

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Вербовський Валерій Степанович



УДК 621.436

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ
СТАЦІОНАРНИХ ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ АКУМУЛЬОВАНОЮ ЕНЕРГІЄЮ**

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана при кафедрі «Теплотехніка і теплові двигуни» Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
Грицук Ігор Валерійович,
професор кафедри «Експлуатації суднових енергетичних установок» Херсонської державної морської академії,
м. Херсон.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор ,
Пильов Володимир Олександрович
професор кафедри двигунів внутрішнього згоряння
Національного технічного університету «Харківський
політехнічний інститут», м. Харків;

кандидат технічних наук,
Назаренко Микола Борисович
учений секретар Державного підприємства
«ДержавтотрансНДІпроект», м.Київ.

Захист відбудеться “06” квітня 2021 р. о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.059.03 в Національному транспортному університеті за адресою: 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка, 1, ауд. 209.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного транспортного університету за адресою: 01103, м. Київ, вул. М. Бойчука, 42.

Автореферат розісланий “05” березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

С.В. Ковбасенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Енергетичні установки з газовими двигунами внутрішнього згорання (ДВЗ) стали невід'ємною частиною систем базового, пікового та резервного енергопостачання. Серед основних проблем ефективної експлуатації газових двигунів електростанцій є забезпечення гарантованого пуску холодного двигуна. Існуючі способи забезпечення теплової підготовки двигунів перед пуском є не досить ефективними, достатньо енерговитратними, такими, що потребують підводу теплової енергії від зовнішніх джерел. Натомість 60-70% енергії палива в газовому двигуні відводиться в навколишнє середовище і не завжди використовується за основними потребами. Утилізація невикористаної теплової енергії та її накопичення в теплових акумуляторах для подальшого одночасного прогріву охолоджуючої рідини та моторної оливи перед пуском двигуна системно не досліджено. У зв'язку з цим дисертаційна робота, що спрямована на вибір і обґрунтування параметрів теплової підготовки систем газового двигуна за рахунок власної теплової енергії є актуальною і багатоплановою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі «Теплотехніка і теплові двигуни» Українського державного університету залізничного транспорту у відповідності до Державної цільової економічної програми енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2015 роки, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 р. № 243, із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 587 від 14.07.2010, № 447 від 27.04.2011, № 105 від 25.01.2012. Дослідження виконувались відповідно до плану НДР «Розробка і дослідження теплового акумулятора фазового переходу і системи комбінованого прогріву на основі двигуна внутрішнього згорання K159M2 (6Ч 12/14)», номер держреєстрації 0113U003625, «Дослідження системи передпускового розігріву газового двигуна внутрішнього згорання K159M2 (6Ч 12/14)», номер держреєстрації 0113U007127 і «Розробка і дослідження теплового акумулятора фазового переходу транспортного засобу», номер держреєстрації 0119U101027.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є скорочення часу забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів за рахунок використання акумульованої теплової енергії.

Для досягнення мети в дисертації вирішувалися такі **завдання**:

1. Проведення огляду інформаційних джерел з підвищення ефективності експлуатації двигунів в низькотемпературних умовах експлуатації.

2. Розробка принципової схеми та конструкції системи теплової підготовки (СТП) з використанням акумульованої енергії моторної оливи і охолоджуючої рідини газового двигуна за рахунок теплової енергії, що не використовується на корисні потреби. Розробка методики проведення досліджень та оцінювання ефективності прийнятих рішень. Проведення теоретичних досліджень на удосконаленій математичній моделі для СТП газового двигуна.

3. Проведення експериментальних досліджень СТП для отримання залежностей необхідних для удосконалення математичної моделі.

4. Розробка методу забезпечення раціональної теплової підготовки двигуна на основі СТП у варіанті його застосування за багатоцільовим призначенням. Аналіз результатів розрахунків на математичній моделі варіантів використання СТП та її підсистем.

5. Розробка практичних рекомендацій щодо формування СТП на основі теплових акумуляторів (ТА) фазового переходу в умовах експлуатації.

Об'єкт дослідження – процес забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів в умовах експлуатації.

Предмет дослідження – забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів використанням акумульованої енергії в умовах експлуатації і методів їх реалізації.

Методи дослідження - в процесі виконання дисертаційного дослідження використовувались: фундаментальні положення теорії ДВЗ, горіння, теплообміну, тепломасопереносу, зокрема: математичне моделювання фізичних процесів в системах мащення і охолодження, оснащених елементами СТП; численні дослідження характеристик двигуна в процесах передпускового і післяпускового прогріву і зберігання двигуна при різних температурах оточуючого середовища, експериментальні характеристики СТП і її складових, газового двигуна і параметрів його теплового стану; емпіричний аналіз результатів дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів: полягає в узагальненні та розвитку існуючих сучасних технологій теплової підготовки двигунів внутрішнього згорання на основі теплових акумуляторів фазового переходу, що дозволило вирішити актуальну наукову задачу удосконалення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів за рахунок використання акумульованої теплової енергії в умовах експлуатації.

Вперше:

- запропоновано метод забезпечення раціональної теплової підготовки стаціонарного газового двигуна на основі СТП у варіантах його застосування за багатоцільовим призначенням, що відрізняється від існуючих урахуванням особливостей теплової підготовки двигуна в залежності від використання за цільовим призначення;

- створено загальний метод отримання, обробки і дослідження результатів і залежностей часу прогріву від елементів СТП в різних комбінаціях її функціонування, паливної економічності та екологічних показників стаціонарного газового двигуна при застосуванні у варіантах багатоцільового призначення.

Удосконалено:

- математичну модель робочого процесу системи теплової підготовки з використанням акумульованої енергії газового двигуна в складі підсистем – контактного теплового акумулятора та накопичувача моторної оливи з тепловими акумуляторами фазового переходу, з удосконаленою підсистемою одночасного прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини, що відрізняється від існуючих здатністю забезпечувати системний прогрів двигуна з варіантами можливої взаємодії між собою.

Дістав подальший розвиток

- спосіб скорочення часу прогріву і покращення паливної економічності

стаціонарних газових двигунів в режимах передпускового і післяпускового прогріву та зберігання двигуна за рахунок використання акумульованої теплової енергії.

Практичне значення одержаних результатів роботи становить:

1. Запропоновано універсальне схемне і конструктивне рішення системи теплової підготовки з використанням акумульованої енергії газового двигуна, що не використовується на корисну роботу, та встановлено доцільність її використання.

2. Запропоновано алгоритм роботи системи теплової підготовки на основі теплових акумуляторів фазового переходу при різних температурах оточуючого середовища.

3. Запропоновано спосіб підвищення ефективності використання палива газовим двигуном на прогрів в умовах низьких температур.

Результати досліджень передані до використання в Інститут газу Національної Академії Наук України, впроваджені у виробництво в ТОВ «ЕРА».

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які викладені в дисертації ф подані до захисту, отримано здобувачем самостійно. Роботи [1, 10, 17] опубліковані без співавторів. У роботах виконаних у співавторстві, здобувачу належать: у роботі [2] - аналіз вітчизняної та закордонної літератури з метою оцінки перспектив підвищення ефективності використання палива стаціонарними і пересувними джерелами енергії; у роботі [3] – уточнення методики визначення кількості теплоти відпрацьованих газів ДВЗ в конструкції теплообмінника системи утилізації теплової енергії; у роботі [4] – уточнена методика розрахунку екологічних показників ДВЗ за циклом передпускового прогріву і пуску; у роботі [5] – уточнені особливості розігріву саме газового двигуна при використанні системи передпускового прогріву; у роботі [6] - адаптування ТА з теплоакумуючим матеріалом до роботи за розробленою методикою; у роботі [7] - алгоритм роботи ТА фазового переходу системи передпускового прогріву газового двигуна; у роботі [8 - 9] – методика розрахунку і проведене розрахункове дослідження ТА для прогріву моторної оливи газового двигуна; у роботі [11, 14, 15, 16] – схема забезпечення передпускового прогріву стаціонарного газового двигуна з використанням ТА; у роботі [12 - 13] – особливості схеми системи регулювання температури моторної оливи ДВЗ; у роботі [18] – розрахункове дослідження щодо впливу параметрів і режимів прогріву на екологічні показники ДВЗ; у роботі [19] - уточнення циклу передпускового розогріву ДВЗ при дослідженні системи комбінованого прогріву; у роботі [20] – розробка схеми і методики розрахунку показників роботи ДВЗ в процесі післяпускового прискореного прогріву; у роботі [21] – розробка схеми прогріву стаціонарного газового двигуна з використанням системи передпускового розігріву з ТА фазового переходу.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи було розкриті в доповідях, обговорені та прийняті на наступних конференціях: Міжнародному конгресі двигунобудівників, м. Рибаче-Харків, м. Кobleво – Харків, 2009, 2013-2014 р.р.; V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного

