

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВЕРБОВСЬКИЙ ВАЛЕРІЙ СТЕПАНОВИЧ

УДК 621.431

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

Галузь знань 14 – електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

В.С. Вербовський

Науковий керівник –
Грицук Ігор Валерійович,
доктор технічних наук, професор

Ідентичність усіх примірників дисертації засвідчую
Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
Д26.059.03

Київ - 2021

АНОТАЦІЯ

Вербовський В.С. Удосконалення забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів використанням акумульованої енергії. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 «Двигуни та енергетичні установки». - Національний транспортний університет, Київ, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної задачі по удосконаленню забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів внутрішнього згорання у складі електростанцій при використанні акумульованої енергії за допомогою теплових акумуляторів фазового переходу.

У **вступі** обґрунтована актуальність теми, сформульовані об'єкт і предмет дослідження, мета й основні завдання, наведені методи дослідження, обґрунтована достовірність отриманих результатів і висновків, визначена наукова новизна та практичне значення результатів роботи, вказаний зв'язок роботи з науковими програмами, відображена повнота викладу результатів у публікаціях і ступінь апробації на наукових конференціях.

Метою наукового доослідження є скорочення часу забезпечення теплової підготовки стаціонарних газових двигунів за рахунок використання акумульованої теплової енергії. Удосконалення полягає у виборі раціональних варіантів застосування системи теплової підготовки (СТП) на основі акумульованої теплової енергії для прогріву моторної оливи (МО) і охолоджуючої рідини (ОР). Визначено склад та налаштування СТП з урахуванням умов експлуатації при виконанні передпускового і післяпускового прогріву та зберігання теплового стану двигуна при зупинці без його запуску і роботи в режимі холостого ходу.

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 ОР і 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.

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

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.

На основі укрупненої структурної схеми розрахунку СТП газового двигуна 6Ч 12/14 в процесі здійснення теплової підготовки розроблена

удосконалена методика розрахунку процесів роботи 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.

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.

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.

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.

У четвертому розділі 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.

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 дослідного газового двигуна (ДГД) на основі акумульованої 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.

За результатами виконання дисертаційної роботи встановлено наступне.

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 (СТП). Акумульована тепла енергія служить для прогріву моторної оливи (МО) і охолоджуючої рідини (ОР) перед запуском двигуна.

Використання СТП 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 СТП 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 СТП 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 СТП.

3. Розроблені схема, конструкція і удосконалена методика розрахунку параметрів процесу СТП для газового двигуна з підсистемами: прискореного прогріву (ППД), утилізації теплової енергії ВГ з тепловим акумулятором (ТА) фазового переходу, контактного теплового акумулятора (КТА), накопичувача моторної оливи з тепловим акумулятором (НМО). Удосконалена методика розрахунку параметрів процесу СТП газового двигуна дозволила оцінити показники роботи СТП 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 СТП дозволяє скоротити час теплової підготовки газового двигуна до прийому навантаження (температура ОР/МО 50 °C) з 1370/1450 с (при штатній системі ОР/МО) до 865/851 с. (при використанні СТП) без погіршення показників екологічності і паливної економичності.

5. Розрахункові дослідження за удосконаленою методикою розрахунку показали, що СТП з ТА дозволяє суттєво покращити показники часу прогріву ОР (до 24-46%) і МО ДГД – до 20-44% у порівнянні зі ШС двигуна. При цьому годинна витрата палива на прогрів двигуна зменшується на 68-82%, а викиди оксидів азоту – на 70- 80%.

6. Для підтримання температури моторної оливи в межах $T_{MO} \approx 50$ °C, найбільш доцільно таке поєднання підсистем СТП: ТА + КТА + НМО. А для підтримання температури ОР в межах 50 °C, найбільш доцільно використовувати такі поєднання підсистем: ТА + КТА, ТА + КТА + НМО і ТА + КТА + НМО, при цьому зменшуються терміни прогріву ОР газового двигуна у 22 рази.

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

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 «Теплосюз Україна».

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

Список публікацій здобувача.

Публікації, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Вербовський В. Оцінка доцільності застосування системи теплової підготовки з використанням акумульованої 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

2. 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.

3. 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.

4. Грицук І.В. Результати розрахунку паливної економічності 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.

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. 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.

7. 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.

8. 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. Гуцин, Д.С. Адров, В.С.Вербовський, З.І. Краснокутська // Збірник наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2013 – Випуск №36., с.156-161.

9. 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.

10. 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.

11. 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

12. 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.Гуцин, 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.

13. 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.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

14. 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.

15. 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

16. 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

17. 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

Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. 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.

19. 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.

20. 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>

21. 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.

ANNOTATION

Verbovsky VS Improvement of provision of thermal preparation of stationary gas engines using accumulated energy. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.05.03 "Engines and Power Plants". - National University of Transport, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and applied problem of improving the provision of thermal preparation of stationary internal combustion engines in the composition of power plants when using the accumulated energy with the help of thermal accumulators of the phase transition.

The introduction substantiates the relevance of the topic, formulated the object and object of the study, the purpose and main tasks, the methods of research, the validity of the obtained results and conclusions, the determined scientific novelty and practical significance of the results of the work, the specified relationship with scientific programs, the fullness presentation of results in publications and degree of approbation at scientific conferences.

The purpose of scientific research is to reduce the time required for the thermal preparation of stationary gas engines by the use of stored thermal energy. The improvement consists in the choice of rational variants of application of the thermal preparation system on the basis of the accumulated thermal energy (STPA) for warming of engine oil (MO) and coolant (OP) of the gas engine, the composition and tuning of STPA taking into account the conditions of pre-firing and preservation of the pre-ignition the thermal state of the engine at an interchangeable stop without starting it and operating in x.h.

In the first section, an overview of information sources for improving the efficiency of the operation of the internal combustion engine in low-temperature conditions, namely the analysis of the influence of low temperatures on the warm-

up time and the performance of the internal combustion engine is performed. The analysis showed that during the cold start of the engine and the start of its operation, the thermal state is much lower than the optimum values of temperature indicators. At the same time fuel consumption and emissions of harmful substances in the exhaust gas (GH) increase, and also increases the time of preparation of the internal combustion engine for operation. To accept the load after starting it is necessary that the engine and engine MOs are warmed to a temperature not lower than 40-60 ° C. The use of the accumulated heat energy of the ICE, which is not used for useful work, makes it possible to significantly improve the performance of the engine during the periods of pre-start and post-start warm-up. Thus, in order to solve the tasks set, improving the provision of thermal preparation of stationary gas engines, fuel economy and improvement of environmental performance, it is advisable to carry out studies of the components of the STPA, their settings depending on the operating conditions.

The second section develops a system of thermal energy training (STPA), which constructively enters, as an integral part, the systems of lubrication and cooling of the gas engine and performs part of their functions and has a decisive influence on the workflow, and consists of subsystems: accelerated engine warming (PPD), utilization of thermal energy of the exhaust gas by a thermal accumulator (AO) of a phase transition (OP) (UTTA), contact thermal accumulator of OP (KTA) and motor oil accumulator with AO of AF (NM) OTA).

The general structure of the advanced methodology of calculation and assessment of the influence of the adopted structural decisions and the ambient temperature on the operational (energy, economic, time) and environmental performance of the gas engine in the process of thermal preparation in the part of pre-start and post-start accelerated heating is developed. The technique and features of the joint use of elements and subsystems of STPA during execution of pre-start, post-start warming of the gas engine and its interchangeable storage are taken into account.

On the basis of the enlarged structural diagram of the method of calculation of STPA gas engine 6C 12/14 in the process of thermal preparation in the part of pre-start and post-start warming up for MO and OR with the combination of the main system objects, an advanced method of calculating the processes of KTA and NMOTA has been developed, and methods have been developed. of calculation of AT of phase transition of UTTA for warming up of MO, PPD, monitoring of the system for parameters of MO and OP, UT of UTTA, calculation technique for estimation and analysis of impact of STPA operation and its composition was improved s research on fuel efficiency in the gas engine warming, emissions of harmful substances from SH and time telovoyi preparation - warming gas engine.

The third section presents the results of experimental studies of pre-start and post-start warming with the help of the system of thermal preparation of the gas engine 6C 12/14 (K-159 M2) in the composition of the electric unit in the laboratory of IG NAS.

To provide thermal preparation of the gas engine, a cycle of thermal preparation was developed - pre-start and post-start warming up of the gas engine equipped with STPA, as well as the algorithm of operation of the STPA gas engine with subsystems and components in the implementation of pre-start and post-start warming. The use of STPA with the developed cycle and the algorithm of thermal preparation allows to reduce significantly the time of warming up of the engine to the operating temperature without the operation of DHD in idle mode.

The results of the experimental tests became the basis for the development of dependencies that formed the basis of an improved method of calculating the gas engine thermal preparation workflow to investigate the effect of structural and control parameters on time, fuel, energy and environmental performance.

In the fourth section, using the advanced method of calculation of the thermal preparation processes, the influence of the gas engine's circulation rate and MO at the time of its warming was determined, which showed that by increasing the rate of circulation of the engine and the MO in the STPA to 0.22 m / s, it is possible to reduce the warming time Engine RH and MO for 8-9 minutes

Assessment of the influence of design and setting parameters STPA on pre-start and post-warm-up time, fuel economy and emissions of harmful substances of the gas engine 6C 12/14 (K-159 M2) confirmed the improvement of urgent indicators of warming, performance of fuel and fuel efficiency with the use of thermal training system, as well as the efficiency of using STPA as one of the effective directions of improving the environmental performance of DHA without worsening fuel economy ness.

Comparing the ICE coolant warm-up time, it can be seen that the STPA with the heat accumulator allows to significantly improve the warm-up time of the coolant and engine oil compared to the standard engine systems. In this case, the total fuel consumption for engine warm-up and emissions of nitrogen oxides are significantly reduced.

When using STPA in the variants of using its components, the most appropriate is the use of AT or various options for completing STPA with its participation.

In general, it can be argued that the use of STPA in different operating conditions is appropriate for the implementation of thermal preparation of the experimental gas engine (DGD) on the basis of accumulated energy, in terms of providing pre-start and start-up preparation of the gas engine 6H 12/14 (K-159 M2) for long-term storage when the engine is not running, and the features of its configuration when used depend on the operational needs.

According to the results of the dissertation, the following is established.

1. In conditions of operation of internal combustion engines, especially at low ambient temperatures, the warm-up of the engine occupies a significant place. One of the effective ways to improve the performance of heat preparation time, temperature state, reduce harmful emissions, increase fuel efficiency when warming up the engine is to use a system of thermal energy based preparation (STPA) for warming up the engine oil (MO) and cooling fluid.

The use of STPA allows the engine to be preheated without fuel consumption and noxious emissions, to accelerate the engine to start after warming

up and to keep the engine temperature at an interchangeable stop without starting and operating in x.h. The thesis defines the composition and setting of STPA on the example of a gas engine 6H 12/14 taking into account the conditions of operation when performing pre-start and post-start warm-up and storage of the thermal state of the engine at interchange stop without its start and operation in x.

2. The technique of estimation of influence of design and adjusting parameters of STPA of experimental gas engine on indicators of time of thermal preparation, fuel economy and ecological parameters of the engine at realization of start-up and post-start warming up in operational conditions under different methods of its execution, which is based on perfected perfection methods, is developed. process of STPA gas engine. For this purpose the corresponding algorithm of work and the method of forming the cycle of warming up of the gas engine using STPA have been developed.

3. The scheme, design and advanced method of calculating the parameters of the workflow STPA gas engine with subsystems are developed: accelerated warming up (PDD), utilization of thermal energy by heat accumulator (AT) of phase transition (UTTA), contact heat accumulator (KTA), with heat accumulator (NMOT). Improved method of calculating the parameters of the workflow STPA gas engine allowed to estimate the performance of STPA during pre-start and after-start warming up and interchangeable storage of heat at ambient temperatures with a deviation of the values of the calculated and experimental values of not more than 5%. The STPA algorithm is implemented in the microprocessor control system.

4. Experimental studies of the gas engine 6C 12/14 in the investigated modes showed that the use of STPA allows to reduce the time of thermal preparation of the gas engine to load (temperature OP / MO 50 ° C) from 1370/1450 s (with the regular system OP / MO) up to 865/851 sec. without degrading environmental performance and fuel economy.

5. Calculation studies using an advanced calculation method showed that STPA with blood pressure (or STPA variants with its participation) can

significantly improve the warm-up time of OP (up to 24-46%) and MO of DGD - up to 20-44% in comparison with GC engine. The hourly fuel consumption for engine warming is reduced by 68-82%, and emissions of nitrogen oxides - by 93-99%.

6. For long-term maintenance of TMO $\approx 50^\circ\text{C}$, with the engine not running STPA, the most appropriate for MO is the following combination of STPA subsystems: TA + KTA + Nmota (TTAM = 85°C), thus improving the gas engine thermal performance for MO at 2350 (2022/1842) min. or 16.5 (35 / 63.2) times, respectively. At the same time, for TOR $\approx 50^\circ\text{C}$, with the engine not running STPA, it is most expedient for the OP to use the following combinations of subsystems: AT + KTA, AO + KTA + NMOT and AO + KTA + NNOT (TAM = 85°C), this improves the urgent indicators of warming up the gas engine for the OP by 1650 (1430/1148) min. or 22 (34.8 / 56.2) times, respectively.

7. The developed recommendations and the results of the work were implemented in the State Enterprise "Donetsk Railway", the Institute of Gas of the NAS of Ukraine and in the educational process of UkrDAZT.

Scientific novelty of the obtained results.

1. Improved mathematical model of the working process of the thermal preparation system using the accumulated energy of the gas engine as a part of subsystems - contact heat accumulator and motor oil accumulator with thermal accumulators of phase transition, with improved subsystem of simultaneous heating of engine oil.

2. A further development of a method for reducing the warm-up time and improving the fuel efficiency of stationary gas engines in the pre-start and post-start modes and the storage of the engine by the use of stored thermal energy.

3. Dependences of gas engine warm-up time, fuel efficiency and environmental performance for the first time on the use of elements of the thermal preparation system using the stored energy in different combinations of its operation.

The practical significance of the results obtained.

1. The schematic and constructive solution of the thermal preparation system with the use of the stored energy of the gas engine which is not used for useful work is offered and the expediency of its use is established.

2. The algorithm of operation of thermal preparation system on the basis of thermal accumulators of phase transition at different ambient temperatures is offered.

3. A method of increasing the efficiency of fuel use by a gas engine in low-temperature conditions is proposed.

The results of the research were transferred to use at the Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine, introduced into production at LLC "Teplosoyuz Ukraine", and also used in the preparation of students at the National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine.

Keywords: gas engine, heat preparation system, heat accumulator, phase transition, engine oil, coolant, warm-up time, fuel consumption, harmful emissions.

List of publications of the applicant.

Publications in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Verbovsky V. Estimation of expediency of application of system of thermal preparation with use of the accumulated energy for the stationary gas engine / Systems and means of transport. Problems of operation and diagnostics: monograph / Blatnický Miroslav, Dižo Ján, Gerlici Juraj, etc .; for science. ed. prof. Gritsuk Igor. - Kherson: CDMA, 2019. - P.288 - 307 ISBN 978-966-2245-53-0

2. Gritsuk IV Improving fuel efficiency by stationary and mobile energy sources / IV. Gritsuk, V.S. Verbovsky, D.S. Adrov // Aerospace Engineering and Technology. - Kharkov: KhAI, 2009. - №4 (61), - p.43-45.

3. Gritsuk IV Features of modeling and research of processes of removal and return of heat of exhaust gases of an internal combustion engine in the design of

the heat exchanger of system of utilization of thermal energy with the thermal accumulator of a phase transition / IV. Gritsuk, OI Pyatnychko, VS Verbovsky, DS Adrov // Collection of Sciences. against Donizt UkrAZAZ. - Donetsk: DONIZT, 2011 - Issue # 28, p.122-130.

4. Gritsuk IV Results of the calculation of fuel economy and environmental performance of the internal combustion engine over the pre-warm-up and start-up cycle when using a combined warm-up system / IV. Gritsuk, D.S. Adrov, ZI Krasnokutskaya, VS Verbovsky // Bulletin of the National Transport University. - K.: NTU, 2013. - Issue 27, p. 225-232.

5. Verbovsky VS Mathematical model of calculation of indicators of work of the internal combustion engine with the system of pre-start warming during the implementation of pre-start and post-start accelerated warming / VS Verbovsky, IV. Gritsuk, D.S. Hadrov // Intercollegiate Collection of Scientific Notes. - Lutsk: LNTU, 2014. - Issue # 45, p.64-71.

6. Verbovsky VS Investigation of the gas engine pre-starter heating system based on the use of a thermal accumulator with a heat-accumulating material having a phase transition / VS Verbovsky, I.V. Gritsuk, D.S. Adrov, ZI Krasnokutsk // Internal combustion engines. Scientific and technical journal. Kharkov: NTU "KPI". - 2013. - №1. - with. 110-116.

7. Yu.F. Gutarevich Features of algorithm of work of system of pre-start warming up of the gas engine in the process of realization of start-up and warming / Yu.F. Gutarevich, IV Gritsuk, V.S. Verbovsky, ZI Krasnokutsk // Bulletin of the SevNTU. Collection of Sciences. wash. Series: Machine-building and transport. - Sevastopol: SevNTU, 2013 - Issue 143/2013., - p.53-57.

8. Gritsuk IV Peculiarities of mathematical modeling of parameters of operation of the heat accumulator of a controlled pre-start system of lubrication of the internal combustion engine in the system of combined warming / IV. Gritsuk, A.M. Gushchin, D.S. Adrov, VS Verbovsky, ZI Krasnokutsk // Collection of Sciences. against Donizt UkrAZAZ. - Donetsk: DONIZT, 2013 - Issue No. 36, p.156-161.

9. Verbovsky VS Features of pre-start heating of a stationary gas engine with use of a thermal accumulator with a phase transition / VS Verbovsky, IV. Gritsuk, D.S. Adrov, ZI Krasnokutsk // Internal combustion engines. Scientific and technical journal. Kharkov: NTU "KPI". - 2014. - №2. - with. 85-90.

10. Verbovsky VS Estimation of expediency of carrying out pre-start and post-start preparation of gas engine K-159 M2 with the help of complex system of pre-start warming / V.S. Verbovsky // Collection of Sciences. against Donizt UkrAZAZ. - Donetsk: DONIZT, 2014 - Issue No. 39, p.93-99.

