходу, c_p – питома ізобарна теплоємність, r – питома теплота фазового переходу, $\Delta T = T_{дж} - T_{нл}$ – температурний перепад, $T_{дж}$ – температура джерела, $T_{нл}$ – температура фазового переходу, індекс: $дж$ – джерело.

Рациональний вибір ТАМ залежить від сукупності цих властивостей і зводиться до задачі вибору критеріїв при розробці та вдосконаленні складних технічних систем.

Оскільки інтенсивність теплопередачі в ТАМ визначається величиною $\Delta T \rightarrow \max$, то при обмеженні значення $T_{дж}$ величина $T_{нл} \rightarrow \min$.

Приймаючи умову вибору критеріальної досконалості як умову «чим більше, тим краще», вираз критерію вибору теплоакumuлюючого матеріалу можна записати як

$$K_{ТАМ} = \frac{q_i \cdot \rho_i}{T_{нлi}} \rightarrow \max$$

Результати узагальнення представлені функціональною залежністю інтегрального критерію ТАМ від температурного перепаду на рисунку 3.1. Матеріали з фазовим переходом за температурою плавлення були поділені на три групи – низькотемпературні, середньотемпературні та високотемпературні, що дозволяє використовувати їх для акумулювання теплоти мастила, охолоджувальної рідини та відпрацьованих газів [86].

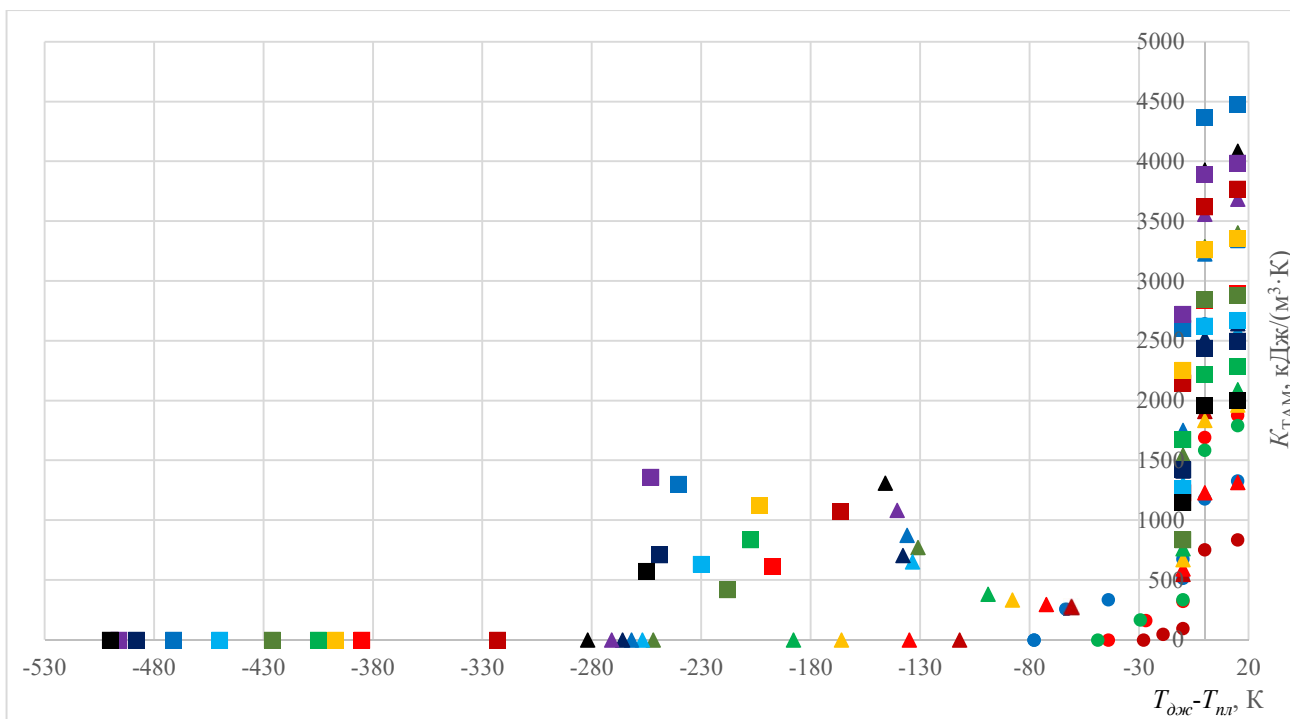


Рисунок 3.1 – Залежність інтегрального критерію K_{TAM} від температурного перепаду:

- низькотемпературні: октадекан – темно-червоний, гідрофосфат натрію – червоний, натрій тіосульфат – зелений, барій гідроксид – темно-зелений, хлорид магнію – синій;
- ▲ середньотемпературні: еритритол – темно-червоний; поліетилен високого тиску – червоний, манітол – помаранчевий, галакрирол – зелений, $LiNO_3$ – темно-зелений, $NaNO_3(18.5)-81.5NaOH$ – світло-синій, $LiCl(37)-63LiOH$ – синій, $NaNO_3(41)-59NaOH$ – темно-синій, $NaNO_2$ – фіолетовий, $NaCl(7.8)-6.4Na_2CO_3-85.5NaOH$ – чорний;
- високотемпературні: $NaOH$ – темно-червоний, $MgCl_2(63)-22,3NaCl-14KCl$ – червоний, $Li_2CO_3(31)-35K_2CO_3-Na_2CO_3$ – помаранчевий, KOH – зелений, $LiF(20)-80LiOH$ – темно-зелений, $NaCl(50)-50MgCl_2$ – світло-синій, $LiOH$ – синій, $Li_2CO_3(47)-53K_2CO_3$ – темно-синій, $Na_2CO_3(56)-44Li_2CO_3$ – фіолетовий, $NaCl(33)-67CaCl_2$ чорний

Для другого ієрархічного рівня теплообмін у теплоаккумуляторі здійснюється за рахунок теплопровідності, інтенсивність якої обернено пропорційна тепловому опору. Для процесів теплообміну з фазовим переходом загальний тепловий опір складається з теплових опорів твердої та рідкої фаз (див. рисунок 3.2)

$$R_T = \frac{\delta_{тв}}{\lambda_{тв}} + \frac{\delta_{рід}}{\lambda_{рід}},$$

де δ , λ – відповідно товщина та коефіцієнт теплопровідності ТАМ,
 $\delta = \delta_{тв} + \delta_{рід}$.

Оскільки значення коефіцієнта теплопровідності твердої фази ТАМ є більшим, ніж аналогічне значення для рідкої фази, а товщина шару змінюється, залежність загального термічного опору від рідкої масової частки ТАМ наведено на рисунку 3.3 [86].

Виходячи з цього, під час оптимізації теплофізичних властивостей ТАМ для визначення масогабаритних показників теплоаккумуляторів доцільно застосовувати мультиплікативний інтегральний критерій такого вигляду

$$K_{ТА} = \frac{K_{ТАМ}}{R_T},$$

залежність якого від температурного перепаду при початковій товщині ТАМ $\delta = 40$ мм показано на рисунку 3.4, а його значення та $K_{ТАМ}$ для масогабаритних показників теплоаккумуляторів у складі газоходів СЕУ для обраних типів суден наведені в таблиці 3.1.

Вибір мультиплікативного інтегрального критерію теплоаккумулятора як елемента підсистеми ТАС залежить від потужності КЕУ або СЕУ, яка визначає рівень утилізованої теплоти, як температурний напір джерела скидної теплоти.

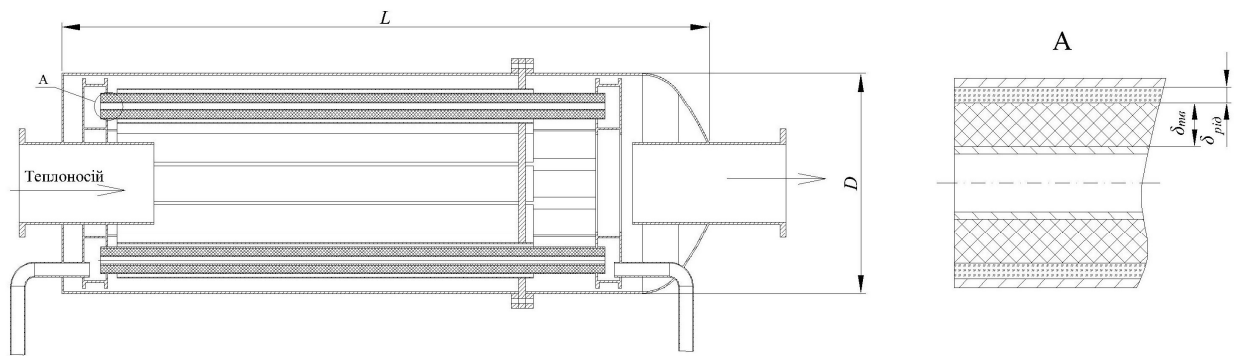


Рисунок 3.2 – Схема теплоаккумулятора з фазовим переходом ТАМ

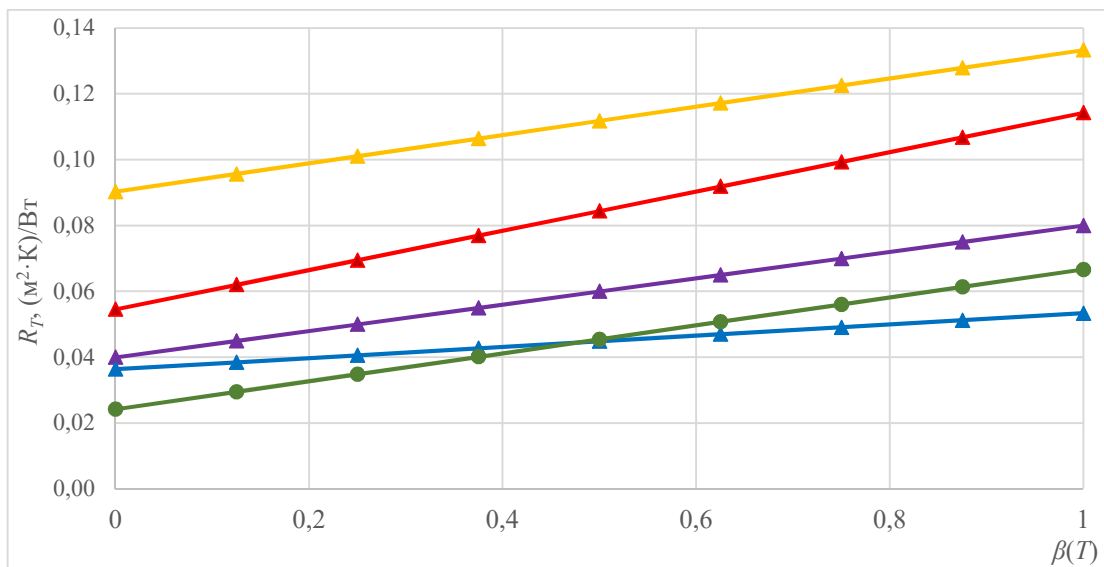


Рисунок 3.3 – Залежність R_T від рідкої масової частки (позначення, як на рисунку 3.1)

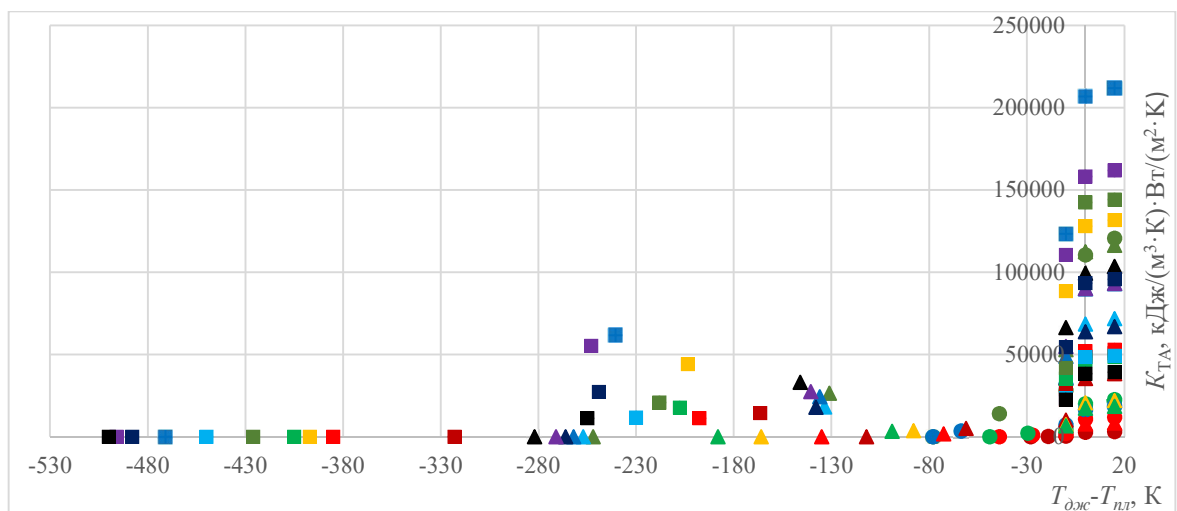


Рисунок 3.4 – Залежність інтегрального критерію K_{TA} від температурного перепаду (позначення, як на рисунку 3.1)

Умови використання підсистеми ТАС як елемента енергетичної установки характеризуються експлуатаційним циклом корабля. Експлуатаційний цикл корабля відображає співвідношення інтервалів часу спектру ходових режимів і стоянки. Цей цикл в узагальненому вигляді представлений на рисунку 3.5.

Врахування співвідношень інтервалів часу робочих режимів і стоянок характеризує співвідношення часу накопичення та віддачі теплоти споживачам ТАС. Вплив співвідношення часу накопичення та віддачі теплоти в інтегральному критерії ТАС враховується виразом

$$K_{ТАС} = K_{ТА} \cdot \frac{\tau_{cmi}}{\tau_{ходi}},$$

де τ_{cmi} та $\tau_{ходi}$ – відповідно час стоянки та час руху відповідно до i -го етапу експлуатаційного циклу.

Результати узагальнення інтегрального критерію ТАС від різниці температур відпрацьованих газів, що відповідають потужності енергетичної установки, швидкості ходу і плавлення ТАМ представлені на рисунку 3.6.

Сформовані інтегральні критерії теплофізичних властивостей ТАМ, теплоаккумулятора та ТАС відповідають трьом ієрархічним рівням моделювання теплофізичних процесів процедурою «ТАС».

Результати дослідження характеристик усереднених значень температури та масової частки рідкої фази для нітриту натрія з геометричними умовами однозначності в мм ($d_b = 19$, $d_3 = 25$, $D_b = 104$, $D_3 = 114$, $l = 1500$) для нержавіючої сталі AISI 321 згідно стандарту EN 10088-1 наведено на рисунку 3.7.

Отримані результати є вихідними даними для другого ієрархічного рівня досліджень – термодинамічних характеристик ТА як окремого елемента ТАС, так і у складі КЕУ або СЕУ. Для порівняння розрахункових та експериментальних характеристик моделі ТА як сукупності локальних значень окремих показників у заданих точках об'єму значення показників ТАМ і теплоносія наведено на рисунку 3.8, де ($d_b = 38$, $d_3 = 45$, $D_b = 149$, $D_3 = 159$, $l = 1500$).

Таблиця 3.1 – Характеристики шумоглушників-теплоаккумуляторів ТАС у складі енергетичних установок суден з джерелом теплоти – відпрацьовані гази

Судно	Двигун MAN	Теплоакмулюючий матеріал	$K_{ТАМ},$ $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	$K_{ТА},$ $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	Потенціал акумуляованої теплоти, кДж
Круїзний лайнер	32/44 9L	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1749	17218	$7,86 \cdot 10^6$
		нітрит натрію NaNO_2	3395	75443	$1,09 \cdot 10^7$
		сіль $\text{LiCl}(37)\text{--}$ 63LiOH	3088	75480	$1,20 \cdot 10^7$
Балкер	6S60ME- C8.5	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1771	23069	$7,12 \cdot 10^6$
		еритритол $\text{C}_4\text{H}_6(\text{OH})_4$	1829	39432	$7,27 \cdot 10^6$
		барій гідроксид $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2496	121106	$9,57 \cdot 10^6$
Танкер	6G60ME- C9.5	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1771	23069	$8,35 \cdot 10^6$
		еритритол $\text{C}_4\text{H}_6(\text{OH})_4$	1829	39432	$8,60 \cdot 10^6$
		барій гідроксид $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2496	121106	$1,11 \cdot 10^7$

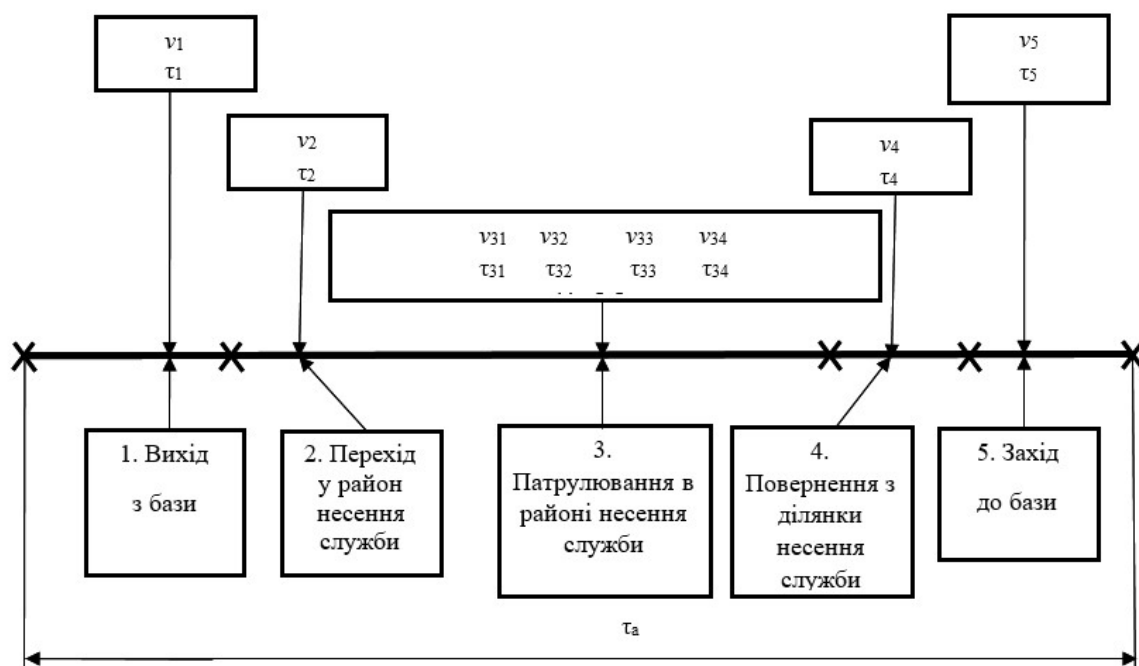


Рисунок 3.5 – Схема експлуатаційного циклу надводного корабля

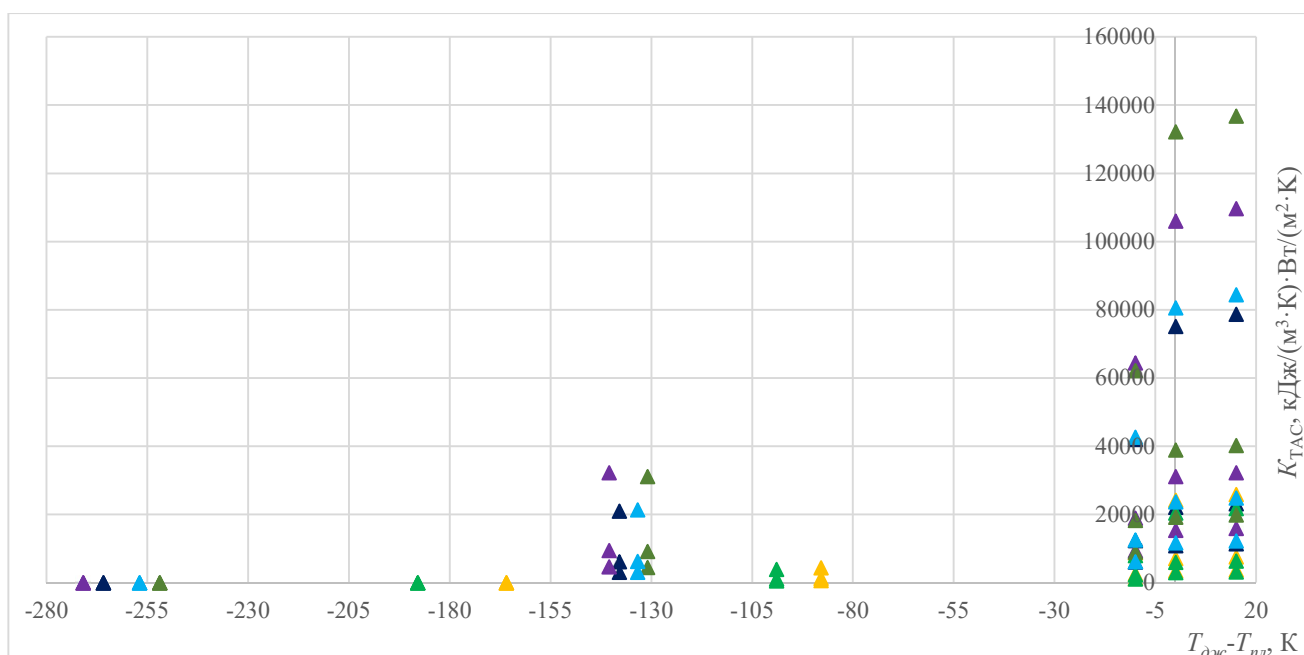


Рисунок 3.6 – Залежність інтегрального критерію $K_{ТАС}$ від різниці температур відпрацьованих газів, що відповідають потужності енергетичної установки, швидкості ходу та плавлення ТАМ на різних ділянках експлуатаційного циклу (позначення відповідають рисунку 3.1)

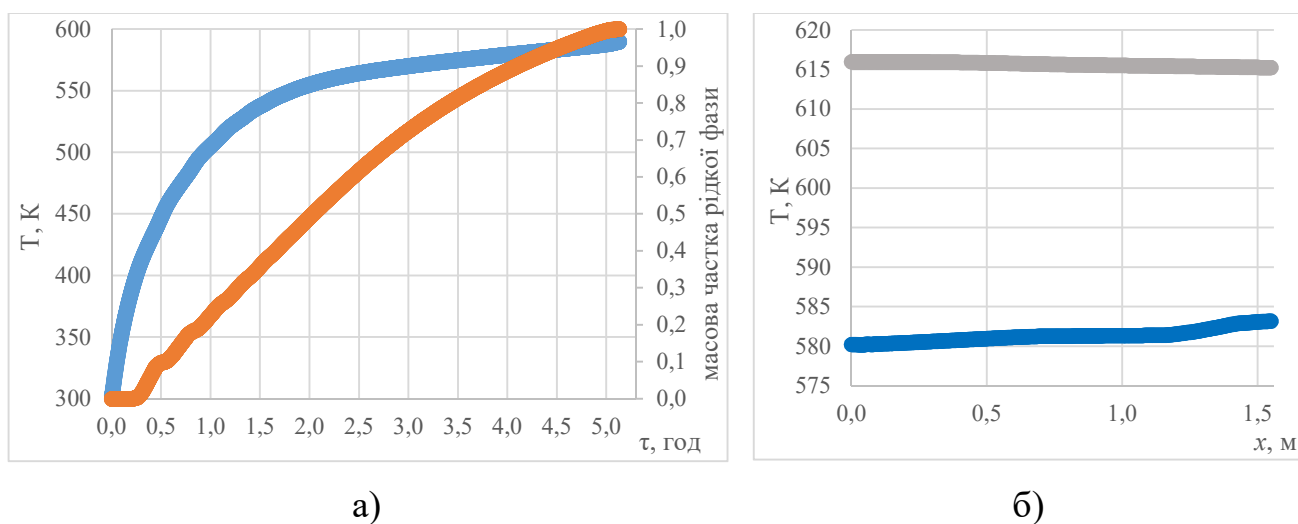


Рисунок 3.7 – Характеристики температури та масової частки рідкої фази нітриту натрію (NaNO_2) залежно від часу (а) та розподіл температури відпрацьованих газів і матеріалу з фазовим переходом уздовж довжини ділянки (б); — — температура відпрацьованих газів, — — температура ТАМ, — — масова частка рідкої фази ТАМ

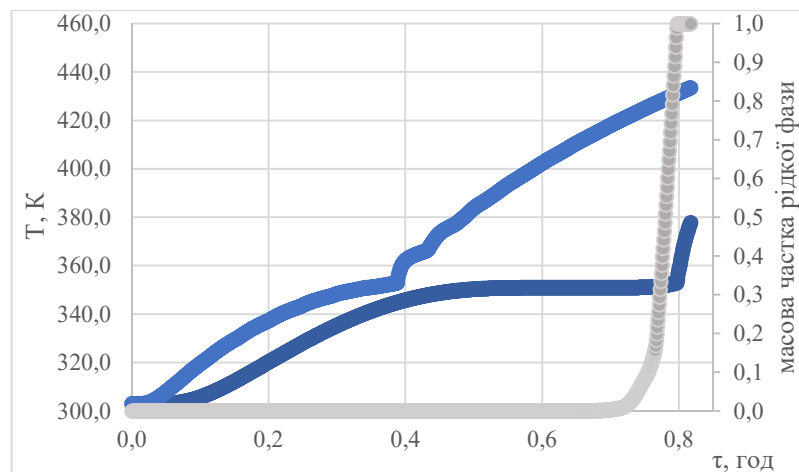


Рисунок 3.8 – Локальні значення температури, масової частки рідкої фази ТАМ – гідроксиду барію ($\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) та відпрацьованих газів у вихідному перерізі шумоглушника-теплоаккумулятора; — — температура ТАМ за відносної товщини шару 1, — — температура ТАМ за відносної товщини шару 0,5

Отримані результати досліджень другого ієрархічного рівня дають змогу уточнити масогабаритні та термогазодинамічні характеристики теплоаккумуляторів як окремих елементів системи, так і в складі ТАС.

3.2. Оцінка ефективності утилізації скидної теплоти корабельної енергетичної установки теплоакуюлюючою системою одного джерела

Оцінка ефективності утилізації скидної теплоти КЕУ ТАС одного джерела отримана на підставі результатів розрахунків за запропонованою математичною моделлю при оптимізації вибору ТАМ з урахуванням фазового переходу при сталих габаритних показниках теплоаккумулятора, складу ТАС та джерела теплових потоків, теплофізичних властивостей теплоносіїв та гідравлічних втрат. Об'єм ТА визначався конструктивно за умов його компоновки в складі ТАС КЕУ [24].