транспорту: управління, економіка і технології», Київ, ДЕТУТ, 2011; Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегия качества в промышленности и образовании», м. Варна, Болгарія, 2011р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Новітні комп'ютерні технології» - NOCOTE, м. Київ-Севастополь, 2010-2011 рр.; Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2011», м. Херсон, 2011р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы», м. Севастополь, 2013, 2014 рр.; Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології розвитку конструкції, виробництва, експлуатації, ремонту і експертизи автомобілів», м. Харків, ХНАДУ, 2014 р.; XXIV Міжнародній науковій конференції «Системи і засоби автомобільного транспорту» - SAKON, м. Жешув – Пшецлав, Польща, 2013; Міжнародній науковій конференції «Science and Education - a New Dimension», Natural and Technical Science, Budapest, Угорщина, 2013; XI Міжнародній науково-технічній конференції «Наука – образованию, производству, экономике», м. Мінськ, БНТУ, 2013р.; Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, ХДМА, 2017, 2019 р.р.; Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», Миколаїв, НУК, 2017; Міжнародній науково-практичній конференції присвяченій пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С., Одеса (Україна) – Стамбул (Туреччина) - Одеса (Україна), Одесса, ОНМУ, 2019; Всеукраїнській науково-технічній конференції науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників, м. Первомайськ в 2009, 2011, 2013 рр.; Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Транспорт і логістика», м. Донецьк, 2012 р.; Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології і мехатроніка» м. Харків, ХНАДУ, 2014; Науково-практичній конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету НТУ в 2009-2010, 2012-2014 р.р.; Міжвузівській науково-технічній конференції «Енерго- і ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування», м. Донецьк, ДонІЗТ, 2009-2013 р.р.

Публікації. Матеріали дисертаційного дослідження опубліковано в 21 науковій праці, з яких 4 у матеріалах науково-технічних конференцій і 1 монографії, 6 - у фахових виданнях України, 4 статті в іноземних виданнях, з них одна індексована в Scopus. Отримано 2 патенти України на корисну модель. Три праці видані одноосібно.

Структура і обсяг дисертації. Робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 268 сторінки, у тому числі 147 сторінок основного тексту, 51 рисунка, 19 таблиць, 5 додатків на 31 сторінці, список використаних літературних джерел з 143 найменування на 18 сторінках.

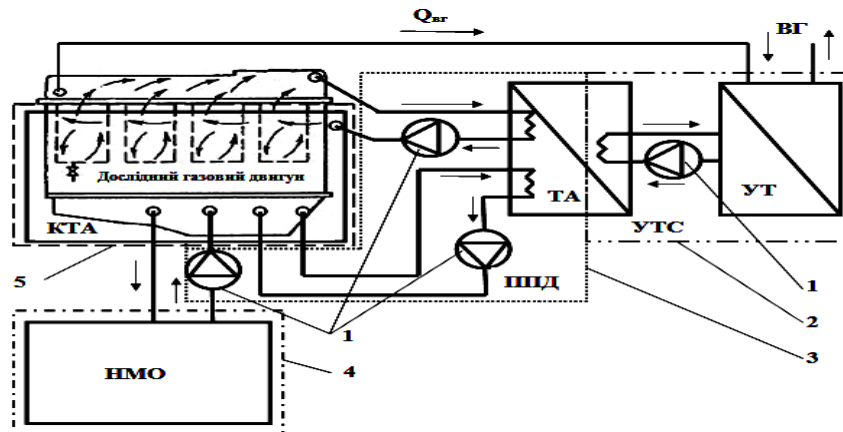
ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі розкрито сутність і стан наукової проблеми, обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, її актуальність, сформульовано мету і задачі

досліджень, а також шляхи їх вирішення.

У першому розділі виконаний огляд інформаційних джерел з підвищення ефективності експлуатації ДВЗ при низьких температурах. Проведений аналіз впливу низьких температур на час прогріву і показники роботи ДВЗ. Аналіз показав, що при холодному пуску двигуна та початку роботи, показники його роботи значно гірші ніж у прогрітого двигуна. Витрата палива і викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах (ВГ) зростають, також збільшується час підготовки ДВЗ до роботи. Для прийняття навантаження після пуску необхідно, щоб охолоджуюча рідина (ОР) та моторна олива (МО) двигуна були прогріті до температури не нижче 40-60 °С. Використання акумульованої теплової енергії ДВЗ, яка не трансформувалась в корисну роботу, дає можливість суттєво покращити експлуатаційні показники двигуна в періоди передпускового та післяпускового прогріву. Таким чином, для вирішення поставлених задач удосконалення забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів, економії палива, та покращення екологічних показників, доцільно проведення досліджень складових СТП, їх налаштувань в залежності від умов експлуатації.

Другий розділ розроблена система теплової підготовки з використанням акумульованої енергії (рис. 1), яка конструктивно входить до систем мащення і охолодження газового двигуна та виконує частину їх функцій. СТП складається з підсистем: прискореного прогріву двигуна (ППД) 3, утилізації теплової енергії відпрацьованих газів тепловим акумулятором фазового переходу (ФП) 2, контактного теплового акумулятора (КТА) 5 і накопичувача моторної оливи (НМО) 4.



1 – циркуляційні насоси; 2 – сукупність елементів утилізатора теплоти; 3 – сукупність елементів ППД; 4 – сукупність елементів НМО; 5 – сукупність елементів КТА; ВГ – відпрацьовані гази; $Q_{вг}$ – теплова енергія відпрацьованих газів; ТА – тепловий акумулятор фазового переходу; УТ – утилізаційний теплообмінник; КТА – контактний тепловий акумулятор ФП; ППД – підсистема прискореного прогріву двигуна; УТС – підсистема утилізації теплової енергії відпрацьованих газів; НМО – накопичувач моторної оливи з ТА ФП

Рисунок 1 – Принципова схема системи теплової підготовки газового двигуна у складі акумуляторів теплоти

Розроблена структура удосконаленої методики розрахунку і оцінки впливу прийнятих конструктивних рішень і температури оточуючого середовища на енергетичні, економічні та екологічні показники газового двигуна в процесі здійснення теплової підготовки за допомогою СТП. Розроблена методика і

враховані особливості спільного використання елементів і підсистем СТП при виконанні передпускового, післяпускового прогріву.

Для здійснення розрахунку і аналізу показників роботи газового двигуна з СТП при виконанні теплової підготовки була удосконалена відповідна методика розрахунку, яка детально описує процес прогріву газового ДВЗ при її використанні. Результатами розрахунку в представленій методиці є паливно-економічні і екологічні показники роботи досліджуваного газового двигуна з СТП при здійсненні теплової підготовки в частині передпускового та післяпускового прогріву. На рис. 2 представлена укрупнена структурна схема удосконаленої методики розрахунку СТП газового двигуна 6Ч 12/14 в процесі здійснення теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву для МО і ОР при поєднанні основних системних об'єктів.