11. Peculiarities of thermal preparation of the stationary power plant engine using phase transition heat accumulators / Verbovsky VS, Gritsuk IV, Skalyga MM, Belousov EV, Rudynets MV // Intercollegiate Collection of Scientific Notes. Lutsk, 2018. Issue No. 62. p.56-60 Professional edition. NMB

12. Patent No. 94641 Ukraine, IPC (2014.01) F01P 3/22 (2006.01), F01M 5/00, "System for regulating the coolant temperature, temperature and pressure of the internal combustion engine engine oil with heat recovery by heat accumulators" V.Y. Poddubnyak, Yu.F. Gutarevich, OI Friday, I.V. Gritsuk, V.S. Verbovsky, MI Sergienko, OO Zrodov, DS Adrov, AMGushchin, Yu.V. Prilepsky, DM Trifonov, ZI Krasnokutskaya, AV Verbovsky, A.I. Gritsuk / (Ukraine); Applicant and patentee: Donetsk Institute of Railway Transport, National Transport University, Gas Institute of NASU, State No. u2014 05701; statements.27.05.2014; publ. 25/11/2014, Bul. №22.-14 p.: Illus.

13. Patent No. 94642 Ukraine, IPC (2014.01) F01P 3/22 (2006.01), F01M 5/00, "System for regulating the coolant temperature, temperature and pressure of the internal combustion engine engine oil" V.Y. Poddubnyak, Yu.F. Gutarevich, OI Friday, I.V. Gritsuk, V.S. Verbovsky, MI Sergienko, OO Zrodov, DS Adrov, AMGushchin, Yu.V. Prilepsky, DM Trifonov, ZI Krasnokutskaya, Sh.K. Amerkhanova, A.V. Verbovsky, A.I. Gritsuk / (Ukraine); Applicant and patentee: Donetsk Institute of Railway Transport, National Transport University, Gas Institute of NASU, State No. u2014 05702; statements.27.05.2014; 25/11/2014, Bul. № 22. 12 pp.: Illus.

Publications that certify the dissertation materials:

14. Gritsuk IV Peculiarities of warming up of a stationary gas engine using a pre-start heating system with a phase transition thermal accumulator. Gritsuk, VS Verbovsky // International scientific-practical conference "The latest technologies of development of construction, production, operation, repair and examination of cars" (15-16 10.2014) [Text]. - Kharkiv .: KhNADU, 2014.- p. 221-222.

15. Peculiarities of pre-start thermal preparation of the power plant engine by means of a heating system with phase transient heat accumulators / Gritsuk IV, Verbovsky VS - Ship Energy: State and Problems: Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference. November 8-10, 2017 - Mykolaiv: NUS, 2017. - 472s. - P. 214-217

16. Provision of thermal preparation of the power plant engine by means of a heating system with phase-transient heat accumulators / IV. Gritsuk, V.S. Verbovsky, O. Podprygora, et al. - Proceedings of an international scientific conference on the memory of Professor Fomin Yu. and Semenov VS, April 24-28, 2019, Odessa, ONMU, 2019. 442s. - P. 108-121

17. Verbovsky VS Estimation of expediency of application of system of thermal preparation of stationary gas engine on the basis of the accumulated energy / V.S. Verbovsky - Modern energy installations for transport and technologies and equipment for their maintenance. Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference, September 12-13, 2019 - Kherson: Kherson State Maritime Academy. Pp. 93-95

Publications which additionally reflect the scientific results of the dissertation:

18. Gutarevich Yu.F. Analysis of the results of the study of fuel efficiency and environmental performance of an internal combustion gas engine equipped with a preheat system in the process of starting and warming / Yu.F. Gutarevich, IV Gritsuk, OS Dobrovolsky, DS Adrov, V.S. Verbovsky, ZI Krasnokutsk // 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. 122-128.

19. Gritsuk IV Peculiarities of Formation of the Pre-Starting Heating Cycle of an ICE in the Study of the Combined Warming System / IV. Gritsuk, V.S. Verbovsky, D.S. Adrov, ZI Krasnokutsk // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr.4. Seria: Transport. - Rzeszow. 2013, c. 227-230. ISBN 978-83-7199-878-3.

20. Gritsuk I., Mateichyk V., Smieszek M., Volkov V., Gutarevych Y., Aleksandrov V., Symonenko R., Verbovskiy V., "Improving the Vehicle 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>

21. 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. Access Mode: SAE International / Scopus: <http://papers.sae.org/2016-01-8071/>. - Title from the screen.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	27
ВСТУП.....	28
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБІТ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ В НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	35
1.1 Вплив низьких температур на ефективність роботи двигунів внутрішнього згорання.....	35
1.2 Аналіз температурних режимів двигунів внутрішнього згорання в низькотемпературних умовах експлуатації	41
1.3 Аналіз досліджень впливу низькотемпературних умов експлуатації на час прогріву двигунів внутрішнього згорання	49
1.4 Аналіз методів і засобів, забезпечуючих пристосованість двигунів внутрішнього згорання до низькотемпературних умов експлуатації	51
Висновки до розділу 1	58
РОЗДІЛ 2 УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ СТАЦІОНАРНИХ ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ ВИКОРИСТАННЯМ АКУМУЛЬОВАНОЇ ЕНЕРГІЇ	61
2.1 Вибір методу визначення показників стаціонарного газового двигуна, оснащеного системою теплової підготовки у складі акумуляторів теплоти на основі фазових переходів	61
2.2 Удосконалення методики розрахунку процесів забезпечення теплової підготовки охолоджуючої рідини і моторної оливи в процесі здійснення передпускового і післяпускового прогріву стаціонарного газового двигуна 6Ч 12/14 використанням акумуляованої енергії	78
2.3 Основні рівняння удосконаленої методики розрахунку процесів	

здійснення теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 під час передпускового і післяпускового прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини	88
2.4 Перевірка адекватності основних залежностей удосконаленої методики розрахунку процесів здійснення теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 під час передпускового і післяпускового прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини .	119
2.5 Висновки до розділу 2.....	121
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	
3.1 Програма експериментальних досліджень.....	123
3.2 Об'єкти і обладнання експериментальних досліджень та вимірювальні прилади.....	125
3.3 Методика формування циклу передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 з використанням СТП на основі ТА	142
3.4 Алгоритм роботи СТП газового двигуна при виконанні передпускового і післяпускового прогріву та зберігання теплової енергії	145
3.5 Методики проведення експериментальних досліджень.....	153
3.6 Результати експериментальних досліджень системи теплової підготовки	164
3.7 Висновки до розділу 3.....	179
РОЗДІЛ 4 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГАЗОВОГО ДВИГУНА В ПРОЦЕСІ ПЕРЕДПУСКОВОГО І ПІСЛЯПУСКОВОГО ПРОГРІВУ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ	
4.1 Оцінювання впливу складових СТП на роботу двигуна	182
4.2 Оцінка впливу параметрів налаштування складових СТП на показники роботи дослідного газового двигуна	191

4.3 Оцінка доцільності прийнятих рішень щодо передпускової і післяпускової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою	
СТП	202
4.4 Висновки до розділу 4.....	215
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ	218
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	220
ДОДАТОК А.....	238
ДОДАТОК Б.....	245
ДОДАТОК В.....	248
ДОДАТОК Г.....	260
ДОДАТОК Д.....	267

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТА – тепловий акумулятор;
ТАМ – теплоакumuлюючий матеріал;
ТА ФП – тепловий акумулятор фазового переходу;
ВГ – відпрацьовані гази;
ВМТ – верхня мертва точка;
ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;
ДГД – дослідний газовий двигун;
ЕУ – енергетичні установки;
ІГ НАНУ – Інститут Газу Національної Академії Наук України;
КТА – контактний тепловий акумулятор;
МО – моторна олива;
НМО - накопичувач моторної оливи з ТА ФП;
НМТ – нижня мертва точка;
ОР – охолоджуюча рідина;
ОС – оточуюче середовище;
ППД – підсистема прискореного прогріву двигуна;
СМ – система мащення;
СО – система охолодження;
СТП - система теплової підготовки (з використанням акумульованої енергії);
ТЗ – транспортні засоби;
УТ – утилізаційний теплообмінник;
УТС - підсистема утилізації теплової енергії відпрацьованих газів;
ФП - фазовий перехід;
х.х. – холостий хід;
ШС – штатна система;
ГР – горячий резерв.

ВСТУП

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 задачі 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 призначенням;

- 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 «Теплосюз Україна».

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 розігріву 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. Коблево – 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, 10 - 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 сторінки основного тексту, 51 рисунка, 19 таблиць, 5 додатків на 31 сторінці, список використаних літературних джерел з 143 найменування на 18 сторінках.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ РОБІТ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ ПРИ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

1.1 Особливості впливу низьких температур на ефективність роботи двигунів внутрішнього згорання

Проблемі зниження ефективності експлуатації двигунів внутрішнього згорання енергетичних установок (ЕУ) і транспортних засобів (ТЗ) в умовах низьких температур присвячена велика кількість робіт різних авторів: Крамаренко Г.В. [1], Авдонькіна Ф.Н. [2], Бакуревіча Е.С. [3], Великанова Д.П., Говорущенко Н.Я. [4, 5], Колчина В.С., Колесника П.А., Лосавіо Г.С. [6], Резника Л.Г. [7], Ертмана С.О. [8], Гринберга Л.С. [9], Полікера Б.Є., Михальського Л.Л., Маркова В.О. [10], Карнаухова М.М. [11], Грицюка О.В. [12], Карташевича О.М., Кухарьонка Г.М. [13], Денисова О.С., Альмеєва Р.І. [14], Шеховцова А.Ф., Абрамчука Ф.І. [15] та багатьох інших. Численні дослідження впливу низьких температурних умов експлуатації на роботу двигунів внутрішнього згорання ЕУ і ТЗ проводились в НТУ (ХП) [12, 13, 15 тощо], НУК ім. Нахімова [16], УкрДАЗТ [17, 18], НТУ [19], ОНМА [20, 21], ДонІЗТ УкрДАЗТ [22, 23], ХНАДУ [4, 5, 13, 24, 25], тощо, а також за кордоном в РФ, це НДІАТ, МГТУ ім. Н.Е.Баумана, НАМІ, МАДІ (ТУ), СибАДІ, ТюмДНГУ тощо [25 - 34 тощо], а також в інших організаціях та установах.

Погіршення ефективності та якості роботи ЕУ і ТЗ при низьких температурах пов'язують, як правило, з погіршенням температурного стану двигунів [1 - 8, 26, 35 - 37 тощо].

Зниження ефективності роботи двигуна при низьких температурах експлуатації позначається на таких показниках як: легкість запуску непрогрітого агрегату, інтенсивність зносу його деталей, завищена витрата палива, тощо. Серед основних проблем ефективної експлуатації ДВЗ

особливе місце займає їх передпускова і післяпускова теплова підготовка. Ця проблема є суттєвою для газових ДВЗ, які служать приводом установок, що забезпечують безперервне живлення відповідальних електричних мереж, для яких виключається можливість застосування традиційних способів і засобів передпускової підготовки і прогріву [38]. Ще однією складністю часто є те, що в таких умовах потрібно зразу ж після пуску здійснювати повне навантаження двигуна.

Пускові якості двигунів оцінюються граничною температурою надійного пуску і часом, необхідним для прийняття навантаження. Серед основних вимог до пуску газової електростанції слід виділити наступні [39]: перед запуском електростанції при температурі зовнішнього повітря $+5^{\circ}\text{C}$ і нижче необхідно забезпечити підігрів охолоджуючої рідини для полегшення запуску. При виконанні запуску електростанції в ручному режимі: запустити двигун без навантаження і дати попрацювати йому протягом 3-4 хвилин, потім необхідно здійснити подачу 30% навантаження і дочекатися збільшення температури охолоджуючої рідини до 50°C , лише потім можливо подати 50% навантаження до 100°C [39, 40]. При температурі охолоджуючої рідини 70°C можливо здійснювати навантаження до 100% [39, 40]. При низьких температурах процедура пуску двигуна ускладнюється, надійність пуску істотно знижується, а час підготовки до прийняття навантаження зростає.

Під надійним пуском двигуна ЕУ і ТЗ прийнято розуміти пуск двигуна на основному паливі при використанні штатних акумуляторних батарей, заряджених на 75%, не більше ніж за три спроби [8, 41]. Тривалість кожної спроби не повинна перевищувати 10 сек. Інтервали між спробами повинні складати 60 – 90 сек. [8, 41].

Утруднення пуску двигуна за низьких температурах виникає через низькі температури охолоджуючої рідини, його складових і силового агрегату, що обумовлює погіршення запалювання робочої суміші і підвищену густину моторної оливи, внаслідок чого виникають складності

досягнення колінчастим валом пускових обертів [6, 8, 27, 37]. Термін запуску двигуна істотно залежить від змін у розподілі позитивних і негативних потоків енергії при здійсненні пуску [8].

Щоб забезпечити колінчастому валу двигуна необхідні пускові обороти, стартер (або інший пусковий пристрій) повинен має розвивати достатній крутний момент. Він визначається моментом опору прокручуванню колінчастого валу при здійсненні пуску [1, 8, 10]. Основною складовою моменту опору прокручуванню колінчастого вала двигуна при холодному пуску є момент на подолання сил тертя і опору прокручуванню (до 92%) [8, 41]. При цьому моменти на подолання сил інерції і компресії практично не змінюються.

При низькій температурі густина моторної оливи, а разом з тим і момент на подолання сил тертя, можуть зростати настільки, що момент тертя виявиться більшим, ніж максимальний створюваний момент стартеру або пускової установки. В цьому випадку пуск двигуна виявиться неможливим.

Разом із збільшенням моменту опору прокручуванню колінчастого валу двигуна при низьких температурах різко знижуються можливості пускового пристрою (стартера). Це насамперед пояснюється зниженням працездатності акумуляторних батарей при зниженні їх температури [1, 5, 6, 8].

За низьких температур значно погіршуються умови запалювання робочої суміші [1, 2]. Причинами погіршення умов запалювання робочої суміші для газових двигунів є збіднення суміші і зниження енергії іскри [1, 6, 8, 41].

Пускові якості двигуна ЕУ і ТЗ в низькотемпературних умовах експлуатації залежать також від ступеня його зносу. Тривалість пуску зношених двигунів в 7 - 15 разів більше ніж не зношених [1, 2, 8].

При експлуатації двигуна в низькотемпературних умовах виділяють три стадії, що характеризуються підвищеним зносом його вузлів і деталей: пуск двигуна; післяпусковий прогрів двигуна; робота прогрітого двигуна.

Авторами досліджень [8, 21, 42] доведено, що за низьких температур експлуатації підвищений знос дотичних деталей двигуна в період пуску зумовлений дією підвищених сил тертя. Пускові зноси особливо великі в першу хвилину після пуску двигуна через неможливість своєчасного надходження МО до вузлів тертя. Так, наприклад, при температурі мінус 10 °С охолоджена МО з'являється в корінних підшипниках через 20 секунд після початку процесу прокручування вала холодного двигуна, а при температурі мінус 20 °С - через 26 секунд [1, 2, 8].

Пускові зноси, згідно з твердженнями авторів [6, 8, 21], складають 5-70% від загальної величини експлуатаційних зносів ТЗ різних марок і моделей. Значення 40-70% вказується в роботах К.С. Рамаїа і Е.О. Чудакова [6, 8, 21], 5-7% - в роботах Г.С. Лосавіо [6, 8, 21, 42], який вперше спростував думку про надмірно великі пускові зноси двигунів при низьких температурах ОС [6, 8, 21]. В якості параметру для порівняння величин зносів Г.С. Лосавіо прийнятий діаметральний знос циліндрів двигунів за один пуск, виражений в еквівалентній відстані, що проходить ТЗ. На рис. 1.1 показана залежність пробігу ТЗ, еквівалентного за зносом одному пуску, від температури двигуна при здійсненні пуску за даними авторів [6, 8, 21].

При застосуванні синтетичних і напівсинтетичних моторних оли (МО) з пологою характеристикою густини МО частка пускових зносів двигуна скорочується до 0,5-1,0% від величини загальних експлуатаційних зносів [6, 8, 41].

Лосавіо Г.С. вперше заявив про те, що основний знос третьових поверхонь двигуна відбувається в період післяпускового прогріву холодного двигуна при роботі на холостому ході [6, 8]. Це підтверджено також в роботах [7, 8]. Одночасно доведено, що основною причиною зносу циліндрів двигуна є електрохімічна корозія, яка виникає внаслідок взаємодії з металом активних кислот, що містяться в продуктах згорання. При зниженому тепловому режимі можливість впливу на метал циліндрів зростає, оскільки паливо, що не випарується і не згоріло в циліндрі двигуна, змиває з

тертьових поверхонь масляну плівку. Активізації корозії також сприяє посилена конденсація парів води і кислот на холодних стінках двигуна [6, 8]. Г.С. Лосавіо називає значення зносів, що припадають саме на холодні пуски в межах 6-8% від всіх зносів.

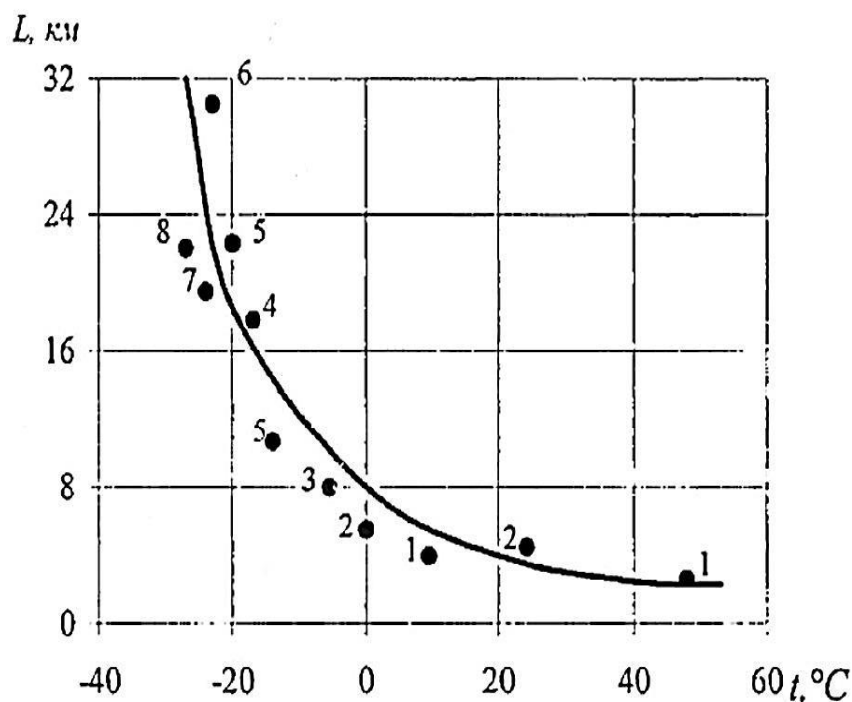


Рисунок 1.1 – Залежність пускових зносів двигунів ТЗ від температури оточуючого середовища: 1 - за Чудаковим Є.О.; 2 - за Дибовим О.В.; 3 - за Карницьким В.П.; 4 - за Дем'яновим Л.Л.; 5 - за Лосавіо Г.С.; 6 - за Туркевичем І.Д.; 7 - за Гурєєвим А.А.; 8 - за Савельєвим Г.С. [6, 8, 21]

Проте, дослідження Г.С. Лосавіо [6, 8] проводились на двигунах із застосуванням мінеральних МО. В сучасних умовах, коли експлуатація двигунів в низькотемпературних умовах проводиться з використанням синтетичних і напівсинтетичних МО з пологою характеристикою густини, частка пускових зносів двигуна скорочується до 2-4% від величини загальних експлуатаційних. Зміна інтенсивності зношування, безумовно, впливає на показники надійності. Найбільш повно загальну схему впливу низьких температур на показники надійності машин навів Ертман С.О. у роботі [8] на

рис. 1.5. Зниження надійності машин в низькотемпературних умовах експлуатації викликається рядом причин, що в свою чергу, призводять до збільшення частоти пускових відмов, зниженню ресурсу елементів ДВЗ, погіршення ремонтопридатності.