Ефективність ТАС у складі КЕУ залежить від її структури, експлуатаційного циклу корабля, джерел утилізованої теплоти, конструкції теплоаккумулятора, ТАМ та складу споживачів. Оцінка ефективності використання ТАС проводиться з використанням критеріїв оптимальності, які характеризують співвідношення теплоти утилізованої, використаної та наявної теплоти сумарних викидів. Тому

визначення критеріїв оптимальності використання ТАС для різних ТАМ в умовах експлуатації КЕУ для різних класів кораблів є актуальним завданням.

Алгоритм розрахунку оцінки ефективності утилізації скидної теплоти КЕУ ТАС за різними схемами складається з вихідних даних, двох процедур: першої – розрахунку частки бюджету часу корабля, яка припадає на простої за заданий проміжок часу та другої – маси ТАМ та кількості теплоти фазового переходу, а також алгоритму визначення критеріїв оптимальності ТАС у складі показників ефективності використання, теплової ефективності і якості, які реалізовані у програмному середовищі Mathcad та дозволяють оцінити значення критеріїв оптимальності ТАС з урахуванням структури КЕУ, експлуатаційного циклу надводного корабля, джерел утилізованої теплоти, конструкції теплоаккумулятора, ТАМ та складу споживачів для наступних джерел: відпрацьовані гази, охолоджувальна рідина та мастило.

При дослідженнях розглянуто використання ТАС в КЕУ для класів надводних кораблів патрульний катер, ракетний катер, корвет та фрегат. Відповідно склад КЕУ цих кораблів наступний:

- патрульного катеру – двовальна дизельна енергетична установка з двома дизельними двигунами CAT C18 та двома дизель-генераторами CAT C4.4 (рисунок 3.9, а);

- ракетного катеру – CODAG з двома дизельними двигунами MTU 16V4000M93, двома газотурбінними двигунами ДС77 та чотирма дизель-генераторами CAT C7.1;

- корвету – CODOG з двома дизельними двигунами CAT C280-16, двома газотурбінними двигунами ДК91 та чотирма дизель-генераторами CAT C32 (рисунок 3.9, г);

- фрегату – CODOG з двома дизельними двигунами CAT C280-12, двома газотурбінними двигунами ДМ94 (рисунок 3.9, г).

Характеристики розглянутих двигунів КЕУ наведено у таблиці 3.2 [102–109].

Результати дослідження для одного з проектів на патрульного катера наведені у таблицях 3.3 та 3.4.

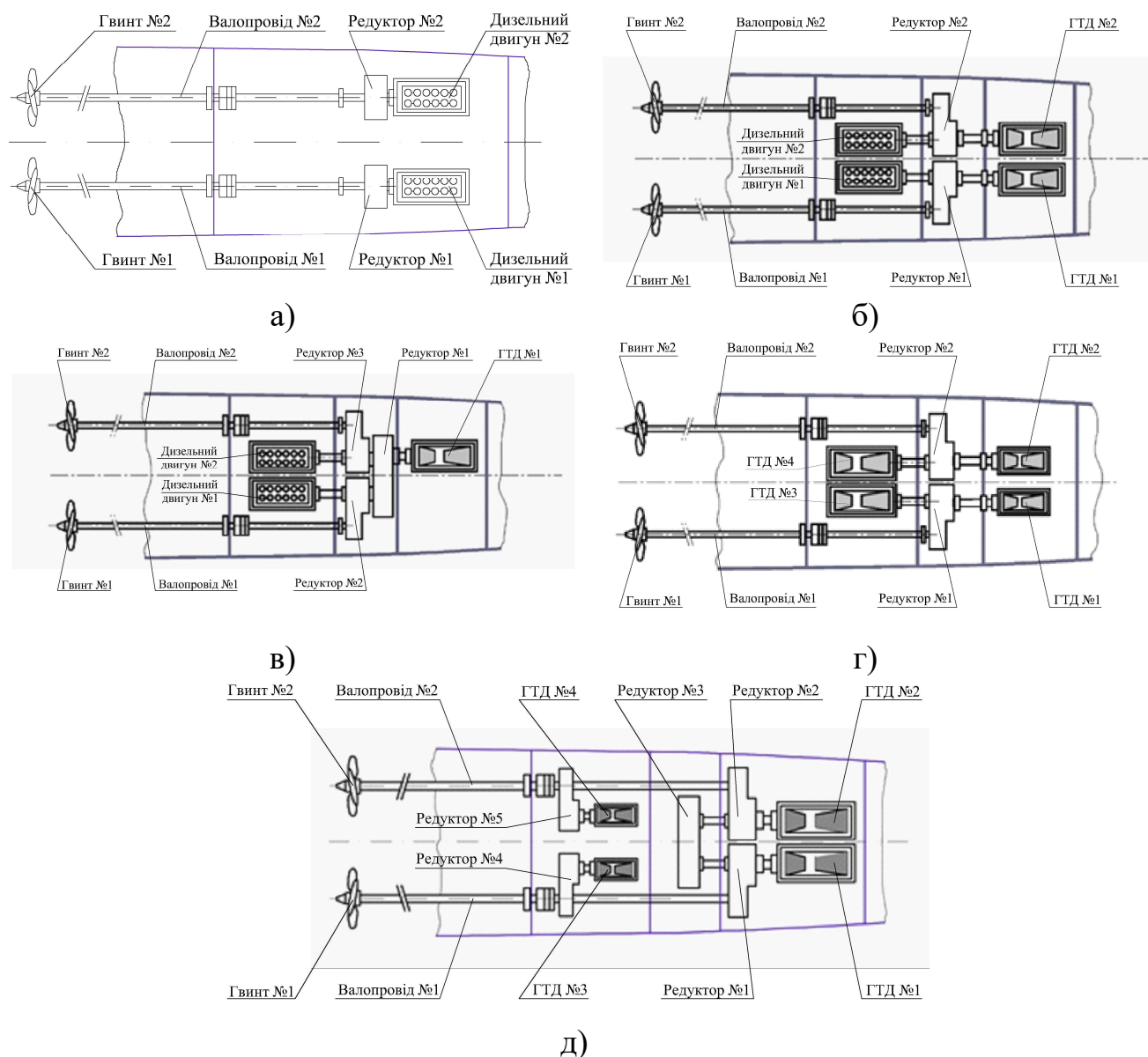


Рисунок 3.9 – Схеми КЕУ: а) ДУ (2 маршових ДД, для патрульних та ракетних катерів); б) CODOG (2 маршових ДД, 2 форсажних ГТД, для фрегатів, корветів, ракетних та патрульних катерів); в) CODAG (2 маршових ДД, 1 форсажний ГТД, для фрегатів, корветів, ракетних та патрульних катерів); г) COGOG (2 маршових ГТД, 2 форсажних ГТД, для фрегатів); д) COGAG (2 маршових та 2 форсажних ГТД, для фрегатів, корветів, ракетних та патрульних катерів).

Таблиця 3.2 – Склад та характеристики КЕУ

Клас корабля	Модель двигуна	N_d , кВт	g_e , г/кВт·год	Об'єм мастила, л	Об'єм охолоджуючої рідини, л	Частота обертання двигуна, об/хв	Витрата палива, л/год
Патрульний катер	CAT C18	651	219,1	64	45,8	2200	167,8
	CAT C4.4	38	226,6	8,5	16,5	1500	11,7
Ракетний катер	MTU 16V4000M93	3120	212	21	330	2100	1044
	ДС 77	8820	272	–	–	7300	–
	CAT C7.1	200	216,4	21	38	1800	4
Корвет	CAT C280-12	4060	205	910	1400	1000	992,1
	ДК 91	21000	–	–	–	–	–
	CAT C32	688	203,1	138	240	1500	143,2
Фрегат	CAT C280-16	4920	208	–	–	1000	1219,9
	ДМ 94	20000	253	–	–	3450	–

Таблиця 3.3 – Таблиця показників ефективності використання ТАС патрульного катеру (влітку/взимку)

Теплоакуюлюючий матеріал	Головний двигун		Допоміжний двигун	
	η_{ETAC}	E_T	η_{ETAC}	E_T
NaOH	0,326/0,571	0,130/0,228	–/–	–/–
LiNO ₃	0,310/0,542	0,124/0,217	–/–	–/–
MgCl ₂ (63)- 22,3NaCl-14KCl	0,263/0,461	0,105/0,184	0,246/0,431	0,098/0,172
LiF(20)–80LiOH	–/–	–/–	0,184/0,321	0,073/0,128
NaCl(50)–50MgCl ₂	–/–	–/–	0,266/0,465	0,106/0,186

Таблиця 3.4 – Таблиця показників якості утилізації ТАС патрульного катеру

Теплоакуюлюючий матеріал	Головний двигун		Допоміжний двигун	
	Кількість передпускових підготовок	Показник якості ТАС, $\eta_{ТАС}$	Кількість передпускових підготовок	Показник якості ТАС, $\eta_{ТАС}$
NaOH	6	0,073	–	–
LiNO ₃	6	0,055	–	–
MgCl ₂ (63)- 22,3NaCl-14KCl	6	0,140	4	0,170
LiF(20)–80LiOH	–	–	4	0,248
NaCl(50)–50MgCl ₂	–	–	4	0,180

Отримані результати дозволили визначити наступні залежності:

- використання потоків теплоти від теплофізичних властивостей теплоакуюлюючого матеріалу, а саме густини, температури плавлення та питомої теплоти фазового переходу;

- показників ефективності ТАС від характеристик джерел теплоти, а саме їхніх фізичних властивостей, масової витрати та температури;

- вплив режимів роботи КЕУ при економічному та повному передньому ході надводного корабля на показники використання, теплової ефективності та якості ТАС у різні пори року;

- вплив складу КЕУ надводних кораблів на показники ефективності ТАС.

Розподіл потенціалу теплоти для утилізації при роботі головних та допоміжних двигунів відповідає наступному порядку – відпрацьовані гази, охолоджувальна рідина та мастило. На підставі цього для розглянутих класів кораблів для КЕУ з ТАС визначені наступні раціональні теплоакуюлюючі матеріали:

- для головного двигуна патрульного катеру – NaOH та допоміжного двигуна – NaCl(50)–50MgCl₂;

- для головного двигуна ракетного катеру– LiNO₃ та допоміжного двигуна – NaNO₂;

- для головного двигуна корвету – $\text{NaCl}(7.8)\text{--}6.4\text{Na}_2\text{CO}_3\text{--}85.5\text{NaOH}$, а допоміжного двигуна – $\text{LiCl}(37)\text{--}63\text{LiOH}$;

- для головного двигуна фрегату – $\text{LiCl}(37)\text{--}63\text{LiOH}$;

Кількість теплоти, що споживається ТАС відносно теплоти, що вона утилізує від відпрацьованих газів КЕУ раціонально вибраним матеріалом для головного двигуна патрульного катеру дорівнює – $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,326$ та $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,571$ відповідно взимку та влітку, а допоміжного двигуна – $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,266$ та $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,465$. Використання теплоти мастила та охолоджувальної рідини для ТАС КЕУ виявилось не раціональним.

Для головного двигуна ракетного катера $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,613$ та $\eta_{\text{ЕТАС}} = 1,000$ відповідно взимку та влітку, а допоміжного двигуна – $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,383$ та $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,670$. Використання теплоти мастила та охолоджувальної рідини для ТАС КЕУ теж не є раціональним.

Для корвета та фрегата аналогічні показники взимку та влітку відповідно дорівнюють:

- для головних двигунів

$\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,861$ та $\eta_{\text{ЕТАС}} = 1,000$; $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,620$ та $\eta_{\text{ЕТАС}} = 1,000$;

- для допоміжних двигунів

$\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,324$ та $\eta_{\text{ЕТАС}} = 0,566$.

Так як показник теплової ефективності ТАС характеризує загальну економію палива енергетичної установки для ТАС в залежності від джерел акумульованої теплоти для головного двигуна патрульного катеру дорівнює $E_{\text{Т}} = 0,130$ та $E_{\text{Т}} = 0,228$ відповідно взимку та влітку, а допоміжного двигуна $E_{\text{Т}} = 0,106$ та $E_{\text{Т}} = 0,186$.

Для головного двигуна ракетного катера $E_{\text{Т}} = 0,233$ та $E_{\text{Т}} = 0,380$ відповідно взимку та влітку, а допоміжного двигуна – $E_{\text{Т}} = 0,146$ та $E_{\text{Т}} = 0,255$.

Для корвета та фрегата аналогічні показники взимку та влітку відповідно дорівнюють:

- для головних двигунів

$E_{\text{Т}} = 0,336$ та $E_{\text{Т}} = 0,390$; $E_{\text{Т}} = 0,235$ та $E_{\text{Т}} = 0,412$;

- для допоміжних двигунів

$$E_T = 0,126 \text{ та } E_T = 0,221;$$

Показник якості ТАС, що дорівнює відношенню утилізованої теплоти ТАС від джерел КЕУ до сумарної кількості теплових викидів КЕУ визначався в залежності від різної кількості передпускових підготовок. Кількість передпускових підготовок оцінювалися з урахуванням експлуатаційного циклу відповідного класу надводного корабля. Ці показники дорівнюють для головного та допоміжного двигунів: патрульного катеру $\eta_{ТАС} = 0,073$ та $0,180$; ракетного катеру $\eta_{ТАС} = 0,009$ та $0,046$; корвета $\eta_{ТАС} = 0,026$ та $0,033$; фрегата $\eta_{ТАС} = 0,016$.

Наведені результати для КЕУ з ТАС корвету та фрегату враховують не тільки утилізацію теплоти відпрацьованих газів, а також теплоту мастила та палива у циркуляційних цистернах.

3.3 Визначення умов ефективного використання теплоакumuлюючих систем в складі енергетичних установок надводних кораблів

У більшості досліджень умови роботи ТАС та процеси зарядки і розрядки теплоакumuляторів для передпускового прогріву двигуна і для аварійних джерел теплоти моделювалися у квазістаціонарних умовах, які характеризувалися сталістю температури та витрати теплоносія, теплота якого утилізувалася.

Умови роботи КЕУ характеризуються різними режимами двигунів у часі в експлуатаційному циклі, які носять ймовірнісний характер і залежать від завдань корабля і зовнішніх умов, що склалися. Визначення умов раціонального використання ТАС у складі КЕУ виконано з урахуванням теплофізичних властивостей ТАМ, параметрів зовнішнього середовища та трьох варіантів характеристик навантаження головних та допоміжних двигунів у часі – детермінованих, ймовірнісних та невизначених.

Детерміновані обставини не дають змоги правильно визначити умови, тривалість утилізації та використання акумульованої теплоти для передпускової підготовки двигуна та інших потреб корабля при різних послідовностях зміни

швидкостей руху. Більш того, при розгляді використання ТАС в складі КЕУ не враховуються конструктивні характеристики ТА у вигляді окремого елементу або вбудованого в існуючий елемент і, як це позначається, на опорі руху теплоносія, а через опір на економічність і масогабаритні показники всієї енергетичної установки.

Для визначення умови ефективного використання ТАС в складі енергетичної установки надводних кораблів з урахуванням детермінованих та ймовірнісних складових швидкостей його ходу в експлуатаційному циклі необхідно:

- 1) дослідити особливості представлення характеристик КЕУ з урахуванням її спектра навантажень для окремих етапів експлуатаційного циклу корабля;
- 2) обґрунтувати склад теплоакumuлюючої системи за джерелами енергії з урахуванням потреб;
- 3) визначити масогабаритні показники ТАС для їх розташування в машинному відділенні.

Особливості представлення характеристик КЕУ з урахуванням її спектра навантажень для окремих етапів експлуатаційного циклу корабля можна представити у вигляді множин швидкостей та часових інтервалів.

В залежності від способів задання цих множин характеристики КЕУ можуть бути представлені як детерміновані, ймовірнісні або невизначені. Для цих випадків необхідно розглянути умови ефективного використання ТАС у складі КЕУ, що залежать від властивостей представлення вихідних даних про спектр її навантаження. Здатність корабля рухатися із заданою швидкістю при ефективному використанні потужності КЕУ досягається за рахунок зв'язку гідродинамічних характеристик корпусу корабля і рушіїв з характеристиками КЕУ.

Гідродинамічні характеристики та буксирувальна потужність визначаються у процесі проектування на підставі модельних випробувань, а потім підтверджуються натурними пропульсивними випробуваннями кораблів у вигляді залежностей швидкості ходу і потужності на гребному валу від частоти його обертання в діапазоні від мінімальної до максимальної в залежності від структури КЕУ.

У зв'язку з цим математичне моделювання процесів утилізації теплоти робочих середовищ теплового двигуна для інтервалу часу Δt при її акумулюванні і використанні на корабельні потреби базується на системі наступних рівнянь:

- час процесу

$$\tau_i = \tau_{noch} + \sum_{i=1}^{i_{кин}} \Delta \tau_i \quad (3.1)$$

- швидкість ходу

$$w_i = w_i(n_i, w_{inoch}), \quad i = 1 \dots i_{кин}, \quad (3.2)$$

де n_i – число оборотів гвинта;

- потужність головного двигуна

$$N_{ГДи} = N_{ГДи}(n_i, N_{inoch}); \quad (3.3)$$

- температури джерел теплоти: відпрацьованих газів – T_{1i} , мастила – T_{2i} та охолоджувальної рідини – T_{3i} відповідно

$$T_{1i} = T_1(N_{ГДи}, T_{1noch}); \quad (3.4)$$

$$T_{2i} = T_2(N_{ГДи}, T_{2noch}); \quad (3.5)$$

$$T_{3i} = T_3(N_{ГДи}, T_{3noch}); \quad (3.6)$$

- потік утилізованої теплоти

$$Q_{yi} = Q_{y1i} + Q_{y2i} + Q_{y3i}; \quad (3.7)$$

- потік акумульованої теплоти

$$Q_{ai} = Q_{a1i} + Q_{a2i} + Q_{a3i}; \quad (3.8)$$

- маса теплоакумуючого матеріалу

$$M_{TAM} = M_{TAM} (Q_a), \quad (3.9)$$

$$\text{де } Q_a = \sum_{i=1}^n Q_{ai};$$

- об'єм теплоаккумулятора

$$V_{TA} = V_{TAM} (M_{TAM}); \quad (3.10)$$

- додатковий опір руху теплоносія джерела теплоти

$$\Delta P_{TA} = \Delta P_{TA} (Q_a); \quad (3.11)$$

У представлених виразах (3.1–3.6) сталі величини ($\tau_{\text{поч}}, w_{\text{поч}}, N_{\text{поч}}, T_{1\text{поч}}, T_{2\text{поч}}, T_{3\text{поч}}$) характеризують початкові умови однозначності.

При використанні ТАС в складі КЕУ розглянуті три джерела теплоти: відпрацьовані гази, охолоджувальна рідина та мастило.

Температури цих джерел визначаються режимом роботи двигунів, а процеси теплопередачі теплофізичними властивостями теплоносіїв та конструктивними показниками пристроїв.

Представлена математична модель (3.1–3.11) має наступні обмеження при визначенні ефективного ТАС у складі енергетичної установки:

- час зарядки теплоаккумулятора становить не більше часу від початку ходу до зупинки двигунів та початку дрейфу ($\tau_{\text{зар}} \leq \sum \tau_{\text{ход}j}, j=1 \dots j_{\text{кін}}, \text{ де } j_{\text{кін}} - \text{сукупність ходових режимів перед зупинкою}$);

- кількість акумульованої теплоти не менше об'єму його сумарного споживання при дрейфі на технічні та загальнокорабельні потреби $U_a \leq U_m + U_{\text{кп}}$;

- габаритні показники теплоаккумулятора не більше габаритів, відведених в машинному відділенні $L_{TA} \cdot B_{TA} \cdot H_{TA} \leq L_M \cdot B_M \cdot H_M$;

- додаткові енергетичні витрати на переміщення теплоносіїв не перевищують допустимих $\Delta P_{TA} \leq \Delta P_{\text{доп}}$;

- час нагріву мастила до заданої температури при запуску двигуна менше

часу передпускової підготовки двигуна $\tau_{nm} \leq \tau_{nn}$.

Якщо задати цільову функцію часу заряджання теплоаккумулятора τ_{zap} , як функцію двох параметрів управління y і зовнішніх умов x , то при завданні детермінованих вихідних даних швидкості руху корабля $w_i(\tau_i)$ в часі, при постійному значенні x , оптимізована цільова функція може бути записана як функція тільки параметра $\tau_{zap}(y)$ і за таких умов має єдиний розв'язок.

У разі, коли швидкість ходу корабля для даного етапу експлуатаційного циклу є ймовірнісною величиною при τ_j і може приймати різні значення $w_{1j}, w_{2j}, \dots w_{lj}$ з відповідними відомими ймовірностями появи цих значень $p_1, p_2, \dots p_l$, де їх сума дорівнює одиниці, математичне сподівання функціоналу мети $M\tau_{zap}$ можна визначити як його мінімальне значення

$$M\tau_{zap}(w_{onm}) = \min \sum_{j=1}^{j_{kin}} p_j \cdot \tau_{zapij}(x_j, w_{ionm}).$$

Випадки, коли значення ймовірностей зовнішніх умов невідомі для швидкості корабля, є невизначеними. Беручи до уваги те, що зовнішні умови є стихійними, математичне очікування функціоналу мети $M\tau_{zap}$ може бути визначено на основі теорії прийняття рішень за допомогою критерію вибору Гурвіца, оскільки він враховує як найбільш, так і найменш сприятливу ситуацію:

$$M\tau_{zap}(w_{onm}) = \min_i \left[\text{КПО} \cdot \max_j \tau_{zapij} + (1 - \text{КПО}) \cdot \min_j \tau_{zapij} \right],$$

де КПО – коефіцієнт «песимізму-оптимізму» Гурвіца, який показує з яким ваговим показником приймається в розрахунок найбільш несприятлива ситуація.

Формалізація експлуатаційного спектру для різних етапів експлуатаційного циклу корабля (рисунок 3.5) і відповідні оцінки спектру ходових режимів для різних етапів несення служби корабля як множини сукупностей швидкостей ходу та часових інтервалів в детермінованому, імовірнісному і невизначеному варіантах

представлені в таблиці 3.5. Чисельні значення яких відповідають класу катерів.

Час автономності τ_a визначається як сума часів окремих етапів циклу

$$\tau_a = \tau_1 + \tau_2 + \tau_{31} + \tau_{32} + \tau_{33} + \tau_{34} + \tau_4 + \tau_5,$$

де $\tau_1, \tau_2, \tau_{31}, \tau_{32}, \tau_{33}, \tau_{34}, \tau_4, \tau_5$ – відповідно час виходу з бази; переходу в район несення служби; патрулювання при різних швидкостях ходу – економічному, максимальному, дрейфі та швартовних операціях; повернення з району несення служби і захід до бази.

Таблиця 3.5 – Результати представлення оцінки спектру ходових режимів

Етап несення служби згідно експлуатаційного циклу корабля	Варіант представлення		
	Детермінований	Ймовірнісний	Невизначений
1. Вихід з бази	$\tau_1/\tau_a=0,003$ $v_1/v_m=0,273$ $N_1/N_n=0,031$	$0,002 \leq \tau_1/\tau_a \leq 0,005$ $0,1 \leq p_1 \leq 0,5$ $0,164 \leq v_1/v_m \leq 0,410$ $0,030 \leq N_1/N_n \leq 0,077$	$0,002 \leq \tau_1/\tau_a \leq 0,005$ $0,164 \leq v_1/v_m \leq 0,410$ $0,030 \leq N_1/N_n \leq 0,077$
2. Перехід у район несення служби	$\tau_2/\tau_a=0,028$ $v_2/v_m=0,682$ $N_2/N_n=0,295$	$0,025 \leq \tau_2/\tau_a \leq 0,030$ $0,2 \leq p_2 \leq 0,3$ $0,637 \leq v_2/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_2/N_n \leq 0,385$	$0,025 \leq \tau_2/\tau_a \leq 0,030$ $0,637 \leq v_2/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_2/N_n \leq 0,385$
3. Патрулювання в районі несення служби: 3.1	$\tau_{31}/\tau_a=0,283$ $v_{31}/v_m=0,682$ $N_{31}/N_n=0,295$	$0,025 \leq \tau_{31}/\tau_a \leq 0,030$ $0,2 \leq p_{31} \leq 0,3$ $0,637 \leq v_{31}/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_{31}/N_n \leq 0,385$	$0,025 \leq \tau_{31}/\tau_a \leq 0,030$ $0,637 \leq v_{31}/v_m \leq 0,764$ $0,277 \leq N_{31}/N_n \leq 0,385$

Продовження табл. 3.5

Етап несення експлуатаційний цикл корабля	Варіант представлення		
	Детермінований	Ймовірнісний	Невизначений
3.2	$\tau_{32}/\tau_a=0,033$	$0,030 \leq \tau_{32}/\tau_a \leq 0,035$	$0,030 \leq \tau_{32}/\tau_a \leq 0,035$
3.3	$v_{32}/v_M=1$	$0,2 \leq p_{32} \leq 0,3$	$0,95 \leq v_{32}/v_M \leq 1,05$
	$N_{32}/N_H=1$	$0,95 \leq v_{32}/v_M \leq 1,05$	$0,94 \leq N_{32}/N_H \leq 1,08$
		$0,94 \leq N_{32}/N_H \leq 1,08$	
	$\tau_{33}/\tau_a=0,617$	$0,600 \leq \tau_{33}/\tau_a \leq 0,620$	$0,600 \leq \tau_{33}/\tau_a \leq 0,620$
3.4		$0,2 \leq p_{33} \leq 0,3$	
	$v_{33}/v_M=0$	$v_{33}/v_M=0$	$v_{33}/v_M=0$
	$N_{33}/N_H=0$	$N_{33}/N_H=0$	$N_{33}/N_H=0$
3.4	$\tau_{34}/\tau_a=0,005$	$0,003 \leq \tau_{34}/\tau_a \leq 0,007$	$0,003 \leq \tau_{34}/\tau_a \leq 0,007$
		$0,2 \leq p_{34} \leq 0,3$	
	$v_{34}/v_M=0,046$	$0,033 \leq v_{34}/v_M \leq 0,077$	$0,033 \leq v_{34}/v_M \leq 0,077$
	$N_{34}/N_H=0,001$	$N_{34}/N_H \approx 0,001$	$N_{34}/N_H \approx 0,001$
4. Повернення з району несення служби	$\tau_4/\tau_a=0,028$	$0,025 \leq \tau_4/\tau_a \leq 0,030$	$0,025 \leq \tau_4/\tau_a \leq 0,030$
		$0,2 \leq p_4 \leq 0,3$	
	$v_4/v_M=0,682$	$0,637 \leq v_4/v_M \leq 0,764$	$0,637 \leq v_4/v_M \leq 0,764$
5. Захід до бази	$N_4/N_H=0,295$	$0,277 \leq N_4/N_H \leq 0,385$	$0,277 \leq N_4/N_H \leq 0,385$
5. Захід до бази	$\tau_5/\tau_a=0,003$	$0,002 \leq \tau_5/\tau_a \leq 0,005$	$0,002 \leq \tau_5/\tau_a \leq 0,005$
		$0,1 \leq p_5 \leq 0,5$	
	$v_5/v_M=0,273$	$0,164 \leq v_5/v_M \leq 0,410$	$0,164 \leq v_5/v_M \leq 0,410$
	$N_5/N_H=0,031$	$0,030 \leq N_5/N_H \leq 0,077$	$0,030 \leq N_5/N_H \leq 0,077$

За приведеними даними можливо оцінити час зарядки теплоаккумулятора в залежності від варіанту представлення результатів. Для детермінованого варіанту його відносне значення час становить не більше $0,347\tau_a$; для ймовірнісного та невизначеного відповідно $0,330\tau_a$ та $0,303\tau_a$ при коефіцієнті «песимізму-оптимізму» Гурвіца КПО = 0,3.