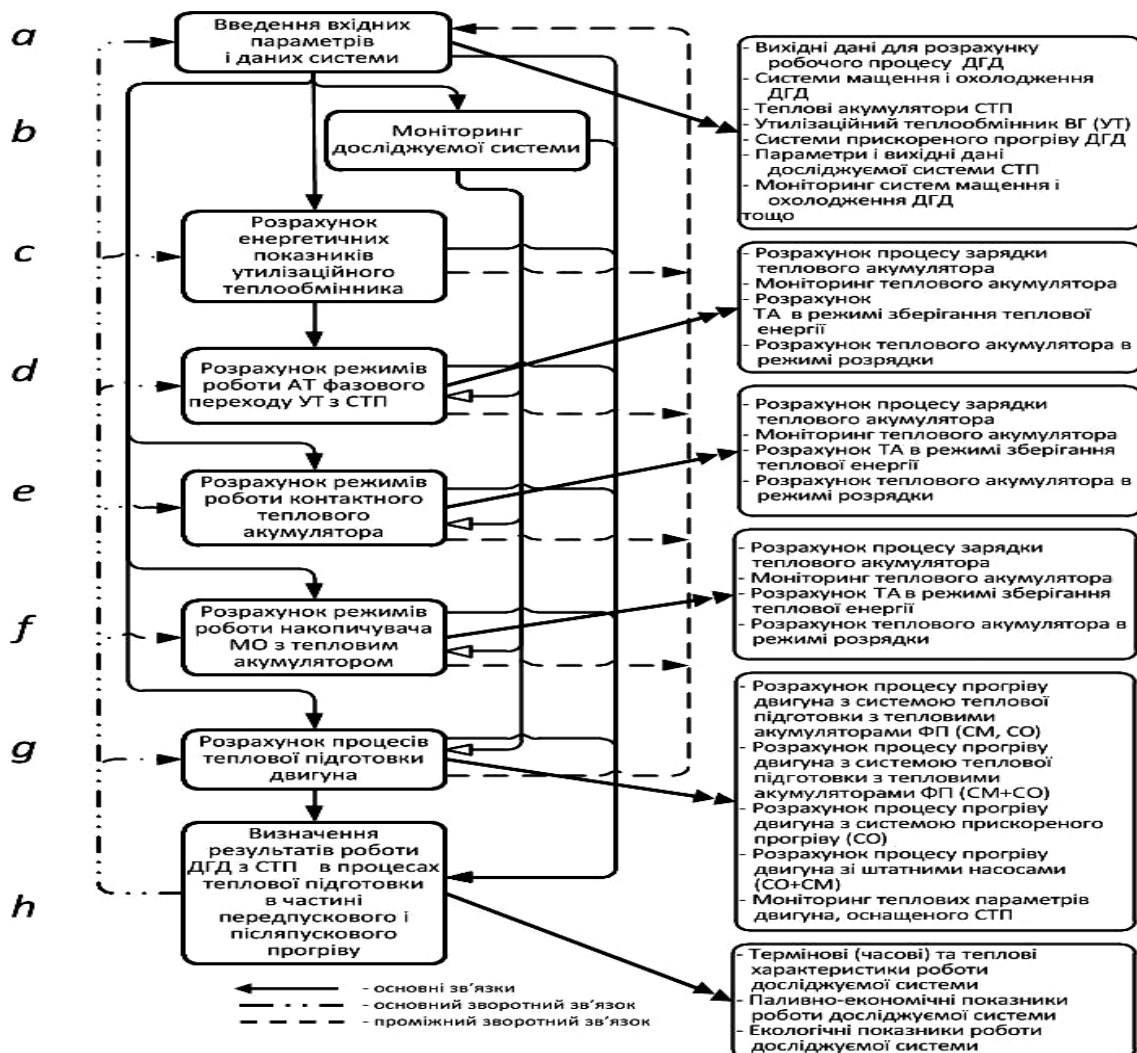


Рисунок 2 - Укрупнена структурна схема методики розрахунку СТП газового двигуна 6Ч 12/14 в процесі здійснення теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву для МО і ОР при поєднанні основних системних об'єктів

В удосконаленій методиці розрахунку процесів теплової підготовки за допомогою СТП газового двигуна виділено п'ять основних процесів, які послідовно пов'язані між собою: розрахунок ТА фазового переходу УТС (рівень d); розрахунок КТА (рівень e); розрахунок НМО (рівень f); розрахунок процесу

прогріву дослідного газового ДВЗ за варіантами використання складових СТП (рівень *g*); визначення результатів, тобто визначення термінових та теплових характеристик, паливно-економічних і екологічних показників роботи досліджуваної СТП газового двигуна (рівень *h*). Для забезпечення функціонування удосконаленої методики розрахунку процесів теплової підготовки встановлено введення вихідних даних та параметрів (рівень *a*), моніторинг двигуна з СТП (рівень *b*); розрахунок енергетичних показників утилізаційного теплообмінника (рівень *c*). Входом системи взагалі і процесу роботи СТП дослідного газового двигуна (ДГД) рівня *a* - введення основних вхідних параметрів і даних для роботи системи служать: вихідні дані щодо робочого процесу ДГД, конструктивні параметри і характеристики системи охолодження (СО) і системи мащення (СМ) дослідного газового двигуна, теплових акумуляторів, УТ, ППД, коефіцієнтів апроксимації досліджуваної системи, вихідні дані для формування моніторингу СМ і СО та досліджуваної системи СПП двигуна. Для формування бази вихідних даних можуть бути використані експериментальні дані параметрів робочого процесу ДГД, або розраховані вихідні дані, для чого можливо використати будь-який сучасний програмний комплекс розрахунку параметрів робочого процесу двигуна, в нашому випадку був використаний програмний комплекс (програма) DIESEL-RK і MATLAB 13. На виході системи утворюються продукти згорання, як сукупність великої кількості шкідливих та нешкідливих компонентів, невикористана теплова енергія ВГ, теплова енергія від СМ і СО, тощо. На основі укрупненої структурної схеми розрахунку СТП газового двигуна 6Ч 12/14 в процесі здійснення теплової підготовки розроблена удосконалена методика розрахунку процесів роботи контактного теплообмінника (КТА) і НМО. Удосконалені та адаптовані методики розрахунку ТА ФП УТ для прогріву МО та ОР. Також удосконалено методику розрахунку для оцінки впливу роботи СТП та її складових на паливну економічність, викиди шкідливих речовин з ВГ, а також час теплової підготовки - прогріву газового ДВЗ.

На виході системи утворюються продукти згорання, невикористана теплова енергія ВГ, теплова енергія від СО і СМ, тощо. За основу обрана математична модель, яка розроблена в УкрДАЗТ. Розроблені математичні моделі складових елементів СТП включають наступні основні рівняння, що показані в табл. 1. Перевірка адекватності математичної моделі шляхом порівняння розрахункових та експериментальних показників для +20 °С, показала, що максимальні відхилення значень розрахункових та експериментальних показників не перевищують 5 %.

У третьому розділі представлені результати експериментальних досліджень передпускового і післяпускового прогріву за допомогою системи теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) у складі електроагрегату. Дослідження виконані в лабораторії ІГ НАНУ (рис. 3).

Для забезпечення теплової підготовки газового двигуна розроблено цикл теплової підготовки - передпускового і післяпускового прогріву, а також алгоритм роботи СТП з підсистемами. Застосування СТП з розробленим циклом та алгоритмом теплової підготовки дозволяє істотно скоротити час прогріву двигуна до робочої температури, зменшити витрати палива та зменшити масові викиди шкідливих речовин у ВГ під час прогріву двигуна.

Експериментальні дослідження газового двигуна К-159 М2 (6Ч 12/14), оснащеного СТП, в процесах теплової підготовки показали, що:

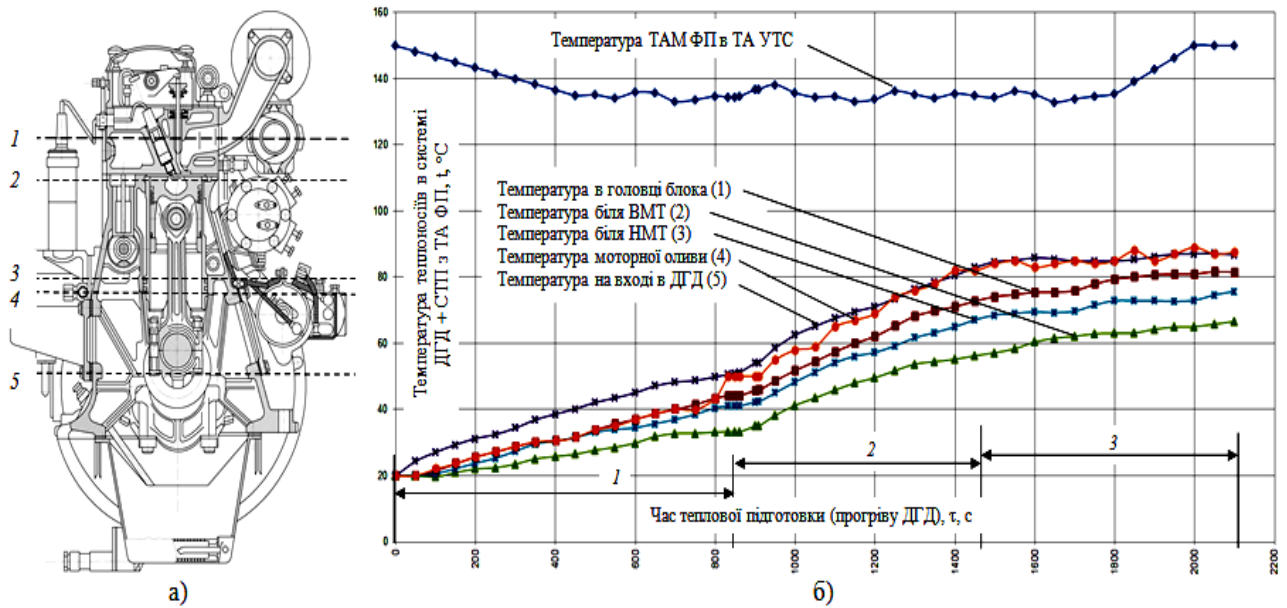
Таблиця 1 – Основні рівняння математичної моделі складових елементів СКП