Крім цього, експлуатація ТЗ і ЕУ в низькотемпературних умовах супроводжується збільшенням витрати палива [2, 6, 7, 8, 42, 43]. Це насамперед зумовлено погіршенням теплового режиму агрегатів і деталей ДВЗ, що обумовлює: підвищення опору через загустіння МО [1, 2, 6, 7, 8, 42, 43]; неповноту згорання палива, пов'язану з поганим його перемішуванням [1, 6, 8, 42]; необхідність додаткових витрат палива на прогрів двигуна [1, 6 - 8]; більш тривалу роботу двигуна на знижених за навантаженням і несталих швидкісних режимах [1, 6, 8]; тощо.

Індикаторний ККД двигуна ЕУ і ТЗ залежить від ступеня стиснення, коефіцієнта надлишку повітря, частоти обертання. Температура повітря безпосередньо впливає на коефіцієнт надлишку повітря і через його зміну на індикаторний ККД [42, 43]. При підвищенні температури повітря цей коефіцієнт зменшується, і суміш збагачується. Як збіднення, так і збагачення суміші впливають на індикаторний ККД і збільшують витрати палива [6, 8, 42].

Теплотворна здатність суміші залежить від коефіцієнта надлишку повітря. При зменшенні або збільшенні якої теплотворна здатність паливо-повітряної суміші знижується, що викликає підвищену витрату палива.

Температура повітря безпосередньо впливає на тепловий стан двигуна. При зниженні температури НС температура охолоджуючої рідини (ОР) і елементів ДВЗ знижується, густина МО при цьому зростає, що сприяє зменшенню механічного ККД, що також викликає збільшення витрати палива [6, 8, 42].

1.2 Аналіз температурних режимів двигунів внутрішнього згорання за низьких температур

Основними параметрами, які характеризують температурний режим двигуна ЕУ і ТЗ, є усталена температура ОР і МО, а також час їх прогріву і охолодження [2, 3, 6, 8, 26, 28, 43].

Усталена температура - це така температура, що встановилася в ОР і МО двигуна ЕУ і ТЗ після довготривалої неперервної роботи, в одних і тих же умовах на встановленому режимі. При довготривалому режимі роботи двигуна протягом деякого проміжку часу в якості характеристики температурного режиму ЕУ і ТЗ виступає середня температура ОР і МО. Темп прогріву і охолодження є величиною, що характеризує відносну швидкість зміни температури ОР і МО [8, 43, 44].

Зміна температурного режиму двигуна ЕУ і ТЗ при низькотемпературних умовах експлуатації зумовлена насамперед втратами тепла в навколишнє середовище. Інтенсивність прогріву двигуна може бути охарактеризована темпом прогріву двигуна [8, 45]. Значення темпу прогріву залежить від режиму роботи двигуна, його первинного теплового стану, потужності, а також від інтенсивності втрат теплоти в навколишнє середовище. Втрати теплоти зростають при зниженні температури ОС і зі збільшенням швидкості повітряного потоку (вітру), а інтенсивність віддачі теплоти двигуна в довкілля можливо охарактеризувати узагальненим показником, у якості якого може виступати темп (швидкість) охолодження двигуна [43, 44].

Значення темпу охолодження, що обумовлюється умовами тепловіддачі двигуна ЕУ і ТЗ при низькотемпературних умовах експлуатації в навколишнє середовище, а також його масою і теплоємністю, має диференційований характер, закономірність зміни якого до теперішнього часу в повній мірі не встановлена [8, 26, 43, 44 - 48].

В джерелах [45, 49, 50] наводяться рекомендації щодо вибору режимних параметрів різних пристроїв передпускового підігріву ДВЗ в зимовий період, необхідних для надійного запуску. Однак ці рекомендації, як правило, неконкретні і суперечливі (не вказуються сорти МО, що розігріваються, не наводяться критерії та формули, що враховують різні умови експлуатації і типи двигунів).

З усього різноманіття і суперечливості наведених даних за вибором параметрів пристрою передпускового розігріву МО, можливо зробити висновок, що для різних умов розігріву двигуна є свої режимні та економічні показники, що встановлюють, в першу чергу, параметри температури і потужності. Тому при проектуванні нових пристроїв передпускового розігріву двигунів, що базуються на нагрівальних елементах, з'являється необхідність розробки нової методики, на основі вище перерахованих параметрів.

Однією з головних задач при передпусковому підігріві ОР і МО є визначення місця підведення теплоти. Місце підведення теплоти, характер розташування нагрівального пристрою, істотно впливає на нерівномірність поля температур в ОР і МО. Це тягне за собою неоднаковий час надходження ОР в СО і МО в масляну магістраль ДВЗ. При цьому, природно, чим менший період затримки тиску МО в системі мащення, тим краще умови його надходження до тертьових сполучень [51]. Проведені дослідження показують [51], що підведення теплоти через окремі ділянки поверхні піддону веде до нерівномірного розігріву моторної оливи. Це в свою чергу викликає складні зміни температури в сполученнях тертьових деталей двигуна під час його прокручування [51].

Також важливим питанням є розробка методики щодо обґрунтування конструктивних параметрів пристрою прогріву МО. В літературних джерелах практично відсутні подібні методики. Таким чином, питання характеру розміщення нагрівального пристрою в ДВЗ є важливими і актуальними, однак це питання недостатньо вивчено.

Не менш важливим параметром є також температура МО, до якої необхідно здійснювати її нагрів, у зв'язку із тим, що це в свою чергу, впливає на загальний час теплової підготовки і витрати енергії. Вибір оптимальної температури МО, при якій можливо здійснювати запуск з мінімальним зносом двигуна, є актуальним завданням. В літературі [1, 2, 38 – 40, 49, 50 тощо] наводиться досить багато різних даних про температурний стан і підігрів двигунів, які необхідні для надійного пуску, в тому числі і щодо МО. В вище згаданих роботах автори керуються різними критеріями від техніко-економічних до визначення ступеня зносу двигуна і часу тривалості його запуску. Всі ці критерії по-своєму вірні і дуже складно керуватися будь-яким одним. Загальні рекомендації щодо температури МО коливаються в межах від -25 до $+80$ °C [49].

Узагальнені результати аналізу рекомендованих температур МО перед пуском ДВЗ різних авторів [53] наведені в табл. 1.1.

Для ДВЗ стаціонарних енергетичних установок пускова температура охолоджуючої рідини і моторної оливи нижче $+5$ °C не допускається [39, 40, 51, 52]. Як правило, на практиці ці значення знаходяться вище означеної температури, а для стаціонарних ДВЗ енергетичних установок транспортних засобів [40 – 42, 45] – ще значно вище і може доходити до $+10 \dots +45$ °C.

Особливістю дослідного двигуна полягають в тому, що він, у відповідності до своєї конструкції і завдань виробника в частині експлуатаційного призначення, може бути багатоцільовим (за призначенням), тобто використаним в якості стаціонарного – для роботи у складі електростанцій загального призначення (дизель і газовий двигун), в якості транспортного – у складі електростанцій (дизель і газовий двигун) для приводу електрогенератора (залізничний, річковий і морський транспорт) і (або) безпосередньо приводу гвинта на річковому і морському транспорті (особливо може бути поширений у складі суден портового і допоміжного транспорту). Тому його можливо вважати двигуном багатоцільового призначення.

Таблиця 1.1 - Рекомендовані температури моторної оливи перед пуском
двигунів внутрішнього згорання

Автори	Температура моторної оливи в піддоні блок-картера двигуна, °С
Ю.Л. Бакуревич і інші	+5 ... +15
Л.О. Миколаїв і інші	-10 (зимові сорти моторних олив) -25 (10% розбавлення бензином)
Г.В. Крамаренко і інші	+15
В.І. Єрохов	+20
Л.М. Мінкін і інші	0
І.М. Примаков	+20
Г.І. Суранов	0 ... +50
Б.О. Взоров і інші	+80
А.Б. Стефановський	-15
	-20
О.П. Жигadlo	+50 ... +70
О.П. Кошик	+50
С.А. Суранов	+20
С.О. Конанов	+20
В.Г. Карпенко	+20
Г.І. Саламасов	+10 ... +30

Враховуючи особливості використання двигунів внутрішнього згорання за багатоцільовим призначенням потрібно проаналізувати їх конструктивні особливості і умови їх експлуатації для усіх можливих випадків використання. Це потрібно для того, що у відповідності до цільових задач їх призначення, формуються й різні вимоги щодо їх пускових температур і температур зберігання без роботи в режимі х.х. в умовах експлуатації.

Зупинемось на особливостях експлуатації стаціонарних двигунів суднового і залізничного призначення в частині особливостей забезпечення робочих температур перед їх запуском.

Стаціонарні двигуни суднового призначення піддаються значним змінам кліматичних і природних умов, характерним для різних частин земної кулі і тому вони повинні бути здатними працювати в різних умовах навколишнього середовища: в зимових і літніх, що характерні для арктичних і тропічних районів (в тому числі на протязі одного рейсу) [54 - 56]. Оскільки зміни температури на поверхні моря досить обмежені, стаціонарний двигун суднового призначення звичайно не буде піддаватися реальним екстремальним температурам. Однак зміни, що відбуваються в умовах навколишнього середовища, серед іншого, викликають зміни в частині загальної витрати палива, кількості відпрацьованих газів і температур двигуна. Крім того, температура повітря у впускному колекторі, параметри стискування та тиску спалювання в циліндрі у стаціонарних двигунів суднового призначення можуть змінюватися. При дуже низьких температурах навколишнього середовища, температура повітря, що впускається в двигун, істотно впливає на його роботу.

Щоб захистити двигун від холодної корозії, а особливо циліндрові вкладиші під час запуску, в якості обмеження, повинні обов'язково встановлюватися перед запуском двигуна, деякі мінімальні температурні,.

Запуск двигуна рекомендується при наступних нормальних умовах: двигун повинен запускатися при прогріванні теплоносія водяної сорочки мінімум до 50 °C і поступово підвищуватися при зміні частоти обертання до 90 % від зазначеної максимально стійкої частоти обертання для номінальної потужності. Для роботи в діапазоні від 90% до 100% вказаної максимально стійкої частоти обертання для номінальної потужності, рекомендується, щоб навантаження збільшувалося повільно, протягом не менше 30 хвилин [54 - 56].

Пуск холодного двигуна, у виключних випадках, коли неможливо виконати вищевказані рекомендації, можливий при мінімальній температурі МО 20 °C і, після якої необхідно поступово підвищувати частоту обертання до 90% від номінальної. Однак, перше ніж перевищити значення 90% від

номінальної, мінімальна температура двигуна повинна складати 50 °С. Для роботи в діапазоні від 90% до 100% від номінальної частоти обертання для номінальної потужності рекомендується, щоб навантаження збільшувалося поступово - тобто на протязі не менше 30 хвилин.

Період часу, необхідний для підвищення температури води в сорочці охолодження від 20 °С до 50 °С, буде залежати від кількості охолоджуючої рідини в системі охолодження, і від навантаження двигуна [54 - 56].

Особливості попереднього нагрівання двигуна під час тривалого простоювання наступні. Під час короткотермінового знаходження в порту (тобто менше 4-5 днів), рекомендується, щоб двигун був попередньо розігрітий. Температуру на виході охолоджуючої рідини з сорочки охолодження слід утримувати як можна вище і, перед запуском, вона повинна знаходитися в межах не менше 50 °С. Це може бути досягнуто або шляхом використання рідини у системі охолодження із допоміжного двигуна або за допомогою вбудованого підігрівача в системі охолодження ОР, або комбінації обох методів [54 - 56]. Для прикладу - системи на основі водяної сорочки з вбудованим підігрівачем. Для двох різних підігрівачів води для сорочок систем суднового двигуна, у варіантах А і В, позиціонування підігрівача в ОР сорочки система охолодження показано схематично на рис. 1.2 і 1.3 відповідно [54 - 56].

Для системи А потік циркулюючої води розподіляється на дві гілки, одна через двигун і інша через систему охолоджувальної води поза двигуном. Як показують стрілки, ОР підігрівача рухається в протилежному напрямку через двигун, у порівнянні з напрямком ОР в основний оболонці. Оскільки вхід для ОР знаходиться у верхній частині двигуна, можливо вважати попередній прогрів двигуна більш ефективним [54 - 56]. Для системи В підігрівач і циркулюючий насос розміщені паралельно з головними насосами водяної сорочки і напрямок потоку ОР такий же, як для системи охолодження охолоджуючої рідини. В обох випадках робота підігрівача контролюється датчиком температури після підігрівача. У разі, коли

підігрівач встановлений в система охолодження ОР, як показано на рис. 1.2 і 1.3, обсяг потоку води від нього, і, отже, продуктивність насоса підігрівача повинна складати близько 10% від обсягу (продуктивності) головного насоса.

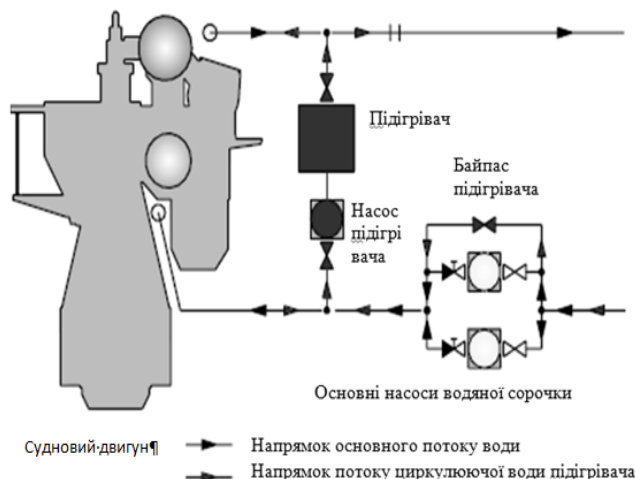


Рисунок 1.2 - Підігрів сорочки

системи охолодження води –

Система А

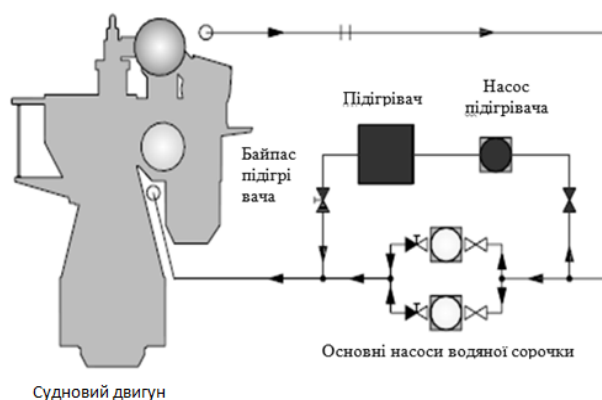


Рисунок 1.3 - Підігрів сорочки

системи охолодження води –

Система В

Виходячи з досвіду експлуатації суднових двигунів рекомендується, що падіння тиску в підігрівачі має бути близько 20 кПа. Насос підігрівача і головний насос повинен бути електричними з блокуваннями, щоб уникнути ризику одночасного включення під час роботи [54 - 56]. Потужність підігрівача залежить від необхідного часу попереднього нагрівання і значень необхідного підвищення температури води в сорочці охолодження двигуна. Зміни температури в часі показані схематично на рис. 1.4, причому параметри майже однакові для всіх типів двигунів [54 - 56].

Взагалі, підвищення температури на величину близько 35 °С (від 15 °С до 50 °С) є обов'язковим. Час попереднього нагрівання 12 годин вимагає потужності підігрівача близько 1% від номінальної потужності суднового двигуна. Криві на рис. 1.4 розраховані виходячи з припущення про те, що на початку попереднього нагріву, двигун і моторний відсік мають однакову температуру. Передбачається, що температура буде рівномірно прогрівати весь двигун під час попереднього нагрівання. Для чого враховуються маси

металу і поверхні двигуна в нижній частині двигуна, які також включені в розрахунок. У реальних умовах експлуатації суднових енергетичних установок (СЕУ) існують значні теплові втрати від працюючого енергетичного обладнання в навколишнє середовище, використання яких, з метою підвищення ефективності ЕУ, можливо за допомогою застосування засобів накопичення або утилізації теплової енергії, що забезпечують, в тому числі, і передпусковий прогрів ДВЗ [54 - 56].

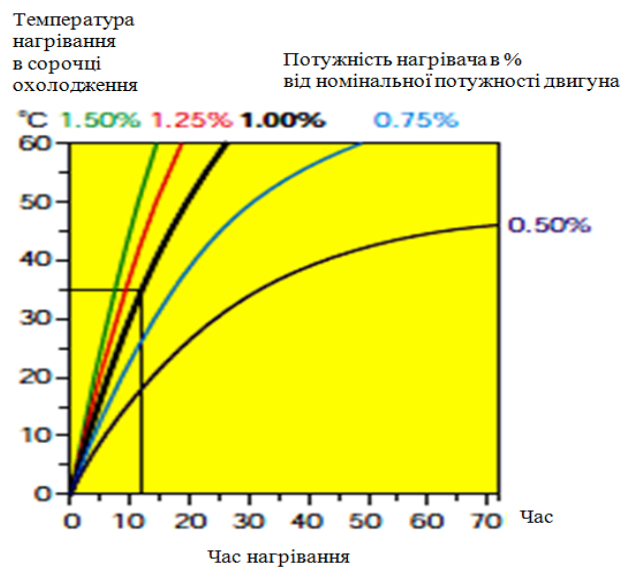


Рисунок 1.4 – Нагрів суднового двигуна (збільшення температури і відповідні криві часу попереднього розігріву показані для п'яти різних розмірів підігрівачів, вказаних у % від номінальної потужності двигуна)

Вибір перспективних засобів і схем систем передпускового прогріву ДВЗ СЕУ проводиться на підставі прийнятих нормативних вимог, що ставляться до таких систем, а також експертним шляхом, на підставі оцінок собівартості системи, конструктивної та технологічної простоти, її надійності та безпеки при експлуатації [54 - 56].

До двигунів залізничного призначення ставляться схожі вимоги в частині забезпечення передпускової і післяпускової теплової підготовки. Тому, враховуючі те, що багатоцільові двигуни за своєю конструкцією і виконанням в частині основних елементів схожі, то виникає питання про

можливість забезпечення для них однакових умов теплової підготовки. Інформації в літературних джерелах в цьому напрямку досліджень не виявлено.