Оцінка очікуваного часу зарядки може бути виконана як середньозважене

значення на основі даних оптимістичного $\tau_o = 0,303\tau_a$, песимістичного $\tau_{\Pi} = 0,347\tau_a$ та найбільш ймовірного прогнозів зарядки $\tau_{HB} = 0,330\tau_a$ згідно виразу

$$\tau_{zap} = (\tau_o + 4 \cdot \tau_{HB} + \tau_{\Pi}) / 6 = 0,328 \cdot \tau_a.$$

Згідно з розподілом часу і потужності головного двигуна визначаються температури і витрати відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини і мастила по етапам несення експлуатаційний цикл для розрахунків утилізованої теплоти. Так для катеру з головним двигуном САТ С18 (650 кВт) температури і витрати відпрацьованих газів наведено в таблиці 3.6 [102].

Визначені кількості утилізованої та акумульованої теплоти від джерела до теплоакumuлюючого матеріалу при умові, що його початкова температура відповідала початковій температурі мастила на рівні 293...300 К.

При цьому використані рівняння теплового балансу та теплопередачі

$$\begin{aligned} Q_a(\tau) &= \eta_{вт} \cdot Q_y(\tau); \\ Q_y(\tau) &= c_{pm} \cdot G_m \cdot (T_{ноч} - T_{кін}); \\ Q_y(\tau) &= k_m \cdot F \cdot \Delta T, \end{aligned}$$

де $\eta_{вт}$ – коефіцієнт втрат теплоти, c_{pm} – питома теплоємність теплоносія, G_m – масова витрата теплоносія, $T_{ноч}$, $T_{кін}$ – вхідні та вихідні температури теплоносія, k_m – коефіцієнт теплопередачі, F – площа теплопередавальної поверхні, ΔT – середньо-логіфімічний перепад температур.

Для теплоакumuлюючого матеріалу натрію гідроксиду з температурою плавлення $T_{плав} = 596$ К результати розрахунків представлені в таблиці 3.7.

Кількість теплоти для передпускової підготовки двигуна $U_{нд}$, яке визначається нагріванням мастила, розраховувалося на підставі експериментальних даних працюючого двигуна [30], а побутове споживання $U_{ноб}$ згідно стандарту [110].

Обґрунтування складу ТАС за джерелами енергії з урахуванням потреб відповідають розрахункам для мастила і охолоджувальної води, які аналогічні виконаним вище для відпрацьованих газів та виконані при наступних температурах на виході з двигуна: мастила 352...357 К та води 360...365 К. Теплоакумуючим матеріалом прийнято барій гідроксид з температурою плавлення $T_{\text{плав}} = 351 \text{ К}$ і теплотою фазового переходу $301 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$.

Оскільки утилізована теплота від мастила менш 0,1%, відносно утилізованої теплоти від відпрацьованих газів, її не має сенсу використовувати. Для охолоджувальної води відносна теплота утилізації дорівнює 0,1...2% і можливість її використання потребує узгодження за додатковими умовами, що пов'язані з розташуванням в машинному відділенні корабля.

Визначення масогабаритних показників теплоакумуляторів при їх розташуванні в складі дизельної енергетичної установки катера зроблено згідно концепції поліпшення характеристик КЕУ за рахунок додаткових пристроїв з використання апробованих технічних рішень за новим призначенням.

Для цього глушник-утилізатор mft типу Н1 [111], схема якого показана на рисунку 3.10 доопрацьований для використання як шумоглушник-теплоакумулятор.

За результатами розробки визначаються геометричні розміри елементів ШГТА та маса ТАМ.

Отримані масогабаритні показники ШГТА забезпечують його використання в системі газовихлопу корабля, схема якої надана на рисунку 3.11.

Варіанти представлення показників КЕУ як песимістичний та оптимістичний з припущенням, що завдяки їх залежності від багатьох ймовірнісних умов, які мають нормальний закон розподілу, дають змогу оцінити значення середньоквадратичного відхилення та зробити інтервальну оцінку отриманих результатів. При такому законі розподілу і довірчої вірогідності – 0,998 різниця між максимальним і мінімальним значеннями показників дорівнює шістьом значенням середньоквадратичного відхилення.

Таблиця 3.6 – Показники температури T , К та масової витрати G , кг/с
відпрацьованих газів двигуна CAT C18

Етап несення служби	Варіант представлення		
	Песимістичний $\tau_{\Pi}=0,347\tau_a$	Оптимістичний $\tau_O=0,303\tau_a$	Очікуваний $\tau_{оч}=0,328\tau_a$
1. Вихід з бази	$T_{11}=565$ $G_{11}=0,099$	$565\leq T_{11}\leq 570$ $0,089\leq G_{11}\leq 0,099$	$565\leq T_{11}\leq 570$ $0,089\leq G_{11}\leq 0,099$
2. Перехід у район служби	$T_{12}=588$ $G_{12}=0,144$	$587\leq T_{12}\leq 612$ $0,144\leq G_{12}\leq 0,279$	$587\leq T_{12}\leq 612$ $0,144\leq G_{12}\leq 0,279$
3. Патрулювання з ходом:			
3.1 економічним	$T_{131}=588$ $G_{131}=0,144$	$587\leq T_{131}\leq 612$ $0,144\leq G_{131}\leq 0,279$	$587\leq T_{131}\leq 612$ $0,144\leq G_{131}\leq 0,279$
3.2 максимальним	$T_{132}=672$ $G_{132}=1,094$	$673\leq T_{132}\leq 681$ $1,094\leq G_{132}\leq 1,119$	$673\leq T_{132}\leq 681$ $1,094\leq G_{132}\leq 1,119$

Таблиця 3.7 – Оцінки кількості теплоти U , МДж

Етап несення експлуатаційний цикл корабля	Варіант представлення		
	Песимістичний $\tau_{\Pi}=0,347\tau_a$	Оптимістичний $\tau_O=0,303\tau_a$	Очікуваний $\tau_{оч}=0,328\tau_a$
1. Вихід з бази	$U_{y11}=27,8$ $U_{a11}=26,1$	$44,8\leq U_{y11}\leq 46,0$ $42,1\leq U_{a11}\leq 42,8$	$41,7\leq U_{y11}\leq 43,0$ $39,2\leq U_{a11}\leq 40,2$
2. Перехід у район несення служби	$U_{y12}=416$ $U_{a12}=392$	$414\leq U_{y12}\leq 484$ $389\leq U_{a12}\leq 450$	$415\leq U_{y12}\leq 455$ $391\leq U_{y12}\leq 423$
3. Патрулювання з ходом:			
3.1 економічним	$U_{y131}=4202$ $U_{a131}=3965$	$4227\leq U_{y131}\leq 4896$ $3973\leq U_{a131}\leq 4553$	$4217\leq U_{y131}\leq 4847$ $3969\leq U_{a131}\leq 4534$
3.2 максимальним	$U_{y132}=5008$ $U_{a132}=4792$	$4991\leq U_{y131}\leq 5019$ $4691\leq U_{a131}\leq 4809$	$4984\leq U_{y131}\leq 5006$ $4684\leq U_{a131}\leq 4799$
3.3 дрейф	$U_{nm}=214,2$ $U_{но}=23,7$	$U_{nm}=214,2$ $U_{но}=23,7$	$U_{nm}=214,2$ $U_{но}=23,7$

Тобто значення середньоквадратичного відхилення часу при якому можлива акумуляція теплоти оцінюється як $0,007\tau_a$ тому результати визначення часу, що отримані мають відносну похибку не більше 2%, що припустимо в цих випадках. Утилізація теплоти охолоджувальної рідини для побутових потреб доцільна при умовах патрулювання, коли тривалість економічного ходу корабля не менше $0,15\tau_a$.

Кількість акумульованої теплоти необхідної для передпускової підготовки двигуна можливо забезпечити тільки за рахунок теплоти відпрацьованих газів протягом часу не менше $0,03\tau_a$ при економічній швидкості руху. Ця кількість теплоти достатня тільки для одного запуску двигуна і відповідає умовам мінімальних масогабаритних показників ШГТА. В разі потреби подальшої повної акумуляції теплоти для передпускової підготовки двигуна повинні бути виконані наступні умови: час руху катера з максимальною швидкістю становить не менше $0,002\tau_a$ або з економічною не менше $0,03\tau_a$.

Визначені умови достатньо вірогідні при експлуатації катера.

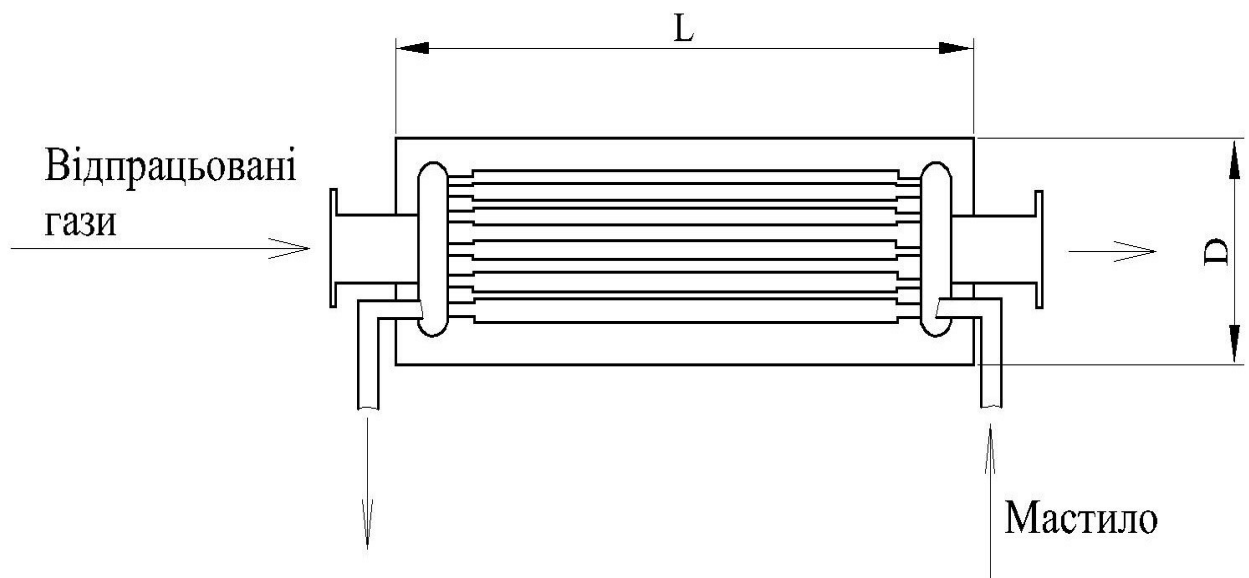


Рисунок 3.10 – Схема шумоглушника-теплоаккумулятора: L – довжина шумоглушника-теплоаккумулятора, D – зовнішній діаметр шумоглушника-теплоаккумулятора

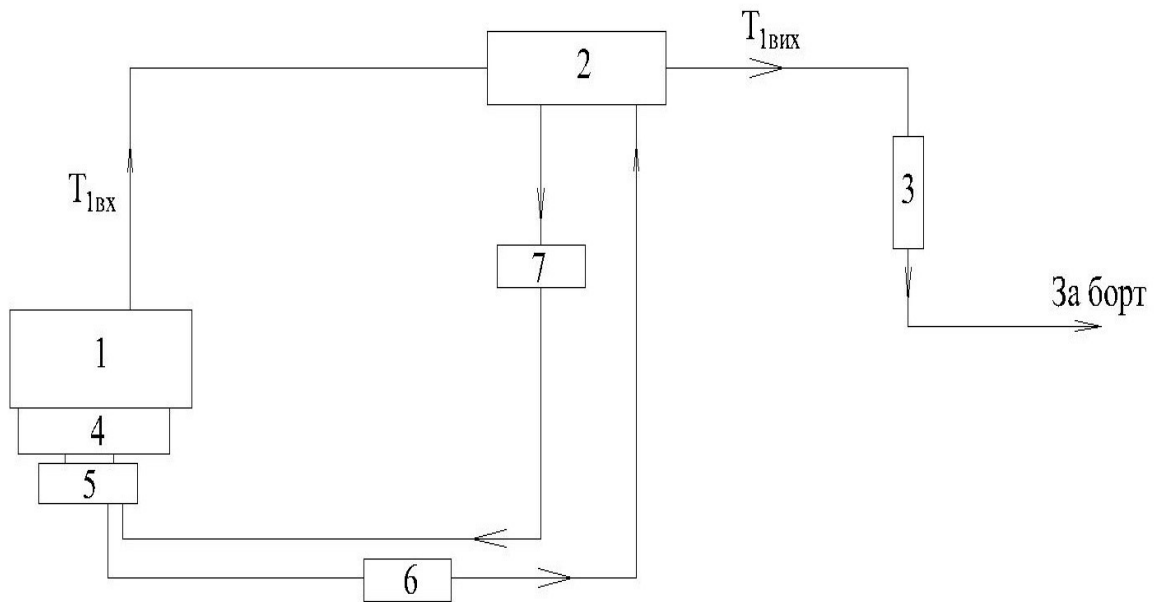


Рисунок 3.11 – Схема газоходу з теплоакумуючою системою від відпрацьованих газів: 1 – дизельний двигун; 2 – шумоглушник-теплоаккумулятор; 3 – пристрій впорскування води; 4 – картер двигуна, 5 – управляюча арматура 1; 6 – управляюча арматура 2; 7 – фільтр

3.4. Підвищення ефективності теплоакумуючих систем в складі енергетичних установок різних класів кораблів з урахуванням технічних обмежень

Ефективність використання ТАС в складі енергетичної установки надводних кораблів залежить від структури, масогабаритних показників і умов експлуатації. Структура та конструктивні показники такої системи визначаються при її проектуванні.

Можливість використання для одного класу корабля різних типів КЕУ з головними двигунами та допоміжними двигунами потребує обґрунтування вибору техніко-економічних показників ТАС з урахуванням оптимальних критеріїв якості та теплової ефективності. Тому визначення критеріїв оптимальності використання ТАС в складі КЕУ для різних класів кораблів на різних етапах розробки та

експлуатації є актуальним завданням.

Відсутність комплексного використання ресурсів скидної теплоти корабельної енергетичної установки, а також умов її експлуатації не дозволяють раціонально використовувати ТАС у складі КЕУ. Тому необхідне обґрунтування структури та масогабаритних показників ТАС в залежності від складу енергетичної установки для різних класів надводних кораблів на етапі їх модернізації або створення.

Визначення залежності ефективності використання ТАС у складі КЕУ від теплофізичних властивостей ТАМ, умов експлуатації кораблів та складу споживачів визначається наступними техніко-економічними показниками: часовим-енергетичним еквівалентом, показником ефективності використання ТАС, її показником якості та теплової ефективності [88].

Значення техніко-економічних показників для наступних класів кораблів: катерів, корветів та фрегатів відповідають довіднику [10].

Для цих класів кораблів розглянуті наступні КЕУ [9, 10]:

- для катерів: дизельна установка, газотурбінна установка та комбінована дизельно-газотурбінна установка – CODAG;

- для корветів: ДУ, комбінована дизельно-газотурбінна установка – CODOG, комбінована газо-газотурбінна установка COGAG та CODAG;

- для фрегатів: ДУ, CODOG, COGAG, CODAG та комбінована дизель-дизельна установка – CODAD.

Склад та характеристики цих КЕУ наведені у таблиці 3.8. Структура та характеристики ТАС для КЕУ наведених у таблиці 3.8 приведені у таблиці 3.9.

Формалізація експлуатаційних циклів кораблів дозволяє визначити відповідні оцінки спектру ходових режимів для різних етапів несення служби. Такі оцінки можуть бути представлені як множини сукупностей швидкостей ходу

Таблиця 3.8 – Склад та характеристики КЕУ для розглянутих класів кораблів

Клас корабля	Типи пропульсивних установок	Розподіл типів пропульсивних установок	Модель двигунів	Номінальна потужність, кВт	Запропонований тип ТАС
Патрульний катер	ДУ	89,6%	ГД – MTU 10V2000M93	1120	Проста
			ГД – MTU 20V4000M93	3900	
			ДГ – CAT C6.6 АДГ – CAT C2.2	130 25,2	
			ГД – Paxman Valenta 16-CM ДГ – Caterpillar 3304T	3940 99	
Ракетний катер	CODAG	4%	ГД – MTU 16V4000M93 ГТД – ДС77 ДГ – CAT C7.1	3120 8820 200	Проста
	COGAG	1%	ГТД – ДС76 ГТД – ДС77	3360 8800	
Корвет	CODOG	14%	ГД – CAT C280-12 ГТД – ДК91 ДГ – CAT C32	4060 21000 688	Гібридна
	CODAG	3%	ГТД – GE LM250 ГД – MTU 16V595TE90	23000 4320	
	CODOG	14%	ГТД - GTE TF50A ГД – MTU 16V 4000 N90	16000 2600	
	CODOG	27%	ГД – CAT C280-16 ГТД – ДМ94	4100 20000	
Фрегат	COGAG	27%	ГТД – M62 ГТД – M8K ДГ – ДГАС-500/1МШ	4410 12500 500	Гібридна
	CODAD	0,5%	MTU 800020VM70 CAT3512 CAT3508	8200 1360 920	

Таблиця 3.9 – Структура та характеристики ТАС

Клас корабля	Тип ТАС	Варіанти джерел скинної теплоти	Тепло-технічні параметри джерел теплоти				Теплоакумулюючий матеріал		Конструктивне виконання елементів ТАС	Склад споживачів	
			Температура, °С		Масова витрата, кг/с		ГД	ДГ			
			ГД	ДГ	ГД	ДГ					
Патрульний катер	Проста	Відпрацьовані гази	400 – 440	500 – 520	0,50 – 1,09	0,007	NaOH LiNO ₃ MgCl ₂ (63)- 22,3NaCl-14KCl	NaCl(50)– 50MgCl ₂ MgCl ₂ (63)- 22,3NaCl- 14KCl	Глушник-теплоакумулятор	ГД та ДГ (передпускова підготовка); потреби екіпажу (обігрів кают у зимовий час)	
			480 – 570	424 – 450	3,40 – 5,25	0,07 – 0,26	NaOH LiNO ₃ MgCl ₂ (63)- 22,3NaCl-14KCl LiCl(37)–63LiOH	LiCl(37)– 63LiOH NaNO ₂ MgCl ₂ (63)- 22,3NaCl- 14KCl			
Корвет	Гібридна	Відпрацьовані гази, паливо	375 – 490	340 – 360	2,02 – 7,67	1,115	NaOH NaCl(7.8)– 6.4Na ₂ CO ₃ – 85.5NaOH LiCl(37)–63LiOH	NaOH LiNO ₃ LiCl(37)– 63LiOH	Глушник-теплоакумулятор,циркуляційна цистерна мастила або палива	ГД та ДГ (передпускова підготовка); потреби екіпажу (обігрів кают у зимовий час); підігрів води для прийняття душу або миття посуду	
		Відпрацьовані гази, мастило	75 – 85	75 – 85	0,244	–					
		Відпрацьовані гази, паливо та мастило	420 – 490	320 – 350	2,00 – 7,65	1,115					2,02 – 7,67 0,244
			80 – 90	80 – 92	0,244	–					
Фрегат		Відпрацьовані гази, паливо	375 – 490	320 – 350	2,00 – 8,00	2,02 – 7,67 0,244	NaOH LiNO ₃ LiCl(37)–63LiOH	–	Глушник-теплоакумулятор, циркуляційна цистерна мастила або палива	ГД та ДГ (передпускова підготовка); потреби екіпажу (обігрів кают у зимовий час); підігрів води для прийняття душу або миття посуду	
		Відпрацьовані гази, паливо	380 – 540	–	8,1 – 13,6 0,788	–					

та часових інтервалів для різних експлуатаційних циклів. Показники експлуатаційних циклів для патрульних та ракетних катерів представлені у таблиці 3.10, а для корветів та фрегатів – у таблиці 3.11.

В результаті математичного моделювання на підставі наданих вихідних даних отримано наступні показники ТАС – ефективності використання, теплової ефективності та якості в різних порах року.

Як приклад ці показники для ракетного катеру приведені в таблицях 3.12 та 3.13.

Визначення впливу складу енергетичної установки надводних кораблів на показники ефективності ТАС з урахуванням конструктивних та експлуатаційних обмежень здійснено за наступними показниками. Конструктивними – допустима втрата тиску у системі, параметри ШГТА та характеристики ТАМ, масо-габаритні характеристики складових ТАС та експлуатаційними – температури, масові витрати та теплофізичні властивості джерел скидної теплоти, періоди часу процесів експлуатаційного циклу корабля.

Оскільки локальні умови ефективного використання ТАС в складі енергетичної установки надводних кораблів з урахуванням експлуатаційних показників відповідають невизначеності, то знаходження сукупних оптимальних умов їх ефективного використання базується на правилах вибору екстремального значення показників в цих умовах згідно теорії прийняття рішень за відповідними критеріями. Для вирішення поставленого завдання використанні критерії Вальда та Лапласа.

Критерій максоміних витрат – критерій Вальда ґрунтується на наступних припущеннях. Оскільки не відомо, яке значення параметра зовнішніх умов, які залежать від експлуатаційних факторів, буде реалізовано, з обережності необхідно орієнтуватися на найбільш несприятливий випадок, що відповідає мінімуму значення цільової функції. Значення цільової функції відповідає одному із значень часового-енергетичного еквіваленту, показника ефективності використання ТАС, її показника якості та теплової ефективності.

Таблиця 3.10 – Показники експлуатаційних циклів катерів

Клас корабля	Етапи експлуатаційного циклу корабля	Варіанти циклу		
		I	II	III
Патрульний катер	Час виходу з бази, год	1	1	1
	Час переходу до місця служби, год	1	1	1
	Загальний час руху з економічним ходом при патрулюванні, год	3,75	5	3,0
	Загальний час руху з максимальним ходом при патрулюванні, год	38,0	40	38,5
	Загальний час у дрейфі при патрулюванні, год	8,0	12	9,00
	Швартовні операції, год	0,68	0,55	0,70
	Час переходу з місця служби, год	0,50	1,0	0,5
	Час входу на базу, год	3,75	5	3,0
Ракетний катер	Час виходу з бази, год	0,67	0,80	—
	Час переходу до місця служби, год	6,67	6,85	—
	Загальний час руху з економічним ходом при патрулюванні, год	67,95	71,00	—
	Загальний час руху з максимальним ходом при патрулюванні, год	8,00	12,25	—
	Загальний час у дрейфі при патрулюванні, год	148,0	140,0	—
	Швартовні операції, год	1,37	1,45	—
	Час переходу з місця служби, год	6,67	6,85	—
	Час входу на базу, год	0,67	0,80	—

Таблиця 3.11 – Показники експлуатаційних циклів корветів та фрегатів

Клас корабля	Етапи експлуатаційного циклу корабля	Варіанти циклу		
		I	II	III
Корвет	Час виходу з бази, год	4,0	3,0	1,5
	Час переходу до місця служби, год	15,0	8,5	3,0
	Загальний час руху з економічним ходом при патрулюванні, год	147,35	135,0	75,0
	Загальний час руху з максимальним ходом при патрулюванні, год	40,0	35,0	33,0
	Загальний час у дрейфі при патрулюванні, год	40,0	45,5	35,0
	Швартовні операції, год	1,65	1,5	1,0
	Час переходу з місця служби, год	15,0	8,5	3,0
	Час входу на базу, год	4,0	3,0	1,5
Фрегат	Час виходу з бази, год	4,0	5	3
	Час переходу до місця служби, год	10,7	12	10
	Загальний час руху з економічним ходом при патрулюванні, год	141,5	460	430
	Загальний час руху з максимальним ходом при патрулюванні, год	37,45	154	154
	Загальний час у дрейфі при патрулюванні, год	60	70	60
	Швартовні операції, год	1,65	2	2
	Час переходу з місця служби, год	10,7	12	10
	Час входу на базу, год	4,0	5	3

Таблиця 3.12 – Таблиця показників ефективності використання ТАС ракетного катеру

Теплоакуючий матеріал	Головний двигун		Допоміжний двигун	
	Показник ефективності використання ТАС влітку/взимку	Показник ефективності ТАС влітку/взимку	Показник ефективності використання ТАС влітку/взимку	Показник теплової ефективності ТАС влітку/взимку
LiNO ₃	0,613/1,000	0,233/0,380	–/–	–/–
MgCl ₂ (63)-22,3NaCl-14KCl	0,521/0,911	0,198/0,346	0,253/0,442	0,096/0,168
LiCl(37)–63LiOH	0,401/0,701	0,152/0,266	0,349/0,610	0,133/0,232
NaNO ₂	–/–	–/–	0,383/0,670	0,146/0,255

Таблиця 3.13 – Таблиця показників якості утилізації ТАС ракетного катеру

Теплоакуючий матеріал	Головний двигун		Допоміжний двигун	
	Кількість передпускових підготовок	Показник якості ТАС, $\eta_{ТАС}$	Кількість передпускових підготовок	Показник якості ТАС, $\eta_{ТАС}$
LiNO ₃	8	0,009	–	–
MgCl ₂ (63)-22,3NaCl-14KCl	8	0,023	3	0,337
LiCl(37)–63LiOH	8	0,015	3	0,047
NaNO ₂	–	–	3	0,046

У такий спосіб визначається значення цільової функції, зменшення якої при виборі різних варіантів буде неможливим.

Тоді критерій оптимальності приймається як максимальне з усіх отриманих значень цільової функції тобто її $\max$ значення. Останнє є твердженням того, що такий результат є гарантованим у будь-якій найнесприятливішій ситуації і якщо його значення трактувати одним з вищенаведених показників умов ефективного використання ТАС, то таке значення відповідає вибору відповідної стратегії, яке заздалегідь не буде знижено, а за сприятливого збігу обставин може виявитися і вищим. Такої гарантії не може дати жодна інша стратегія.

Критерій максіміну має той недолік, що він зорієнтований на врахування лише найнесприятливішої ситуації. Такий критерій має безумовну перевагу, якщо вибір стратегії доводиться робити в най несприятливих умовах.