Складові елементи СТП	Основні рівняння математичної моделі складових елементів СТП	№ п/п
КТА	Кількість теплоти dQ , яку втрачає маса елемента конструкції двигуна й МО з СМ в картері: $dQ = (G_o c_o + G_{дв} c_{дв}) dt_{дв}$	(1)
	Час, через який почнеться процес кристалізації ТАМ. $\tau = \frac{1}{A_1} \left\{ \ln[(t_{дв,о} - t_o) \left(1 - k_1 \frac{\delta_{пов}}{\lambda_{пов}}\right)] - \ln(t_{ТАМкр} - t_o) \right\}$	(2)
	Рівняння теплового балансу $M_{ТАМ} q_{ТАМ} = B_1 (\tau_2 - \tau_1) + B_2 \{ \exp[-A_2 (\tau_2 - \tau_1) - 1] \}$	(3)
	Загальний час теплообміну, на момент якого температура МО в картері й маси двигуна будуть дорівнюють заданому значенню $t_{дв,з}$: $\tau_3 = \tau_2 + \frac{1}{A_3} [\ln(t_{дв,2} - t_o) - \ln(t_{дв,3} - t_o)]$	(4)
НМО	Кількість теплоти dQ_1 , що передається від МО НМО в оточуюче середовище через стінку: $dQ_1 = kF(t_p - t_o) dt$	(5)
	Залежність зміни температури робочої рідини в НМО: $t_p = t_o + (t_{p0} - t_o) \exp\left(-\frac{kF}{Gc} \tau\right)$	(6)
	Час процесу теплообміну, за який температура МО з СМ в ємності знизиться до заданого рівня t_p : $\tau = \frac{Gc}{kF} [\ln(t_{p0} - t_o) - \ln(t_p - t_o)]$	(7)
	Коефіцієнт теплопередачі k : $k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{1}{\alpha_{зовн}} + \frac{\delta}{\lambda}}$	(8)

де G_o - маса оливи, кг; c_o - питома теплоємність МО з СМ, Дж/(кг·К); $G_{дв}$ - маса елемента конструкції двигуна, кг; $c_{дв}$ - питома теплоємність елемента конструкції двигуна, Дж / (кг·К); τ - поточне значення часу, с; $t_{дв}$ - поточне значення температури елемента конструкції двигуна і МО, °С; t_o - температура ОС, °С; τ_1 - поточний час процесу охолодження двигуна, С; $\delta_{пов}$ - товщина шару повітряного прошарку, мм; $\lambda_{пов}$ - коефіцієнт теплопровідності повітряного прошарку, Вт / (м·К); $t_{дво}$ - початкове значення температури елемента конструкції двигуна і МО з СМ, °С; Q - кількість теплоти, переданої від МО в оточуюче середовище за деякий інтервал часу; k - коефіцієнт теплопередачі від МО з СМ в піддоні картеру до оточуючого середовища, Вт / (м²·К); F - поверхня теплообміну, м²; k - коефіцієнт теплопередачі від МО в середині НМО в оточуюче середовище, Вт/(м²·К); F - зовнішня поверхня НМО, м²; t_p - поточне значення температури робочої рідини в НМО, °С; t_o - температура оточуючого середовища, °С; t_{p0} - початкове значення температури МО з СМ в ТН, °С; τ - інтервал часу, с; τ - поточний час, с; де G - маса МО з СМ, кг; c - питома теплоємність МО, Дж/ (кг·К); $\alpha_{вн}$ - коефіцієнт тепловіддачі від МО з СМ в ємності до стінки НМО, Вт/(м²·К); $\alpha_{зовн}$ - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні в оточуюче середовище, Вт/(м²·К); δ - товщина шару теплоізоляції, мм; λ - коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу, Вт/(м·К).

- розроблені ППД, ТА фазового переходу УТС, з поліетиленом у якості ТАМ ФП та КТА і НМО з парафіном у якості ТАМ ФП, повністю забезпечують працездатність ДГД у складі СТП при виконанні поставлених у дослідженні задач;
- час зарядки ТА фазового переходу УТС до температури 130°С складає 1850сек. або 30,8хв. при температурі теплоносія 170°С, а при температурі теплоносія 110°С – 3650сек. або 60,8хв. Зі 130°С до 20°С ТА фазового переходу СУТС

розряджається за 380сек. або 6,3хв. при швидкості теплоносія 0,22 м/сек., а при швидкості теплоносія 0,08 м/сек. - за 720 сек. або 12 хв. відповідно;



1 – теплова підготовка ДГД (прогрів) від ТА ФП підсистеми UTC СТП; 2 – запуск ДГД після виконання теплової підготовки від ТА ФП, подальша теплова підготовка при роботі ДГД в режимі х.х. (передбачена можливість навантаження ДГД); 3 – завершення теплової підготовки ДГД, початок зарядки ТА ФП

Рисунок 3 - Зміна температур теплоносіїв в системі ДГД з СТП на основі ТА фазового переходу (ТАМ ФП, моторної оливи і охолоджуючої рідини) в різних ділянках (а) дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 в процесах теплової підготовки під час повного циклу його розрядки – зарядки (б) в залежності від режимів роботи СТП в період передпускового і післяпускового прогріву при роботі за розробленим алгоритмом

- при швидкості циркуляції ОР в СО ДГД 0,08м/с, яка близька до швидкості циркуляції штатного насоса ОР газового двигуна в режимі холостого ходу, прогрів ОР в СО до 85°C відбувається за 1950с. або за 32,5хв., а у той же час, при збільшенні швидкості до 0,22м/с, яка може бути створена циркуляційним насосом з модульованою подачею СТП в режимі х.х. і, яка відповідає максимальній швидкості штатного насоса ОР газового двигуна, час прогріву до вказаної температури скорочується до 1432 с. або до 23,9 хв. При вказаних вище умовах значення температури ОР +50 °С досягається ДГД відповідно без СТП за 1370 с. (22,8 хв.) і з СТП за 1070 с. (17,8 хв.);

- збільшення швидкості циркуляції МО в СМ до 0,22 м/с з СТП забезпечує швидкий прогрів газового двигуна до 85 °С за 1525 с. (25,4 хв.) у порівнянні з прогрівом при штатній швидкості циркуляції 0,08 м/с за 2025 с. (33,8 хв), а до 50 °С, при вказаних вище умовах, досягається відповідно - з СТП за 1145 с. (19,2 хв.) у порівнянні з базовим варіантом - за 1450 с. (24,2 хв.);

- передпусковий прогрів ОР і МО одночасно за розробленим алгоритмом роботи СТП дозволяє краще прогріти зону колінчастого вала двигуна, ніж у випадку, коли передпусковий прогрів проводиться тільки для ОР;

- передпусковий прогрів ДГД без його запуску при температурі оточуючого середовища 20 °С за допомогою СТП забезпечує економію часу в процесі прогріву без запуску і прогріву в режимі х.х. двигуна до моменту можливого навантаження складає до передпускової температури 40°C (50°C / 60°C)

відповідно від 475 до 539 с або від 34 до 39% для ОР і від 544 до 635 с або від 38% до 44 % для різних температур. При цьому економія газового палива на прогрів двигуна з СТП склала відповідно від 1,678 до 1,939 м³ або 69 – 80% у порівнянні зі штатною системою, для якої витрата склала 2,424 м³, а зниження викидів у порівнянні зі штатною системою (3,1 г / 0,34 мг) склало відповідно від 2,8 до 3 г або 93 – 97% для оксидів азоту.

Дослідження спроможності СТП підтримувати накопичену теплову енергію показало, що повна розрядка дослідного ТА фазового переходу УТС здійснюється зі 150 °С до 135 °С за 57,5...36 годин при температурі оточуючого середовища +20...-20 °С, використання КТА для ОР і МО дозволяє на протязі 960 хв. зберігати теплову енергію, накопичену в КТА від газового двигуна в межах +50 °С, використання НМО для МО дозволяє на протязі 960 хв. зберігати теплову енергію МО в межах +50 °С.

Проведені дослідження свідчать про те, що газовий двигун 6Ч 12/14 при використанні СТП дозволяє більш інтенсивно і більш рівномірно за висотою корпусних деталей прогрівати дослідний ДГД, забезпечувати передпускову теплову підготовку без роботи двигуна в режимі х.х., швидкий післяпусковий прогрів до робочої температури і тривале зберігання накопиченої теплової енергії міжзмінний період. Отримані результати експериментальних досліджень стали основою для розробки удосконаленої методики розрахунку процесу теплової підготовки газового двигуна. Досліджено вплив конструктивних та регулювальних параметрів СТП на паливо-енергетичні та екологічні показники ДГД.

В четвертому розділі за допомогою розроблених математичних моделей було розраховано роботу ТА фазового переходу СТП в процесі повного циклу його розрядки – зарядки у складі дослідної системи для газового двигуна К-159 М2. В математичних моделях були враховані особливості конструкції ТА, як складової частини СО і СМ, при одночасному прогріві ОР і МО в процесі передпускового і післяпускового прогріву.