1.3 Аналіз досліджень впливу низьких температур на час прогріву двигунів внутрішнього згорання

В результаті досліджень, проведених різними авторами, було встановлено, що тривалість прогріву двигуна ЕУ і ТЗ за низьких температур експлуатації суттєво залежить від: вихідного теплового стану ОР і МО двигуна [1, 2, 4, 5, 6 - 8, 12, 25, 34, 45, 53, 49 тощо]; температури НС і швидкості вітру [4 - 8, 28, 17, 27, 44 тощо]; наявності засобів регулювання теплових потоків в конструкції двигуна (рис 1.5) [1, 2, 6, 8, 11, 43 тощо]; конструкції приводу і продуктивності вентилятора системи охолодження (рис 1.5, 1.6) [1, 2, 8 тощо]; частоти обертання колінчастого валу при прогріванні [8 тощо]; конструктивних особливостей двигуна: кривошипно-шатунного механізму, систем охолодження і мащення, тощо [2, 8, 43 тощо]; утеплення моторного відсіку ТЗ або капоту (кунгу) ЕУ, тощо [1, 2, 6, 8, 42 тощо].

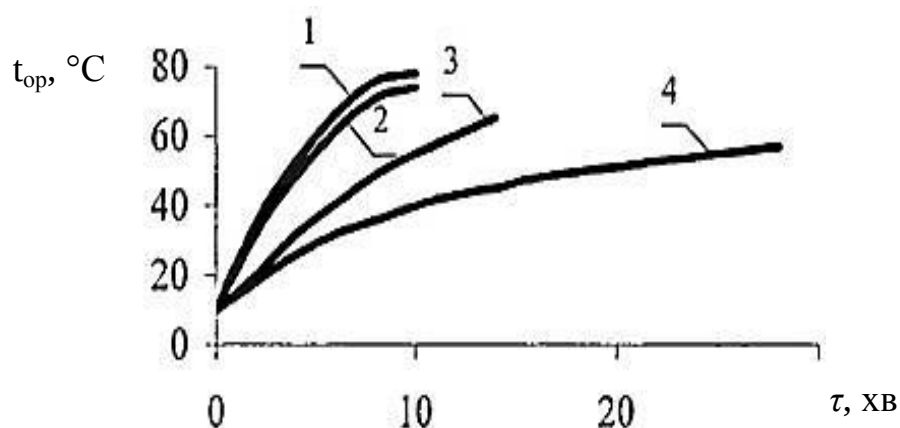


Рисунок 1.5 - Залежність температури ОР двигунів групи ЗМЗ-53 від часу прогріву після пуску [8, 27]: 1 - з термостатом без вентилятора; 2 - з термостатом з вентилятором; 3 - без термостата без вентилятора; 4 - без термостата з вентилятором

В процесі прогріву двигуна в режимі холостого ходу температура МО і ОР підвищується. Як показав аналіз літератури, дослідження температури двигуна ТЗ і ЕУ проводиться, в більшості робіт, за даними вимірювань температур його ОР і МО. Між тим, зв'язок між температурою двигуна і температурою його ОР і МО при здійсненні прогріву науково не обґрунтований, не встановлені відповідні математичні залежності, не визначені чисельні значення параметрів, що входять до неї.

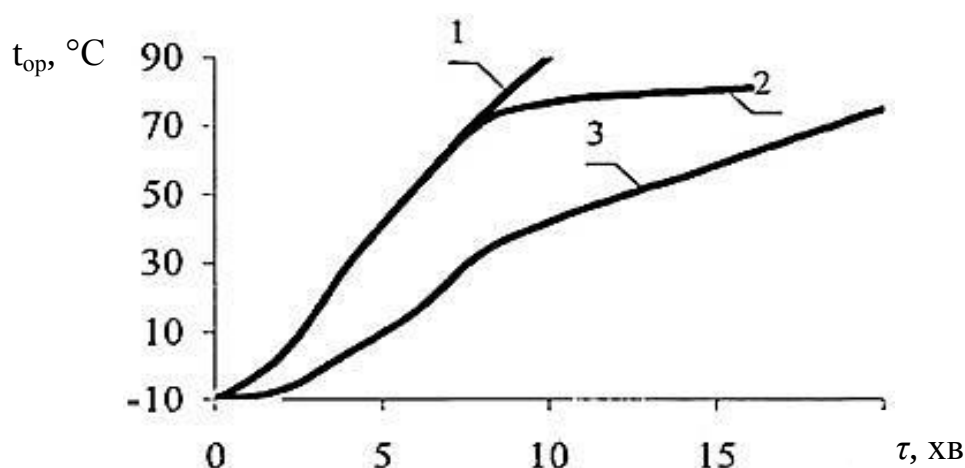


Рисунок 1.6 – Залежність температури ОР двигунів групи ЗМЗ-53 від часу прогріву після пуску [8, 27]: 1 – з відключеним водяним насосом без термостата і вентилятора; 2 – з термостатом і вентилятором; 3 – без термостата і без вентилятора

Аналіз раніше проведених наукових досліджень, зокрема, робіт, виконаних в ДонІЗТ УкрДАЗТ [22, 25 тощо], показав, що робота в цьому напрямку зводилась, в основному, до досліджень впливу тільки температури ОР на процес роботи двигуна під час здійснення його пуску.

Проведені дослідження показали, що найбільше значення темпу прогріву виникає при збільшених швидкостях циркуляції ОР у порівнянні зі штатною системою охолодження і при дії стороннього джерела теплової підготовки ОР (теплового акумулятора (ТА) фазового переходу) [22, 25 тощо]. Крім того, в результаті проведених досліджень в ДонІЗТ УкрДАЗТ встановлено залежність зміни усталеної температури різних зон двигуна від

температури НС [101, 102 тощо].

1.4 Аналіз методів і засобів, забезпечуючих пристосованість двигунів внутрішнього згорання до низькотемпературних умов експлуатації

Вплив низьких температур на температурний режим двигунів ЕУ і ТЗ різних марок і моделей обумовлений різним рівнем пристосованості цих двигунів до вимог експлуатації [8]. Термін «пристосованість» вже існує його використовують фахівці в процесі експлуатації ЕУ і ТЗ.

Визначення пристосованості, як однієї з найбільш важливих характеристик якості двигунів ТЗ (і ЕУ), вперше сформульовано і обґрунтовано проф. Л.Г. Резніком: "Під пристосованістю мається на увазі властивість забезпечувати в певних умовах використання задані значення експлуатаційних показників" [8].

Вивчення і оцінку ступеня відповідності ТЗ умовам експлуатації проводив ще в 30-х роках двадцятого століття академік Е.А. Чудаков [1, 8]. Поняття пристосованості використовується і професором М.Я. Говорущенко [6, 7], який, зокрема, говорить про пристосованість системи «автомобіль-водій» до різних умов роботи за допомогою зміни експлуатаційних властивостей [6 - 8]. Д.П. Веліканов вказує, що будь яка транспортна машина, володіє комплексом якостей, що визначають ступінь її придатності до використання в певних умовах експлуатації [1, 8].

Визначено, що різна пристосованість двигунів ЕУ і ТЗ до низькотемпературних умов експлуатації, в тому числі, і до здійснення пуску залежить, перш за все, від конструктивно-технологічних особливостей механізмів і систем двигунів.

До конструктивних заходів щодо підвищення пристосованості двигунів ЕУ і ТЗ до низькотемпературних умов експлуатації відносять наступні:

- передбачення в конструкції двигунів ЕУ і ТЗ засобів, що полегшують пуск холодного двигуна - засобів передпускового і прискореного

післяпускового розігріву двигуна, пристроїв для забезпечення надійного сумішоутворення і запалювання робочої суміші тощо [6, 8];

- використання обігріву стартертерних акумуляторних батарей [6, 8];
- створення засобів автоматичного регулювання режиму роботи вентилятора в СО, в залежності від температури ОР двигуна, шляхом зміни кута атаки лопатей або відключення вентилятора в залежності від температури ОС [1, 2, 4, 8];

- заходи для скорочення післяпускового розігріву холодного двигуна [1, 2, 6, 8]: термостат в системі охолодження; стулчасті жалюзі перед радіатором; термостатичні керовані вентилятори або вентилятори з меншою кількістю лопатей, гумовотканинні шторки перед радіатором, ущільнення відсіку двигуна, напиленням на внутрішні його поверхні теплоізолюючих матеріалів [1, 2, 6, 8].

Теплоенергетичні втрати і баланс теплоти двигунів внутрішнього згорання мають свої особливості. Теплова енергія згорання палива впливає на складові енергетичного балансу двигуна, а саме на втрати на подолання сил тертя та інерції, розігрівання охолоджуючої рідини та моторної оливи. Крім цього, частина теплової енергії згорання палива втрачається з відпрацьованими газами та розсіюється в навколишнє середовище внаслідок тепловипромінювання і конвекції. Ці втрати тим більші, чим більший перепад температур між двигуном і навколишнім середовищем.

На рис. 1.7 показані діаграми співвідношення, які описують енергетичний баланс двигуна в режимі його прогріву в умовах експлуатації. Показані результати були отримані при постійних швидкості і навантаженні двигуна з примусовим запалюванням [57 - 59].

На рис. 1.7 а показаний розподіл енергії теплового балансу в камері згорання двигуна, а на рис. 1.7 б показаний розподіл 53% теплової енергії, яка витрачається на розігрівання двигуна. З вказаної кількості теплової енергії лише 4% йде на розігрівання саме моторної оливи в блок-картері двигуна, 12% – забезпечує збільшення температури охолоджуючої рідини в

СО у блоці циліндрів, 32% теплової енергії переходить до металевих корпусних елементів двигуна (блок циліндрів, головка блоку, колінчастий вал тощо) та 52% – втрачається безпосередньо в навколишнє середовище – так звана «невикористана теплота». Аналіз інформації на рис. 1.7 дає можливість визначити найбільш оптимальні шляхи вирішення задачі з підвищення енергетичної ефективності двигунів при холодному пуску і прогріванню на час теплової підготовки, паливну економічність та екологічні показники двигуна.

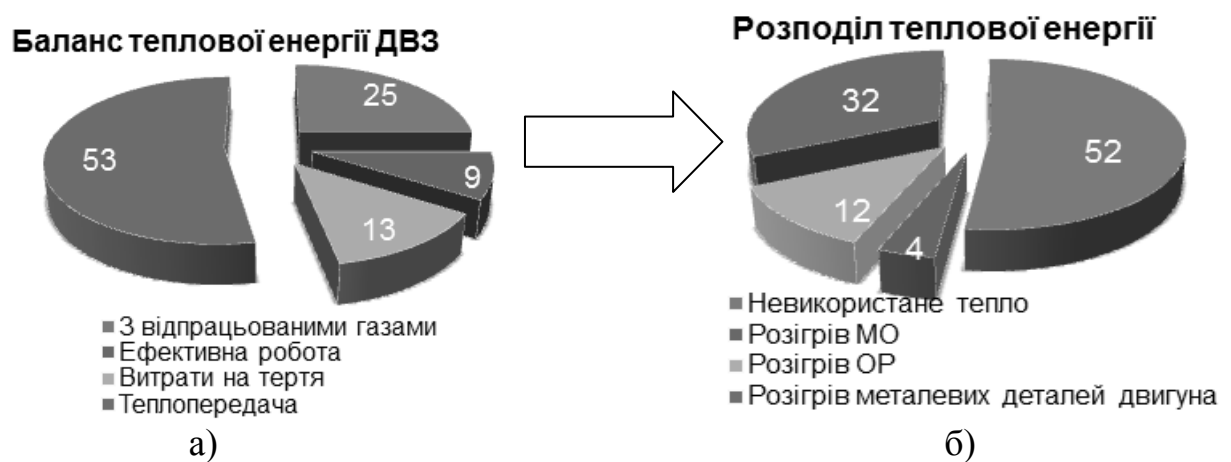


Рисунок 1.7 – Схема енергетичного балансу (а) і розподілу теплової енергії (б) двигуна внутрішнього згорання з примусовим (іскровим) запалюванням в режимі прогрівання [57 - 59]

Кількість теплоти, спрямованої на прогрів двигуна (Q) визначається його конструктивними особливостями:

- у двигунах з розділеними камерами згорання віддача теплової енергії в ОР і МО більш висока (більше відношення поверхні камери згорання до її об'єму).

- із збільшенням відношення ходу поршня до його діаметра (S/D) величина Q зростає.

- із збільшенням протитиску відпрацьованих газів p_r на випуску величина Q зростає (приблизно пропорційно $p_r^{0.22}$).

- величина Q залежить від конструктивних особливостей випускної системи: при загальному трубопроводі на шість циліндрів на 8-10% більше, ніж при індивідуальних патрубках.

- у двигунах з наддувом Q при $n = \text{const}$ приблизно пропорційна P_k^m / G , де G - витрата повітря двигуном, а середнє значення показника $m \approx 0,8$.

Експлуатаційні заходи для підвищення пристосованості двигунів ЕУ і ТЗ до низькотемпературних умов експлуатації щодо забезпечення передпускової підготовки, пуску і інтенсивності їх прогріву за інтенсивністю їх прогрівання можуть бути наступні:

- при збідненні суміші або пізньому запалюванні віддача теплоти в ОР зростає;

- з підвищенням температури ОР Q зменшується в середньому на 4% на кожні 10 °С підвищення її температури;

- величина Q залежить від складу ОР; віддача теплоти в етиленгліколь на 10 - 12% менше ніж у воду;

- величина Q нового двигуна або після капітального ремонту на 8-10% вища ніж через 50-60 мотогодин його роботи [1, 2, 4, 6, 8].

До експлуатаційних заходів щодо полегшення пуску холодного двигуна ТЗ відносяться: забезпечення стоянки ТЗ в утепленому сховищі; передпусковий прогрів двигуна; застосування зимових сортів моторних олив зі зниженою температурою загустіння; утеплення акумуляторної батареї; застосування зимових сортів палива з вищим вмістом легких фракцій [5, 18].

Без прогріву ОР та МО пуск двигуна можливий при температурах вище температури загустіння МО на 3...6 °С [1, 2, 6, 8, 45], подальше зниження температури НС вимагає застосування засобів передпускової підготовки і полегшення пуску. При використанні не мінеральних моторних олив, що мають температуру загустіння мінус 15 °С ... - 25 °С, а синтетичних і напівсинтетичних МО з температурою загустіння до мінус 40 °С, можливо здійснити запуск двигуна без попереднього обігріву при температурі -10 °С ... -30 °С. Запуск же двигунів ЕУ при температурі ОР і МО нижче +5 °С ...

+10 °С взагалі не допускається. В умовах експлуатації застосовуються такі способи теплової підготовки холодних двигунів:

1. Розігрів гарячою водою [3, 6, 8, 27, 42, 45, 51, 52 тощо] та розігрів гарячою моторною оливою що заливається в СО і СМ двигуна. Це один з найбільш простих способів підготовки ТЗ і ЕУ транспортних засобів залізничного транспорту до роботи в низькотемпературних умовах експлуатації. Однак при дуже низьких температурах НС величина моменту сил опору двигуна може виявитися більше крутного моменту пускового пристрою, а це може викликати значні перевантаження деталей КШМ і ГРМ, їх вихід з ладу і не забезпечить надійний пуск двигуна [8, 27].

2. Розігрів і підігрів паром [3, 8, 27, 45, 51, 52 тощо] за допомогою пересувних паропідігрівальних пристроїв (широко застосовувався в лісозаготівельної промисловості в кінці 20-го століття). Двигун розігрівається шляхом подачі пари безпосередньо в незаповнену систему охолодження через радіатор або блок циліндрів без повернення або з поверненням з урахуванням конденсату. В систему охолодження впускається насичений пар, який, остигаючи, перетворюється на воду. Через складність і порівняно високу вартість устаткування, низьку економічності при невеликих парках і ряду інших причин цей метод в даний час не застосовується.

3. Розігрів і підігрів двигунів ЕУ і ТЗ електричною енергією при застосуванні різних приладів електропідігріву [1 - 3, 6, 8, 11, 27, 45, 51, 52 тощо] широко використовується при температурі ОС від 0 °С і наявності доступу до електромережі. Електронагрівальні елементи встановлюються в різних точках двигуна, забезпечуючи підігрів ОР в СО і МО в піддоні картера і СМ. При їх використанні коефіцієнт використання теплоти досягає в залежності від схеми $\eta_e = 30 \dots 75\%$ [8, 45]. Менші значення і близькі до них відповідають проточним схемам. Можливі контактні схеми, при яких η_e може істотно перевищувати 75% [8, 45].

4. Підігрів та розігрів інфрачервоними променями за допомогою

спеціальних газових пальників інфрачервоного випромінювання - інфрачервоних випромінювачів [3, 6, 8, 45, 51, 52 тощо] вимагає великих витрат часу і тому широко не використовується. За допомогою інфрачервоних променів до двигуна ТЗ підводиться близько 50% теплової енергії, інша частина втрачається з продуктами згорання.

5. Підігрів розігрітим повітрям [3, 6, 8, 44, 45, 51, 52 тощо] в значній мірі підвищує надійність пуску, має найменший, порівняно з іншими засобами, коефіцієнт використання теплоти (η_e) - не більше 15% [45, 8]. Подача гарячого повітря може бути здійснена до самого двигуна, до акумуляторної батареї, тощо. Надходження нагрітого повітря в механізми відбувається під тиском, а також за рахунок його достатньої проникаючої здатності або шляхом влаштування спеціальних повітряроздавальних патрубків.

6. Розігрів за допомогою індивідуальних рідинних або газоповітряних підігрівачів [3, 6, 8, 10, 11, 22, 23, 27, 28, 43, 45, 60, 61 тощо] широко використовується в умовах низькотемпературної експлуатації відповідальної енергетичної і транспортної техніки. Як правило, конструкції підігрівачів включають систему паливоподачі, камеру згорання, теплообмінник і систему трубопроводів. Для них характерне значення коефіцієнта використання теплоти порядку $\eta_e = 40\%$ [8, 45].

7. Застосування легкозаймистих пускових рідин [3, 6, 8, 44, 45] ефективне в діапазоні температур до мінус 25 ° С [6, 8]. Детально не розглядається, тому що їх застосування пожежонебезпечно. Їх застосування можливо тільки при холодному пуску.

8. Автоматичний періодичний дистанційний запуск двигуна, для підтримування температури двигуна таким чином, щоб наступний його запуск був «легким» і безвідмовним [22].

9. Підігрів за допомогою пристроїв, що використовують енергію відпрацьованих газів (ВГ) ЕУ і ТЗ. Їх потрібно розділяти на декілька основних груп: пристрої, що перетворюють енергію ВГ в механічну енергію

на борту ТЗ; пристрої, що накопичують теплову енергію ВГ в теплонакопичувачах на борту ТЗ; пристрої що утилізують теплоту ВГ для безпосереднього використання [8, 10, 11, 22, 36, 37, 62]. Для здійснення першого напрямку додаткова корисна робота або передається безпосередньо на колінчастий вал поршневого ДВЗ, або використовується для приводу яких-небудь агрегатів і систем силової установки. У цьому напрямку системи утилізації теплоти ВГ поршневих ДВЗ можливо поділити на основні п'ять груп [22, 62] у відповідності до схеми (рис. 1.5 [22]): паросилові установки, термоелектричні генератори, двигуни Стирлінга (ДС), повітряні розширювальні машини і поршневі двигуни з внутрішнім пароутворенням [22, 62 тощо]. Другий напрямок достатньо повно представлений в роботах [101, 112, 113 тощо].