Однак у завданнях визначення сукупних умов ефективного використання ТАС в складі енергетичної установки надводних кораблів з урахуванням експлуатаційних обмежень, їх значення є результатом недостатнього знання закономірностей відповідної діяльності. У зв'язку з цим логічно під час вибору стратегії враховувати не тільки найбільш несприятливі умови, а й будь-які інші.

Оскільки немає підстав віддати перевагу будь-якій конкретній з умов експлуатації, логічно вважати їх рівномірними. Тоді можна застосувати підхід, що відповідає розрахунку середнього значення функціоналу мети. Для цього критерію, що має назву «критерій недостатньої підстави» або критерій Лапласа необхідно приймати мінімальне з розрахованих значень.

Застосування критеріїв максіміна і недостатньої підстави наведено в таблиці 3.14, як приклад для показника часового-енергетичного еквіваленту, де X_j , $j = 1 \dots n$ – це значення перспективного місячного навантаження КЕУ, Y_i , $i = 1 \dots m$ – це варіанти рішень щодо введення ТАС з відповідними ТАМ, а $ЧЕЕ_{ij}$ – значення часового-енергетичного еквіваленту, показника ефективності використання ТАС.

Як приклад ці показники для патрульного катеру приведені в таблицях 3.15 та 3.16.

Оптимальне вирішення завдання – це вибір такого варіанта введення ТАС,

якому відповідає максимум очікуваного приросту теплоти в ТАС та дорівнює різниці між утилізованою теплотою витрат на транспортування теплоносіїв з відрахуванням енергії від зовнішніх джерел.

Розробка рекомендацій щодо впровадження ТАС у склад КЕУ за умови ефективного використання для відповідного складу енергетичної установки та класу надводного корабля ґрунтується на значеннях показників скорочення витрати палива.

3.5. Висновки за розділом 3

1. Обґрунтовано вибір ТАМ за наступними теплофізичними показниками: температурою плавлення, питомою масовою теплоємністю, питомою теплотою фазового переходу, густиною та коефіцієнтом теплопровідності визначений методом системного аналізу оптимізації багатокритеріальної задачі при заданих технічних обмеженнях конструктивного та експлуатаційного характеру для об'єктно-орієнтованої структури математичної моделі ТАС вибору ТАМ шляхом зведення до одного інтегрального критерію.

2. Отримані оцінки ефективності утилізації скидної теплоти ТАС у складі КЕУ з урахуванням її структури, експлуатаційного циклу корабля, джерел утилізованої теплоти, конструкції теплоаккумулятора, ТАМ та складу споживачів за наступними показниками використання, теплової ефективності та якості утилізації числові значення яких наступні:

- патрульний катер з теплоакумуючим матеріалом NaOH $\eta_{\text{ETAC}} = 0,326$ та $\eta_{\text{ETAC}} = 0,571$, $E_T = 0,130$ та $E_T = 0,228$; $\text{NaCl}(50)\text{--}50\text{MgCl}_2$ $\eta_{\text{ETAC}} = 0,266$ та $\eta_{\text{ETAC}} = 0,465$, $E_T = 0,106$ та $E_T = 0,186$, $\eta_{\text{TAC}} = 0,073$ та $0,180$;

- ракетний катер з теплоакумуючим матеріалом LiNO_3 $\eta_{\text{ETAC}} = 0,613$ та $\eta_{\text{ETAC}} = 1,000$, $E_T = 0,233$ та $E_T = 0,380$; з NaNO_2 $\eta_{\text{ETAC}} = 0,383$ та $\eta_{\text{ETAC}} = 0,670$, $E_T = 0,146$ та $E_T = 0,255$, $\eta_{\text{TAC}} = 0,009$ та $0,046$.

Таблиця 3.14 – Таблиця формування критеріїв максіміна та недостатньої підстави для показника часового-енергетичного еквіваленту

Y	X_1	X_2	...	X_j	...	X_n	$\min ЧЕЕ_l$	$\text{mid } ЧЕЕ$
Y_1	$ЧЕЕ_{11}$	$ЧЕЕ_{12}$	...	$ЧЕЕ_{1j}$	...	$ЧЕЕ_{1n}$	$\min_j ЧЕЕ_{1j}$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ЧЕЕ_{1j}$
Y_2	$ЧЕЕ_{21}$	$ЧЕЕ_{22}$	...	$ЧЕЕ_{2j}$	...	$ЧЕЕ_{2n}$	$\min_j ЧЕЕ_{2j}$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ЧЕЕ_{2j}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
Y_i	$ЧЕЕ_{i1}$	$ЧЕЕ_{i2}$	...	$ЧЕЕ_{ij}$	...	$ЧЕЕ_{in}$	$\min_j ЧЕЕ_{ij}$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ЧЕЕ_{ij}$
...	...	...	...	...	...	...	...	...
Y_m	$ЧЕЕ_{m1}$	$ЧЕЕ_{m2}$	...	$ЧЕЕ_{mj}$	...	$ЧЕЕ_{mn}$	$\min_j ЧЕЕ_{mj}$	$\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ЧЕЕ_{mj}$
Критерій оптимальності							$\max_i \min_j ЧЕЕ_{ij}$	$\max_i (\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n ЧЕЕ_{ij})$

Таблиця 3.15 – Результати знаходження сукупних оптимальних умов ефективного використання ТАС за показником часового-енергетичного еквіваленту для патрульного катеру варіант 1 – джерело відпрацьовані газу

Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	$\min ЧЕЕ$	$\text{mid } ЧЕЕ$
Y_1	3,5	4,7	7,1	9,4	11,8	14,2	16,5	18,9	22,4	18,9	9,4	7,1	3,5	11,8
Y_2	3,5	8,7	10,4	13,9	17,4	20,9	24,4	27,8	29,6	27,8	13,9	10,4	3,5	17,4
Y_3	2,0	2,7	4,1	5,4	6,8	8,2	9,5	10,9	11,6	10,9	5,4	4,1	2,0	6,8
Y_4	3,3	8,3	10,0	13,3	16,6	19,9	23,2	26,6	28,2	26,6	13,3	10,0	3,3	16,6
Критерій оптимальності													3,5	17,4

Таблиця 3.16 – Результати знаходження сукупних оптимальних умов ефективного використання ТАС за показником часового-енергетичного еквіваленту для патрульного катеру варіант 2 – джерело відпрацьовані газу та охолоджувальна рідина

Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	$\min ЧЕЕ$	$\text{mid } ЧЕЕ$
Y_1	11,1	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	11,1	27,7
Y_2	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	10,0	33,3
Y_3	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	22,7	9,1	22,7
Y_4	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	4,7	15,6
Критерій оптимальності													11,1	17,4

- корвет з теплоакумуючим матеріалом $\text{NaCl}(7.8)\text{--}6.4\text{Na}_2\text{CO}_3\text{--}85.5\text{NaOH}$
 $\eta_{\text{ETAC}} = 0,861$ та $\eta_{\text{ETAC}} = 1,000$, $E_{\text{T}} = 0,336$ та $E_{\text{T}} = 0,390$; з $\text{LiCl}(37)\text{--}63\text{LiOH}$
 $\eta_{\text{ETAC}} = 0,324$ та $\eta_{\text{ETAC}} = 0,566$, $E_{\text{T}} = 0,126$ та $E_{\text{T}} = 0,221$, $\eta_{\text{TAC}} = 0,026$ та $0,033$;

- фрегат з теплоакумуючим матеріалом LiNO_3 $\eta_{\text{ETAC}} = 0,620$ та
 $\eta_{\text{ETAC}} = 1,000$, $E_{\text{T}} = 0,235$ та $E_{\text{T}} = 0,412$, $\eta_{\text{TAC}} = 0,014$.

3. Визначені умови ефективного використання теплоакумуючих систем в складі енергетичної установки надводних кораблів, які характеризуються різними режимами двигунів в експлуатаційному циклі та носять ймовірнісний характер і залежать від завдань корабля та стану зовнішньої середовища для детермінованого, ймовірнісного та невизначеного варіантів характеристик навантаження головних та допоміжних двигунів у часі та відповідних їм температур та витрат відпрацьованих газів, а також кількості утилізованої та акумульованої теплоти в дані проміжки часу.

4. Визначена ефективність теплоакумуючих систем в складі енергетичних установок різних класів кораблів з урахуванням технічних обмежень за наступними показниками: конструктивними – допустима втрата тиску у системі, параметри глушника-теплоаккумулятора та характеристики теплоакумуючого матеріалу, масо-габаритні характеристики складових ТАС та експлуатаційними – температури, масові витрати та теплофізичні властивості джерел скидної теплоти, періоди часу процесів експлуатаційного циклу корабля за значеннями показників – часового-енергетичного еквіваленту, показника ефективності використання ТАС, її показника якості та теплової ефективності в різних порах року з використанням критеріїв Вальда та Лапласа.

5. Отримано базу вихідних даних для розробки схемних рішень утилізації скидної теплоти теплоакумуючими системами з фазовим переходом та її використання на надводних кораблях у складі корабельної енергетичної установки.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [86, 88].

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МОДЕЛІ ШУМОГЛУШНИКА-ТЕПЛОАКУМУЛЯТОРА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ

4.1. Результати експериментальних досліджень дизельного двигуна з моделлю шумоглушника-теплоаккумулятора

Особливість випробувань характеризується проведенням досліджень в умовах реальної експлуатації ТАС, починаючи від запуску двигуна і його прогріву, виходу на експлуатаційний режим і роботи при квазістабілізованих 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 $280 - 285^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4.1).

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°C значення потоку теплових втрат бути на рівні близько 400 Вт/м^2 , що досягається прошарком теплової ізоляції товщиною 50 мм з матеріалу Rockwool SeaRox WM 640.

Результати порівняння експериментальних і розрахункових температур ТАМ дослідного зразка ШГТА наведено на рисунку 4.2.

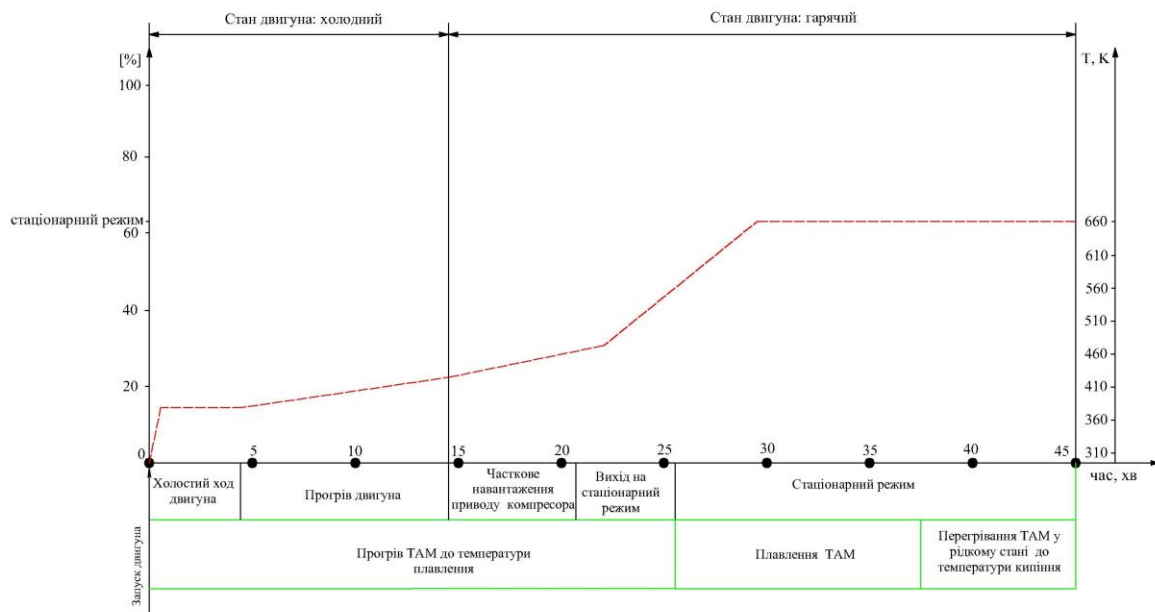


Рисунок 4.1 – Визначення ділянок часу процесу у загальному процесі дослідження ШГТА

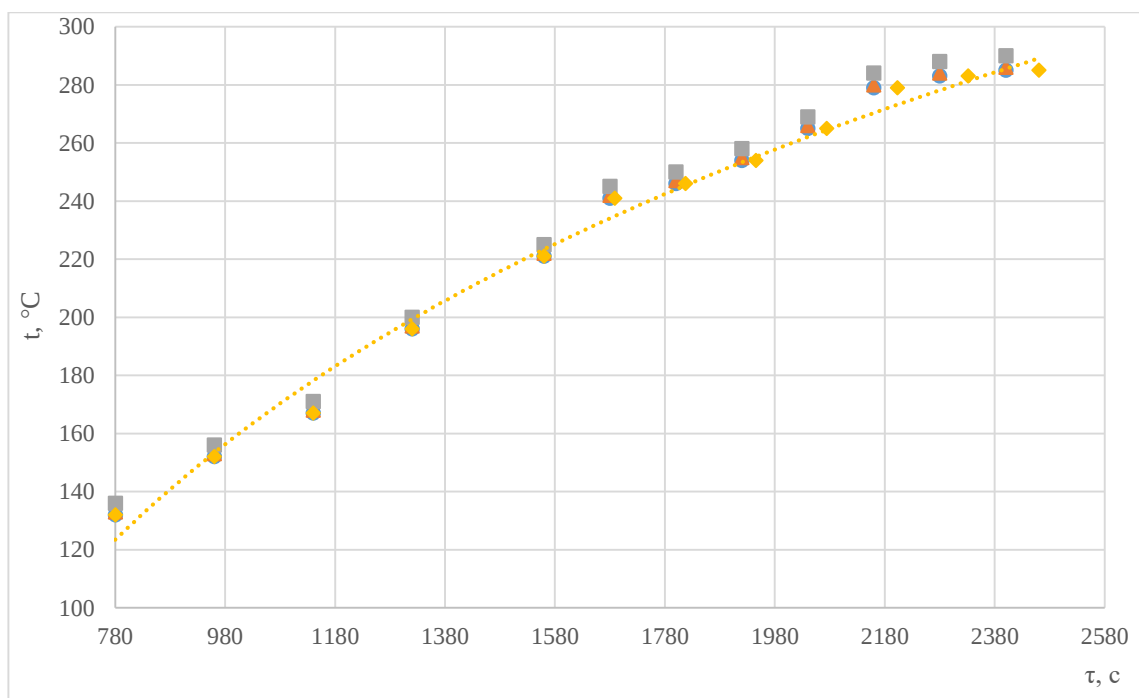


Рисунок 4.2 – Результати порівняння експериментальних і розрахункових температур ТАМ дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора:

●, ▲, ■ – експериментальні, ◆ – розрахункові

Перевірка за балансом теплоти визначалась відповідністю теплового потоку на вході сумі теплових потоків до ТАМ і втрат з поверхні. Відносна похибка розрахована за виразом (2.10).

Баланси теплоти для трьох ділянок випробувань процесів підведення теплоти в капсулі з ТАМ представлені у таблиці 4.1, а відповідні значення показників ефективності ТАС у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – 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	13,12	12,72	9,80
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 4.2 – Показники ефективності моделі ТАС на ділянках підводу теплоти при станах твердому, фазовому переході та рідкому

Стан ТАМ	твердий			фазовий перехід		рідкий
Час, с	780	960	1140	1320	1560	2160
$\eta_{\text{ТАС}}$	0,323	0,350	0,374	0,223	0,197	0,450
E_{T}	0,136	0,147	0,157	0,094	0,083	0,189

Отримані значення відносної похибки балансу складали 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 [112].

Результати обробки експериментально визначених температур ТАМ дослідного зразка шумоглушника-теплоаккумулятора наведено на рисунку 4.3.

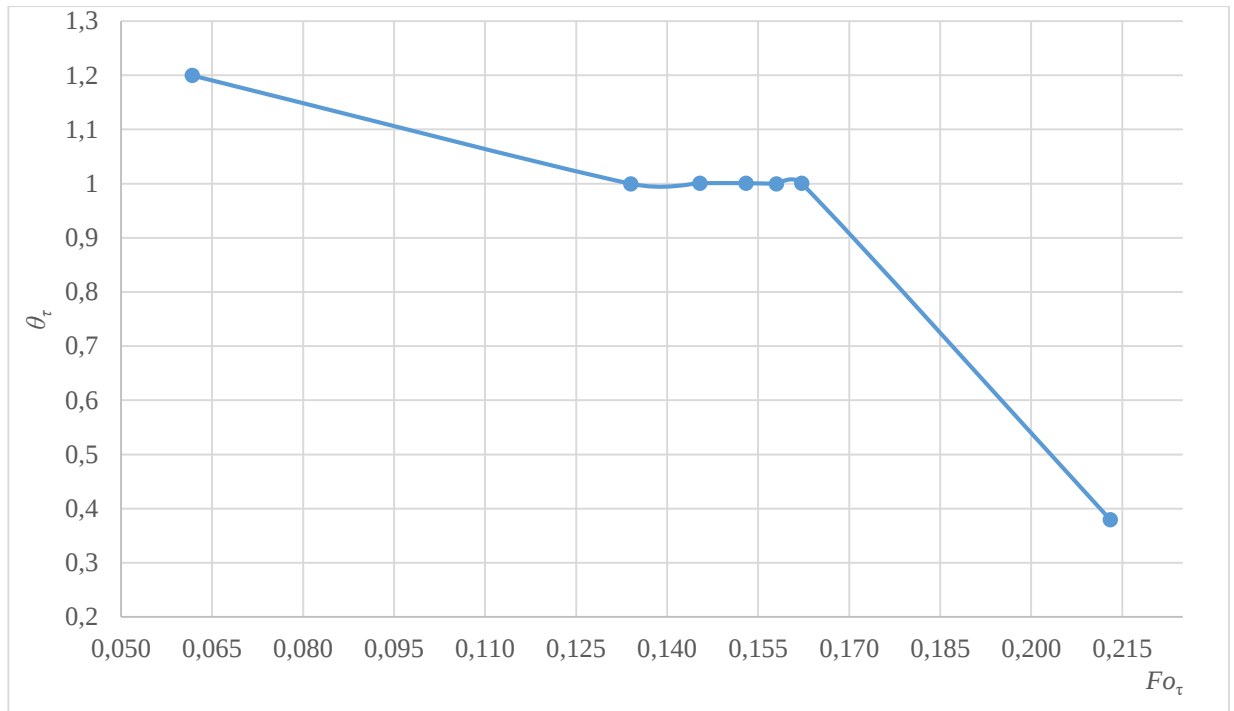


Рисунок 4.3 – Узагальнені результати обробки експериментально визначених температур ТАМ дослідного зразка ШГТА

На рисунку використані наступні позначення $\theta_\tau = \frac{T_\varepsilon - T(\tau)}{T_\varepsilon - T_{nl}} = f(R, Bi, Fo)$;

$$R_{\text{вим}} = \frac{r_{\text{вим}}}{r_0}; \quad Bi = \frac{\alpha \cdot r_0}{\lambda}; \quad Fo = \frac{a \cdot \tau}{r_0^2}; \quad r_{\text{вим}} - \text{радіальна координата розташування}$$

термопар; a – коефіцієнт температуропровідності ТАМ.

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

4.2. Оцінка зниження рівня шуму суднових двигунів при використанні шумоглушника-теплоаккумулятора

Результати випробування експериментальної моделі ТАС з ШГТА підтвердили її відповідність Правилам класифікації та побудови морських суден Регістру судноплавства України за розділом 11 Газовипускна система. Для оцінки зниження рівня шуму суднових двигунів при використанні ШГТА відповідно ДСТУ 2867-94 «Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги» виконані розрахунки сумарного зниження рівня шуму, яке визначалося за рахунок розширення потоку відпрацьованих газів та зниження його температури за рахунок теплообміну. Ці величини ослаблення шуму визначені для третьоктавних полос зі стандартизованими значеннями середньгеометричних частот: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц.

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

$$\Delta L_{\text{гл}} = 10 \cdot \lg \left[1 + 0,25 \cdot \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \bar{f} \right) \right],$$

де $m = \frac{S_{\text{к}}}{S_{\text{тр}}}$ – коефіцієнт розширення, що характеризує відношення площі прохідного перерізу розширювальної камери $S_{\text{к}}$ до площі перерізу трубопроводу газовипускної системи $S_{\text{тр}}$; $\bar{f} = \frac{f}{f_m}$ – безрозмірна частота, яка являє собою відношення середньгеометричних частот третьоктавних полос f до характеристичної частоти глушника $f_m = \frac{c}{4l_{\text{к}}}$; $c = \sqrt{kRT}$ – 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 визначається як

$$T_1 = T_2 - \Delta T,$$

де T_2 – температура газів після двигуна, К; ΔT – значення охолодження газів у випускному тракті, в залежності від довжини випускного тракту, К.

Використання запропонованої конструкції ШГТА без інтенсифікаторів теплопередачі дозволяє одночасно з акумуляцією теплоти для загальносуднових потреби знизити рівень акустичного тиску. Результати оцінки зміни акустичного тиску при використанні моделі ШГТА представлені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати розрахунку ослаблення шуму для третьоктавних полос

Ослаблення звукового тиску, дБ	Середньгеометричні частоти октавних ділянок f , Гц							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
ΔL	1,23	0,91	1,41	0,21	0,70	1,44	0,04	0,32
$L_{\text{доп}}$	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

Отримані результати свідчать, що завдяки використанню ТАС можливе додаткове зниження рівня акустичного тиску.

4.3. Погодження результатів математичного і фізичного моделювання для різних теплоакумуючих матеріалів

Відповідність результатів фізичного і математичного моделювання процесів фазового переходу в експериментальному зразку ШГТА дає підставу за положеннями теорії подібності отримати наступний вираз для співвідношення часів зарядки при конструктивних та експлуатаційних обмеженнях експериментального зразка

$$\begin{aligned}
\frac{\tau_{ШГТА1}}{\tau_{ШГТАзраз}} &= \frac{\frac{r_1 \rho_1 V}{\alpha (T_{1нагр} - T_{1ТАМ}) F}}{\frac{r_{зраз} \rho_{зраз} V}{\alpha (T_{зразнагр} - T_{обрТАМ}) F}} \cdot \left[\left[\frac{c_{птв} (T_{нл} - T_0)}{r} + 1 + \frac{c_{ппід} (T_{\kappa} - T_{нл})}{r} \right] \right] = \\
&= \frac{r_1 \rho_1}{r_{зраз} \rho_{зраз}} \frac{(T_{зразнагр} - T_{обр})}{(T_{1нагр} - T_{1ТАМ})} \cdot \left[\left[\frac{c_{птв} (T_{нл} - T_0)}{r} + 1 + \frac{c_{ппід} (T_{\kappa} - T_{нл})}{r} \right] \right] = \\
&= \frac{K_{1ТАМ}}{K_{зразТАМ}} \frac{\left(\frac{T_{зразнагр} - T_{зраз}}{T_{обрнаг}} \right)}{\left(\frac{T_{1нагр} - T_{1ТАМ}}{T_{1нагр}} \right)} \left[\left[\frac{c_{птв} (T_{нл} - T_0)}{r} + 1 + \frac{c_{ппід} (T_{\kappa} - T_{нл})}{r} \right] \right]
\end{aligned}$$

де $\tau = \frac{U}{qF}$ – час процесу;

$$\begin{aligned}
U &= \left[c_{птв} (T_{нл} - T_0) + r + c_{ппід} (T_{\kappa} - T_{нл}) \right] \cdot c_{птв} (T_{нл} - T_0) \rho V = \\
&= r \left[\frac{c_{птв} (T_{нл} - T_0)}{r} + 1 + \frac{c_{ппід} (T_{\kappa} - T_{нл})}{r} \right] \rho V \quad \text{– кількість} \\
&\quad \text{теплоти;}
\end{aligned}$$

$$q = \alpha \cdot \Delta t = \alpha \cdot (t_{нагр} - t_{ТАМноч}) \text{ – потік теплоти;}$$

$$V, F, \alpha, T_{1ТАМ}, T_{обр} - const, T_{нагр} = T_{нл} + \Delta T.$$

Умова порівняння відповідає наступному виразу

$$\frac{\tau_{ШГТА1}}{\tau_{ШГТАзраз}} = \frac{K_{1ТАМ}}{K_{зразТАМ}} \cdot \frac{\left(\frac{T_{зразнагр} - T_{зраз}}{T_{зразнаг}} \right)}{\left(\frac{T_{1нагр} - T_{1ТАМ}}{T_{1нагр}} \right)} \cdot \left[\left[\frac{c_{птв} (T_{нл} - T_0)}{r} + 1 + \frac{c_{ппід} (T_{кін} - T_{нл})}{r} \right] \right].$$

Згідно виразу співвідношення часів зарядки та залежності нестационарного процесу акумуляції теплоти для ТАМ – манітол отримані відповідні оцінки тривалості процесів з іншими ТАМ, які надано на рисунку 4.4.

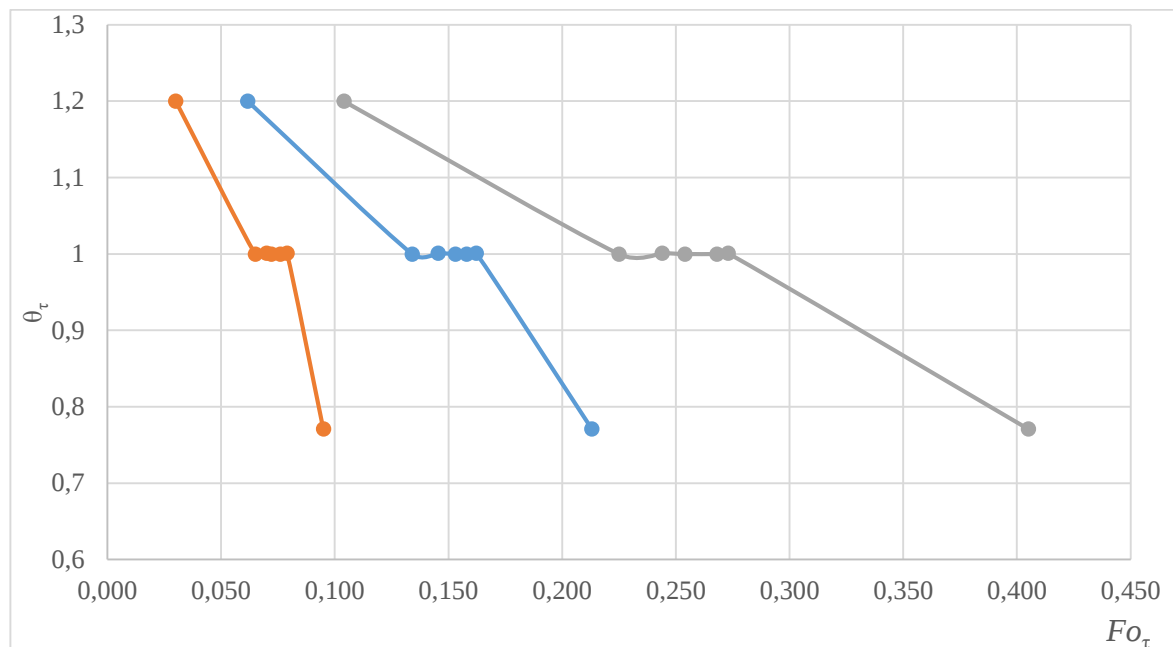


Рисунок 4.4 – Тривалості процесів підігріву, плавлення та перегріву ТАМ при акумуляції скидної теплоти відпрацьованих газів дизельного двигуна: — — поліетилен високого тиску, — — манітол, — — NaOH

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

4.4 Висновки за розділом 4

1. Оцінка інтервалу часу повного розплавлення 3 кг теплоакumuлюючого матеріалу манітола з початкової температури 8 °C до 166 °C 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 °C.