Розроблені методики і математичні моделі розрахунку роботи ТА, КТА, НМО фазового переходу СТП в процесі повного циклу їх розрядки – зарядки – зберігання теплової енергії у складі дослідної системи, як за рахунок фізичного охолодження – нагрівання, так і при здійсненні процесу кристалізації ТАМ в квазіізотермічному режимі. Для формування бази вихідних даних в математичній моделі СТП дослідного газового двигуна вихідні дані стосовно теплових параметрів при роботі ДВЗ в режимі холостого ходу були отримані за допомогою програмного комплексу Diesel-RK.

За допомогою розробленої методики розрахунку процесів теплової підготовки визначений вплив швидкості циркуляції ОР і МО газового двигуна на час його прогріву. За рахунок збільшення швидкості циркуляції ОР і МО в СТП до 0,22 м/с можливо скоротити час прогріву ОР і МО двигуна на 8 хв.

Виходячи з розроблених алгоритмів одночасного передпускового і післяпускового прогріву СО і СМ газового двигуна були складені 11 варіантів для виконання аналізу використання складових розробленої СТП. При цьому, для всіх означених варіантів, під час здійснення передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна з СТП, оцінювались наступні режимні параметри: прогрів ОР і МО від T_{oc} до 50 °С, хв., підтримання $T_{OP} \approx 50$

$^{\circ}\text{C}$ і $T_{MO} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв., прогрів ОР і МО від 50°C до 85°C , хв. Аналіз параметрів роботи проводився окремо для СО і СМ двигуна при різних температурах оточуючого середовища, а саме: 20°C , 0°C , -20°C .

Оцінка впливу конструктивних параметрів та параметрів налаштування СТП на час передпускового і післяпускового прогріву, паливну економічність та викиди оксидів азоту газового двигуна К-159 М2 підтвердила покращення термінових параметрів прогріву, паливної економічності при роботі газового двигуна за розробленим циклом прогріву із застосуванням комплексної системи передпускового прогріву, а також ефективність застосування СТП, як одного з дієвих напрямків покращення екологічних показників ДВЗ без погіршення паливної економічності.

Порівнюючи час прогріву охолоджуючої рідини ДВЗ видно (рис. 4), що СТП з ТА дозволяє суттєво покращити показники часу прогріву (до 23-44%), а час прогріву моторної оливи ДВЗ – до 20-44% у порівнянні зі штатними системами двигуна. При цьому сумарна витрата палива на прогрів двигуна зменшується на 69-80%, викиди оксидів азоту – на 93-97%, що відповідає часу прогріву ДВЗ з СТП без прогріву МО двигуна. Суттєвим позитивним моментом при здійсненні прогріву МО ДВЗ є додатковий прогрів зони колінчастого валу двигуна. При використанні комбінації варіантів поєднання підсистем в СТП найбільш доцільним залишається варіант з використанням ТА, як для прогріву ОР і МО від T_{oc} до 50°C , хв., так і для прогріву ОР і МО від 50°C до 85°C , хв. Для довготривалого підтримання $T_{OP} \approx 50^{\circ}\text{C}$ при непрацюючому двигуні найбільш доцільно для ОР використовувати наступні варіанти поєднання підсистем СТП: ТА + КТА, ТА + КТА + НМО і ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85^{\circ}\text{C}$).

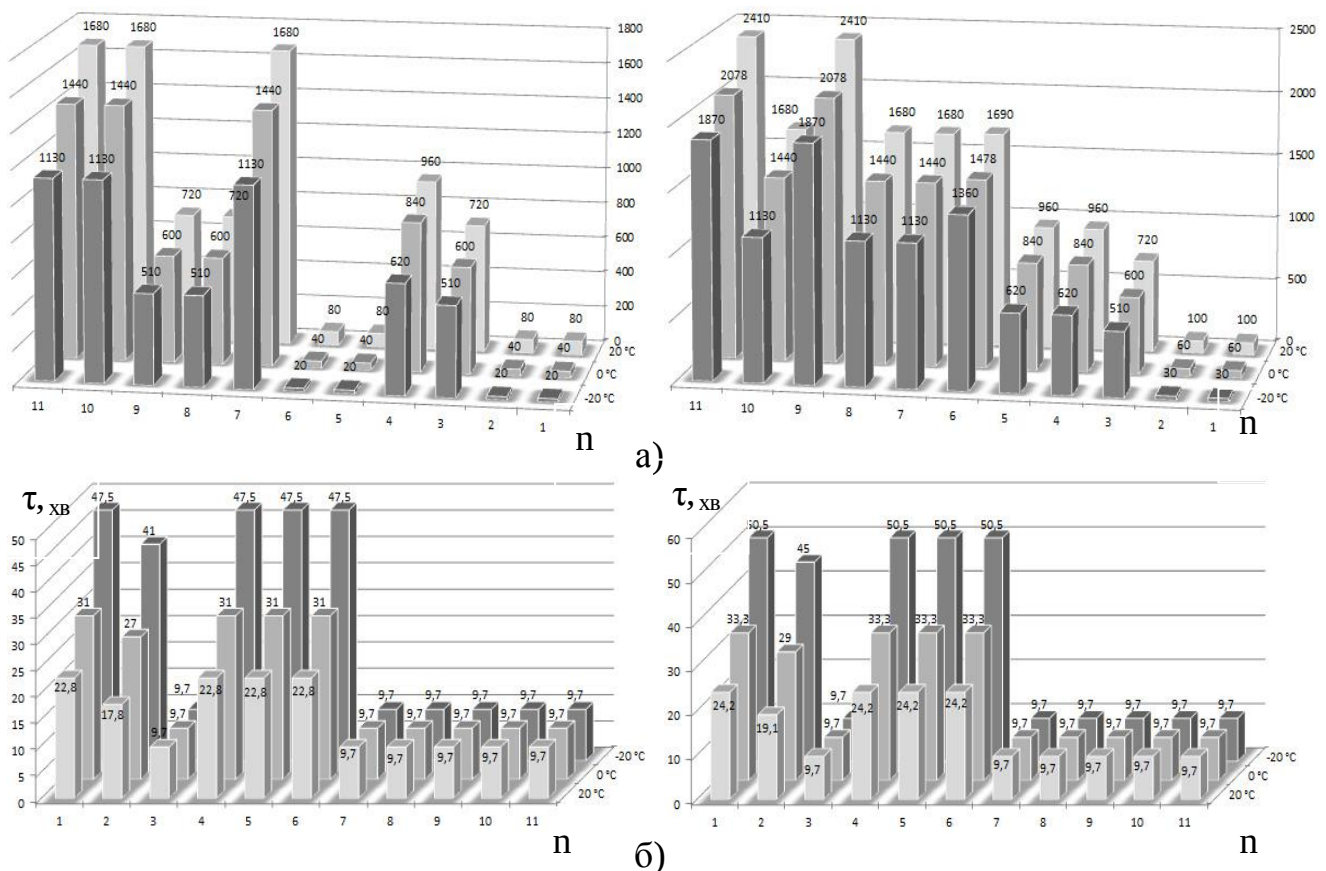


Рисунок 4 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за часом теплової підготовки ОР (МО) в СО в частині: а) підтримання $T_{OP} \approx T_{MO} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв.; б) прогріву ОР (МО) від 50°C до 85°C , хв

Таке поєднання елементів і підсистем дозволяє покращити теплові показники газового двигуна для ОР на 1600 (1400/1100) хв. або на 2000 (3500/5500)% відповідно. Для довготривалого підтримання $T_{MO} \approx 50^\circ\text{C}$ при не працюючому двигуні найбільш доцільно для МО використовувати варіант поєднання підсистем СТП у вигляді ТА + КТА + НМО ($T_{ТАМ} = 85^\circ\text{C}$). Таке поєднання елементів і підсистем дозволяє покращити теплові показники прогріву газового двигуна для МО на 2310 (2018/1840) хв. або на 1590 (3363/6133)% відповідно.

Застосування СТП з тепловим акумулятором дозволяє суттєво покращити показники часу прогріву охолоджуючої рідини і моторної оливи у порівнянні зі штатними системами двигуна. При цьому сумарна витрата палива на прогрів двигуна і викиди оксидів азоту суттєво зменшуються. В цілому можна стверджувати, що використання СТП доцільно для здійснення теплової підготовки досвідного газового двигуна на основі акумуляованої енергії, в частині забезпечення передпускової і післяпускової підготовки двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2), так і для довготривалого його зберігання при не працюючому двигуні. Комплектація СТП залежать від експлуатаційних потреб.