10. Регулювання температури, як при здійсненні передпускового, післяпускового, так і міжзмінного зберігання ЕУ і ТЗ за допомогою систем прогрівання. Системи прогрівання для ДВЗ ЕУ і ЗТ розділяються на бортові і стаціонарні [22, 24, 51, 52, 63]. Бортові системи вмонтовуються безпосередньо на самому двигуні і є автономними по відношенню до стаціонарних джерел енергії, що є їх перевагою. Стаціонарні системи прогрівання базуються на досить потужних котельних установках або електричних підстанціях, які можуть забезпечити прогрівання ДВЗ одночасно декількох ЕУ або ЗТ. Такий спосіб прогрівання дозволяє досягти зниження експлуатаційної витрати палива до 5% [22, 64]. Недоліком стаціонарних, систем прогрівання є необхідність виділення спеціальних місць відстою ТЗ, будівництво теплопідготовчих пунктів, роздавальних колонок тощо.

Одним з різновидів бортових систем регулювання температури є комбіновані системи управління і регулювання теплового режиму двигуна. Вони можуть бути поєднанням різних способів в залежності від призначення і особливостей конструкції. Основні види комбінованих систем регулювання температури представлені в роботах [22, 24, 63, 65 - 68 тощо]. Найбільш

цікавими з точки зору паливної економічності і ресурсозбереження, з точки зору автора, є системи що базуються на поєднання теплових акумуляторів і систем регулювання температури ОР і МО двигунів ЕУ і ТЗ.

З виконаного аналізу виявлено, що, незважаючи на різноманіття досліджень в області прогріву і пристроїв прогріву двигунів ЕУ і ТЗ, недостатньо розроблені ефективні, надійні і прості за конструкцією системи. Актуальними залишилися питання розробки методів спрямованих на зменшення витрат палива під час прогрівання двигунів ЕУ і ТЗ за низьких температур, що в умовах наростаючого дефіциту традиційних джерел енергії є найбільш перспективним. В області застосування вторинних енергоносіїв, як одного з варіантів ресурсозберігаючих технологій, існує певний обсяг знань, але в конструкції двигунів ЕУ і ТЗ запропонований напрямок до теперішнього часу належного розвитку не отримав. Питання витрати палива на здійснення передпускового і передпускового прогріву двигунів ЕУ і ТЗ пропонується вирішувати установкою в систему охолодження додаткових теплоакумуючих модулів, з подальшим перепусканням теплоносіїв, перерозподіл теплової енергії яких здійснюється за рахунок пристроїв автоматики.

Можливо стверджувати, що на сьогодні відсутні рекомендації щодо застосування тих чи інших конструктивних і експлуатаційних заходів щодо поліпшення пристосованості двигунів ЕУ і ТЗ до низькотемпературних умов експлуатації в частині забезпечення передпускової підготовки, пуску і інтенсивного прогріву. Не розроблена методика оцінки пристосованості двигунів ЕУ і ТЗ до низькотемпературних умов експлуатації.

Висновки до розділу 1

Аналіз раніше проведених досліджень дозволяє зробити наступні висновки:

1. Погіршення показників якості та ефективності експлуатації двигунів

ЕУ і ТЗ в низькотемпературних умовах експлуатації дослідники пов'язують, як правило, з погіршенням їх температурного режиму.

2. Зниження ефективності роботи двигуна ЕУ і ТЗ проявляється, перш за все, утрудненням пуску холодного агрегату, збільшенням інтенсивності зносу його деталей, збільшенням витрати палива.

3. Основними параметрами, які характеризують температурний режим двигунів, є усталена температура ОР і МО, а також темп їх прогрівання і охолодження. Найбільший темп зносу циліндро-поршневої групи має місце при холодному пуску двигуна та його роботі, коли тепловий стан значно нижчий за оптимальні значення температурних показників. При цьому збільшується витрата палива і зростають трудові та часові витрати на підготовку ЕУ і ТЗ до роботи. Для прийняття навантаження після пуску необхідно, щоб ОР і МО двигуна були прогріті до температури 40-60 °С.

4. Вплив низькотемпературних умов на темпи прогріву і охолодження двигунів ЕУ і ТЗ має диференційований характер, закономірність зміни яких повною мірою не встановлена.

5. Диференційований характер впливу низькотемпературних умов на тепловий режим двигунів ЕУ і ТЗ обумовлений різним рівнем пристосованості цих двигунів до низькотемпературних умов.

6. Дослідження температурного стану двигуна ЕУ і ТЗ проводяться в більшості робіт за даними вимірювань температури ОР. Між тим, зв'язок температурного стану двигуна і температури його ОР і МО науково не доведений.

7. Утилізація та використання теплової енергії відпрацьованих газів, яка видаляється при роботі двигуна являє собою перспективний напрямок підвищення ефективності використання самого ДВЗ та енергії згорання палива. Передпускова і післяпускова прискорена теплова підготовка двигуна являє собою актуальну науково-технічну задачу.

8. Для передпускової підготовки двигунів розроблено широкий спектр пристроїв і обладнання, але в літературі мало інформації щодо систем

передпускового прогріву у складі елементів утилізації теплової енергії ВГ з тепловими акумуляторами фазового переходу і елементів прискореної циркуляції охолоджуючої рідини і моторної оливи, на час прогріву, паливну економічність та екологічні показники.

9. В науковій літературі не виявлено результатів досліджень стаціонарних газових двигунів з системою теплової підготовки на основі акумульованої теплової енергії в частині оцінювання показників часу теплової підготовки, паливної економічності і екологічності при системній взаємодії декількох фазоперехідних акумуляторів теплоти із засобами прискореного прогріву МО і ОР і утилізації теплової енергії відпрацьованих газів. Крім цього, не знайдено методики розрахунку системи теплової підготовки стаціонарних газових двигунів для певних умов експлуатації.

РОЗДІЛ 2

УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ СТАЦІОНАРНИХ ГАЗОВИХ ДВИГУНІВ ВИКОРИСТАННЯМ АКУМУЛЬОВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1 Вибір методу визначення показників стаціонарного газового двигуна, оснащеного системою теплової підготовки у складі акумуляторів теплоти на основі фазових переходів

За допомогою методу морфологічного (або структурного) аналізу [69 - 71] був проведений синтез та аналіз, сформовані можливі варіанти схем забезпечення теплової підготовки газового двигуна на основі особливостей його призначення і використання за допомогою системи теплової підготовки (СТП) в умовах експлуатації.

Особливість наведеного методу полягає в тому, що в досліджуваній технічній системі СТП виділяли декілька характерних для неї основних функціональних елементів морфологічних ознак (особливих характеристик) з переліком різних конкретних варіантів (альтернатив) технічного вираження наведених ознак [71]. Кожна виділена морфологічна ознака характеризує функцію, конструктивне рішення або складову системи, режим роботи або стан СТП, форму технологічної взаємодії складових тощо, від яких залежить вирішення проблеми теплової підготовки і досягнення мети функціонування СТП в умовах експлуатації.

Морфологічні ознаки (основні характеристики) СТП газового двигуна на всіх етапах здійснення теплової підготовки розташовані у вигляді морфологічної матриці. Для точного виконання морфологічного аналізу були сформульовані цілі теплової підготовки, як системи. Для газового двигуна з СТП використали підхід, при якому було забезпечено варіювання можливого використання стаціонарного двигуна за призначенням ($x_{1.3.}$), можливих складових системи теплової підготовки ($x_{3.1.}$ - $x_{3.5.}$), можливих варіантів

призначення системи теплової підготовки ($x_{5.1.} - x_{5.4.}$). Основні морфологічні ознаки, від яких залежить досягнення поставленої мети і формула теплової підготовки газового двигуна показані в табл. 2.1.

У відповідності до положень [69 - 71], метод дослідження, оснований на морфології складових об'єктів системи теплової підготовки газового двигуна у складі електростанції з системою СТП дозволяє системно аналізувати різні структури об'єкту, що впливають із закономірностей їх призначення, будови і функціональних задач.

Була розроблена схема системи теплової підготовки газового двигуна у складі акумуляторів теплоти з теплоакумуючими матеріалами, що мають властивості фазового переходу.

Система теплової підготовки у складі акумуляторів теплоти (ТА) на основі фазових переходів (ФП) складається з окремих ТА ФП, об'єднаних між собою єдиним функціоналом і приєднаних до двигуна внутрішнього згорання для забезпечення теплової підготовки моторної оливи (МО) і охолоджуючої рідини (ОР) в процесах його роботи. До складу СТП при проведенні дослідження включені ТА ФП, що об'єднані у підсистеми (рис. 2.1): прискореного прогріву двигуна (ППД), утилізації теплової енергії відпрацьованих газів (ВГ) ТА, контактного теплового акумулятора (КТА), накопичувача моторної оливи з ТА ФП (НМО). СТП конструктивно входить, як складова частина, до систем охолодження (СО) і мащення (СМ) газового двигуна та виконує частину їх функцій й здійснює визначальний вплив на протікання робочого процесу газового двигуна [72 - 78], а саме забезпечує передпусковий і прискорений післяпусковий прогрів ОР і МО газового двигуна до температури, при якій можливо здійснювати навантаження двигуна. Складові частини СТП одночасно взаємодіють з СМ і СО, а саме ППД, УТС і КТА входять як складові елементи в систему мащення і охолодження дослідного двигуна, а НМО – тільки в систему мащення двигуна.

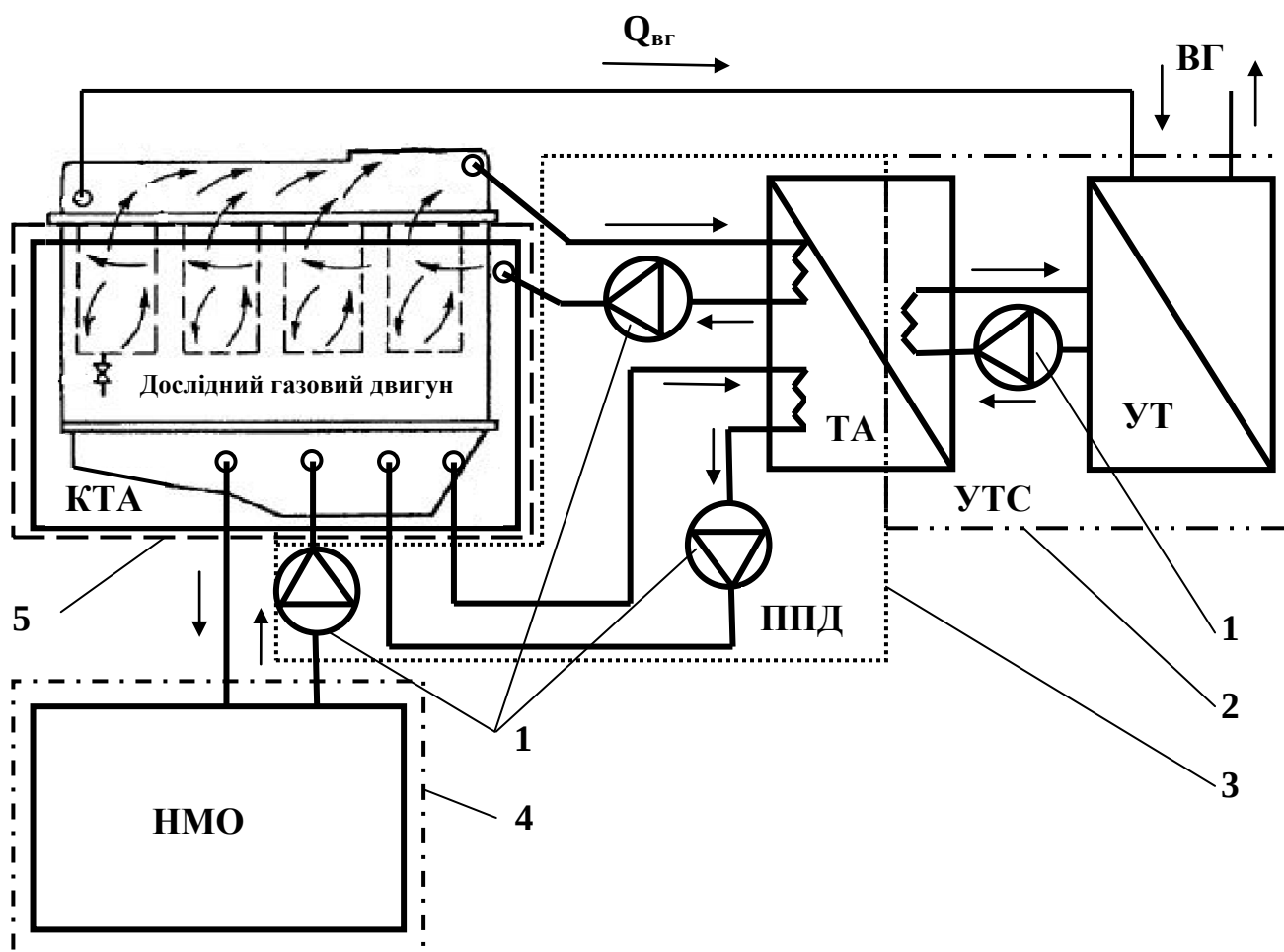


Рисунок 2.1 – Принципова схема системи теплової підготовки газового двигуна у складі акумуляторів теплоти: 1 – циркуляційні насоси; 2 – сукупність елементів УТС; 3 – сукупність елементів ППД; 4 – сукупність елементів НМО; 5 – сукупність елементів КТА; ВГ – відпрацьовані гази; $Q_{ВГ}$ – теплова енергія 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

Всі перераховані підсистеми можуть працювати спільно у складі та за алгоритмом роботи СТП, або окремо одна від одної з виконанням властивих їм функцій [72 - 80]. Принцип роботи СТП в цілому полягає в накопиченні ТА фазового переходу теплової енергії ВГ, яка утворюється при згоранні палива та не використовується на корисну роботу, а викидається в атмосферу з ВГ, а також теплової енергії конвекції двигуна та теплової енергії МО, як теплоносії при накопиченні її у НМО.

Накопичення теплової енергії в ТА фазового переходу за допомогою УТС стає можливим завдяки встановленню паралельно глушнику в випускному трубопроводі газового двигуна утилізаційного теплообмінника (УТ), який пов'язаний з тепловим акумулятором на основі фазоперехідного теплоакумуючого матеріалу (ТАМ ФП) УТС трубопроводами. Саме за допомогою нього, завдяки циркуляційному насосу (рис. 2.1) відбувається циркуляція теплоносія УТС. Теплоносій проходячи через УТ в випускному трубопроводі розігрівається від теплової енергії ВГ до температури 150...190 (200) °С (в якості теплоносія в процесі досліджень використовувалась спеціальна високотемпературна рідина (гальмівна рідина) з температурою кипіння 220 °С). УТ встановлено в байпасі випускного трубопроводу двигуна, паралельно основному трубопроводу. Таке конструктивне рішення [72, 73, 81] прийнято для того, щоб забезпечити можливість відключення його після того, як ТА фазового переходу УТС буде повністю заряджений.

Теплоносій з УТ потрапляє в ТА фазового переходу УТС, який заповнений ТАМ ФП і представляє собою теплоізований резервуар з трьома теплообмінниками (для заряджання та розряджання ТА відповідно в СО і СМ дослідного газового двигуна (ДГД)).

Теплоносій в УТС, при проходженні від УТ до ТА фазового переходу УТС, охолоджується та віддає накопичену теплову енергію ТАМ ФП. В період накопичення теплової енергії ТАМ ФП найбільшу ефективність являє собою процес фазового переходу ТАМ ФП – наповнювача ТА, тобто зміна його

агрегатного стану, для забезпечення якого потрібна велика кількість теплової енергії ВГ. Попередній нагрів ТАМ ФП в ТА, до значень температури фазового переходу ТАМ ФП, та подальший нагрів, після досягнення значень температури ТАМ ФП, в процесі фізичного накопичення теплової енергії ТАМ, є не таким енергоємним, як безпосередньо сам процес фазового переходу в ТАМ ФП. Особливості процесі роботи ТА фазового переходу УТС в різних періодах накопичення і віддачі теплової енергії детально описані в [22, 79, 80, 72 - 78].

Контактний тепловий акумулятор (КТА) ДГД (рис. 2.1) являє собою багатошаровий кожух, закріплений ззовні на корпусних елементах блока циліндрів та піддоні двигуна таким чином, щоб забезпечити щільне його прилягання [79, 80, 72 - 78]. Характерною особливістю конструкції КТА ДГД є наявність секцій-контейнерів з ТАМ ФП, що закріплені ззовні на контактних поверхнях блока циліндрів і піддона газового ДГД, зверху закритих теплоізоляційним кожухом (чохлом), що складається з декількох шарів теплоізоляційного матеріалу [79, 80, 82]. Застосування КТА на ДГД не вимагає внесення яких-небудь істотних змін у конструкцію двигуна та його систем, він легко монтується за допомогою кронштейнів, простий в обслуговуванні і не вимагає додаткового джерела енергії. Робота КТА заснована на виділенні конвекцією теплоти блоку циліндрів і піддону газового двигуна й поглинанні ТАМ ФП у КТА при зміні його агрегатного стану. Завдяки використанню КТА досягається мінімальна втрата конвективної теплоти, що виділяється газовим двигуном протягом часу його роботи, оскільки КТА виконує теплоізолюючу функцію. Крім цього вдається уникнути появи термічних напруг у блоці циліндрів двигуна при його прогріві саме тому, що робочий процес КТА полягає в довготривалій підтримці температури теплоносіїв (МО в СМ і ОР в СО) двигуна на відміну від відомих теплових акумуляторів, де здійснюється нагрівання ДВЗ після їх зупинки [79, 80, 72 - 78].

Особливістю конструкції НМО є наявність в оболонці накопичувальної ємності додаткового контактного теплового акумулятора, що аналогічний за конструкцією і принципу дії КТА, але встановлений на корпусі ємності для зливу моторної оливи з ДГД. Завдяки використанню НМО досягається мінімальна втрата теплоти теплоносія - МО з СМ, що виділяється після її зливання в теплоізововану ємність, під час довготривалої зупинки газового двигуна, а також при зворотньому закачуванні МО в СМ двигуна забезпечується прискорений прогрів корпусних елементів двигуна, що контактують з МО, а саме зону колінчастого валу, масляної магістралі і зону масляної оболонки ДГД. Температура МО двигуна в НМО контролювалась за допомогою додаткового вбудованого датчика температури МО.