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

3. Достовірність експериментальних даних для порівняння з розрахунковими значеннями математичної моделі підтверджується значеннями похибок вимірювання, які не перевищують 8% та похибок опосередкованого визначення балансів теплоти – від 12 до 20%.

Основні результати розділу опубліковані в [87].

РОЗДІЛ 5. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ В ПРОЕКТУВАННЯ ТА СТВОРЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НАДВОДНИХ КОРАБЛІВ ТА СУДЕН З ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЮ СИСТЕМОЮ

5.1 Розробка раціональних структур схемних рішень енергетичних установок надводних кораблів

Розташування головних і допоміжних елементів КЕУ характеризується тривимірним розташуванням у машинному відділенні, що визначає форму і геометричні розміри трас для переміщення робочих тіл між цими елементами. Визначення раціональної структури схемних рішень КЕУ залежить від сукупності критеріїв, що об'єднують тип установки, потужність головних двигунів, масогабаритні характеристики, розташування, забезпечення роботи на часткових режимах, автоматизацію, витрату палива та мастила, віброакустичні характеристики, вартість, експлуатаційні витрати, живучість, надійність, ремонтпридатність з урахуванням тактико-технічних вимог до корабля [5]. В свою чергу тактико-технічні вимоги визначаються швидкістю повного та економічного ходу, типом і матеріалом корпусу, водотоннажністю, маневреністю, виконанням завдань протичовнової оборони, роботою гідроакустичної системи, чисельністю екіпажу, дальністю плавання, заданою спектрограмою ходів, малопомітністю, живучістю корабля, екологічністю, стійкістю до зовнішнього середовища (клімат, хитавиця і т.п.), стійкістю до зовнішніх впливів (вибуху) і обґрунтовується шляхом аналізу структури елементів в складі енергетичних установок.

Таким чином визначення структури схемних рішень дизельних, газотурбінних та комбінованих корабельних енергетичних установок є актуальним науково-технічним завданням для впровадження ТАС в їх склад.

Визначення раціональної структури схемних рішень корабельних енергетичних установок в машинному відділенні корабля відповідає умовам відповідних технічних обмежень.

Для визначення раціональної структури схемних рішень енергетичних установок надводних кораблів розглянуто наступні варіанти компоновки: прості схеми – дизельні енергетичні установки та комбіновані енергетичні установки (CODOG, CODAG, COGOG, COGAG), які представлено на рисунку 3.9.

Аналіз структур компонування головних енергетичних установок дозволив виявити їх такі відповідні ознаки: кількість і тип двигунів та рушіїв, симетричність або несиметричність розташування, пряме, зворотне або змішане виконання, реверсивність або неревверсивність, кількість та тип редукторів (одношвидкісні, багатошвидкісні, реверсивні, неревверсивні).

Структура схемного рішення представлялася відповідним орієнтованим графом (рисунок 5.1), що дозволило формалізувати дослідження інваріантних у часі властивостей загальної системи та використати математичний апарат теорії графів [113].

Для визначення раціональної структури КЕУ згідно з отриманими графами визначаються матриці суміжності для топологічних властивостей елементів енергетичної установки та їх зв'язків за принципом передачі і розподілу потужності. У результаті визначено початкові (двигуни) та кінцеві (рушії) елементи, що відносяться до висячих і тупикових вершин графа, показники діаметру структури, зв'язковості елементів, її ступеня централізації та складності [5].

Діаметр структури характеризує максимальне число зв'язків, що розподіляють початкові та кінцеві елементи. За його значенням можна оцінювати технічні обмеження системи, зокрема її надійність, інерційність, тривалість запізнення та інше.

Під зв'язковістю елементів розуміється їх найменше число видалення яких робить неможливим передачу потужності, а енергетичну установку недієздатною. Для оцінки зв'язковості використано показник, що характеризує відносну кількість різниці зв'язків в наявній структурі і мінімальною кількістю зв'язків працездатної

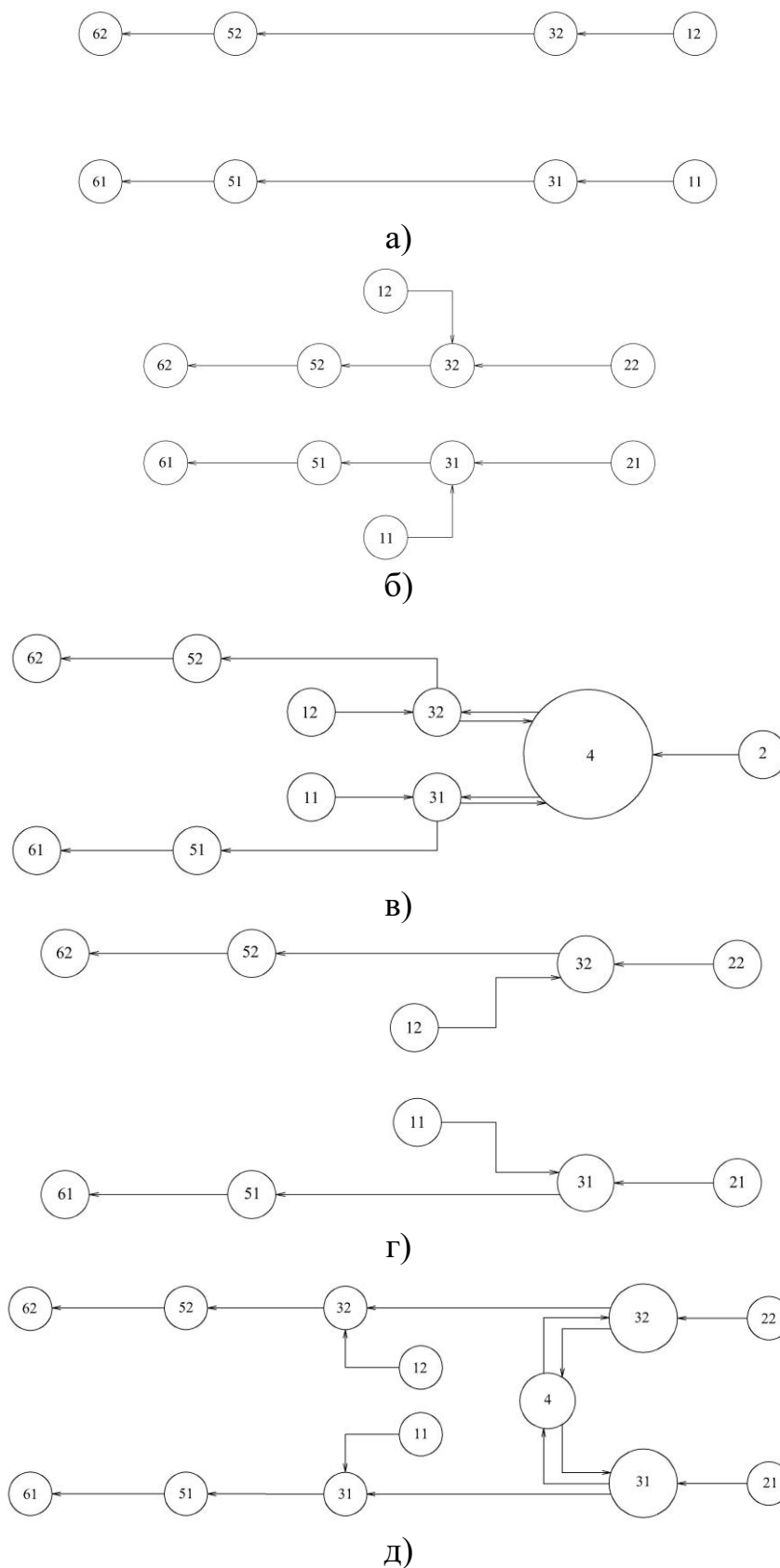


Рисунок 5.1 – Схеми КЕУ у вигляді орієнтованих графів відповідно рисунку 3.9:
перша цифра визначає номер елементу КЕУ: 1 – ДД; 2 – ГТД; 3 – редуктор; 4 –
підсумовуючий редуктор; 5 – валопровід; 6 – гвинт; друга цифра визначає борт: 1
– правий, 2 – лівий

структури. Показник зв'язковості інтерпретується зазвичай як міра надмірності структури за зв'язками.

Індекс центральності використовується для характеристики нерівномірності завантаження елементів структури.

Поняття складності структури КЕУ визначається, як процес переносу її потужності від головних двигунів до рушіїв для забезпечення руху корабля. Чим більше варіантів цього переносу потужності тим складніша структура енергетичної установки.

Кількісний показник складності пропорційний кількості складових шляхів між початковим і кінцевим елементами структури КЕУ.

Алгоритм визначення показників наступний [5]:

1. Пронумеровуються усі елементи графу, будується матриця суміжності, де показується зв'язки між усіма елементами, визначаються тупикові та висячі вершини;

2. Визначається довжина мінімального шляху d_{ij} між висячою вершиною i та тупиковою вершиною j , яка дорівнює числу ребер, що складають даний шлях. Якщо I та J є множинами висячих та тупикових вершин графа діаметр структури $d = \max_{i,j} d_{ij}$;

3. Показник зв'язковості визначається за формулою:

$$\zeta = \frac{n_{\Sigma}}{n-1} - 1,$$

де n – кількість вершин графа, n_{Σ} – показник, який згідно матриці суміжності для орієнтованого графа визначається як сума одиничних елементів матриці;

4. Індекс центральності для орієнтованого графа представляється у вигляді

$$\gamma = \frac{1}{(n-1) \cdot (V(k)-1)} \cdot \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n (V(k) - V(i)),$$

де $V(i)=v_i+v^i$ – сумарне число вхідних та вихідних ребер i -ої вершини, а $V(k)=\max_i V(i)$.

5. Показник складності для орієнтованого графа представляється у вигляді

$$\rho = \frac{1}{\rho_d} \cdot \left(n_1 \cdot n_2 \cdot \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \rho_{ij} \right),$$

де n_1 та n_2 – числа висячих та тупикових вершин у структурі графа, ρ_{ij} – кількість складових шляхів, що ведуть від i -ої висячої вершини до j -ої тупикової, ρ_d – показник одиниці виміру для одновальної ДУ.

Приклад реалізації алгоритму визначення вищеназваних показників представлено для схеми COGAG, а результати для розглянутих схем КЕУ в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Показники топологічних властивостей КЕУ

Схема КЕУ	Назва показника				
	Висячі та тупикові вершини	Діаметр структури d	Зв'язність, ζ	Індекс центральності, γ	Складність, ρ
ДУ	11, 12 61, 62	3	0,714	0,571	2
CODOG	11, 12, 21, 22 61, 62	3	0,778	0,778	8
CODAG	11, 12, 2 61, 62	5	1,000	0,778	30
COGOG	11, 12, 21, 22 61, 62	3	0,778	0,778	8
COGAG	11, 12, 21, 22 61, 62	6	1,000	0,667	34,7

1. Згідно з графом схеми COGAG матриця суміжності

$$V_{\text{COGAG}} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 21 & 22 & 31 & 32 & 4 & 31 & 32 & 11 & 12 & 51 & 52 & 61 & 62 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 21 \\ 22 \\ 31 \\ 32 \\ 4 \\ 31 \\ 32 \\ 11 \\ 12 \\ 51 \\ 52 \\ 61 \\ 62 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

2. Довжина мінімального шляху між вершинами: $d_{21,61} = d_{22,62} = 4$, $d_{11,61} = d_{12,62} = 3$, $d_{21,62} = d_{22,61} = 6$. Діаметр структури $d = \max_{i,j} d_{ij} = d_{21,62} = 6$.

3. Показник зв'язковості

$$\zeta = \frac{1}{13-1} \cdot (1+1+3+3+2+3+3+1+1+2+2+1+1) - 1 = 1.$$

4. Сумарне число вхідних та вихідних ребер для кожної вершини:

$$V(21) = V(22) = V(11) = V(12) = V(61) = V(62) = 1;$$

$$V(51) = V(52) = 2;$$

$$V(31) = V(32) = 3;$$

$$V(31) = V(32) = V(4) = 4.$$

Індекс центральності

$$\gamma = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 2}{12 \cdot 3} = \frac{24}{36} = 0,667.$$

5. Згідно графу схеми COGAG висячі вершини це 11, 12, 21, 22, а тупикові – 61, 62. З вершини 11 до 61 можна потрапити шляхом 11-31-51-61, з 21 до 61 шляхом

21-31-31-51-61, а з 21 до 62 шляхом 21-31-4-32-32-52-62. Так як показник одиниці виміру для одновальної ДУ дорівнює 3, а показник її складності – 1, то загальна складність схеми COGAG дорівнює

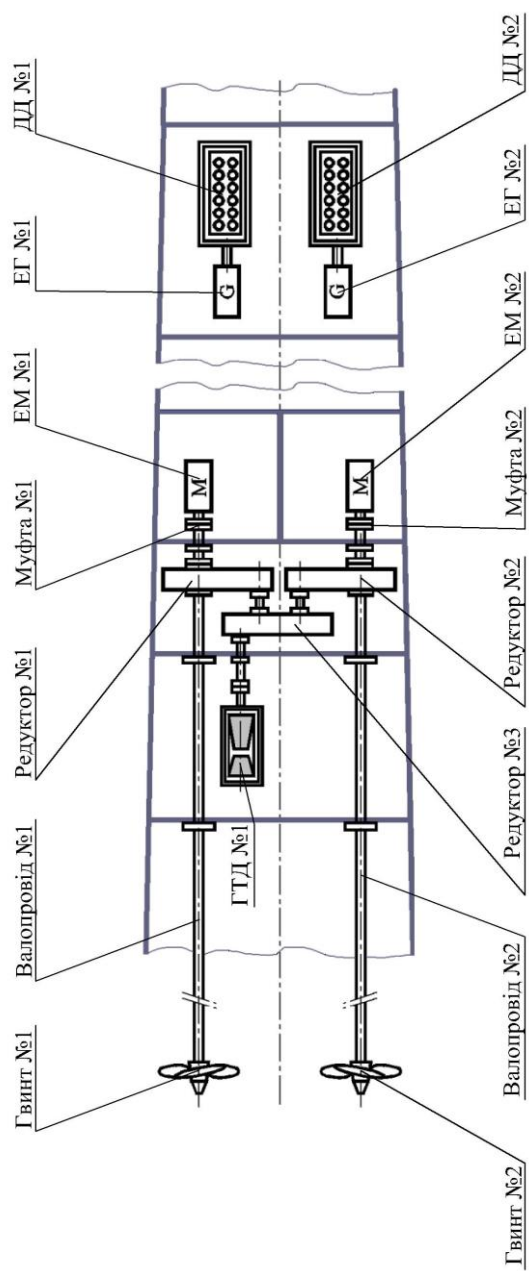
$$\rho = \frac{1}{3} \cdot 4 \cdot 2 \cdot (3 + 4 + 6) = 34,7.$$

Результати аналізу складу головних енергетичних установок, що визначається кількістю машинних відділень, дозволяють виявити наступну тенденцію:

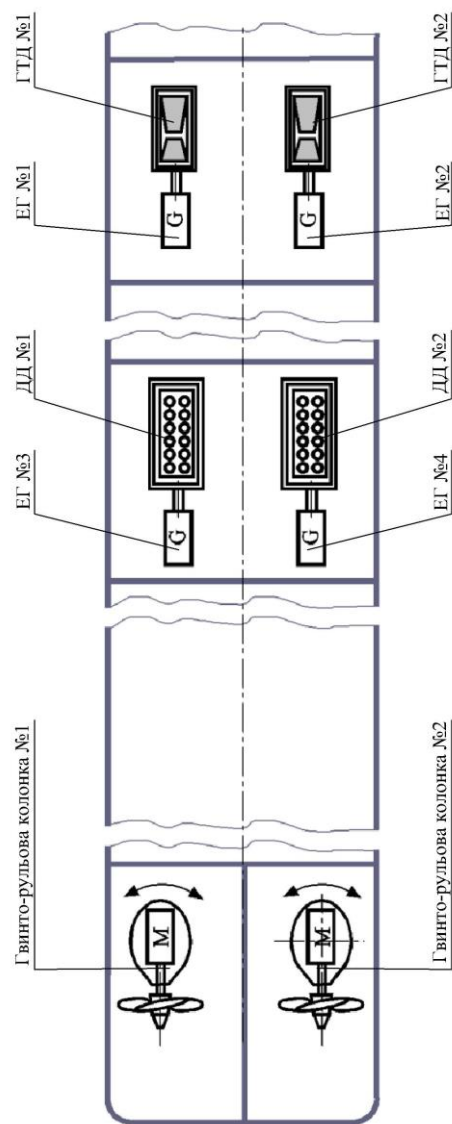
- одномашинний та двомашинний склади мають дизельні установки, комбіновані установки, що працюють за схемою CODOD та CODAD;
- двомашинний та тримашинний склади, як правило, мають установки, що працюють за іншими схемами, у тому числі CODOG та CODAG, при цьому практично реалізувати тримашинний склад для корветів більш складно, ніж для фрегатів.

Наявність декількох машинних відділень приводить до того, що зв'язок між елементами КЕУ інцидентний не двом, як в простому графі, а більшій кількості (рисунок 5.2 [114]).

Тобто структури КЕУ при багатомашинних варіантах можуть визначатися гіперграфами $H=(A,B)$, де A – множина елементів установки, а B – множина зв'язків в якому кожний зв'язок задається переліченням елементів йому інцидентних. Використовуючи позначення 1, 2, 5 і 6 щодо рисунку 5.2 та додавши 7 – електрогенератор та 8 – електромотор, для схеми КЕУ CODELAG $A=\{1, 2, 5, 6, 7, 8\}$, $B=\{B_1, B_2\}$, $B_1=\{1, 2, 7, 8\}$, $B_2=\{8, 5, 6\}$.



а)



б)

Рисунок 5.2 – Схеми КЕУ: ЕГ – електрогенератор, ЕМ – електромотор
а) CODELAG, б) Azimuthing Propulsion (AZP)

Матриця інциденцій гіперграфа для схеми KEY CODELAG задається наступним чином

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 2 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \end{matrix}.$$

Алгоритм дослідження структури багатомашинних відділень наступний. Визначаються рівні ієрархії структури схеми CODELAG і будується багаторівневий ієрархічний граф. Ієрархічний граф перетворюється в еквівалентний граф в якому відсутні суміжні елементи, що розташовані на одному рівні ієрархії. Отриманий граф трансформується в сукупність гіперграфів і визначаються їх матриці інциденцій. Отримані матриці інциденцій використовуються при розрахунку показників топологічних властивостей багатомашинних відділень KEY. Загальна складність схеми CODELAG дорівнює 85,3.

Оскільки KEY є складною технічною системою то її реалізація відповідає умовам тактико-технічного завдання корабля, де оптимізація зводиться до розкриття невизначеностей цілей. Рішення такого завдання може бути виконано методом згортки при мінімізації сукупності показників, що наведені вище.

На підставі топологічних показників розглянутих систем KEY на апіорних умовах енергетичної ефективності та компактності можливі їх слідує загальні характеристики: дизельна установка – компактна, не складна, але має задовільні показники живучості та нерівномірності завантаження; CODOG – відносно компактна, більш складна, живуча і рівномірно завантажена; CODAG – має підвищені габарити, складна, але живуча і рівномірно завантажена; COGOG – компактна, більш складна, живуча і рівномірно завантажена; COGAG – має підвищені габарити, більш складна, живуча і менш рівномірно завантажена.

Підвищення кількості локалізованих машинних відділень при сталій енергетичної ефективності KEY підвищує її живучість за рахунок збільшення

загальної питомої довжини відділень , але приводить до їх ускладнення.

Технічна реалізація елементів корабельної енергетичної установки в її складі залежить від вихідних даних і пов'язана з пошуком узагальненої цілі на базі сукупності заданих технічних характеристик та їх кількісних оцінок [5].

Для патрульних катерів з дизельною установкою схемне рішення має вигляд представлений на рисунку 5.3. В складі цього та наступних схемних рішень присутній ШГТА, конструктивна схема якого наведена на рисунку 5.4. Схемне рішення ТАС для ракетного катеру з комбінованою установкою CODAG на рисунку 5.5.

Для корвета з комбінованою установкою CODOG схемні рішення мають вигляд представлений на рисунку 5.6, а для фрегату з комбінованою установкою CODOG на рисунку 5.7.

Надані схемні рішення дозволяють забезпечити утилізацію теплоти відпрацьованих газів в теплоакumuлюючий елемент системи ТАС для подальшого використання на передпускову підготовку двигуна з підігрівом охолоджувальної рідини та мастила. Для корветів і фрегатів поряд із ШГТА можуть використовуватися додаткові теплоакumuлюючі елементи, зокрема циркуляційні цистерни мастила або палива, що формують гібридні теплоакumuлюючі системи відповідно до складу та особливостей енергетичної установки конкретного корабля.

Розробка схемних рішень підсистеми ТАС для розподілу на загальнокорабельні потреби виконана відповідно до вимог РД5.5391-79, частина 1, де згідно пункту 2.1.11: $t_1=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура холодної води; $t_2=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура гарячої води; $t_3=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура змішаної води. Схемне рішення цієї підсистеми представлено на рисунку 5.8. Особливістю цієї підсистеми ТАС для розподілу на загальнокорабельні потреби є неперворотність води після використання в камбузі, душових та санвузлах.

Конструктивні показники ШГТА для усіх розглянутих варіантів надані в таблиці 5.2.

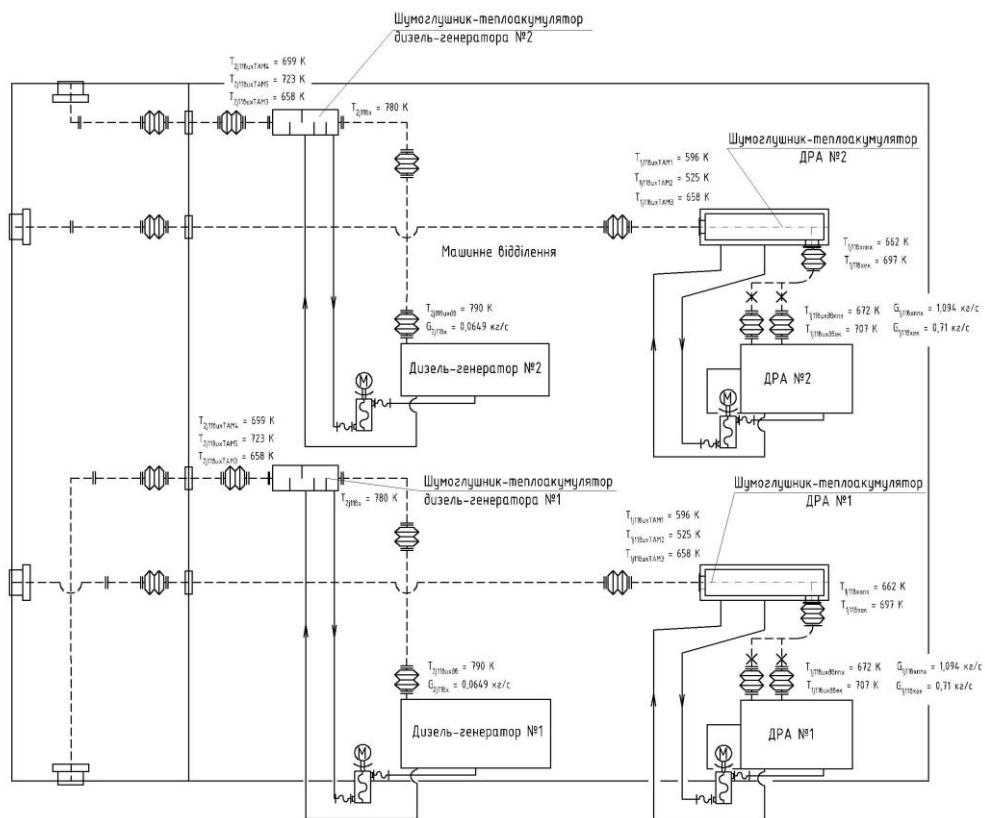


Рисунок 5.3 – Схема енергетичної установки патрульного катеру з ТАС: ТАМ₁ – NaOH, ТАМ₂ – LiNO₃, ТАМ₃ – MgCl₂(63)-22,3NaCl-14KCl, ТАМ₄ – LiF(20)–80LiOH, ТАМ₅ – NaCl(50)–50MgCl₂