Для оцінки можливостей використання розробленої системи СТП з ДГД за багатоцільовим призначенням в умовах експлуатації скористались удосконаленою методикою і стандартними вимогами до енергетичних і транспортних засобів з його можливим використанням. Розглядали наступні варіанти: 1 - застосування ДГД в якості джерела енергії на залізничному транспорті (вагони рефрижератори) з режимом роботи: неперервна робота на номінальному режимі 2-3 доби після цього зупинка двигуна на 1-2 доби (1440 – 2800 хв.); на річковому або морському транспорті в якості двигуна портового або допоміжного судна з режимом роботи: за добу 2 x 3 години робота на номінальному або частковому режимі, зупинка двигуна на 6 годин або 12 годин (360 – 720 хв.); в якості стаціонарної електростанції (аварійна) з режимом роботи: робота на добу 2 години і зупинка двигуна 12 годин (720 хв.). З досліджуваних варіантів в першу чергу розглядали всі варіанти, що є найкращими для зберігання МО і ОР на протязі відповідного часу. Розглянуті в дослідженні варіанти показані на рис. 5 – 6. Використання накопичувача охолоджуючої рідини (НОР) в досліджуваних варіантах використання стаціонарної енергетичної установки з ДГД не можливо з технічних і технологічних міркувань. Тому в подальшому цей варіант не розглядаємо.

На рис. 5 показаний варіант зберігання МО за допомогою різних комплектацій СТП в період зупинки газового двигуна без роботи в режимі х.х. З 6 найкращих варіантів, відібраних в попередній частині дослідження, всі задовольняють умовам роботи ДГД у варіанті суднового двигуна в режимі зберігання через 360 хв. Обмеження у 720 хв. – забезпечують 5 варіантів крім варіанту ТА в умовах експлуатації 0°C і -20°C . Для ДГД експлуатація при температурах 0°C і -20°C в умовах суднової енергетичної установки на річковому і морському транспорті не можлива через те, що такі температури не допускаються. Тому, можливо вважати, що ТА також можливо використовувати в означеному варіанті. Використання ж СТП для роботи автономної стаціонарної електростанції з інтервалом зберігання

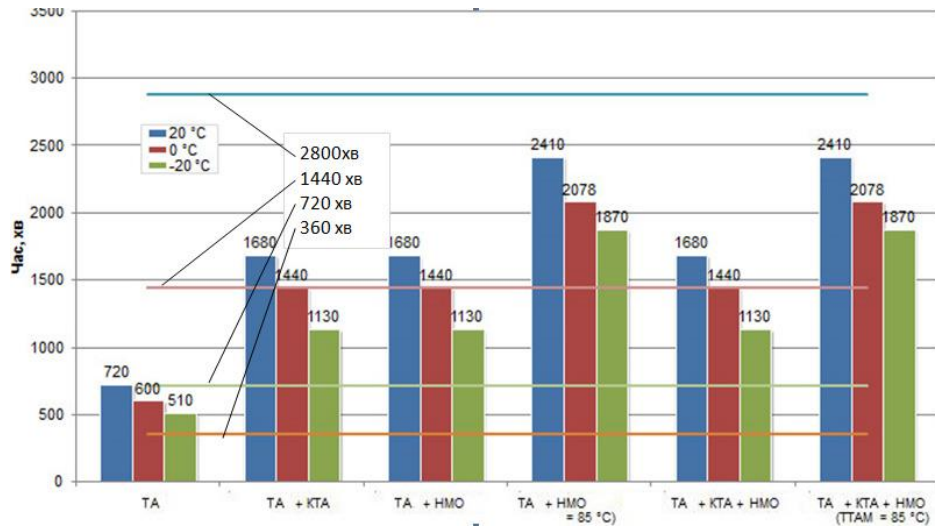


Рисунок 5 - Результати дослідження впливу варіантів комплектації СТП на час підтримання температури МО газового двигуна в межах $\approx 50^\circ\text{C}$

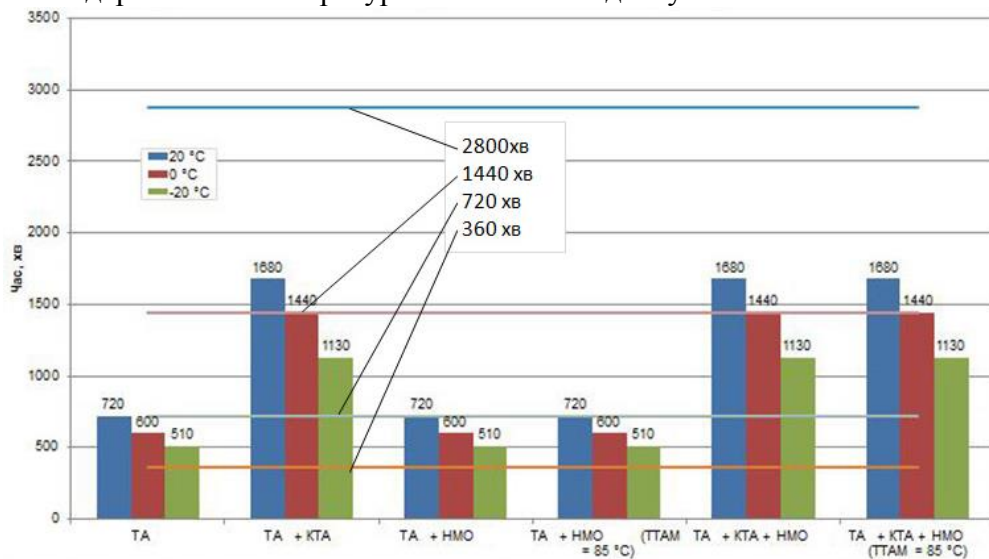


Рисунок 6 - Результати дослідження впливу варіантів комплектації СТП на час підтримання температури ОР газового двигуна в межах $\approx 50^\circ\text{C}$

двигуна 720 хв. можливо, якщо температура оточуючого середовища знаходиться в межах тільки $+20^\circ\text{C}$. Для зберігання ДГД в межах 1400 хв. (залізничний транспорт) доступні повноцінно тільки 2 варіанти комплектації - ТА + НМО ($T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$) і ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$), варіанти комплектації ТА+КТА; ТА+НМО і ТА+КТА+НМО для виконання вказаної задачі можуть використовуватись тільки в діапазоні температур $+20^\circ\text{C}$ і 0°C . Термін зберігання 2800 хв. для МО, жоден з варіантів забезпечити не зміг. В той же час, інтервали часу зберігання ОР ДГД (рис. 6) 360 і 720 хв. забезпечується всіма варіантами комплектацій СТП, а 1440 хв. можуть забезпечити тільки варіанти: ТА+КТА, ТА +КТА+НМО і ТА +КТА+НМО ($T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$) в інтервалі температур оточуючого середовища $+20^\circ\text{C}$ і 0°C .

В цілому, за результатами дослідження в частині застосування СТП ДГД, можливо зробити висновок, що використання варіанта з ТА (при найнижчій вартості у 25000 грн. (серпень 2019 р.)) у конструкції СТП є найкращим варіантом для забезпечення зберігання ДГД в межах 360 хв. в якості головного або допоміжного двигуна судна портового або допоміжного класу на річковому

або морському транспорті. При цьому забезпечується прогрів з 50°C до 85°C за 9,7 хв. з витратою палива на виконання операції $0,424 \text{ м}^3$. В інтервалі часу зберігання ДГД 720 хв. можливо з обмеженнями використовувати всі інші варіанти комплектації СТП. Для інтервалу часу зберігання ДГД 1440 хв. найкращим є варіант ТА + КТА + НМО ($T_{\text{ТАМ}} = 85^{\circ}\text{C}$), який може, з обмеженнями в частині ОР, в інтервалі температур оточуючого середовища $+20^{\circ}\text{C}$ і 0°C використовуватись в умовах експлуатації.

В цілому можливо стверджувати, що використання СТП в різних умовах експлуатації доцільно для здійснення теплової підготовки ДГД на основі акумульованої енергії, в частині забезпечення передпускової і післяпускової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2), так і для довготривалого його зберігання при не працюючому двигуні, а особливості його комплектації при використанні залежать від експлуатаційних потреб.

ВИСНОВКИ

1. В умовах експлуатації двигунів внутрішнього згорання, особливо при низьких температурах оточуючого середовища, є важливим прогрів двигуна. Одним із дієвих способів покращення показників часу теплової підготовки, зниження шкідливих викидів, підвищення паливної економічності при прогріві двигуна є застосування системи теплової підготовки на основі акумульованої теплової енергії системи теплової підготовки. Акумульована тепла енергія служить для прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини перед запуском двигуна.

Використання системи теплової підготовки дозволяє провести передпусковий прогрів двигуна без витрати палива та викидів шкідливих речовин, та зменшити терміни його післяпускового прогріву. В дисертаційній роботі визначено склад та налаштування системи теплової підготовки на прикладі газового двигуна 6Ч 12/14 з урахуванням температури оточуючого середовища при виконанні передпускового і післяпускового прогріву та забезпечення необхідного теплового стану двигуна при міжзмінній зупинці без його запуску чи постійній роботі в режимі х.х.

2. Розроблена методика оцінки впливу конструктивних і регулювальних параметрів системи теплової підготовки дослідного газового двигуна на показники часу теплової підготовки, паливної економічності і екологічних показників при здійсненні передпускового і післяпускового прогріву в експлуатаційних умовах. Розроблено алгоритм роботи і методика формування циклу прогріву газового двигуна з використанням системи теплової підготовки.