Теплова підготовка двигуна з використанням СТП може виконуватись в частині передпускового і післяпускового прогріву МО і ОР в наступних варіантах комплектації підсистем:

- при звичайному прогріві ДГД з використанням штатних систем двигуна;
- при використанні тільки підсистеми ППД і штатному прогріві ДГД;
- при використанні підсистеми ППД з ТА фазового переходу УТС;
- при поєднанні використання КТА (НМО) або КТА + НМО і ТА фазового переходу УТС.

Зберігання теплової енергії МО і ОР двигуна при тривалому зберіганні ДГД з використанням СТП може виконуватись в наступних варіантах комплектації підсистем:

- при звичайному зберіганні ДГД з використанням штатних систем двигуна;
- при використанні підсистеми ППД з ТА фазового переходу УТС;
- при використанні тільки КТА або НМО;
- при поєднанні використання КТА (НМО) або КТА + НМО і ТА фазового переходу УТС.

При необхідності запуску двигуна після тривалої зупинки в дію включається СТП.

СТП, працюючи за власними алгоритмами, що описані в розділі 3 дисертації, включає електричні циркуляційні насоси ППД з модульованою подачею, які забезпечують циркуляцію МО і ОР в газовому двигуні та в ТА фазового переходу УТС. Моторна олива і охолоджуюча рідина, проходячи через ТА, отримують накопичену ТАМ ФП теплову енергію та передають її основним елементам конструкції ДГД, а що є найголовнішим, стінці та головці циліндра та зоні колінчастого валу (саме МО). Правильний вибір теплової потужності ТА дозволяє виконати швидкий попередній прогрів ДГД з низької температури оточуючого середовища (від встановленим в дослідженні - 20 °С) до температури МО і ОР на рівні температур +40...60 °С, при яких можливо забезпечувати прийом навантаження двигуном при його роботі в умовах експлуатації. Вибір теплової потужності ТА в процесах теплової підготовки встановлюється модулем керування СТП на основі визначення параметрів теплового стану ДГД. Для цього модуль керування СТП, на основі розрахунку теплового балансу ДГД, встановлює необхідну кількість теплової енергії для прогріву МО і ОР, блока циліндрів, головки блока циліндрів, з урахуванням втрат в з'єднуючих патрубках і трубопроводах та теплових втрат самого двигуна [74, 79, 80, 83, 84].

Отримавши теплову енергію в процесі роботи СТП теплоносії - МО і ОР передають її конструктивним елементам ДГД в районі камери згоряння, що забезпечує позитивний вплив на процес запуску ДГД. В дослідженні варіювались початкові температури теплоносіїв двигуна, при яких проводили його запуск (вказано вище). Ці температури встановлювались у ДГД за показами датчиків СТП.

Після запуску ДГД СТП продовжує працювати для сприяння більш швидкого та ефективного прогріву працюючого двигуна до температури МО і ОР на рівні $+85 \pm 5$ °С. Це досягається завдяки подальшому використанню накопиченої теплової енергії ТАМ ФП в ТА і надходження теплової енергії

ВГ від енергії палива працюючого двигуна. Після досягнення температури MO і $OP +85 \pm 5$ °C СТП спочатку переходить в режим підтримання отриманих значень теплової підготовки в заданих межах за умовами використання і за встановленими вимогами заводу виробника, а після цього - підключає ШС двигуна.

Враховуючи дані, отримані від датчиків температур ДГД, модуль керування СТП встановлює оптимальну частоту обертання циркуляційних насосів та управляє клапанами системи, спрямовуючи потоки рідини через ті чи інші елементи СТП. Функціонування розробленої СТП газового ДВЗ побудовано на аналізі температурних значень теплоносіїв і елементів конструкції ДГД [75 – 78, 79, 80, 83, 84].

В період зупинки і зберігання непрацюючого ДГД накопичена теплота в КТА віддається зворотньо від ТАМ ФП для забезпечення довготривалої підтримки температури корпусних деталей і теплоносіїв дослідного двигуна. При низькій температурі навколишнього середовища та зарядженому ТА фазового переходу УТС, коли накопиченої теплоти КТА вже недостатньо, прогрів ДГД здійснюється аналогічно описаному раніше.

Крім цього, при довготривалій зупинці двигуна, коли потрібно температуру MO ДГД підтримувати в межах температур «гарячого прогріву» на протязі тривалого часу, доцільним є використання НМО, в який моторна олива зливається з піддону двигуна. При необхідності здійснення пуску двигуна та зарядженому ТА фазового переходу УТС, через додаткові патрубки відбувається подача до ДГД за допомогою циркуляційного насоса з НМО в картер двигуна прогрітої MO . Подальший процес прогріву дослідного газового двигуна здійснюється аналогічно описаному раніше.

За допомогою датчиків температури MO і OP відбувається контроль теплового стану MO , OP .

Для оцінки експлуатаційних та екологічних показників стаціонарних газових двигунів достатньо широко використовують експериментальні методи і методики розрахунку робочих циклів і характеристик газових

двигунів [71, 72 – 78, 85 - 100]. У відповідності до поставлених задач для виконання теоретичного дослідження СТП необхідна розробка або удосконалення існуючої методики розрахунку робочого процесу та вихідних показників двигуна при прогріві газового двигуна в процесі здійсненні передпускового і після пускового прискореного прогріву за допомогою примусового зовнішнього нагрівача (ТА фазового переходу) в залежності від прийнятих конструктивних рішень і температури оточуючого середовища. В більшості випадків для досліджень ДВЗ використовують фізичні моделі.

Автором роботи [85] представлена методика розрахунку робочого циклу газового двигуна, в якій для розрахунку процесу тепловиділення використані параметри, які отримані в процесі індиціювання двигуна. Недоліком методики є неможливість розрахунку параметрів робочих процесів двигуна в процесі прогріву крім як на режимі холостого ходу, відсутність можливості розрахунку параметрів циклу при сумішах з $\alpha < 1$, не враховуються дисоціація продуктів згорання, вологість повітря, тощо.

Для прогнозування показників і характеристик газових двигунів із різноманітними варіантами систем живлення розроблено багато різних методик. Аналіз відповідних публікацій довів, що найбільш детально розроблена така методика в МАДІ [97].

Для розрахунку процесу утворення шкідливих речовин при протіканні робочого циклу в циліндрі двигуна моделюють робочий цикл за багатозонною моделлю [97]. Для розрахунку розглядається замкнутий цикл із робочим тілом, що протягом усього циклу зберігає незмінну масу, але має змінний склад, враховується залежність теплоємності від складу і температури, який складається з ділянок політропного стискання, згорання, розширення продуктів згорання, для яких враховується теплообмін із стінками. Для розрахунку циклу застосовується рівняння стану ідеального газу. Дослідники в роботі [86] використовували аналогічну методику. Для цього використовували також залежності тривалості тепловиділення, форми кривої (формула Вібе) і тривалості першої фази горіння від частоти

обертання двигуна, коефіцієнта надлишку повітря, кута випередження запалювання і складу газу.

Для прогнозування показників двигуна при підвищенні ступеня стискання у роботі [87] проводиться розрахунок параметрів циклу газового двигуна. Для моделювання окремих процесів стискання - згорання - розширення використовувалась двозонна модель, а параметри газообміну визначались орієнтовно. Це було необхідно, зокрема, для визначення кількості NO_x у відпрацьованих газах.

Для одержання найкращих показників циклу, для вибору оптимальної форми камери згорання при мінімальних викидах NO_x у ВГ і місця розташування свічок запалювання в камері згорання автори роботи [90] моделюють тривимірний рух заряду і поширення турбулентного горіння, з урахуванням локальних швидкостей суміші.

Важливе значення для точного моделювання показників циклу двигуна мають методики розрахунку характеру тепловиділення, які можливо розділити на дві великі групи:

1. Методика, запропонована в роботі [100], згідно з якою, залежності, що складені виходячи з уявлень про реакції горіння, швидкості турбулентного полум'я, які пов'язують розвиток процесу з поточними умовами. При чому, точне відтворення умов у кожній конкретній області камери згорання в динаміці потребує розрахунків за багатозонними моделями із використанням методів моделювання тривимірного руху заряду не тільки в процесі згорання, але й у тактах впуску і стиску.

2. Формальні залежності, що описують процес в часі і не розкривають особливостей його розвитку [88, 100]. Ці залежності у випадку процесу згорання в гомогенному середовищі, характерного для двигунів із примусовим запалюванням, дають задовільне співпадіння з експериментальними дослідженнями. В основі вказаних залежностей лежать закони, що допускають єдиний характер протікання процесу на всьому його протязі, що справедливо для випадку горіння поширенням фронту полум'я.

Визначення коефіцієнтів і показників степені в рівняннях для формального опису тепловиділення засноване на здійсненні аналізу результатів визначення характеристик тепловиділення, що отримані за експериментальними індикаторними діаграмами.

Метод розрахунку робочого процесу [89], в основі якого лежать диференціальні рівняння об'ємного балансу, доведено до рівня інженерного, він знайшов широке застосування в практиці двигунобудування. Цей метод отримав розповсюдження в науково-дослідній роботі, а також в заводській практиці. Він дає практично повну збіжність розрахункових і дослідних даних [89].

Основою для розрахунку робочого процесу двигуна при роботі в режимі холостого ходу може бути прийнята методика, що розроблена проф. Глаголевым М.М. і проф. Дяченко В.Г. [90, 101] для дизельних двигунів і застосовувалась в роботах проф. Гутаревича Ю.Ф., проф. Матейчика В.П. і доц. Цюмана М.П. [77, 78] для моделювання робочих процесів бензинових двигунів. Методика дозволяє розраховувати параметри робочого тіла на всіх тактах робочого циклу з визначенням індикаторних і ефективних показників двигуна [91]. Також, можуть бути прийнятими для розрахунку робочого процесу математичні моделі програмного комплексу DIESEL-RK [92] (МДТУ ім. М.Е. Баумана), в основі яких лежить розрахунковий метод, запропонований проф. М.Ф.Разлейцевим і дороблений О.С.Кулешовим, в якому використовується широкий набір розрахункових методів для моделювання складних фізичних процесів, що відбуваються у двигуні. При цьому в моделі враховується залежність властивостей робочого тіла від його складу й температури. Емісія оксидів азоту в моделі розраховується за термічним механізмом на основі схеми Зельдовича. Для визначення температур використовується зонна модель (методика проф. В.А.Звонова). Теплообмін моделюється роздільно для різних поверхонь, температури яких визначаються шляхом розв'язання завдання

теплопровідності. Коефіцієнт тепловіддачі від газів до стінки циліндра визначається за формулою Вошні [95].

Але ці підходи, для визначення термінових показників теплової підготовки при використанні комплексних систем прогріву не можуть бути використаними в чистому вигляді. Особливість роботи СТП полягає в тому, що більшість передпускової підготовки ОР і МО дослідного газового двигуна проводиться без фактичного його запуску від теплової енергії, що запасена в теплових акумуляторах ТА ФП, а запуск двигуна відбувається тільки при досягненні відповідної температури ОР і МО в межах вимог виробника. Післяпусковий прогрів двигуна до відповідної температури здійснюється при роботі ДГД в режимі холостого ходу, що необхідно для забезпечення процесу зарядки ТА фазового переходу, які є складовою частиною СТП.

Крім цього для оцінки викидів шкідливих речовин (ШР) з ВГ ДВЗ у відповідності до діючих норм, використовують ГОСТ 30574-98 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ и дымность отработавших газов. Циклы испытаний» [96], для регламентації послідовності дій, режимів на яких виконуються вимірювання вмісту ШР у ВГ при випробуваннях двигунів. Для оцінки ШР у ВГ газового двигуна, оснащеного СТП, ця методика в повному обсязі не придатна.

Виходячи з вищевикладеного та методів [96] для оцінки викидів ШР у ВГ газового двигуна з СТП, об'єктивно оцінити екологічні показники його роботи неможливо, тому що відповідно до існуючих методик двигун повинен працювати на відповідному режимі і з певним навантаженням. А робота та принцип дії СТП полягає у тому, що практично весь час, який необхідний для теплової підготовки двигуна до температури 40-60 °С, двигун не працює, а прогрівається від елементів СТП. Тому виконати вимоги існуючих методик і стандартів з випробувань неможливо.

Для проведення досліджень СТП двигуна можливо скористатися методикою, розробленою [22, 24, 63, 77, 78], що полягає в наступному. Для ШС дослідного газового двигуна вимірювання термінових, економічних і

екологічних показників проводиться в режимі холостого ходу при прогріві ОР і МО до температури 50 °С за існуючими стандартними методиками. Дослідження роботи СТП газового двигуна відбуваються наступним чином: за той же проміжок часу, що необхідний для прогріву ОР і МО газового двигуна зі ШС до температури охолоджуючої рідини 50 °С, фіксується витрата палива, час прогріву та викиди ШР (враховуючи і той період, коли газовий двигун не працює, а прогрівається від ТА фазового переходу СТП). Потім проводиться порівняння отриманих результатів сумарної витрати палива на прогрів ДГД та сумарних викидів шкідливих речовин з ВГ зі штатними СО і СМ та з використанням СТП.

Загальна структура методики оцінки впливу прийнятих конструктивних рішень і температури оточуючого середовища на експлуатаційні та екологічні показники газового двигуна в процесі здійсненні передпускового і післяпускового прискореного прогріву за допомогою СТП, наведена на рис. 2.2.

На першому етапі методикою передбачено провести аналіз раніше проведених досліджень в частині підвищення ефективності експлуатації двигунів внутрішнього згорання в низькотемпературних умовах експлуатації і розробки способів та засобів прогріву двигунів стаціонарних ЕУ і ТЗ, і методик оцінювання експлуатаційних та екологічних показників стаціонарних газових двигунів при здійсненні теплової підготовки, а саме передпускового та післяпускового прискореного прогріву (блок 1). В результаті виконання цього етапу повинні бути визначені і узагальнені висновки щодо проведених досліджень, встановлено, які питання вже були досліджені і які підлягають подальшому дослідженню, а також сформульовані задачі дисертаційної роботи.

На основі отриманих результатів в блоці 1 проводимо вибір методу визначення паливної економічності та часових і екологічних показників газового двигуна із запропонованою СТП в блоці 2. Також проводимо розробку і уточнення методик розрахунку елементів (складових) і підсистем

СТП стаціонарного ДГД. На основі проведеного узагальнення методів передпускового прогріву й урахування особливостей СТП в блоці 2 методикою передбачено формування і вибір методу оцінювання показників паливної економічності та екологічних показників газового двигуна при здійсненні теплової підготовки.

Для визначення коефіцієнтів поліноміальних залежностей і отримання характеристик, що описують двигун, як джерело енергії, споживача палива та джерела шкідливих викидів, а також елементів СТП, в блоці 3 на рис. 2.2 проводиться експериментальне дослідження елементів (складових) і підсистем СТП для визначення експлуатаційних та екологічних показників ДГД в процесах теплової підготовки.

В блоці 4 проводимо уточнення методики розрахунку на основі експериментальних досліджень елементів (складових) і підсистем СТП дослідного газового двигуна і перевірка адекватності складових методики розрахунку. Після відповідного уточнення в блоці 5 проводяться теоретичні дослідження за удосконаленою методикою розрахунку для визначення експлуатаційних та екологічних показників газового двигуна з СТП при здійсненні теплової підготовки.

Заключним етапом роботи є аналіз отриманих результатів експериментальних і розрахункових досліджень і розробка рекомендацій щодо оснащення двигуна СТП та методики оцінювання впливу теплової підготовки за допомогою СТП на показники роботи газового двигуна.

Виходячи з викладеного, при дослідженні процесів в СО і СМ газового ДВЗ, оснащеного СТП, доцільно застосовувати основні принципи системного підходу, а саме: комплексне дослідження системи, як єдиного цілого, з урахуванням параметрів взаємодії спільної роботи підсистем; декомпозиція і ієрархічність описів складових елементів системи; багатоетапність та ітераційність дослідження; типізація та уніфікація основних рішень та засобів дослідження [33, 102, 103].

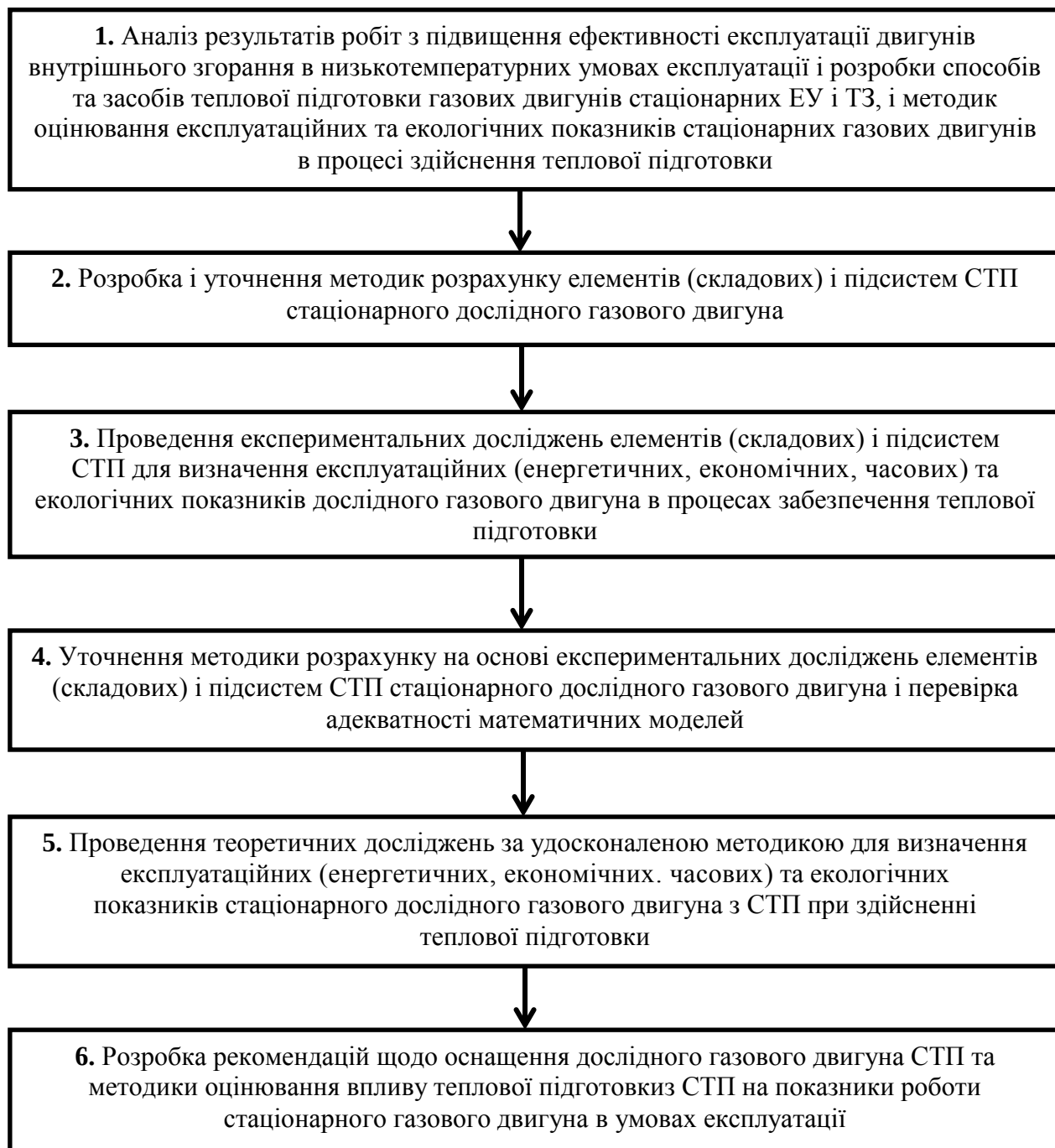


Рисунок 2.2 - Загальна структура методики оцінки впливу прийнятих конструктивних рішень і параметрів оточуючого середовища на експлуатаційні (енергетичні, економічні, часові) та екологічні показники дослідного газового двигуна в процесі здійснення теплової підготовки за допомогою СТП

При проведенні дослідження, на кожному етапі формування і визначення показників СТП, виконується вибір раціонального рішення для кожної з вказаних вище підсистем. Визначальними параметрами при цьому є ефективність роботи СТП, енергетичні, економічні і екологічні показники.