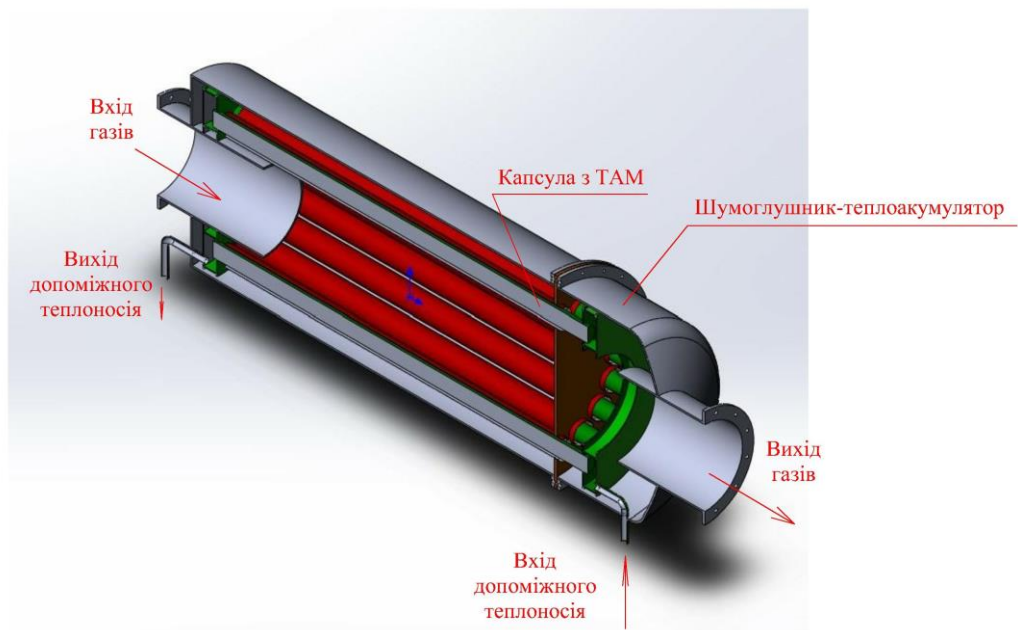


Рисунок 5.4 – Конструктивна схема шумоглушника-теплоаккумулятора

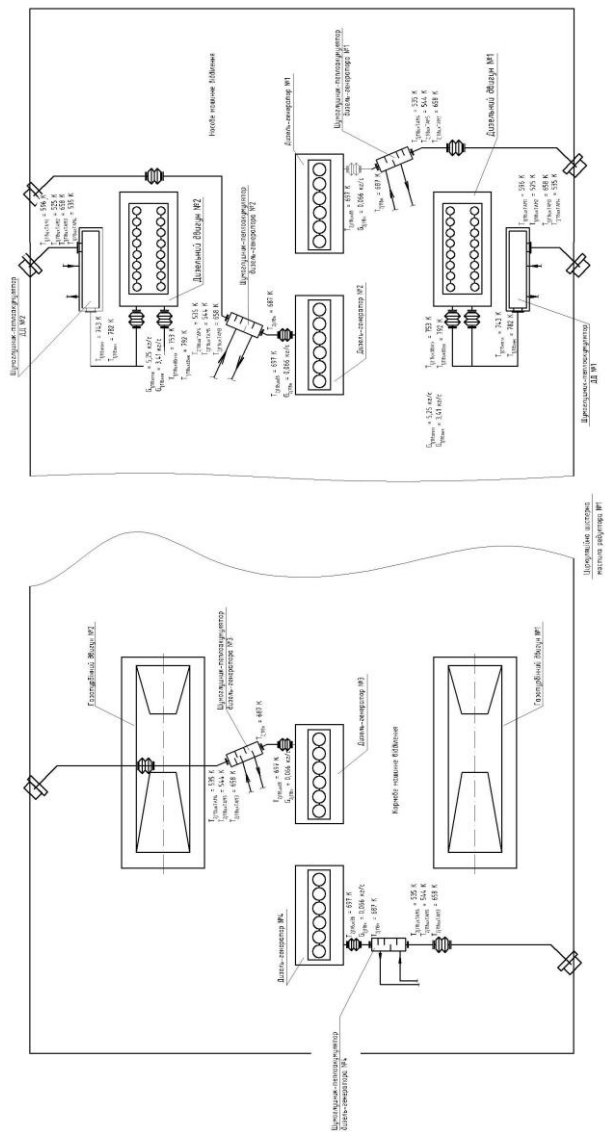


Рисунок 5.5 – Схема энергетичної установки ракетного двигателю з ТАС: $TAM_1 - NaOH$, $TAM_2 - LiNO_3$, $TAM_3 - MgCl_2(63)-22,3NaCl-14KCl$, $TAM_4 - LiF(20)-80LiOH$, $TAM_5 - NaCl(50)-50MgCl_2$

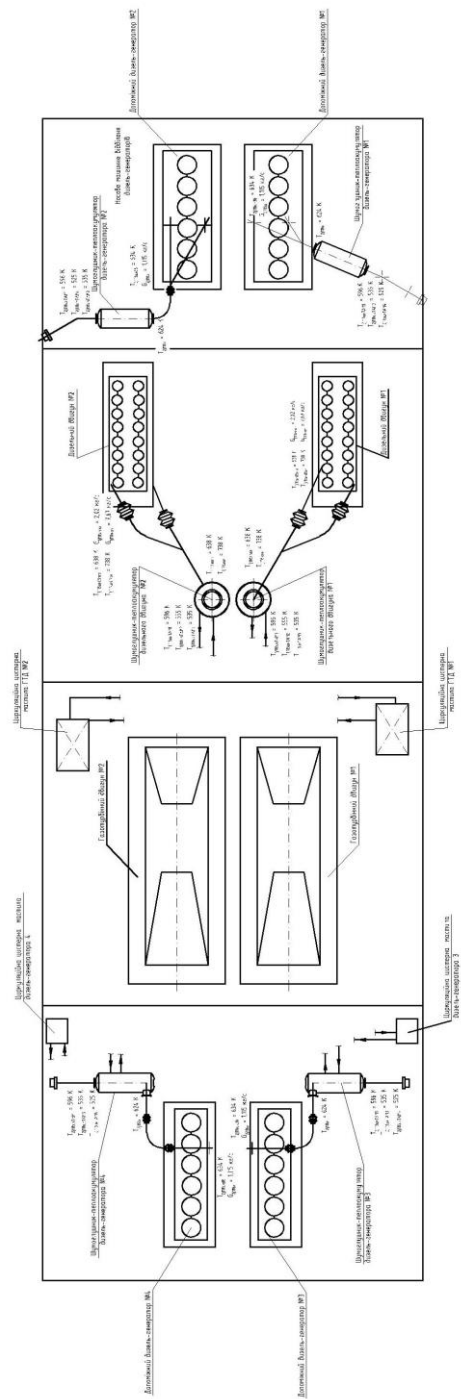


Рисунок 5.6 – Схема енергетичної установки корвету з ТАС: $TAM_1 - NaOH$, $TAM_2 - LiNO_3$, $TAM_3 - MgCl_2(63)-22,3NaCl-14KCl$, $TAM_4 - LiF(20)-80LiOH$, $TAM_5 - NaCl(50)-50MgCl_2$

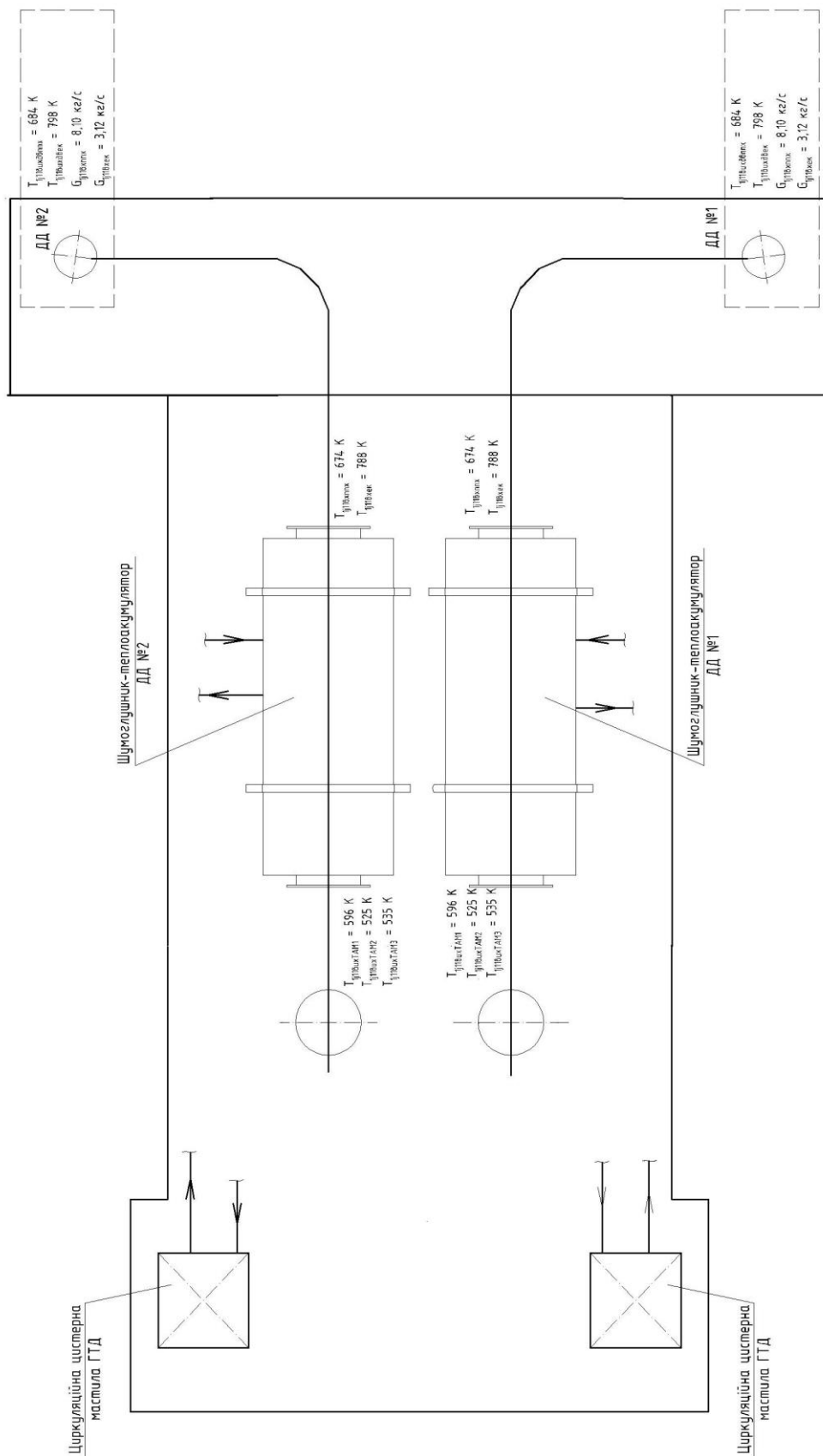


Рисунок 5.7 – Схема энергетичної установки фрегату з ТАС: $\text{TAM}_1 - \text{NaOH}$, $\text{TAM}_2 - \text{LiNO}_3$, $\text{TAM}_3 - \text{MgCl}_2(63)-22,3\text{NaCl}-14\text{KCl}$, $\text{TAM}_4 - \text{LiF}(20)-80\text{LiOH}$, $\text{TAM}_5 - \text{NaCl}(50)-50\text{MgCl}_2$

Таблиця 5.2 – Конструктивні показники шумоглушника-теплоаккумулятора

Клас корабля	Джерело теплоти	ТАМ	Габарити шумоглушника- теплоаккумулятора, м	Потенціал запасеної теплоти, кДж
Патрульний катер	Відпрацьовані гази	LiF(20)–80LiOH	0,40×1,30	3,279·10 ⁴
		NaCl(50)– 50MgCl ₂		1,918·10 ⁴
		MgCl ₂ (63)- 22,3NaCl-14KCl		2,446·10 ⁴
Ракетний катер		NaOH	1,060×1,115	7,037·10 ⁴
		LiNO ₃	1,060×1,115	7,406·10 ⁴
		MgCl ₂ (63)- 22,3NaCl-14KCl	1,060×1,115	8,720·10 ⁴
		LiCl(37)–63LiOH	1,060×1,115	6,320·10 ⁴
Корвет	Відпрацьовані гази	NaOH	1,110×2,440	2,291·10 ⁵
		NaCl(7.8)– 6.4Na ₂ CO ₃ – 85.5NaOH		1,842·10 ⁵
		LiCl(37)–63LiOH		2,057·10 ⁵
Фрегат		NaOH	1,600×2440	2,300·10 ⁵
		LiNO ₃		2,411·10 ⁵
		LiCl(37)–63LiOH		2,100·10 ⁵

Об'єм теплоаккумулятору визначався конструктивно за умов його компоновки в складі ТАС КЕУ. Схема ДЕУ з ТАС у вигляді орієнтованих графів надано на рисунку 5.9.

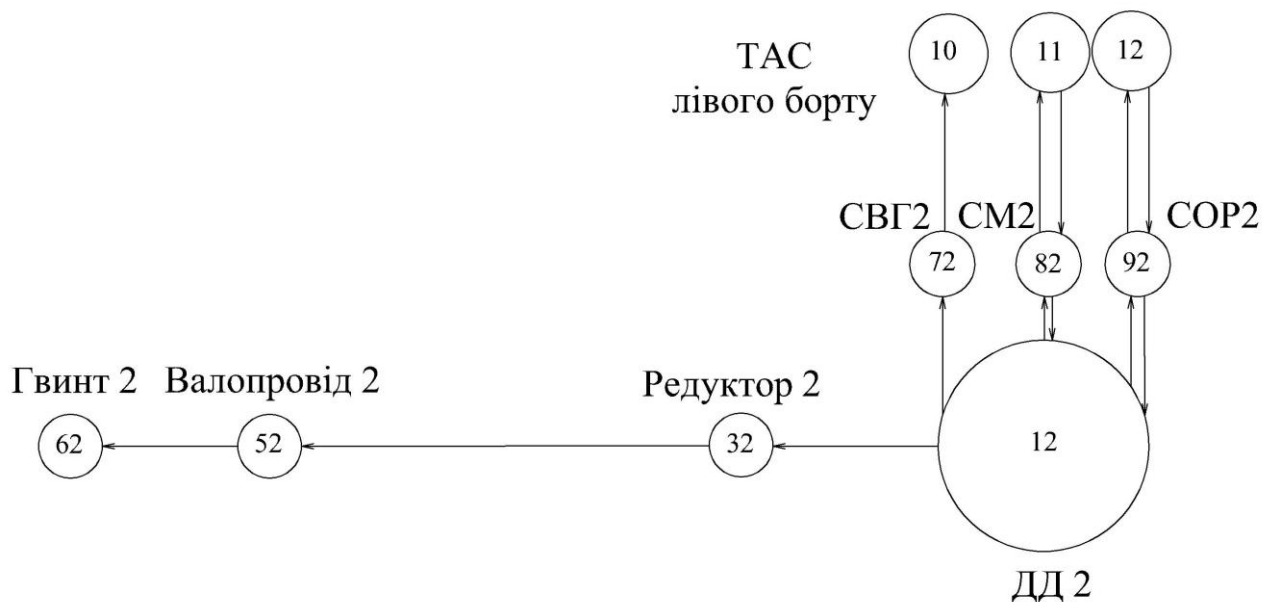


Рисунок 5.9 – Схема ДЕУ з ТАС від трьох джерел теплоти у вигляді орієнтованого графа, де СВГ – система відпрацьованих газів, МС – мастильна система, СОР – система охолоджувальної рідини, 7 – газохід, 8 – мастилопровід, 9 – трубопровід мастила, 10 – шумоглушник-теплоаккумулятор, 11 – циркуляційна цистерна мастила, 12 – цистерна охолоджувальної рідини

Порівняння топологічних показників ДЕУ та ДЕУ з ТАС представлені у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Порівняння топологічних показників ДЕУ та ДЕУ з ТАС

Схема КЕУ	Назва показника			
	Діаметр структури d	Зв'язність, ζ	Індекс центральності, γ	Складність, ρ
ДЕУ	3	0,714	0,571	2
ДЕУ з ТАС	3	0,754	0,767	4

5.2 Визначення показників ефективності енергетичних установок надводних кораблів та суден з теплоакumuлюючою системою

Аналіз тенденцій застосування ТАС у складі СЕУ різних типів суден виконано на основі статистичних даних, наведених у [1, 115], і представлено в таблиці 5.4.

Основна увага при дослідженнях була приділена трьом типам суден – круїзним лайнерам, балкерам, танкерам і енергетичними установками: головними – в основному дизельна або дизель-електрична і допоміжними – дизель-генератори [93].

Енергетична установка круїзного лайнеру складається з чотирьох дизельних двигунів MAN 32/44 9L потужністю 5400 кВт кожен, чотирьох електрогенераторів Siemens з характеристиками: 720 об/хв, 5400 кВт, двох гвинто-рульових колонок Siemens SISHIP eSiPOD 10M [95]; схема установки приведена на рисунку 5.10 [96].

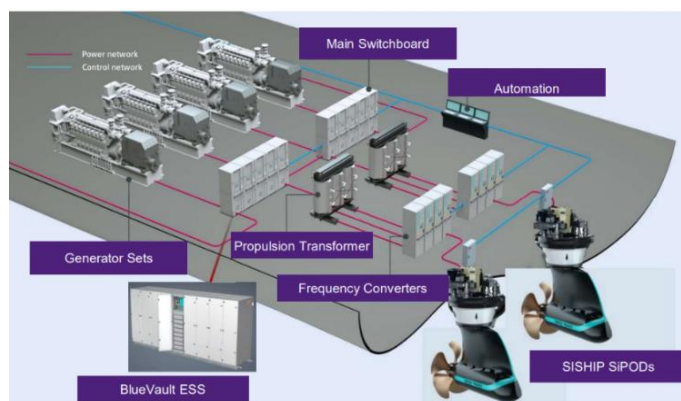


Рисунок 5.10 – Схема дизель-електричної установки круїзного лайнеру

Дизельна установка балкеру складається з одного дизельного двигуна MAN S60ME-C8.5 потужністю 14940 кВт, трьох дизель-генераторів Yanmar 6EY18ALW з характеристиками 600 кВт, 900 об/хв та гвинта фіксованого кроку [95]. Для танкеру енергетична установка складається з одного дизельного двигуна MAN 6G60ME-C9.5 потужністю 16080 кВт, трьох дизель-генераторів та гвинта фіксованого кроку [94]. Схеми дизельної установки балкеру та танкеру аналогічні, тому на рисунку 5.11 [95] представлена дизельна установка для балкеру.

Таблиця 5.4 – Оцінка перспективного використання ТАС у складі СЕУ

Тип судна	Суднова енергетична установка (головна та допоміжна)	Частка світового тоннажу, % DWT	Рівень перспективного використання ТАС
Bulk carriers	дизельна та дизель-генератори	42,7%	високий
Oil tankers	дизельна з валогенератором та утилізацією теплоти, дизель-генератор	28,3%	високий
Container ships	дизельна та дизель-генератори	14,0%	середній
Liquefied gas carriers (LNG/LPG)	дизельна та дизель-генератори	4,0%	середній
Offshore supply (OSV)	дизель-електрична з системою динамічного позиціонування судна	3,8%	низький
Chemical tankers	в основному дизельна, іноді дизель-електрична	2,2%	середній
General cargo ships	дизельна та дизель-генератори	3,6%	високий
Ferries & passenger ships	дизель-електрична	0,4%	високий
Other / n.a.	дизельна або дизель-електрична	1,1%	середній

Оцінка питомого об'єму системи ТАС відносно об'єму системи газовихлопу для круїзного лайнеру, балкеру та танкеру відповідно дорівнюють 4–6%, а відносно об'єму машинного відділення відповідно – 0,3-0,5%.

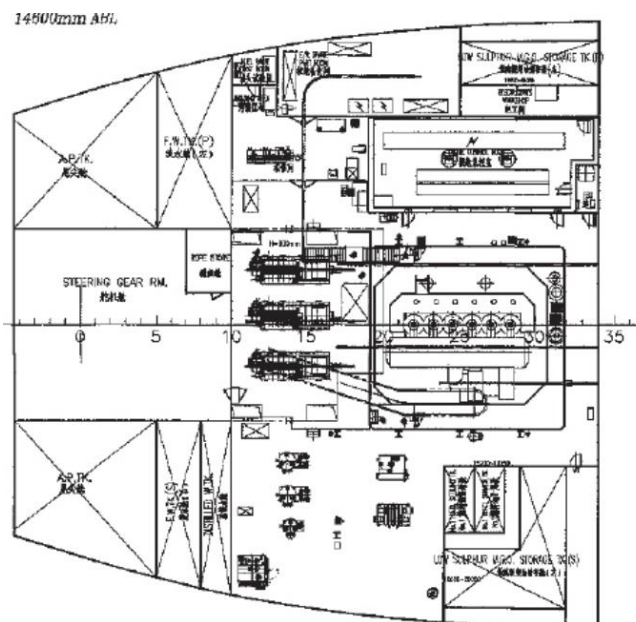


Рисунок 5.11 – Схема дизельної установки балкера

Особливістю експлуатаційного циклу СЕУ круїзного лайнера є використання в режимі ходу зі швидкістю 19 вузлів трьох двигунів при потужності на рівні 0,8 від номінального значення кожного двигуна, а при стоянці в порту – одного двигуна для загальносуднових потреб.

Для балкера особливістю експлуатаційного циклу СЕУ є використання в режимі ходу зі швидкістю 14,3 вузла при потужності двигуна на рівні 0,75 від номінального значення, а для танкера швидкість – 14 вузлів при потужності 0,8 [95].

Експлуатаційний рейс для розглянутих суден визначався кількістю діб ходу і стоянок. Кількість персоналу на судні, який залишається під час стоянки в порту, була оцінена експертним шляхом з урахуванням призначення судна.

Оцінка перспективи використання ТАС враховувала необхідність передпускової підготовки двигунів, а також загальносуднових і санітарно-побутових потреб.

ТАС для СЕУ розглянутих суден розроблені на базі їх систем газовихлопу з характеристиками ШГТА з вибраними теплоакumuлюючими матеріалами у складі газоходів СЕУ і наведені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Характеристики шумоглушників-теплоаккумуляторів ТАС у складі енергетичних установок суден з джерелом теплоти – відпрацьовані гази

Судно	Двигун MAN	Теплоакуюлючий матеріал	$K_{ТАМ},$ $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$	$K_{ТА},$ $\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \cdot \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	Потенціал акумуляованої теплоти, кДж
Круїзний лайнер	32/44 9L	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1749	17218	$7,86 \cdot 10^6$
		нітрит натрію NaNO_2	3395	75443	$1,09 \cdot 10^7$
		сіть $\text{LiCl}(37)\text{--}$ 63LiOH	3088	75480	$1,20 \cdot 10^7$
Балкер	S60ME- C8.5	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1771	23069	$7,12 \cdot 10^6$
		еритритол $\text{C}_4\text{H}_6(\text{OH})_4$	1829	39432	$7,27 \cdot 10^6$
		барій гідроксид $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2496	121106	$9,57 \cdot 10^6$
Танкер	6G60ME- C9.5	манітол $\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$	1771	23069	$8,35 \cdot 10^6$
		еритритол $\text{C}_4\text{H}_6(\text{OH})_4$	1829	39432	$8,60 \cdot 10^6$
		барій гідроксид $\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	2496	121106	$1,11 \cdot 10^7$

Наступним етапом дослідження було визначення показників ефективності використання, теплової ефективності ТАС, у складі енергетичної установки судна з урахуванням експлуатаційних циклів, габаритних обмежень машинних відділень і розташування в корпусі, а також схематичних рішень конструктивного виконання системи.

Ці показники ефективності ТАС у складі СЕУ наведені з урахуванням модернізації систем газовихлопу на круїзному лайнері тільки головних двигунів з установкою 7 шумоглушників-теплоаккумуляторів, на балкері – головних і дизель-генераторів з установкою відповідно по 3 і 2 на кожен з двигунів і на танкері відповідно по 3 і 2 на кожен двигун. Значення показників ефективності ТАС у складі СЕУ круїзного лайнера, балкера і танкера наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Показники ефективності ТАС

Судно	Теплоакумуючий матеріал	Кількість персоналу на судні під час стоянки, %	Показники ефективності	
			η_{ETAC}	E_T
			літо/зима	літо/зима
Круїзний лайнер	Манітол	10	0,603/0,947	0,171/0,370
		25	0,879/1,000	0,404/0,460
	NaNO ₂	10	0,434/0,837	0,200/0,385
		50	0,987/1,000	0,454/0,460
	LiCl(37)–63LiOH	10	0,395/0,812	0,182/0,373
		50	0,957/1,000	0,440/0,460
Балкер	Манітол	10	0,095/0,389	0,044/0,179
		100	0,147/0,923	0,067/0,425
	Еритритол	10	0,093/0,381	0,043/0,175
		100	0,143/0,903	0,066/0,415
	Ba(OH) ₂ ·5H ₂ O	10	0,071/0,292	0,033/0,134
		100	0,110/0,692	0,051/0,319
Танкер	Манітол	10	0,123/1,000	0,058/0,470
		100	0,187/1,000	0,088/0,470
	Еритритол	10	0,208/1,000	0,098/0,470
		100	0,315/1,000	0,148/0,470
	Ba(OH) ₂ ·5H ₂ O	10	0,093/0,925	0,044/0,435
		100	0,140/0,972	0,066/0,457

На заключному етапі визначалися покращення показників енергетичних установок кораблів та суден при використанні ТАС у їх складі. Для кораблів до таких показників віднесені скорочення часу запуску двигунів, економія палива та збільшення терміну експлуатації до капітального ремонту, а для суден – економія палива та зменшення індексу енергоефективності проєкту судна, що наведені у таблицях 5.7 та 5.8.

В цих таблицях вихідні данні маси двигунів, варіантів і складових процесу запуску, витрати палива на окремих складових цих процесів та термінів експлуатації до капітального ремонту визначені згідно [116–122].

Економія палива при використанні ТАС дорівнювала витраті палива в ДГ для забезпечення електроенергією штатної передпускової системи одного двигуна на один запуск.

Таблиця 5.7 – Поліпшення характеристик КЕУ при використанні ТАС

Клас корабля, головний двигун	Варіант і складові процесу запуску	Час запуску без ТАС, хв	Економія палива при використанні ТАС, кг		Термін експлуатації до капітального ремонту, год	
			на двигун	загальна	без ТАС	з ТАС
Патрульний катер, САТ С18 $m_{\text{САТ}} = 1,67 \text{ т}$	штатний запуск	15,0	2	26	10000	11500
	передпускова підготовка	3,0				
	пуск двигуна	0,75				
	поступеневий прогрів	4,50				
	набір потужності	6,75				
	екстрений 1	11,25	1,5	25,5		
	передпускова підготовка	2,25				
	пуск двигуна	0,75				
	поступеневий прогрів	3,0				
	набір потужності	5,25				
	екстрений 2	9,0	1,5	25,5		
	передпускова підготовка	0,0				
	пуск двигуна	0,75				
	поступеневий прогрів	3,0				
	набір потужності	5,25				

продовж. табл. 5.7

Клас корабля, головний двигун	Варіант і складові процесу запуску	Час запуску без ТАС, хв	Економія палива при використанні ТАС, кг		Економія палива при використанні ТАС, кг	
			на двигун	загальна	без ТАС	з ТАС
Ракетний катер, MTU 16V4000M93 $m_{\text{MTU}} = 9,6 \text{ т}$	штатний запуск	27,0	11	190	до 96000	до 110000
	передпускова підготовка	5,40				
	пуск двигуна	1,35				
	поступеневий прогрів	8,10				
	набір потужності	12,15				
	екстрений 1	20,25	8	187		
	передпускова підготовка	4,05				
	пуск двигуна	1,35				
	поступеневий прогрів	5,40				
	набір потужності	9,45				
	екстрений 2	16,2	8	187		
	передпускова підготовка	0,0				
	пуск двигуна	1,35				
	поступеневий прогрів	5,40				
	набір потужності	9,45				

продовж. табл. 5.7

Клас корабля, головний двигун	Варіант і складові процесу запуску	Час запуску без ТАС, хв	Економія палива при використанні ТАС, кг		Термін експлуатації до капітального ремонту, год	
			на двигун	загальна	без ТАС	з ТАС
Корвет, САТ С280-12 $m_{\text{САТ}} = 25,9 \text{ т}$	штатний запуск	40	9	106	20000– 30000	23000– 34500
	передпускова підготовка	8,0				
	пуск двигуна	2,0				
	поступеневий прогрів	12,0				
	набір потужності	18,0				
	екстрений 1	30,0	7	104		
	передпускова підготовка	6,0				
	пуск двигуна	2,0				
	поступеневий прогрів	8,0				
	набір потужності	14,0				
	екстрений 2	24,0	7	104		
	передпускова підготовка	0,0				
	пуск двигуна	2,0				
	поступеневий прогрів	8,0				
	набір потужності	14,0				

продовж. табл. 5.7

Клас корабля, головний двигун	Варіант і складові процесу запуску	Час запуску без ТАС, хв	Економія палива при використанні ТАС, кг		Термін експлуатації до капітального ремонту, год	
			На двигун	Загальна	Без ТАС	з ТАС
Фрегат, САТ С280-16 $m_{\text{САТ}} = 28,5 \text{ т}$	штатний запуск	44,0	45	214	22000– 28000	25300– 32200
	передпускова підготовка	8,8				
	пуск двигуна	2,2				
	поступеневий прогрів	13,2				
	набір потужності	19,8				
	екстрений 1	33,0	34	203		
	передпускова підготовка	6,6				
	пуск двигуна	2,2				
	поступеневий прогрів	8,8				
	набір потужності	15,4				
	екстрений 2	26,4	34	203		
	передпускова підготовка	0,0				
	пуск двигуна	2,2				
	поступеневий прогрів	8,8				
	набір потужності	15,4				

Умови екстреного запуску варіантів 1 і 2 відрізняються тим що перший виконується зі стану коли двигун охолоджений, а другий – коли двигун підтримується в прогрітому стані. Тому крім економії палива в варіанті 2 додатково скорочується загальний час запуску на величину передпускової підготовки.