3. Розроблені схема, конструкція і удосконалена методика розрахунку параметрів процесу системи теплової підготовки для газового двигуна з підсистемами: прискореного прогріву, утилізації теплової енергії відпрацьованих газів з тепловим акумулятором фазового переходу, контактного теплового акумулятора, накопичувача моторної оливи з тепловим акумулятором. Удосконалена методика розрахунку параметрів процесу системи теплової підготовки газового двигуна дозволила оцінити показники роботи системи теплової підготовки при проведенні передпускового і післяпускового прогріву та зберігання акумульованої теплоти при різних температурах

оточуючого середовища з відхиленням значень розрахункових та експериментальних показників не більше 5 %.

4. Проведені експериментальні дослідження газового двигуна 6Ч 12/14 при температурі оточуючого середовища 0°C показали, що використання системи теплової підготовки дозволяє скоротити час теплової підготовки газового двигуна до прийому навантаження (температура охолоджуючої рідини/моторної оливи 50°C) з 1370/1450 с (при штатній системі охолодження) до 865/851 с. (при використанні системи теплової підготовки) без погіршення показників екологічності і паливної економичності.

5. Розрахункові дослідження за удосконаленою методикою розрахунку показали, що системи теплової підготовки з тепловим акумулятором дозволяє суттєво покращити показники часу прогріву охолоджуючої рідини (до 24-46%) і моторної оливи дослідного газового двигуна – до 20-44% у порівнянні зі штатною системою двигуна. При цьому годинна витрата палива на прогрів двигуна зменшується на 68-82%, а викиди оксидів азоту – на 93-99%.

6. Для підтримання температури моторної оливи в межах $T_{MO} \approx 50^\circ\text{C}$, найбільш доцільно таке поєднання підсистем: тепловий акумулятор фазового переходу, контактний тепловий акумулятор та накопичувач моторної оливи. А для підтримання температури охолоджуючої рідини в межах 50 °C, найбільш доцільно використовувати такі поєднання підсистем: тепловий акумулятор фазового переходу + контактний тепловий акумулятор, тепловий акумулятор фазового переходу + контактний тепловий акумулятор + накопичувач моторної оливи, при цьому зменшуються терміни прогріву охолоджуючої рідини газового двигуна у 22 рази.

7. Розроблені рекомендації і результати роботи впроваджені в Інституті газу НАН України і в розробках ТОВ «ЕРА».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях

1. Грицук І.В. Повышение эффективности использования топлива стационарными и передвижными источниками энергии / І.В. Грицук, В.С. Вербовський, Д.С. Адров // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: ХАИ, 2009. - №4(61), – С.43-45.
2. Грицук І.В. Результати розрахунку паливної економичності та екологічних показників двигуна внутрішнього згорання за циклом передпускового прогріву і пуску при застосуванні системи комбінованого прогріву / І.В. Грицук, Д.С. Адров, З.І. Краснокутська, В.С.Вербовський // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2013. – Випуск 27, стор. 225-232.
3. Вербовський В.С. Дослідження системи передпускового розігріву газового двигуна на основі використання теплового акумулятора з теплоакумуючим матеріалом, що має фазовий перехід / В.С.Вербовський, І.В. Грицук, Д.С. Адров, З.І. Краснокутська // Двигатели внутреннего сгорания. Научно-технический журнал. Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2013. – №1. – с. 110-116.
4. Вербовський В.С. Особливості передпускового прогріву стаціонарного газового двигуна з використанням теплового акумулятора з фазовим переходом / В.С.Вербовський, І.В. Грицук, Д.С. Адров, З.І. Краснокутська // Двигатели

внутреннего сгорания. Научно-технический журнал. Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – №2. – с. 85-90.

5. Вербовський В.С. Математична модель розрахунку показників роботи двигуна внутрішнього згорання з системою передпускового прогріву при здійсненні передпускового і післяпускового прискореного прогріву / В.С.Вербовський, І.В. Грицук, Д.С. Адров // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». - Луцьк: ЛНТУ, 2014. – Випуск №45, - с.64-71.

6. Вербовський В.С. Особливості теплової підготовки двигуна стаціонарної енергетичної установки за допомогою теплових акумуляторів фазового переходу / Вербовський В.С., Грицук І.В., Скалига М.М., Белоусов Є.В., Рудинець М.В. // Міжвузівський збірник "Наукові нотатки". Луцьк, 2018. Випуск № 62 . с.56-60

Публікації у наукових періодичних виданнях іноземних держав з напрямку

7. Вербовський В. Оцінка доцільності застосування системи теплової підготовки з використанням акумуляованої енергії для стаціонарного газового двигуна / Системи і засоби транспорту. Проблеми експлуатації і діагностики: монографія / Blatnický Miroslav, Dižo Ján, Gerlici Juraj та ін.; за наук. ред. проф. Грицука Ігоря. – Херсон : ХДМА, 2019. –288С. – 307 ISBN 978-966-2245-53-0

8. Гутаревич Ю.Ф. Аналіз результатів дослідження паливної економічності і екологічних показників газового двигуна внутрішнього згорання, оснащеного системою передпускового прогріву, в процесі здійснення пуску і прогріву / Ю.Ф. Гутаревич, І.В. Грицук, О.С. Добровольський, Д.С. Адров, В.С. Вербовський, З.І. Краснокутська // Journal "Science and Education - a New Dimension", Natural and Technical Science Vol. 8. 2013. Society for Cultural and Scientific Progress in Central and Eastern Europe Budapest, 2013. p. 122-128.

9. Грицук І.В. Особливості формування циклу передпускового розогріву ДВЗ при дослідженні системи комбінованого прогріву / І.В. Грицук, В.С. Вербовський, Д.С. Адров, З.І. Краснокутська // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr.4. Seria:Transport. - Rzeszow. -2013, с. 227-230. ISBN 978-83-7199-878-3.

10. Gritsuk I., Mateichyk V., Smieszek M., Volkov V., Gutarevych Y., Aleksandrov V., Symonenko R., Verbovskiy V., "Improving the Vehicular Engine Pre-Start and AfterStart Heating by Using the Combined Heating System," HVAC System, Chapter 7:101-122, 2018, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.79467>

11. Gritsuk I. Improving Engine Pre-Start And After-Start Heating by Using the Combined Heating System / I. Gritsuk, V. Volkov, Y. Gutarevych, V. Mateichyk, V. Verbovskiy // SAE Technical Paper 2016-01-8071, 2016, doi:10.4271/2016-01-8071. Pages: 16. Mode of access: SAE International / Scopus: <http://papers.sae.org/2016-01-8071/>. - Title from the screen.

Опубліковані праці апробаційного характеру

12. Грицук І.В. Особливості моделювання і дослідження процесів знімання й віддачі теплоти відпрацьованих газів ДВЗ в конструкції теплообмінника системи утилізації теплової енергії з тепловим акумулятором фазового переходу / І.В. Грицук, О.І. П'ятничко, В.С.Вербовський, Д.С. Адров // Збірник наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2011 – Випуск №28., с.122-130.

13. Гутаревич Ю.Ф. Особливості алгоритму роботи системи передпускового прогріву газового двигуна в процесі здійснення пуску і прогріву / Ю.Ф. Гутаревич, І.В. Грицук, В.С. Вербовський, З.І. Краснокутська // Вісник СевНТУ. Збірник наук. праць. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. - Севастополь: СевНТУ, 2013 - Випуск 143/2013., - с.53-57.
14. Грицук І.В. Особливості математичного моделювання параметрів роботи теплонакопичувача керованої передпускової системи мащення двигуна внутрішнього згорання у складі системи комбінованого прогріву / І.В. Грицук, А.М. Гушин, Д.С. Адров, В.С.Вербовський, З.І. Краснокутська // Збірник наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2013 – Випуск №36., с.156-161.
15. Вербовський В.С. Оцінка доцільності проведення передпускової і післяпускової підготовки газового двигуна К-159 М2 за допомогою комплексної системи передпускового прогріву / В.С. Вербовський // Збірник наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2014 – Випуск №39., с.93-99.
16. Грицук І.В. Особливості прогріву стаціонарного газового двигуна з використанням системи передпускового розігріву з тепловим акумулятором фазового переходу / І.В. Грицук, В.С.Вербовський // Міжнародна науково-практична конференція «Новітні технології розвитку конструкції, виробництва, експлуатації, ремонту і експертизи автомобілів» (15-16 10.2014 р.) [Текст]. – Харків.: ХНАДУ, 2014.- с. 221-222.
17. Особливості передпускової теплової підготовки двигуна енергетичної установки за допомогою системи прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами / Грицук І.В., Вербовський В.С. - Суднова енергетика: стан та проблеми: Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції. 8-10 листопада 2017 р. - Миколаїв: НУК, 2017. – 472с. - С. 214-217
18. Забезпечення теплової підготовки двигуна енергетичної установки за допомогою системи прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами / І.В. Грицук, В.С. Вербовський, О. Podprygo, і др. - Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С., 24-28 квітня 2019, Одеса, ОНМУ, 2019. 442с. - С. 108-121
19. Вербовський В.С. Оцінка доцільності застосування системи теплової підготовки стаціонарного газового двигуна на основі акумульованої енергії / В.С. Вербовський - Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. Матеріали 10-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 12-13 вересня 2019 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. С. 93-95