До основних характеристик ДГД відносимо енергетичні, економічні і екологічні характеристики, що визначаються в процесах теплової підготовки двигуна. Ці характеристики визначаються для різних варіантів роботи СТП. Виділення основних варіантів роботи СТП для порівняння здійснюється на основі аналізу основних схемних варіантів її реалізації, тобто для порівняння способів прискореного прогріву стаціонарного газового двигуна, а саме: прогрівання газового двигуна без СТП, прогрівання газового двигуна з СТП при відключених і включених підсистемах прискореного прогріву ОР і МО, ТА фазового переходу УТС, при використанні КТА, при використанні НМО (+ КТА). Подальше диференціювання варіантів СТП здійснюється на більш низькому рівні: за способом циркуляції ОР і МО, способом підключення СТП до ДГД, потужністю ТА, КТА і НМО, регулювання глибини утилізації ВГ у відповідності до вибору схемних і компоновальних рішень. Ще більш низький рівень, тобто агрегатний, розглядається при виборі типів раціональних параметрів електроклапанів, ТАМ ФП, ТА, КТА і НМО, розгляді способів їх конструктивного і технологічного виконання.

Слід зазначити ітераційний характер всіх досліджень СТП стаціонарного ДГД, що обумовлюється відповідним взаємним зв'язком виділених рівнів їх дослідження. Так, наприклад, при дослідженні СТП ДГД енергетичної установки на кожній ітерації більш детально визначались параметри роботи програмованих циркуляційних насосів ОР і МО (ППД) і системи утилізації теплової енергії ВГ, ТА фазового переходу УТС, ТА фазового переходу КТА, ТА фазового переходу НМО, УТ системи утилізації теплової енергії ВГ, а також рівень теплової енергії, який необхідно утилізувати через теплообмінник на різних режимах роботи ДГД.

Засобами реалізації системного підходу стали теоретичні та експериментальні методи дослідження СТП при здійсненні теплової підготовки стаціонарного газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2).

Як було викладено вище, в ДонІЗТ, НТУ і ХНАДУ [22, 24, 63, 77, 78] було розроблено методику дослідження енергетичних, економічних і екологічних характеристик дизеля і бензинового двигуна в процесі його прогріву, яка базується на визначенні режимів роботи двигуна при умовному виконанні циклів теплової підготовки двигуна за циклом прогріву та відповідних цим режимам експериментально визначених показниках двигуна. За отриманими експериментальними даними розрахунковим методом визначається час прогріву, теплові параметри в СМ і СО, витрата палива та шкідливі викиди на кожен цикл теплової підготовки двигуна та за циклом прогріву в цілому. Аналіз результатів досліджень за удосконаленою методикою розрахунку, та отриманих з їх допомогою результатів довів можливість оцінки впливу типу системи прогріву газового двигуна на енергетичні, часові, паливо–економічні та екологічні показники ДВЗ імітацією проведення теплової підготовки в залежності від температури оточуючого середовища. Крім цього, він дозволяє отримати достовірні висновки при використанні мінімального набору експериментальних параметрів з відносно невеликою трудомісткістю виконаних робіт.

2.2 Удосконалення методики розрахунку процесів забезпечення теплової підготовки охолоджуючої рідини і моторної оливи в процесі здійснення передпускового і післяпускового прогріву стаціонарного газового двигуна 6Ч 12/14 використанням акумульованої енергії

Методикам розрахунку характеристик теплових акумуляторів фазового переходу, що використовуються для передпускової підготовки ДВЗ присвячена велика кількість робіт. Аналіз існуючих розрахункових методів [103] дозволяє зробити висновок, що питання теплової підготовки в частині

передпускового і післяпускового прискореного прогріву двигуна за допомогою СТП з тепловими акумуляторами фазового переходу є складним і не достатньо дослідженим питанням, тому виникає необхідність удосконалення існуючих методик розрахунку і показників роботи газового ДВЗ з СТП при здійсненні теплової підготовки.

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 [104 – 110].

При удосконаленні методики розрахунку було враховано, що складний рух рідкого теплоносія в сорочці охолодження двигуна при прогріві не дозволяє виконати детальний математичний опис процесів теплопереносу між рідким теплоносієм на виході з ТА фазового переходу УТС і конструкцією блоку циліндрів ДВЗ. Реальна картина процесу теплопереносу при описанні процесів нагрівання в елементах СТП представлена умовною відповідною методикою розрахунку. Основні припущення і модельні уявлення щодо роботи СТП і її складових елементів і підсистем представлені в [104 – 110].

У відповідності до удосконаленої методики розрахунку дослідження ефективності СТП газового двигуна включає наступні елементи: вибір критеріїв для оцінки енергетичної й економічної ефективності СТП й на їх основі вибір оптимальної конфігурації СТП дослідного газового двигуна, оптимальних енергетичних параметрів схеми СТП, конструктивних і режимних характеристик елементів схеми й екологічних характеристик системи прогріву ДГД в залежності від різних умов експлуатації. Оскільки об'єкт дослідження в загальному випадку є численним класом систем, що використовують різні джерела енергії для забезпечення теплової підготовки

широкого спектра ДВЗ, то для визначення найважливіших елементів і зв'язків була розроблена формалізована схема СТП дослідного газового ДВЗ, що містить у собі основні енергетичні потоки і їх перетворення від входу до виходу системи [72 - 78]. Комбінацію СТП дослідного газового двигуна і системи енергії від додаткових (поновлюваних при роботі ДГД) джерел у вигляді теплоти технологічно можливо виконати в контурах СО і СМ дослідного газового двигуна і додаткових блоків. Різні види енергії, різний потенціал, і, відповідно, її енергетична цінність у різних точках системи, наявність процесів багаторазового перетворення одних видів енергії в інші, залежність процесів і параметрів системи від режимів навантаження споживача, утруднюють використання традиційних методів дослідження, що застосовуються при розрахунках ДВЗ або в технологічних процесах роботи СТП. Утилізована теплота СО, СМ і випуску ВГ газового ДВЗ, залежно від споживача, використовується для нагрівання ТАМ ФП в ТА фазового переходу СТП, або - для технологічних потреб.

Методологічною основою оцінки й вибору елементів і способів підвищення ефективності СТП дослідного газового ДВЗ є системний підхід, який досить широко використовується при проведенні досліджень як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації СО і СМ газового ДВЗ, і енергетичних машин у цілому. Основним критерієм віднесення елемента до досліджуваної системи є його участь у процесах самої системи, а для всебічного розгляду й аналізу елементів і взаємозв'язків між ними, та дослідження властивостей основні виділені елементи СТП представляються в системних об'єктах (вхід, процес, вихід, зворотний зв'язок і обмеження) [69 - 71]. Для оцінки впливу конструктивних і технологічних факторів на теплову підготовку в частині передпускового і прискореного післяпускового прогріву запропоновано досліджувати саму СТП дослідного газового ДВЗ. Для формування й використання СТП дослідного газового ДВЗ у практичних розрахунках в удосконаленій методиці були математично описані складові її елементи. Це зроблено з метою представити можливість застосування

системотехнічного підходу для створення й використання дослідної системи (СТП) у практичному використанні.

Для визначення і розрахунку показників роботи ДГД з СТП в процесах теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву необхідно враховувати участь її складових елементів і підсистем в основних процесах роботи дослідного газового ДВЗ. Крім того, для всебічного розгляду і аналізу самої досліджуваної системи, її складових елементів і взаємозв'язків між ними та дослідження властивостей створеної системи в залежності від природно-кліматичних умов, її потрібно представляти у складових об'єктах, які самі по собі мають властивості окремих системних об'єктів. Це пояснюється тим, що кожен з об'єктів складається із складових, які суттєво впливають на його кінцеві характеристики і властивості, а також для всієї системи відповідно.

До основних складових удосконаленої методики розрахунку СТП дослідного газового двигуна в цілому відносимо наступні елементи і процеси: формування і введення основних вхідних параметрів і даних для роботи СТП, УТ, ТА фазового переходу УТС, КТА [79, 80, 82], НМО [14, 79, 80, 111], процес теплової підготовки в частині прогріву МО і ОР газового ДВЗ за допомогою ППД, моніторинг досліджуємої СТП двигуна в цілому і поелементно, зв'язки між основними елементами системи, зворотній зв'язок, обмеження і вихід системи.

Функцією введення основних вхідних параметрів і даних системи є формування параметрів СТП, що включають в себе конструктивні, технологічні параметри всіх без виключення елементів досліджуваної системи у відповідності до природно-кліматичних умов, а також забезпечення її експлуатаційними матеріалами, енергією і (або) інформацією про роботу елементів системи, які отримують під час процесу роботи.

Робота окремих складових елементів системи (УТ, ТА, КТА, НМО, УТС, ППД, моніторинг системи) та СТП в цілому переводить формування і введення основних вихідних даних для роботи системи у вихід системи.

Зв'язки між основними елементами системи призначені для зміни процесів роботи окремих елементів з метою наближення показників на виході з методики розрахунку із заданими показниками, що обумовлені на початку дослідження. Зворотній зв'язок в системі (основний і проміжний) в цілому призначений для зміни всього процесу з метою наближення показників на виході із заданими показниками на початку дослідження. Обмеження, що накладаються на окремі складові елементи системи або на СТП в цілому формують методику розрахунку виходу системи або мету проведення роботи всієї системи. Вихід системи в удосконаленій методиці розрахунку, тобто визначення термінових (у параметрах часу роботи елементів і всієї системи) та теплових характеристик, паливно-економічних і екологічних показників роботи СТП досліджуваного газового ДВЗ є кінцевим результатом процесу дослідження та може бути визначений в якості призначення всієї розробленої методики розрахунку, для досягнення якого всі складові об'єкти системи було об'єднано в одне ціле.

Для оцінки впливу конструктивних і технологічних параметрів окремих складових елементів і в цілому СТП двигуна у відповідності до природно-кліматичних умов його експлуатації на екологічні, паливно-економічні показники, терміни прогріву та основні теплові параметри і характеристики роботи системи прогріву ДВЗ запропоновано досліджувати СТП газового двигуна. На рис. 2.3 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.

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*);

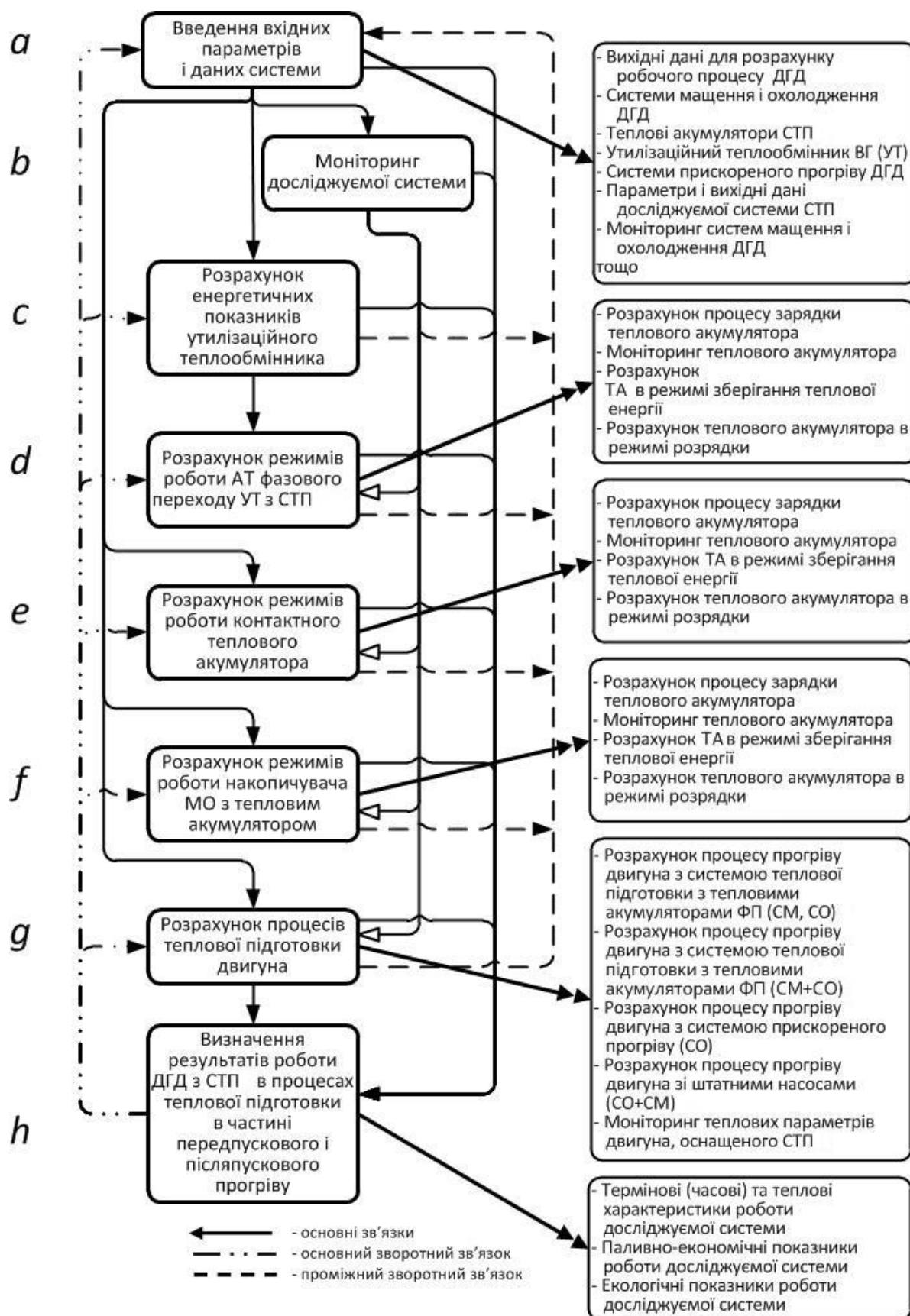


Рисунок 2.3 - Укрупнена структурна схема методики розрахунку СТП газового двигуна 6Ч 12/14 в процесі здійснення теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву для МО і ОР при поєднанні основних системних об'єктів

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 *e*); розрахунок енергетичних показників утилізаційного теплообмінника (рівень *c*).

Входом системи взагалі і процесу роботи СТП ДГД рівня *a* - введення основних вхідних параметрів і даних для роботи системи служать: вихідні дані щодо робочого процесу ДГД, конструктивні параметри і характеристики СО і СМ дослідного газового двигуна, теплових акумуляторів [22, 23, 103, 110], УТ [104], ППД [79, 80, 111], коефіцієнтів апроксимації досліджуваної системи, вихідні дані для формування моніторингу СМ і СО [44] та досліджуємої системи СПП двигуна [23]. 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 [22, 24, 63, 92, 94].

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.

Для керування робочим процесом СТП газового двигуна, з метою наближення показників виходу системи до показників системи із заданою точністю, служить зворотній зв'язок, який забезпечує моніторинг СМ і СО газового двигуна (рівень *b*) в різних його елементах, а також підсистеми ППД, ТА фазового переходу УТС, КТА, НМО в процесі роботи СТП при охолодженні її і під час прогрівання, тощо.

Окремі об'єкти «УТ (рівень c) – ТА фазового переходу УТС (рівень d) – КТА (рівень e) – НМО (рівень f)» утворюють в загальному вигляді єдину енергетичну систему зі своїми особливими властивостями, яка виконує наступні функції: відбір теплової енергії за допомогою УТ від ВГ газового двигуна, передача теплової енергії до високотемпературного контуру ТА фазового переходу УТС, передача теплової енергії двигуна до КТА, передача теплової енергії МО до НМО, фазове перетворення ТАМ ФП в ТА фазового переходу, КТА, НМО, зберігання отриманої теплової енергії на протязі відповідного терміну часу, віддача теплової енергії від низькотемпературного контуру ТА до СМ і СО газового двигуна.

Для визначення енергетичних показників УТ ВГ двигуна на рівні c на основі аналізу, конструктивних параметрів та фізичних властивостей передбачений розрахунок наступні параметри: коефіцієнт тепловіддачі k , середній температурний напір dT та тепла потужність теплообмінника Q . Об'єкти рівня d , e , f визначаються і описуються суто, як ТА фазового переходу для СМ і СО двигуна. На цих рівнях проводиться розрахунок процесів зарядки, розрядки і зберігання теплоти в ТА фазового переходу УТС, КТА і НМО, а також моніторинг температур в різних частинах їх конструкцій. До цих рівнів включені розрахунки фазових переходів ТАМ ФП, що є особливістю розрахунків теплових акумуляторів (ТА, КТА і НМО) фазового переходу. Енергетичний вихід рівня a і рівня c є вхідним параметром процесів рівнів d , e , f . Крім цього на рівнях d , e , f моніторинг температур в різних частинах конструкції ТА фазового переходу УТС, КТА і НМО виконується на основі параметрів, що отримані на рівні a і рівні b . Результатами розрахунків на означених рівнях є: коефіцієнт тепловіддачі k_{ta1} від теплоносія до ТАМ ФП, середній температурний напір від теплоносія до ТАМ ФП dT_{ta1} , час зарядки ТА фазового переходу УТС, КТА і НМО t_{zar} та енергетичний ККД зарядки ТА фазового переходу УТС, КТА і НМО η_{zar} , час зберігання зарядки ТА фазового переходу УТС, КТА і НМО t_{zber} , коефіцієнт тепловіддачі k_{ta2} від ТАМ ФП до охолоджуючої рідини, середній

температурний напір від ТАМ ФП до охолоджуючої рідини d_{Tta2} , час розрядки ТА фазового переходу УТС, КТА і НМО при прогріві ДГД t_{roz} , кінцеві температури МО T_{mo} і ОР T_{ox} , стінок циліндра T_{st} , головки блока циліндрів T_{gol} та в районі колінчастого валу T_{pd} ДГД.

Вибір, параметрів конструкції СМ і СО газового двигуна, УТ, ТА фазового переходу УТС, КТА і НМО, ППД, процесу прогріву на відповідних рівнях (рівні b , c , d , e , f і g) забезпечують підсистеми зворотного зв'язку з рівнем a в удосконаленій методиці розрахунку.