Таблиця 5.8 – Економія палива за рахунок використання ТАС

Тип судна	Кількість персоналу на судні під час стоянки, %	$K_{ТАС}$	Паливо, зекономлене під час рейсу, т	Відносна економія палива допоміжних котлів за рейс, %	Значення EEDI		
					необхідний	досягнутий	виконаний
Круїзний лайнер	50–75	7379	0,530	44,52–29,68	15,87	10,16	10,146–10,145
		32333	0,740	60,70–41,26			10,140–10,139
		32349	0,810	64,77–45,32			10,139–10,138
Балкер	75–100	11079	0,354	9,72–9,69	3,94	3,72	3,7170
		18937	0,362	9,94–6,81			3,7169
		58163	0,472	12,96–8,88			3,7161
Танкер		9662	0,461	7,41–5,48	3,64	2,81	2,8062
		16516	0,474	7,63–5,64			2,8060
		50725	0,614	9,88–7,31			2,8049

За рахунок раціональних схемних рішень теплоакumuлюючої системи та способів акумуляції теплоти з фазовим переходом від її різних джерел — відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила, а також з урахуванням умов роботи двигунів за експлуатаційними циклами визначено економію палива допоміжних елементів СЕУ при використанні ТАС. З урахуванням забезпечення теплотою ТАС споживачів на судні економія палива допоміжних котлів залежить від складу СЕУ та призначення судна і може складати від 5 до 64%.

Згідно концепції необхідного показника індексу енергоефективності проєкту судна, коефіцієнта зниження, граничних значень та етапів виконання вимог на період 2025-2030 років відповідні значення для типів суден – круїзний лайнер, балкер, танкер складають 1,02; 0,37; 0,28 [17]. За результатами розрахунків, що наведені в таблиці 5.8 впровадження ТАС на цих суднах може забезпечити

зниження індексу енергоефективності проєкту судна відповідно до 2,2%, 1,1% та 1,8% за рахунок зниження загального використання палива в СЕУ.

5.3 Загальні рекомендації щодо формування теплоакумуючої системи з фазовим переходом в складі енергетичних установок надводних кораблів та суден

При розробці ТАС з фазовим переходом в складі СЕУ необхідно враховувати зовнішні та внутрішні фактори, які впливають на ефективну роботу системи, та вимоги безпеки.

5.3.1 Рекомендації щодо розробки ТАС на стадії проектування.

Розроблені рекомендації на стадії науково-дослідної роботи відповідають загальним вимогам стадії дослідно-конструкторської роботи і викладені в формі послідовних дій.

Визначити попередні характеристики ТАС в складі енергетичної установки надводного корабля призначити: потенціали джерел теплоти та її споживачів, експлуатаційний цикл та кліматичні умови регіону служби, масогабаритні показники ШГТА для системи газовихлопу при конструктивних обмеженнях машинного відділення корабля.

Результатом є визначення вихідних даних, обумовлених умовами розміщення та експлуатації енергетичної установки.

Обґрунтувати вибір ТАМ за його теплофізичними властивостями – теплота фазового переходу, густина та коефіцієнт теплопровідності; експлуатаційними умовами – рівень температур рідкої фази, питомий об'єм та тиск.

Вибір ТАМ за теплофізичними властивостями рекомендується здійснювати згідно з інтегральним критерієм, наведеним на рисунку 3.1, з послідовним уточненням згідно з інтегральними критеріями, наведеними на рисунках 3.4 та 3.6.

Обґрунтувати вибір матеріалу і конструктивних показників теплоізоляції ТА для задоволення норм безпеки та збереження накопиченої теплоти на термін відповідний експлуатаційному циклу. Результатом є конструктивне рішення

теплоізоляції ТА.

Задати техніко-економічні показники ефективності використання ТАС у КЕУ: часовий-енергетичний еквівалент, показник ефективності використання ТАС, показник якості та теплової ефективності.

За результатами теплового розрахунку ТАС в складі КЕУ погодити та прийняті вихідні дані.

Оцінити ефективність утилізації скидної теплоти КЕУ згідно алгоритму визначення критеріїв оптимальності ТАС за показниками ефективності використання, теплової ефективності і якості, які реалізовані у програмному середовищі Mathcad та визначити значення критеріїв оптимальності ТАС з урахуванням структури корабельної енергетичної установки, експлуатаційного циклу надводного корабля, джерел утилізованої теплоти, конструкції теплоаккумулятора, ТАМ та складу споживачів для наступних джерел: відпрацьовані гази, охолоджувальна рідина та мастило.

Рекомендовані характеристики ТАС в складі КЕУ наведені в таблиці 5.9.

5.3.2 Рекомендації щодо застосування схемних рішень ТАС у складі енергетичних установок надводних кораблів, що проектуються та модернізуються.

На підставі результатів отриманих в 5.3.1 запропоновано наступне.

При реалізації простих схемних рішень ТАС конструкцію шумоглушника-теплоаккумулятора виконати за конструктивною схемою глушника MFT компанії MAXIM SILENCERS, INC з доробкою конструкції теплообмінника типу «труба в трубі» на окремі касети з ТАМ зі з'єднаними внутрішніми трубами при протиточному русі теплоносія для споживачів.

Таблиця 5.9 – Рекомендовані характеристики ТАС в складі KEY

Клас корабля	Пропульсивна установка	Тип ТАС	Джерела скидної теплоти	Розміри глушника-теплоаккумулятора, DxL, мм	TAM
Патрульний катер	ДУ	Проста	Відпрацьовані гази	0,60x1,12	MgCl ₂ (63)-22,3NaCl-14KCl
				0,40x1,30	NaOH
				0,50x1,2	LiF(20)–80LiOH
Ракетний катер	CODAG	Проста	Відпрацьовані гази	1,060x1,115	LiCl(37)–63LiOH
	COGAG		Мастило та паливо	-	мастило та паливо
Корвет	CODOG	Гібридна	Відпрацьовані гази	1,110x2,440	NaCl(7.8)–6.4Na ₂ CO ₃ –85.5NaOH, мастило та паливо
			мастило та паливо	-	
			Охолоджувальна рідина та мастило	-	
	CODAG		Відпрацьовані гази	1,080x2,500	NaOH, мастило та паливо
			Мастило та паливо	-	
			Охолоджувальна рідина та мастило	-	
	CODOG		Відпрацьовані гази	1,050x1,200	LiNO ₃ , мастило та паливо
			Мастило та паливо	-	
			Охолоджувальна рідина та мастило	-	
Фрегат	CODOG	Гібридна	Відпрацьовані гази	1,600x2440	LiNO ₃ , мастило та паливо
			Мастило та паливо	-	
			Охолоджувальна рідина та мастило	-	
	COGAG		Відпрацьовані гази	-	мастило та паливо
			Мастило та паливо	-	
			Охолоджувальна рідина та мастило	-	
	CODAD		Відпрацьовані гази	1,450x2500	LiNO ₃ , мастило та паливо
			Мастило та паливо	-	
			Охолоджувальна рідина та мастило	-	

При реалізації гібридних схемних рішень ТАС додатково з ШГТА використати теплоакumuлюючі циркуляційні цистерни палива, мастила та рідини з відповідною теплоізоляцією для задоволення норм збереження накопиченої теплоти на термін відповідний експлуатаційному циклу та безпеки.

Обґрунтування структури схемних рішень простих та гібридних ТАС виконати шляхом аналізу топологічних показників відповідних орієнтованих графів.

Уточнити окремі характеристики схемних рішень ТАС у складі енергетичних установок надводних кораблів за наступними показниками ефективності використання ТАС: часовий-енергетичний еквівалент, показник ефективності використання ТАС, показник якості та теплової ефективності при виконанні дослідно-конструкторських робіт за визначеним проектом.

Погодити отримані характеристики ТАС з вимогами Правил класифікації та побудови морських суден Регістру судноплавства України [123].

5.4. Висновки за розділом 5

1. Для наступних класів кораблів – патрульні та ракетні катери, корвети і фрегати впровадження ТАС у складі їх КЕУ рекомендовано за значеннями показників ефективності, які дають найбільшу економію палива, а саме на рівні 0,7–1,18% для патрульних катерів, 1,0–1,5% для ракетних катерів, 1,5–1,8% для корветів та 1,0–1,3% для фрегатів, що дозволяє розширити функціональні можливості забезпечення потреб енергетичних установок та персоналу.

2. Обґрунтовано конструкцію шумоглушника-теплоакumuлятора за конструктивною схемою глушника MFT компанії MAXIM SILENCERS, INC за новим призначенням.

3. Розроблені рекомендації щодо застосування схемних рішень ТАС у складі енергетичних установок надводних кораблів, що проектуються та модернізуються.

4. Визначені умови уточнення окремих показників схемних рішень ТАС у складі енергетичних установок надводних кораблів за показниками ефективності

використання ТАС: часовий-енергетичний еквівалент, показник ефективності використання ТАС, показник якості та теплової ефективності при виконанні дослідно-конструкторських робіт за визначеним проектом.

5. За рахунок раціональних схемних рішень ТАС та способів акумуляції теплоти з фазовим переходом від різних джерел відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила, умов роботи двигунів за експлуатаційними циклами, визначено збільшення утилізації скидної теплоти для кораблів відповідно на 14–24%, а забезпечення споживачів судна акумульованою теплотою дозволяє зменшити витрату палива допоміжних котлів від 5 до 64% в залежності від складу СЕУ та призначення судна, а також забезпечити зниження значень індексу енергоефективності проєкту судна у середньому до 2%.

Основні результати розділу опубліковані в роботах [5, 24, 86, 88, 93].

ВИСНОВКИ ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ

1. У результаті виконаних наукових досліджень отримав подальший розвиток напрям створення інноваційного обладнання для корабельних та суднових енергетичних установок на основі акумуляції скидної теплоти процесами з фазовим переходом та розробки їх багаторівневої моделі у вигляді об'єктно-орієнтованих взаємопов'язаних процедур «Головний двигун», «Допоміжний двигун» та «Теплоакumuлююча система» з ієрархічними рівнями: теплопередавальна поверхня теплоакumuлятора, теплоакumuлятор як елемент підсистеми та теплоакumuлююча система, як елемент енергетичної установки, реалізація яких забезпечує економію палива за рахунок оптимізації вибору теплоакumuлюючих матеріалів та шумоглушників-теплоакumuляторів в складі раціональних схемних рішень теплоакumuлюючих систем і, як наслідок, поліпшення ефективності цих систем та техніко-економічних показників установок в цілому.

2. Виконано аналіз сучасного стану та перспективи розвитку надводного морського флоту, його енергетичних установок та установлено, що:

- вимоги ІМО спрямовані на зниження витрат палива, обмеження викидів парникових газів та підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок;

- за результатами експлуатації корабельних та суднових енергетичних установок, близько 30% енергії первинних енергоресурсів використовується на її потреби та екіпажу, решту енергії біля 50% складають вторинні енергоресурси різних температурних рівнів, а близько 20% становлять безповоротні втрати;

- питання споживання теплових викидів з температурами, які нижче за 300 °С, що становить 89% від загального обсягу, є складною проблемою на даний час, оскільки потребує ефективних технологій для задоволення потреб споживачів;

- одним з напрямів споживання низькопотенційних теплових викидів є їх акумуляція ефективними засобами інтегрованими в склад систем енергетичних установок.

3. Обґрунтовано напрям підвищення ефективності теплоакumuлюючих систем з урахуванням температурного потенціалу різних джерел скидної теплоти на процеси її акумуляції, умов збереження і використання в різних експлуатаційних циклах енергетичних установок надводних кораблів шляхом узгодження – часового-енергетичного еквіваленту, показниками ефективності використання теплоакumuлюючої системи, її якості та теплової ефективності, вплив яких залежить від технічних обмежень за конструктивними та експлуатаційними показниками.

4. За результатами обґрунтування напряму підвищення ефективності теплоакumuлюючих систем досліджено і реалізовано:

- способи акумуляції теплоти з фазовим переходом з різними джерелами відпрацьованих газів, охолоджувальної рідини та мастила, а також визначено параметри та умови їх ефективного застосування, теплофізичні властивості теплоакumuлюючих матеріалів, форму, розмір і орієнтацію поверхонь теплообміну, умови роботи двигунів в експлуатаційному циклі, що мають ймовірнісний характер і залежать від завдань корабля і стану зовнішнього середовища, для детермінованого, ймовірнісного та невизначеного варіантів характеристик навантаження головних і допоміжних двигунів у часі, відповідних їм температур, витрат відпрацьованих газів, а також кількості утилізованої й акумульованої теплоти в дані проміжки часу, що забезпечують збільшення утилізації скидної теплоти для кораблів відповідно на 14–24%, а забезпечення споживачів судна акумульованою теплою дозволяє зменшити витрату палива допоміжних котлів від 5 до 64% в залежності від складу СЕУ та призначення судна, а також забезпечити зниження значень індексу енергоефективності проекту судна у середньому до 2%;

- схемні рішення для класів кораблів – патрульні та ракетні катери, корвети і фрегати для впровадження теплоакumuлюючих систем, які основані на використанні способів акумуляції теплоти з фазовим переходом, в складі енергетичних установок.

5. Методами математичного та фізичного моделювання термогазодинамічних процесів обґрунтовано підвищення ефективності та

працездатності шумоглушників-теплоаккумуляторів, та як наслідок поліпшення техніко-економічних показників двигунів та енергетичних установок за рахунок зменшення аеродинамічного опору та рівня шуму завдяки зниженню його температури за рахунок теплообміну.

6. Результати експериментальних досліджень дизельного двигуна з моделлю шумоглушника-теплоаккумулятора підтвердили достовірність результатів математичного моделювання процесів акумулювання теплоти експериментального зразка, а отримана залежність безрозмірної температури від чисел Біо і Фур'є для нестационарної теплопровідності дає можливість раціонального їх використання при розробці повнорозмірного устаткування.

7. Конструктивна схема шумоглушника-теплоаккумулятора, схемні рішення теплоакуючих систем простого та гібридного складів з рекомендаціями щодо їх застосування у складі енергетичних установок надводних кораблів, що проектується та модернізуються, дозволяють комплексно підвищити ефективність збереження енергетичних та матеріальних ресурсів при забезпеченні загальнокорабельних потреб.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. UNCTAD. Review of Maritime Transport 2024. Chapter II World shipping fleet and services. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024ch2_en.pdf (дата звернення 01.09.2025).
2. UNCTAD. Maritime transport. Data insights 2024: веб-сайт. URL: <https://unctadstat.unctad.org/insights> (дата звернення 01.09.2025).
3. The 2022 World Merchant Fleet Statistics from Equasis. URL: <https://www.equasis.org/Fichiers/Statistique/MOA/Documents%20availables%20on%20statistics%20of%20Equasis/Equasis%20Statistics%20-%20The%20world%20fleet%202022.pdf> (дата звернення 03.09.2025).
4. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx> (дата звернення 03.09.2025).
5. Борисов В. Є., Кузнецов Г. В. Визначення раціональних структур схемних рішень енергетичних установок надводних кораблів при розкритті невизначеності цілі. *Збірник наукових праць НУК*. 2024. №3 (496). С. 51–58. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).7](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).7).
6. Військово-морські сили Збройних сил України: веб-сайт. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Військово_морські_сили_Збройних_сил_України#cite_note-4 (дата звернення 05.09.2025).
7. В Україні розроблена й затверджена нова стратегія розвитку ВМСУ до 2035 року: веб-сайт. URL: <https://web.archive.org/web/20181205003228/https://defence-ua.com/index.php/home-page/5912-v-ukrayini-rozroblena-y-zatverdzhena-nova-stratehiya-rozvytku-vmsu-do-2035-roku> (дата звернення 05.09.2025).
8. Завдяки партнерам у складі ВМС України вже 90 кораблів та катерів: веб-сайт. URL: <https://military.com/uk/news/zavdyaky-partneram-u-skladi-vms-ukrayiny-vzhe-90-korabliv-ta-kateriv/> (дата звернення 05.09.2025).
9. Propulsion Systems Used in Modern Naval Vessels: веб-сайт. URL:

<https://navalpost.com/propulsion-systems-navies-gas-diesel-electric/> (дата звернення 05.09.2025).

10. Jane's Fighting Ships 2019-2020 / editor Pape A. London: IHS Markit, 2019. 1048 p.

11. MAN Energy Solutions. MAN 175D Project Guide – Marine: Four-stroke high-speed diesel engine compliant with IMO Tier II / IMO Tier III. Rev. 03.2023/10.0. Augsburg: MAN Energy Solutions, 2023. Technical guide. 628 p.

12. REINTJES Powertrain Solutions. Product Guide 2025 | Marine. Hameln: REINTJES GmbH, 2025. 110 p. URL: https://reintjes-gears.de/wp-content/uploads/2025/05/Reintjes-Product-Guide-2025_web_mit-Passwortschutz.pdf (дата звернення: 18.10.2025).

13. Caterpillar Inc. Marine Power Solutions. Edition 2025. Peoria: Caterpillar Inc., 2025. 64 p. URL: https://stbgazwewebassetsp1.blob.core.windows.net/bcatprod/assets/document/TR/Marine%20Selection%20Guide_2025.pdf (дата звернення: 18.10.2025).

14. Clemens F., Kolawole Muritala I., Pardemann R., Meyer B. Estimating the global waste heat potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 57. P. 1568–1579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.192>.

15. Dincer I., Rosen M.A. Exergy Analysis of Heating, Refrigerating and Air Conditioning: Methods and Applications. Oxford: Elsevier, 2015. 739 p.

16. Baldi F., Gabrielli C. A feasibility analysis of waste heat recovery systems for marine applications. *Energy*. 2015. Vol. 80. P. 654–665. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.12.020>.

17. Kalina A. I. Combined-cycle system with novel bottoming cycle. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 1984. Vol. 106. P. 737–742.

18. Moran M. J., Shapiro H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Hoboken: Wiley, 2014. 800 p.

19. International Energy Outlook 2013: веб – сайт. URL: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2013).pdf) (дата звернення 10.09.2025).

20. Lion S., Vlaskos I., Taccani R. A Review of Emissions Reduction Technologies

for Low and Medium Speed Marine Diesel Engines and Their Potential for Waste Heat Recovery. *Energy Conversion and Management*. 2020. Vol. 207. Article 112553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112553>.

21. Wang X., Shu G., Tian H., Wang R., Cai J. Dynamic Performance Comparison of Different Cascade Waste Heat Recovery Systems for Internal Combustion Engine in Combined Cooling, Heating and Power. *Applied Energy*. 2020. Vol. 260. Article 114245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114245>.

22. Heywood J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill, 1988. 930 p.

23. Miller T., Durlik I., Kostek E., Kozlovska P., Jakubowski A., Lobodzińska A. Waste Heat Utilization in Marine Energy Systems for Enhanced Efficiency. *Energies*. 2024. Vol. 17. Article 5653. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17225653>.

24. Кузнецов Г. В. Математична модель теплоакумуючої системи у складі енергетичної установки надводного корабля. *Збірник наукових праць НУК*. 2023. №1 (490). С. 128–134. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2023.1\(490\).16](https://doi.org/10.15589/znp2023.1(490).16).

25. Трифонов Д. М. Використання теплового акумулятора фазового переходу для забезпечення пуску холодного двигуна та його прогрівання за рахунок поліпшення сумішоутворення. *Збірник наукових праць. Серія: галузеве машинобудування, будівництво*. 2015. Вип. 3 (45). С. 18–27.

26. Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А., Ключева О. О. Дослідження роботи теплового акумулятора системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згоряння. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2020. т. 42, №3. С. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2020.9>.

27. Грицук І. В., Адров Д. С., Прилепський Ю. В., Дорошко В. І., Щипак Є. В., Строков М. М. Використання безпаливної енергетичної установки на основі багатосекційного теплового акумулятору фазового переходу для прогріву дизель-поїзду Д1. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2013. №29. С. 123–135.

28. Грицук І. В. Формування вимог і показників ефективності теплових акумуляторів фазового переходу у складі комплексної системи комбінованого прогріву двигуна і транспортного засобу. *Вісник Донецької академії*

автомобільного транспорту. 2014. № 3. С. 58–66.

29. Vasiliev L. L., Burak V. S., Kulakov A. G., Mishkinis D. A., Bohan P. V. Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine. *Applied Thermal Engineering*. 2000. Vol. 20, issue 10. P. 913–923.

30. Вербовський В. С. Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових двигунів акумульованою енергією: дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: 05.05.03 / Український державний університет залізничного транспорту. Київ, 2021. 268 с.

31. Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Вербовський В. С., Вольська О. М., Вербовський О. В., Сімагін А. Ф. 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, 2019. С. 108–121.

32. Вербовський В. С. Оцінка доцільності застосування системи теплової підготовки стаціонарного газового двигуна на основі акумульованої енергії. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 10-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 2019. С. 93–95.

33. Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Худяков І. В., Білай А. В. Теплова підготовка суднового двигуна за допомогою теплового акумулятора фазового переходу. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТОО-2021*: матеріали 12-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 2021. С. 128–131.

34. Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Булгаков М. П., Худяков І. В. Теплова підготовка дизельного двигуна енергетичної установки судна портового флоту. Матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ навчально-наукового інституту морського флоту Одеського Національного Морського Університету «МРР&О». Одеса, 2020. С. 281–287.

35. Грицук І. В., Погорлецький Д. С., Худяков І. В., Дзигар А. К., Волков

В. В. Теплова підготовка двигуна енергетичної установки судна портового флоту. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту (ДІ НУ«ОМА» - 2020). Ізмаїл, 2020. С. 29–33.

36. KOTUG's New Zero-Emission Heat Recycling System: веб-сайт. URL: <https://maritime-executive.com/corporate/kotugs-new-zero-emission-heat-recycling-system> (дата звернення: 28.10.2025).

37. Damen ASD Tug 2810 Hybrid. URL: <https://joules-project.eu/Joules/resources/Damen%20ASD%20Tug%202810.pdf> (дата звернення: 30.10.2025).

38. Damen ASD Tug 2810 Hybrid. Presentation. URL: <https://www.scribd.com/document/596551977/Presentation-Damen-ASD-Tug-2810-Hybrid> (дата звернення: 01.11.2025).

39. U27-36XP. Group 27, 36 Volt 50 Ah Lithium Ion Battery Module. Technical Datasheet. URL: https://cdn.prod.website-files.com/66ffb64a823d61cba7cd072e/689c0c48592795e01e83ae5e_Valence-U27-36XP-Data-Sheet-220601.pdf (дата звернення: 01.11.2025).

40. Варшамов А. В., Голеншин В. В., Харитонов М. Ю. Вибір перспективних схем теплоакumuлюючих систем передпускового прогріву двигунів внутрішнього згоряння. *Наукові праці. Техногенна безпека. Радіобіологія*. 2016. Вип. 268, том 280. С. 21–27.

41. Голеншин В. В., Шалухін А. В., Варшамов А. В. Експериментальні дослідження температурного стану обладнання та корпусних конструкцій у машинному відділенні малотоннажного судна. *Вісник Інженерної академії України*. 2011. № 2. С. 159–162.

42. Голеншин В. В., Шалухін В. І., Варшамов А. В. Експериментальні дослідження температурного стану обладнання та корпусних конструкцій у машинному відділенні малотоннажного судна. *Вісник Інженерної академії України*. 2011. №2. С. 159–162.

43. Голеншин В. В., Харитонов Ю. М., Варшамов А. В., Шалухін В. І.

Параметри капсульованого теплового акумулятора систем передпускового прогріву ДВЗ. *Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення*: матеріали другої науково-технічної конференції. Первомайськ: ППІ НУК, 2007.

44. Dincer I., Rosen M. A. Thermal energy storage: systems and applications. 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2021. 704 p.

45. Sharma A., Tyagi V. V., Chen C. R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13, No. 2. P. 318–345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.

46. Verma J., Kumar D. Recent developments in energy storage systems for marine environment. *Materials Advances*. 2021. Vol. 2. P. 6800–6815.

47. Akbarzadeh S., et al. Cost assessment of battery hybrid energy storage for full electric marine applications. SEABAT H2020 Project Report. 2022.

48. Singh D. V., Pedersen E. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 111. P. 315–328. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2015.12.073>.

49. Farid M. M., Khudhair A. M., Razack S. A. K., Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*. 2004. Vol. 45. No. 9–10. P. 1597–1615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>.

50. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.364>.

51. Frazzica A., Manzan M., Palomba V., Brancato V., Freni A., Pezzi A., M. Vaglieco B. Experimental Validation and Numerical Simulation of a Hybrid Sensible-Latent Thermal Energy Storage for Hot Water Provision on Ships. *Energies*. 2022. Vol. 15. 2596. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15072596>.

52. Ametta M., Sapienza A. and Vasta S. 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 (дата звернення:

10.12.2025).

53. Manzana M., Pezzia A., Zandegiacomo de Zorzia E., Frenib A., Frazzicac A., Vagliecod B. M., Lucioe Z., Claudioe D. Potential of thermal storage for hot potable water distribution in cruise ships. *Energy Procedia*. 2018. Vol. 148. P. 1105–1112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.044>.

54. Ciappia L., Niknamb P., Fisherc R., Sciacovellid A. Application of flat plate latent heat thermal energy storage for waste heat recovery and energy flexibility in maritime sector. 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Las Palmas De Gran Canaria, 2023. P. 2342–2353.