Патенти:

20. Патент № 94641 Україна, МПК (2014.01) F01P 3/22 (2006.01), F01M 5/00, «Система регулювання температури охолоджуючої рідини, температури і тиску моторної оливи двигуна внутрішнього згорання з утилізацією теплоти тепловими акумуляторами» В.Й. Поддубняк, Ю.Ф. Гутаревич, О.І. П'ятничко, І.В. Грицук, В.С. Вербовський, М.І. Сергієнко, О.О. Зародов, Д.С. Адров, А.М.Гушин, Ю.В.Прилепський, Д.М. Трифонов, З.І. Краснокутська, А.В. Вербовський, А.І. Грицук / (Україна); Заявник і патентовласник: Донецький інститут залізничного транспорту, Національний транспортний ун-т, Інститут

газу НАНУ, Державний № u2014 05701; заяв.27.05.2014; опубл. 25.11.2014, Бюл. №22.-14 с.:іл.

21. Патент № 94642 Україна, МПК (2014.01) F01P 3/22 (2006.01), F01M 5/00, «Система регулювання температури охолоджуючої рідини, температури і тиску моторної оливи двигуна внутрішнього згорання» В.Й. Поддубняк, Ю.Ф. Гутаревич, О.І. П'ятничко, І.В. Грицук, В.С. Вербовський, М.І. Сергієнко, О.О. Зародов, Д.С. Адров, А.М.Гущин, Ю.В.Прилепський, Д.М. Трифонов, З.І. Краснокутська, Ш.К. Амерханова, А.В. Вербовський, А.І. Грицук / (Україна); Заявник і патентовласник: Донецький інститут залізничного транспорту, Національний транспортний ун-т, Інститут газу НАНУ, Державний № u2014 05702; заяв.27.05.2014; опубл.25.11.2014, Бюл. № 22. 12 с.:іл.

АНОТАЦІЯ

Вербовський В.С. Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових двигунів акумульованою енергією - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки» - Національний транспортний університет, Київ, 2021.

Дисертація присвячена покращенню теплових, термінових, економічних та екологічних показників стаціонарних газових двигунів, обладнаних системою теплової підготовки з тепловими акумуляторами фазового переходу.

Проведені розрахункові та експериментальні дослідження газового двигуна К-159М2 (6Ч12/14), обладнаного системою теплової підготовки з тепловими акумуляторами фазового переходу, щодо обґрунтування вибору комплектації системи при здійсненні прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини та визначення впливу температури навколишнього середовища на показники двигуна. Розроблено метод забезпечення раціональної теплової підготовки стаціонарного газового двигуна на основі системи теплової підготовки у варіантах його застосування за багатоцільовим призначенням, що відрізняється від існуючих урахуванням особливостей теплової підготовки двигуна в залежності від використання за цільовим призначенням.

Визначені доцільні значення часу прогріву і зберігання теплоти в газовому двигуні при різних комплектаціях системи теплової підготовки в широкому інтервалі температур оточуючого середовища.

Ключові слова: *газовий двигун, система теплової підготовки, тепловий акумулятор, фазовий перехід, моторна олива, охолоджуюча рідина, час прогріву, витрата палива, шкідливі викиди.*

АННОТАЦИЯ

Вербовський В.С. Совершенствование процесса тепловой подготовки стационарных газовых двигателей аккумулярованной энергией - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 «Двигатели и энергетические установки» - Национальный транспортный университет, Киев, 2021.

Диссертация посвящена улучшению тепловых, экономических и экологических показателей стационарных газовых двигателей, оборудованных системой тепловой подготовки с тепловыми аккумуляторами фазового перехода.

Разработана методика оценки влияния конструктивных и регулировочных параметров системы тепловой подготовки исследуемого газового двигателя на показатели времени тепловой подготовки, топливной экономичности и экологических показателей при осуществлении предпускового и послепускового прогрева в эксплуатационных условиях. Разработан алгоритм работы и методика формирования цикла прогрева газового двигателя с использованием системы тепловой подготовки.

Разработаны схема, конструкция и усовершенствованная методика расчета параметров рабочего процесса системы тепловой подготовки для газового двигателя со следующими подсистемами: ускоренного прогрева, утилизации тепловой энергии отработавших газов с тепловым аккумулятором фазового перехода, контактного теплового аккумулятора, накопителя моторного масла с тепловым аккумулятором фазового перехода. Усовершенствованная методика расчета параметров рабочего процесса системы тепловой подготовки газового двигателя позволила оценить показатели ее работы при проведении предпускового и послепускового прогрева и хранения аккумуляированной теплоты при различных температурах окружающей среды с отклонением значений расчетных и экспериментальных показателей не более 5%.

Проведены расчетные и экспериментальные исследования газового двигателя К-159М2 (6Ч12/14), оборудованного системой тепловой подготовки с тепловыми аккумуляторами фазового перехода, посвященные обоснованию выбора комплектации системы при осуществлении прогрева моторного масла и охлаждающей жидкости и определения влияния температуры окружающей среды на показатели двигателя. Разработан метод обеспечения рациональной тепловой подготовки стационарного газового двигателя на основе системы тепловой подготовки в вариантах его применения в качестве многоцелевого назначения, отличающийся от существующих учетом особенностей тепловой подготовки двигателя в зависимости от его целевого назначения.

Определены наиболее целесообразные значения времени прогрева и хранения теплоты в газовом двигателе при различных комплектациях системы тепловой подготовки в широком интервале температур окружающей среды.

Проведенные экспериментальные исследования газового двигателя 6Ч 12/14 при температуре окружающей среды 0 °С показали, что использование системы тепловой подготовки позволяет сократить время тепловой подготовки газового двигателя до приема нагрузки (температура охлаждающей жидкости / моторного масла 50 °С) с 1370/1450 с (при штатных системах охлаждения / смазки) до 865/851 с. (при использовании системы тепловой подготовки) без ухудшения показателей экологичности и топливной экономичности.

Проведенные расчетные исследования по усовершенствованной методике расчета показали, что система тепловой подготовки с тепловыми

аккумуляторами позволяет существенно улучшить показатели времени тепловой подготовки охлаждающей жидкости (до 24-46%) и моторного масла исследуемого газового двигателя - до 20-44% по сравнению со штатными системами двигателя. При этом часовой расход топлива на прогрев двигателя уменьшается на 68-82%, а выбросы оксидов азота - на 93-99%.

Для поддержания температуры моторного масла в пределах $\approx 50^{\circ}\text{C}$, наиболее целесообразно такое сочетание подсистем системы тепловой подготовки: тепловой аккумулятор + контактный тепловой аккумулятор + накопитель моторного масла с тепловым аккумулятором. Для поддержания температуры охлаждающей жидкости в пределах 50°C , наиболее целесообразно использовать такие сочетания подсистем: тепловой аккумулятор + контактный тепловой аккумулятор и тепловой аккумулятор + контактный тепловой аккумулятор, при этом уменьшаются время прогрева охлаждающей жидкости газового двигателя в 22 раза.

Ключевые слова: *газовый двигатель, система тепловой подготовки, тепловой аккумулятор, фазовый переход, моторное масло, охлаждающая жидкость, время прогрева, расход топлива, вредные выбросы.*

SUMMARY

Verbovsky V. Improving the process of thermal preparation of stationary gas engines with accumulated energy - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.05.03 "Engines and power plants" - National transport university, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to improvement of thermal, urgent, economic and ecological indicators of the stationary gas engines equipped with system of thermal preparation with thermal accumulators of phase transition.

Calculated and experimental studies of gas engine K-159M2 (6FS12/14), equipped with a thermal treatment system with thermal accumulators of the phase transition, to justify the choice of system equipment when heating engine oil and coolant and determine the effect of ambient temperature on engine performance. The method of providing rational thermal preparation of the stationary gas engine on the basis of system of thermal preparation in variants of its application on multipurpose appointment differs from existing taking into account features of thermal preparation of the engine depending on use on target purpose is developed.

The expedient values of time of heating and storage of heat in the gas engine at various complete sets of system of thermal preparation in a wide range of ambient temperatures are defined.

Key words: *gas engine, heat treatment system, heat accumulator, phase transition, motor oil, coolant, warm - up time, fuel consumption, harmful emissions.*