55. Nawfal Z. M., Nagentra R. T., Vishnu G. and Silaipillayarputhur K. Design of Thermal Energy Storage System. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 455. 02011.

56. Virtanen J. Thermal energy storage for cruise ship's cooling system. System design and operating principles. Master's thesis. Tampere, 2024. 109 p.

57. Thermal storage and heat pumps: a step towards zero-emission cruise ships: веб-сайт. URL: <https://blog.sintef.com/ocean/thermal-storage-and-heat-pumps-a-step-towards-zero-emission-cruise-ships/> (дата звернення: 01.12.2025).

58. Catapano F., Frazzica A., Freni A., Manzan M., Micheli D., Palomba V., Sementa P., Vaglieco B.M. Development and experimental testing of a waste-heat recovery system for naval applications. *Applied Energy*. 2022. Vol. 311. 118673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118673>.

59. Revisiting Thermal Energy Storage for Vessel Propulsion: веб-сайт. URL: <https://maritime-executive.com/editorials/revisiting-thermal-energy-storage-for-vessel-propulsion> (дата звернення: 01.12.2025).

60. Kosztyła T., Tutaj J. An application of the heat accumulator and improvement of the dc-dc converter for hybrid-electric vehicles. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2016. Vol. 23. No. 3. P. 263–270. DOI: <https://doi.org/10.5604/12314005.1216492>.

61. Sun W., Hong Y., Wang Y. Operation Optimization of Steam Accumulators as Thermal Energy Storage and Buffer Units. *Energies*. 2017. Vol. 10(1). 17. DOI:

<https://doi.org/10.3390/en10010017>.

62. Gil A., Medrano M., Martorell I., Lázaro A., Dolado P., Zalba B., Cabeza L. F. State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1: Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. P. 31–55. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2009.07.035>.

63. Brancato V., Fotia¹ A., Palomba V., La Rosa D., Costa F., Frazzica A. Investigation on a thermal energy storage system to maximize the use of vessels' waste heat in port and during hoteling operations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2024. Vol. 2893. 012021. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2893/1/012021>.

64. Agyenima F., Hewitta N., Eames^b Ph., Smytha M. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14. P. 615–628. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.015>.

65. Elarem R., Alqahtani T., Mellouli S., Askri F., Edacherian A., Vineet T., Badruddin I. A., Abdelmajid J. A comprehensive review of heat transfer intensification methods for latent heat storage units. *Energy Storage*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/est2.127>.

66. Zalba B., Marín J. M., Cabeza L. F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. P. 251–283. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8).

67. Pandiyarajana V., Chinna Pandian^b M., Malana E., Velraja R., Seeniraj R. V. Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system. *Applied Energy*. 2011. 88. P. 77–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.023>.

68. Raja S. P., Rajavel R., Navaneethakrishnan D. 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*. 2014. Vol. 3. Spec. Is. 3. P. 2663–2670.

69. Wilson John M. R., Singh A. K., Singh A. K. and Subramanian Ganapathy

L. R. Waste heat recovery from diesel engine using custom designed heat exchanger and thermal storage system with nanoenhanced phase change material. *Thermal science*. 2017. Vol. 21. №1B. P. 715–727. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI160426264W>.

70. Subramanian S. P., Pandiyarajan V., Velraj R. Experimental Analysis of a PCM Based I.C. Engine Exhaust Waste Heat Recovery System. *International Energy Journal*. 2004. Vol. 5. №2. P. 81–92.

71. Rathod A. C., Bandela C. V., Rehman A. R. Experimental Study on Phase Change Material based Thermal Energy Storage System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 04. Is. 11. P. 1833–1838.

72. Корінчевська Т. В. Теплофізичні властивості теплоакумуючих матеріалів з фазовим переходом на основі органічних сполук: дис. канд. техн. наук: 05.14.06 / Національна академія наук України: Інститут технічної теплофізики. Київ, 2017. 211 с.

73. Tay N.H.S., Belusko M., Bruno F. Experimental investigation of tubes in a phase change thermal energy storage system. *Applied Energy*. (2012). 90(1). P. 288–297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.026>.

74. Agyenim F., Eames P., Smyth M. Heat transfer enhancement in medium temperature thermal energy storage system using a multitube heat transfer array. *Renewable Energy*. 2010. 35(1). P. 198–207.

75. Nallusamy N., Sampath S., Velraj R. 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*. 2006. 7(8). P. 1422–1430. DOI: <https://doi.org/10.1631/jzus.2006.A1422>.

76. Medrano M., Yilmaz M. O., Nogués M., Martorell I., Roca J., Cabeza L. F. Experimental evaluation of commercial heat exchangers for use as PCM thermal storage systems. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86(10). P. 2047–2055. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.014>.

77. Park S., Woo S., Shon J., Lee K. Experimental study on heat storage system using phase-change material in a diesel engine. *Energy*. 2017. 119. P. 1108–1118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.063>.

78. Харитонов Ю. М., Голеншин В. В., Варшамов А. В. Суднові теплоакумуючі комплекси. *Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні*: зб. матеріалів VII Міжнародної науково-технічної конференції. Миколаїв, 2012.

79. Адров Д. С., Грицук І. В., Прилепський Ю. В., Дорошко В. І. Тепловий акумулятор як засіб підвищення ефективності пуску стаціонарного двигуна в умовах низьких температур. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2011. №27. С. 117–125.

80. Волков В. П., Грицук І. В., Гутаревич Ю. Ф., Александров В. Д. та ін. Системи прогріву двигунів внутрішнього згорання: основи функціонування: монографія. Донецьк: ЛАНДОН-XXI, 2015. 311 с.

81. Грицук І. В. Формування і дослідження комплексної системи комбінованого прогріву двигуна і транспортного засобу. *Вестник ХНАДУ*. 2015. Вип. 70. С. 23–32.

82. Удосконалення теплової підготовки і покращення паливної економічності та екологічних показників двигуна суднової енергетичної установки застосуванням системи теплової підготовки. URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2018/03/Thermal-Preparation-System.pdf> (дата звернення: 10.12.2025).

83. Patankar S. V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.

84. COMSOL Multiphysics Reference Manual. Version 4.4. Burlington: COMSOL AB, 2013.

85. Alawadhi E., Amon C.H. PCM thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2003. Vol. 26. No. 1. P. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2003.811480>.

86. Кузнецов Г. В. Вибір матеріалу для теплоакумуючих систем енергетичних установок суден на основі інтегральних критеріїв. *Розвиток транспорту*. 2026. № 2(29). С.

87. Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М. Експериментальні дослідження

характеристик моделі шумоглушника-теплового акумулятора для суднових енергетичних установок. *Суднобудування та Морська інфраструктура*. 2026. №1(22). С. 93–104. DOI: [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).09](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).09).

88. Кузнецов Г. В. Эффективность использования теплоаккумулирующих систем в составе энергетической установки надводных кораблей та суден. *Збірник наукових праць НУК*. 2026. №1 (504). С. 171–179. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2026.1\(503\).1.20](https://doi.org/10.15589/znp2026.1(503).1.20).

89. RESOLUTION MEPC.308(73) (adopted on 26 October 2018). 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships. URL: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf#:~:text=EEDI%20values%20for%20containerships%20are%20calculated%20as,70%25%20deadweight%20as:%20.3%20parameters%20a%20and](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf#:~:text=EEDI%20values%20for%20containerships%20are%20calculated%20as,70%25%20deadweight%20as:%20.3%20parameters%20a%20and) (дата звернення: 20.02.2026).

90. Solidification and Melting: веб-сайт. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th_chp_melt_freeze.html (дата звернення: 10.12.2025).

91. Technical reference SolidWorks Flow Simulation 2021. URL: <https://www.cati.com/wp-content/uploads/2021/04/swflow2021-technical-reference.pdf> (дата звернення: 10.12.2025).

92. Zienkiewicz O., Taylor R., Zhu J. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. 7th ed., Butterworth-Heinemann, 2013. 802 p.

93. Кузнецов Г. В., Харитонов Ю. М. Эффективность использования теплоаккумулирующих систем у составе энергетических установок судов различного назначения. *Развиток транспорта*. 2025. № 1(24). С. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2025.1-24.02>.

94. Significant Ships of 2018. A Publication of the Royal Institution of Naval Architects. URL: <https://rina.org.uk/publications/significant-ships/> (дата звернення: 15.12.2025).

95. Significant Ships of 2019. A Publication of the Royal Institution of Naval

Architects. URL: <http://www.snc.ro/upload/20200201significatships2019small-1599829039.pdf> (дата звернення: 15.12.2025).

96. Behrens H. Hybrid Propulsion Solutions for ships. Siemens Energy. 2022. URL: https://www.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/dossiers/siemens_energy_marine.pdf (дата звернення: 15.12.2025).

97. Ocean Cruises: веб-сайт. URL: <https://travel.saga.co.uk/cruises/ocean/our-ships/spirit-of-discovery.aspx> (дата звернення: 18.12.2025).

98. MAN L32/44 GenSet. Project Guide – Marine. Four-stroke diesel engine compliant with IMO Tier III. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/projectguidesde_projectguidesde_files/man-l32-44-genset-imo-tier-iii-marine.pdf?sfvrsn=9e0eb17a_1 (дата звернення: 18.12.2025).

99. S60ME-C10.5-GI. Technical Documentation. Project guide. URL: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/S60ME-C10_5-GI.pdf (дата звернення: 18.12.2025).

100. G60ME-C9.5-GIE. Technical Documentation. Project guide. URL: https://man-es.com/applications/projectguides/2stroke/content/printed/G60ME-C9_5-GIE.pdf (дата звернення: 18.12.2025).

101. Kenisarin M. M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. №14. P. 955–970.

102. CATERPILLAR. PERFORMACE DATA for CAT C18. URL: https://st.mascus.com/images/productimages/704C1C53/att_Caterpillar%20C18%20Performance%20Data.pdf (дата звернення: 18.12.2025).

103. CAT C4.4. Performance data. URL: <https://www.avesco-cat.com/fileadmin/unsorted/DE90E3S.pdf> (дата звернення: 28.12.2025).

104. MTU 16V4000M93 series Manuals: веб-сайт. URL: <https://www.manualslib.com/products/Mtu-16v4000m93-Series-10341045.html> (дата звернення: 18.12.2025).

105. Каталог продукції «Зоря»-«Машпроект».

106. C7.1. Marine generator set package: general engine specifications. URL:

<https://www.avesco-cat.com/fileadmin/unsorted/DE220E0.pdf> (дата звернення: 18.12.2025).

107. C280-12. Marine propulsion. URL: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/LEHM7106-01> (дата звернення: 18.12.2025).

108. CAT C32. Marine auxiliary/Generator set. URL: <https://ws.toromont.ca/DMS/api/File/0x01000000BA110A0CE7BF20B34847D6118D7832EDA45C7D6E72E28355> (дата звернення: 18.12.2025).

109. CAT C280. EPA TIER2/IMO II. ENGINE FAMILY. Marine Project Guide.

110. ДЕРЖАВНІ САНІТАРНІ ПРАВИЛА ДЛЯ МОРСЬКИХ СУДЕН УКРАЇНИ ДСП 7.7.4.-057-2000. ЗАТВЕРДЖЕНО Постанова Головного державного санітарного лікаря України 20.12.2000 N 57. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/MOZ2945> (дата звернення: 28.12.2024).

111. Reciprocating Engine Heat Recovery Silencers MFT. URL: <https://maximsilencers.com/silencers/heat-recovery-silencers/reciprocating-engine-heat-recovery-silencers-mft/> (дата звернення: 28.12.2024).

112. Gil A., Barreneche C., Moreno P., Solé C., Fernández A. I., F. Cabeza L. 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*. 2013. Vol. 111. P. 1107 –1113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.081>.

113. Карнаух Т. О., Ставровський А. Б. Теорія графів у задачах. URL: <https://studfile.net/preview/5768773/> (дата звернення: 28.12.2024).

114. Rules for classification: Naval vessels. Propulsion plants. Pt3Ch2. 2015. URL: <https://www.dnv.com/rules-standards/> (дата звернення: 28.12.2024).

115. Shipbuilding Market: Current Analysis and Forecast (2022-2030): веб-сайт. URL: <https://univdatos.com/reports/shipbuilding-market> (дата звернення: 10.01.2026).

116. C18 ACERT. Marine propulsion 651 bkW (873 bhp) Specifications. URL: <https://ws.toromont.ca/DMS/api/File/0x0100000065E252432035CAFD6CE574916C11BEA9924C9000F9D88DAF> (дата звернення 01.05.2026).

117. Marine & Offshore. Solution guide. URL: <https://penskeanz.com/wp->

content/uploads/2023/07/16120032_16120032_MTU_SolutionGuide_Marine_00.pdf

(дата звернення 01.05.2026).

118. C280-12 Propulsion Engine. Marine. URL:
https://emc.cat.com/pubdirect.ashx?media_string_id=MSS-MAR-18394026-008.pdf

(дата звернення 01.05.2026).

119. C280-16 Marine Propulsion. URL:
<https://pdf.nauticexpo.com/pdf/caterpillar-marine-power-systems/cat-c280-16-spec-sheets/19997-52933.html> (дата звернення 01.05.2026).

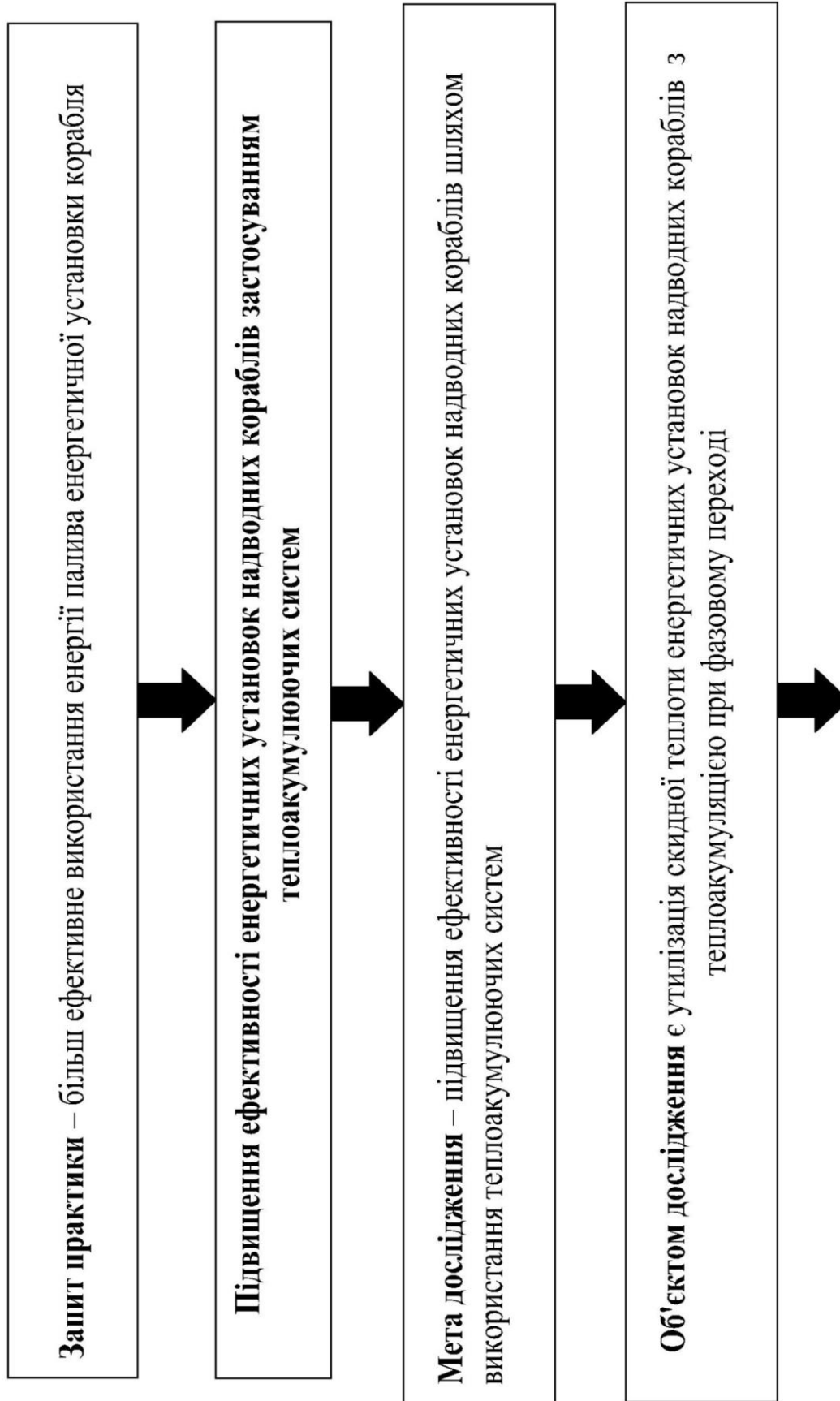
120. C18 Marine Engine. Maintenance Intervals. URL:
<https://www.jimmyrogersyachtbroker.com/wp-content/uploads/2015/02/CAT-C-18-Marine-Maintenance-Schedule.pdf> (дата звернення 01.05.2026).

121. PRESS RELEASE Commercial Marine Rolls-Royce extends TBO intervals of MTU Series 4000 engines for commercial marine application: веб-сайт. URL:
<https://www.mtu-solutions.com/na/en/pressreleases/2021/rolls-royce-extends-tbo-intervals-of-mtu-series-4000-engines-for.html#:~:text=Rolls-Royce%20extends%20TBO%20intervals,engines%20for%20commercial%20marine%20application> (дата звернення 01.05.2026).

122. Caterpillar. C280 Marine Project Guide EPA Marine Tier 2 / IMO Tier II Compliant. Caterpillar Inc. 52 p.

123. Регістр судноплавства України. Правила класифікації та побудови морських суден. 2020, Том 3. URL: https://ur.ua/wp-content/uploads/2022/09/PCBSSt3_2020.pdf (дата звернення: 10.05.2026).

ДОДАТКИ



Робоча гіпотеза дослідження – підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів при застосуванні теплоакumuлюючої системи у складі енергетичної установи досягається застосуванням теплоакumuляторів, вбудованих у наявні системи корабля, із теплоакumuлюючими матеріалами, обраними з урахуванням сукупності їх характеристик: теплофізичних – температури плавлення, питомої масової теплоємності, питомої теплоти фазового переходу, густини та коефіцієнта теплопровідності; конструктивних – товщини шару та експлуатаційних – часів стоянки та ходу відповідно до експлуатаційного циклу



Наукові результати	
Задачі наукового дослідження 1. Аналіз сучасних методів організації процесів утилізації теплоти в корабельних енергетичних установках з можливим використанням теплоакumuлюючої системи	Визначено, що: - за результатами експлуатації корабельних та суднових енергетичних установок, близько 30-40% енергії первинних енергоресурсів використовується на її потреби та скіпажу, решту енергії близько 40-50% складають вторинні енергоресурси різних температурних рівнів, а близько 20% становлять безповоротні втрати; - забезпечення вимог IMO спрямованих на зниження витрат палива, обмеження викидів парникових газів та підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок можливо споживанням теплових викидів з температурами нижче за 300 °С, що становлять 89% від загального обсягу, за рахунок ефективних технологій для задоволення потреб споживачів; - одним з напрямів споживання низькопотенційних теплових викидів різних теплофізичних джерел є послідовна утилізація, акumuляція, збереження та споживання теплоти ефективними засобами інтегрованими в склад систем енергетичних установок.
2. Обґрунтування та вдосконалення математичної моделі процесів комплексної акumuляції теплоти різних джерел в гібридних теплоакumuлюючих системах урахуванням впливу теплофізичних властивостей теплоакumuлюючого матеріалу на процеси фазових переходів та особливостей теплопередачі в умовах їх взаємодії з потоками зовнішніх теплоносіїв в теплоакumuлюючих пристроях	Розроблена математична модель процесів енергетичної установи з теплоакumuлюючою системою, що враховує особливості використання в складі корабельної енергетичної установи різних теплових двигунів, її структуру і умови експлуатації та дозволяє оптимізувати: - структуру теплоакumuлюючої системи з урахуванням споживання на загальнокорабельні потреби; перспективні напрямки та обсяги можливих теплових потоків від елементів корабельної енергетичної установи 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 зарядки, збереження та розрядки теплоакumuлюючої системи з урахуванням відбору на загальнокорабельні потреби. Обґрунтовано напрям підвищення ефективності теплоакumuлюючих систем з урахуванням температурного потенціалу різних джерел скидної теплоти на процеси її акumuляції, умов збереження і використання в різних експлуатаційних циклах енергетичних установок надводних кораблів шляхом узгодження - часового-енергетичного еквіваленту, ефективності використання теплоакumuлюючої системи, її якості та теплової ефективності, вплив яких залежить від технічних обмежень за конструктивними та експлуатаційними показниками.

3. Експериментальне дослідження енергетичних характеристик моделі шумоглушника-теплоаккумулятора фазового переходу з верифікацією запропонованої математичної моделі	Підтверджено результатами експериментальних досліджень дизельного двигуна з моделлю шумоглушника-теплоаккумулятора достовірність результатів математичного моделювання процесів акумулювання теплоти експериментального зразка, а отримана залежність безрозмірної температури від чисел Бю та Фур'є для нестационарної теплопровідності дає можливість раціонального їх використання при розробці повнорозмірного устаткування
4. Визначення характеристик теплоакуюлюючих систем для енергетичних установок кораблів різних класів та суден з розробкою практичних рекомендацій щодо їх впровадження	У результаті виконаних наукових досліджень отримав подальший розвиток напрям створення інноваційного обладнання суднових енергетичних установок на основі акумуляції скінної теплоти процесами з фазовим переходом та розробки їх багаторівневої моделі у вигляді об'єктно-орієнтованих взаємопов'язаних процедур "Головний двигун", "Допоміжний двигун" та "Теплоакуюлююча система з ієрархічними рівнями": теплопередавальна поверхня теплоакуюлюючого теплоакуюлюючого як елемент підсистеми та теплоакуюлююча система, як елемент енергетичної установки, реалізація яких забезпечує економію палива за рахунок оптимізації вибору теплоакуюлюючих матеріалів та шумоглушників-теплоакуюлюючів у складі раціональних схемних рішень теплоакуюлюючих систем і як наслідок поліпшення ефективності цих систем та техніко-економічних показників установок в цілому для кораблів відповідно на 14-24%, а забезпечення споживачів судна акумульованою теплою дозволяє зменшити витрату палива допоміжних котлів від 5 до 64% в залежності від складу СЕУ та призначення судна, а також забезпечити зниження значень індексу енергоефективності проєкту судна у середньому до 2%. Метами фізичного та математичного моделювання термодинамічних процесів обґрунтовано підвищення ефективності та працездатності шумоглушників-теплоакуюлюючів, та як наслідок поліпшення техніко-економічних показників двигунів та енергетичних установок за рахунок зменшення аеродинамічного опору та рівня шуму завдяки зниженню його температури при теплообміні. Конструктивна схема шумоглушника-теплоакуюлюючого, схемні рішення теплоакуюлюючих систем простого та гібридного складів з рекомендаціями щодо їх застосування у складі енергетичних установок надводних кораблів, що проєктуються та модернізуються, дозволяють комплексно підвищити ефективність збереження енергетичних та матеріальних ресурсів при забезпеченні загальнокорабельних потреб

ДОДАТОК В. Документи щодо впровадження результатів роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор-генеральний конструктор
ТОВ «Дослідно-проектний центр
кораблебудування»



Вадим БОРИСОВ

04 05 2026 р.

Акт про використання

результатів дисертаційного дослідження Кузнецова Г.В.
«Підвищення ефективності енергетичної установки надводних кораблів
застосуванням теплоакumuлюючих систем»

Результати досліджень способів акумуляції скидної теплоти з застосуванням фазових переходів, запропоновані конструктивна схема шумоглушника-теплоакumuлятора, схемні рішення простих та гібридних теплоакumuлюючих систем з рекомендаціями щодо їх застосування у складі енергетичних установок надводних кораблів дозволяють забезпечити економію палива, з урахуванням раціонального вибору теплоакumuлюючих матеріалів та, як наслідок, поліпшити ефективність та техніко-економічні показники установок в цілому.

У сукупності з результатами науково-дослідної роботи 0126U000045 «Ефективність застосування теплоакumuлюючих систем в складі енергетичної установки надводних кораблів», яка виконана в ТОВ «ДПЦК», результати дисертаційного дослідження можуть бути використані для обґрунтування проєктних рішень при створенні нових корабельних енергетичних установок.

Начальник механічного
відділу, канд. техн. наук

Андрій ВОЛОШИН



SHIP DESIGN

Вина №4/5 від 18.03.2026р.

Zaliv Ship Design, LLC

www.zalivdesign.com

info@zalivdesign.com

Mala Morska str. 108/5, office 402

Mykolaiv, Ukraine, 54002

tel.: +380 512 76 54 00, fax: +380 512 76 50 03

АКТ ВИКОРИСТАННЯ

результатів дисертаційного дослідження Кузнецова Г.В.

“Підвищення ефективності енергетичних установок надводних кораблів
застосуванням теплоакумуючих систем”

Результати дисертаційного дослідження, що виконані в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова та присвячені розробці способів та засобів теплоакумуючих систем з фазовим переходом використовувалися при обґрунтуванні проєктних рішень суднових енергетичних установок.

Конструктивна схема шумоглушника-теплоаккумулятора, схемні рішення теплоакумуючих систем з рекомендаціями щодо їх застосування у складі енергетичних установок мають практичний інтерес та можуть використовуватися при проєктуванні суднових енергетичних установок, їх систем та елементів перспективних суден.

Директор ТОВ “Залів Шіп Дизайн”



Приходько В.К.

Zaliv Ship Design, LLC

Mala Morska str 108/5, office 402, Mykolaiv, Ukraine, 54001, tel.: +38 (0512) 765400, fax: +38 (0512) 765003
e-mail: info@zalivdesign.com Website: www.zalivdesign.com



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА**

54007, м. Миколаїв, пр. Героїв України 9, тел./факс +38(0512) 42-42-80, e-mail: university@nuos.edu.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ



Ректор Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова

професор

Євген ТРУШЛЯКОВ

«___» _____ 2026р

АКТ

про використання

результатів дисертаційного дослідження Кузнецова Г.В.

«Підвищення ефективності енергетичних установок надводних кораблів
застосуванням теплоакумуючих систем» у навчальному процесі
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

Отримані результати дослідження використані в навчальному посібнику
Коробко В.В., Кузнецов Г.В., Шевцов А.П. «Методологія наукових досліджень
та педагогічної діяльності для університету кораблебудування», в двох частинах,
обсягом 13,5 друкованих аркушах з грифом «Рекомендовано вченою радою НУК
ім. адмірала Макарова, як навчально-методичний посібник», який
використовується в навчальному процесі аспірантами і магістрантами.

Директор Машинобудівного
навчально-наукового інституту
д.т.н., професор

Сергій СЕРБІН