Об'єкти рівня g описують процес безпосереднього прогріву газового двигуна. У відповідності до особливостей конструкції розробленої системи [79, 80, 112, 113] на цьому рівні методики передбачені наступні розрахунки: розрахунок процесу прогріву МО газового двигуна з ППД і з ТА фазового переходу УТС; розрахунок процесу прогріву ОР газового двигуна з ППД і з ТА фазового переходу УТС; розрахунок процесу прогріву МО і ОР газового двигуна з ППД; розрахунок процесу прогріву МО і ОР газового двигуна зі штатними насосами СМ і СО; а також виконується моніторинг теплових параметрів газового двигуна, оснащеного СТП і всієї дослідної системи зі своїми системними властивостями. Виходом підсистеми рівня g є: час прогріву до заданої температури МО і ОР t_{prog} , кількість теплової енергії, яку необхідно отримати для прогріву до заданої температури МО і ОР Q_{prog} , кількість теплової енергії, яку отримуємо від ТА фазового переходу УТС, КТА і НМО Q_{ta} , кількість теплової енергії, яку отримуємо в процесі згорання палива Q_{top} .

На кінцевому рівні h визначаються: термінові (часові, тобто у параметрах часу роботи СТП і її елементів) та теплові характеристики роботи досліджуємої СТП газового двигуна; паливно-економічні показники роботи досліджуваного газового двигуна з СТП в процесах теплової підготовки; екологічні показники при здійсненні передпускового та післяпускового прогріву газового двигуна з СТП. Вхідними параметрами рівні h є: результати апроксимації експериментальних характеристик, результати

розрахунків рівнів b , c , d , e , f і g . Вихід системи на цьому рівні це: викиди оксидів азоту за процес теплової підготовки газового двигуна, витрата палива за процес теплової підготовки двигуна питомі викиди оксидів азоту за процес теплової підготовки двигуна, питома витрата палива для різних режимів роботи ДГД з СТП та ДГД зі ШС, а також динаміка прогріву різних зон газового двигуна для різних режимів роботи ДГД з СТП та ДГД зі ШС. Зворотній зв'язок рівня h керує процесами рівнів a , b , c , d , e , f і g для реалізації заданого процесу теплової підготовки газового двигуна (здійснення відповідного алгоритму теплової підготовки в частині передпускового та післяпускового прогріву ДГД з СТП) в залежності від природно-кліматичних і технологічних умов роботи, та інших факторів, які мають місце в реальних процесах експлуатації стаціонарної ЕУ. Перераховані параметри визначають режими роботи (рівні a , c , d , e , f , g і h) газового ДГД з СТП, тобто значення витрат теплової енергії, палива і викидів ШР у ВГ ДГД для реалізації того чи іншого алгоритму теплової підготовки в частині передпускового та післяпускового прогріву ДГД з СТП.

Алгоритм формування передпускового та післяпускового прогріву досліджуваного газового двигуна, оснащеного СТП для одночасного здійснення теплової підготовки МО і ОР детально показаний і описаний в роботі [107].

Система теплової підготовки газового двигуна є відкритою і функціонує в оточуючому середовищі. Це пояснюється тим, що її елементи і підсистеми та сама СТП, в цілому, обмінюється з оточуючим середовищем речовинами, енергією і інформацією. Основні взаємозв'язки з оточуючим середовищем, які враховуються при дослідженні системи, наступні: із середовища, яке характеризується тиском, температурою і відносною вологою, поступає паливо і повітря в процес рівня a ; середовищу віддається частина теплової енергії, отриманої в процесі рівнів b , c , d , e , f і g ; в середовище поступає супутній вихід процесу рівня a (продукти згорання, частина теплової енергії); відображає взаємодію газового двигуна,

оснащеного СТП, з повітрям, яке враховується параметрами вітру, опадами і температури у процесі виконання моніторингу СМ, СО і СТП в цілому. В якості обмеження для всієї СТП розглядаються визначені величини інтервалів часу, питомих витрат палива та викидів забруднюючих речовин, тобто мети функціонування системи, які визначають вихідні параметри газового двигуна з СТП.

Таким чином, запропонована 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, повністю відповідає поставленим вимогам та реалізує в повному обсязі різні алгоритми процесу теплової підготовки СМ і СО досліджуваного двигуна з СТП. Крім цього СТП сформована у відповідності до основних принципів побудови аналогічних складних виробничих систем. В розробленій системі, підсистемою, яка визначає рівень теплової підготовки СТП ДГД за ефективністю паливовикористання та забруднення середовища, є УТС, ППД, КТА і НМО, а запропонований підхід дозволяє систематизувати можливі алгоритми теплової підготовки в частині прогріву та досліджувати вплив різних алгоритмів роботи УТС, ППД, КТА і НМО на паливну економічність та екологічну безпеку досліджуваного газового двигуна в межах розробленої моделі функціонування системи теплової підготовки.

2.3 Основні рівняння удосконаленої методики розрахунку процесів здійснення теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 під час передпускового і післяпускового прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини

Для розрахунково-теоретичного дослідження експлуатаційних та екологічних показників газового двигуна 6Ч 12/14 з СТП в процесах теплової підготовки під час передпускового і післяпускового прогріву удосконалена

методика розрахунку на основі використання дослідних характеристик складових елементів. Дослідні характеристики були апроксимовані алгебраїчними рівняннями (поліномами) різних ступеней з одним, або декількома аргументами [114]. При удосконаленні методики розрахунку використовувались методи, що були описані в роботах [22, 24, 63, 72, 73, 77, 78, 103], а також досвід розробки методик розрахунку і математичних моделей на кафедрі УкрДАЗТ, НТУ, ХНАДУ, для дослідження експлуатаційних та екологічних показників двигунів ЕУ і ТЗ в процесах передпускового і післяпускового прогріву [15, 69, 71 тощо].

В представленій дисертації в удосконалену методику розрахунку внесені наступні нові елементи:

1. Враховані особливості конструкції і роботи ТА фазового переходу УТС при забезпеченні теплової підготовки під час здійснення прогріву МО і ОР при виконанні передпускового та післяпускового прогріву дослідного газового двигуна.

2. Враховані особливості конструкції і роботи підсистеми прискореного прогріву (ППД) при забезпеченні теплової підготовки під час здійснення прогріву МО і ОР при виконанні передпускового та післяпускового прогріву дослідного газового двигуна.

3. Введений контактний тепловий акумулятор (КТА) фазового переходу в систему СТП дослідного газового двигуна. Враховані особливості конструкції, робочих процесів і використання КТА при зберігання теплової енергії в МО і ОР у процесі міжзмінної зупинки двигуна та розроблена відповідна методика розрахунку.

4. В систему СТП дослідного газового двигуна введений накопичувач моторної оливи з тепловим акумулятором фазового переходу (НМО). Враховані особливості конструкції, робочих процесів і використання НМО при зберігання нагрітої МО у процесі міжзмінної зупинки двигуна та розроблена відповідна методика розрахунку.

5. Враховані особливості процесів моніторингу при здійсненні теплової підготовки в частині прогріву МО і ОР під час передпускового та післяпускового прогріву газового двигуна.

6. Передбачене врахування особливостей розрахунку потужності УТ та його конструктивних властивостей, виходячи із енергетичних потреб СТП, параметрів дослідного газового двигуна, режимів його роботи, тощо, при здійсненні теплової підготовки в частині заряджання ТА фазового переходу УТС при прогріванні МО і ОР.

7. Передбачене врахування особливостей використаних ТАМ ФП в теплових акумуляторах, а саме в КТА і НМО.

8. Отримані і апроксимовані поліномами характеристики елементів СТП газового двигуна.

9. Розроблена методика і враховані особливості спільного використання елементів і підсистем СТП при виконанні теплової підготовки в частині передпускового, післяпускового прогріву дослідного газового двигуна і міжзмінного його зберігання.

Виводи рівнянь методики розрахунку основних складових СТП, розглянуті в перерахованих вище і в інших працях автора. Тому відмітимо тільки основні особливості цих рівнянь, зупинимось тільки на виводі рівнянь теплообміну в КТА і НМО, у зв'язку із тим, що вказані елементи введені в систему передпускової підготовки дослідного газового двигуна вперше.

Основні припущення і модельні уявлення щодо роботи КТА і НМО у складі СТП, які були прийняті при виводі рівнянь теплообміну елементів СТП, в удосконаленій методиці розрахунку процесів здійснення теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 під час передпускового і післяпускового прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини представлені в [104 - 110].

Удосконалена методика розрахунку процесів здійснення теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 під час передпускового і післяпускового прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини охоплює всі

її періоди в процесі використання СТП, а саме: передпусковий прогрів, післяпусковий прогрів та зберігання розігрітої МО і ОР у процесі міжзмінної зупинки стаціонарного газового двигуна.

Переходимо до розгляду рівнянь удосконаленої методики розрахунку процесів роботи СТП газового двигуна 6Ч 12/14 при здійсненні передпускового і післяпускового прогріву МО і ОР.

Рівняння теплового балансу при прогріванні дослідного газового двигуна має вигляд [10, 22, 24, 63, 113, 115]:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{кон}} + Q_{\text{ор}} + Q_{\text{мо}} + Q_{\text{вт}}, \text{Дж/с} \quad (2.1)$$

де $Q_{\text{пр}}$ – теплова енергія необхідна для прогріву дослідного газового двигуна, Дж/с; $Q_{\text{кон}}$ – теплова енергія необхідна для нагріву елементів конструкції газового двигуна, Дж/с; $Q_{\text{ор}}$ – теплова енергія необхідна для нагріву ОР двигуна, Дж/с; $Q_{\text{мо}}$ – теплова енергія необхідна для нагріву МО двигуна, Дж/с; $Q_{\text{вт}}$ – теплова енергія, що буде втрачена у вигляді променевого теплообміну, конвекції та інших видів теплових втрат в роботі газового двигуна, Дж/с.

При роботі СТП у складі дослідного газового двигуна більша частина теплової енергії, що необхідна для забезпечення теплової підготовки в процесі прогріву ДГД до робочої температури, отримується від ТА фазового переходу УТС при взаємодії з підсистемою ППД. Для розрахунку технологічних процесів теплової підготовки за допомогою СТП було складено наступний тепловий баланс [20, 24, 63, 101, 115]:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{АТ}} \cdot \eta_{\text{АТ}} = (\eta_{\text{АТ}} \cdot \eta_{\text{УТ}}) \cdot Q_{\text{УТ}}, \text{Дж/с} \quad (2.2)$$

де $Q_{\text{пр}}$ – теплова енергія, що необхідна для прогріву дослідного газового двигуна з СТП, Дж/с; $Q_{\text{АТ}}$ – теплова потужність ТА фазового переходу УТС, Дж/с; $Q_{\text{УТ}}$ – теплова потужність УТ, встановленого в УТС (встановлюється, виходячи із теплової потужності ТА фазового переходу УТС), Дж/с; $\eta_{\text{АТ}}$; $\eta_{\text{УТ}}$ – коефіцієнти, що враховують втрати теплової енергії

при прогріві газового двигуна відповідно від ТА фазового переходу УТС і при заряджанні ТА фазового переходу УТС від УТ (втрати теплової енергії на нагрів трубопроводів, розсіювання, тощо).

Теплова потужність ТА фазового переходу УТС розраховується із запасом для урахування діапазону температур оточуючого середовища при експлуатації дослідного газового двигуна і який впливає на кількість теплової енергії, що необхідна для прогріву його до заданої температури від СТП. Теплова потужність УТ має відповідати потужності ТА фазового переходу УТС та враховувати втрати теплової енергії в процесі зарядки ТА від УТ і його розрядки. Рівняння характеристик $Q_{\text{ПР ОР}}(\tau, w)$ і $Q_{\text{ПР МО}}(\tau, w)$ визначаються апроксимацією [114] відповідних експериментальних характеристик (розділ 2).

2.3.1 Введення вхідних параметрів і даних системи на рівні *a* включає в себе комплекс заходів у відповідності до положень розділу 2.

В удосконалену методику розрахунку процесів здійснення теплової підготовки за допомогою СТП газового двигуна в частині прогріву МО і ОР на рівні *a* (рис. 2.3) входить поєднання початкових даних. Серед них: параметри і характеристики робочого процесу ДГД, конструктивні особливості, а також параметри і характеристики елементів СМ і СО газового двигуна, теплових акумуляторів: ТА фазового переходу УТС, КТА, НМО [103, 22 - 24, 110, 115], утилізаційного теплообмінника [104], ППД [79, 80, 112], коефіцієнтів апроксимації досліджуваної системи, вихідні дані для формування моніторингу СМ і СО і [44] і досліджуємої системи СТП газового двигуна [22, 24].

Для формування бази вихідних даних в частині робочого процесу газового двигуна можуть бути використані безпосередньо отримані експериментальні дані робочого процесу газового двигуна 6Ч 12/14 або розраховані вихідні дані. В нашому випадку був використаний програмний комплекс DIESEL-RK [92, 94]. Введення параметрів для розрахунку [116,

117] проводилось через робоче вікно для вводу вихідних даних в програмний комплекс *Diesel-RK*.

Введення отриманих експериментальних даних відбувається після їх апроксимації за допомогою програмного комплексу CurveExpert 1.34 [118]. До них відносяться залежності параметрів прогріву МО і ОР, годинної витрати палива, викидів азоту, в залежності від часу прогріву, тощо.

2.3.2 На рівні *c* удосконаленої методики, при проведенні розрахунків утилізаційного теплообмінника (УТ) УТС, використовувались методи оптимізації для досягнення максимальної ефективності в досліджуваному варіанті УТ [22, 24, 104, 115]. В результаті були отримані залежності основних енергетичних параметрів УТ в системі випуску ВГ в залежності від врахування всіх технологічних та конструктивних обмежень проекрованої СТП і умов теплового балансу дослідного газового ДВЗ. Вибір оптимального технологічного і конструктивного варіанту УТ, пов'язаний з вибором критерію, в якості оцінки ефективності варіанту, що розглядається, а саме з тепловою енергією $Q_{\text{УТ}}$, що утилізується теплообмінною частиною УТС, її величина повинна відповідати умовам теплового балансу всієї СТП газового двигуна. Розрахунок теплового балансу УТ підсистеми УТС [22, 24, 104, 113, 115, 119 – 120] проводився окремо для газового потоку та потоку теплоносія на одному шарі трубок з визначенням відповідних параметрів складових. Розрахунок теплового балансу для потоку теплоносія проводився з врахуванням загального протитоку ВГ відповідно для потоку теплоносія і для газового потоку:

$$\frac{dT_w}{dl} = \hat{K}(T_w - \bar{T}_g), \quad 0 \leq l \leq L \quad (2.3)$$

$$G_g c_g T_g^0 = G_g c_g T_g^i - \Delta Q, \quad (2.4)$$

де T_w - температура рідини, К; l – поточне значення довжини трубки, м; $\hat{K}$ - коефіцієнт тепловіддачі, $\bar{T}_g$ середня температура газового потоку, К; G_g -

витрата ВГ, кг/с; c_g - теплоємність ВГ, кДж/кг К; ΔQ - теплова енергія, яку отримує рідкий теплоносіє.

Особливості удосконаленої методики розрахунку робочих процесів підсистеми ППД в СТП для двигуна 6Ч 12/14 з використанням методів тепломасопереносу, теплопередачі і гідравліки для досягнення максимальної ефективності оснований для ОР на положеннях, описаних в роботах [22, 24, 104, 113, 115, 119 – 120]. Для СМ дослідного газового двигуна описана методика була адаптована для роботи СТП як для СО, так і для СМ двигуна. Час прискореного прогріву МО і ОР базується для обох варіантів на формуванні температурних параметрів за час однократного обміну всієї технічної рідини (МО і (або) ОР). За положеннями знаходимо час процесу прогріву $\Delta \tau$, за який температура МО і ОР зміниться від температури t_0 до температури t_n

$$\Delta \tau = \frac{V_2 + V_5 + V_8 + \frac{V_3}{b}}{q_{cp} F} \rho_w c_w (t_n - t_0), c \quad (2.5)$$

При цьому тепловий потік q_{cp} :

$$q_{cp} = \frac{Nu l}{d} F (t_{ct} - t_w) \quad (2.6)$$

де V_2, V_5, V_8, V_3 - об'єм МО (ОР) в головці блоку циліндрів дослідного газового двигуна, в магістралях (трубопроводах) СМ (СО), СТП та блоці циліндрів двигуна відповідно, м³; F - площа теплообміну в ДГД, м²; b - кількість циліндрів; Nu - число Нусельта; ρ_w - щільність рідкого теплоносія, кг/м³; c_w - теплоємність рідкого теплоносія в СМ (СО), Дж/кг·К; t_n, t_0, t_w - початкова, поточна та кінцева температури МО (ОР), °С; t_{ct} - температура стінки циліндра.

2.3.3 Удосконалена методика розрахунку процесів моніторингу параметрів МО, як і ОР [22, 24], дослідного газового двигуна на рівні b , у відповідності до положень [22, 24, 44, 115], представлена на основі диференціального рівняння першого порядку [119, 120] звичайної динамічної методики розрахунку процесу охолодження технологічних рідин:

$$T_H \frac{d\xi}{d\tau} + \xi = \frac{P}{A} \quad (2.7)$$

де T_H - постійна часу нагрівання; ξ - температура перегріву МО двигуна; P - теплова потужність, що передається об'єкту; A - коефіцієнт тепловипромінювання, тобто кількість теплової енергії, випромінюваної в навколишнє середовище в одиницю часу при перегріві в 1 °С СМ двигуна.

2.3.4 Розрахунок режимів роботи ТА фазового переходу УТС в удосконаленій методиці розрахунку на рівні d проводиться з використанням методик розв'язання нестационарних завдань теплообміну [22, 24, 103, 121 – 123,].

Математичний опис параметрів та процесів удосконаленої методики розрахунків, які відбуваються в ТА фазового переходу УТС, виконується з метою визначення конструктивних параметрів ТА, параметрів теплоакумуючого матеріалу (ТАМ ФП), можливостей та ефективності ТА у складі СТП. Конструктивно, в представлений дисертації, ТА фазового переходу УТС являє собою резервуар з встановленими теплообмінниками зарядки та розрядки, виконані у вигляді змійовиків: один для МО, другий - для ОР (рис. 2.4). Речовина-наповнювач ТА, який заповнює простір між теплообмінниками зарядки та розрядки, а також стінками резервуара - теплоакумуючий матеріал (ТАМ ФТ), а саме поліетилен високої густини низького тиску [19, 22 - 24]. Удосконалена методика розрахунків процесів роботи ТА фазового переходу УТС з точки зору його роботи у складі СТП дослідного газового двигуна полягає у розрахунку потужності ТА фазового

переходу, яка б відповідала вимогам надійної експлуатації СТП при низьких температурах, мала запас теплової потужності та малий час накопичення теплової енергії для подальшого використання її.

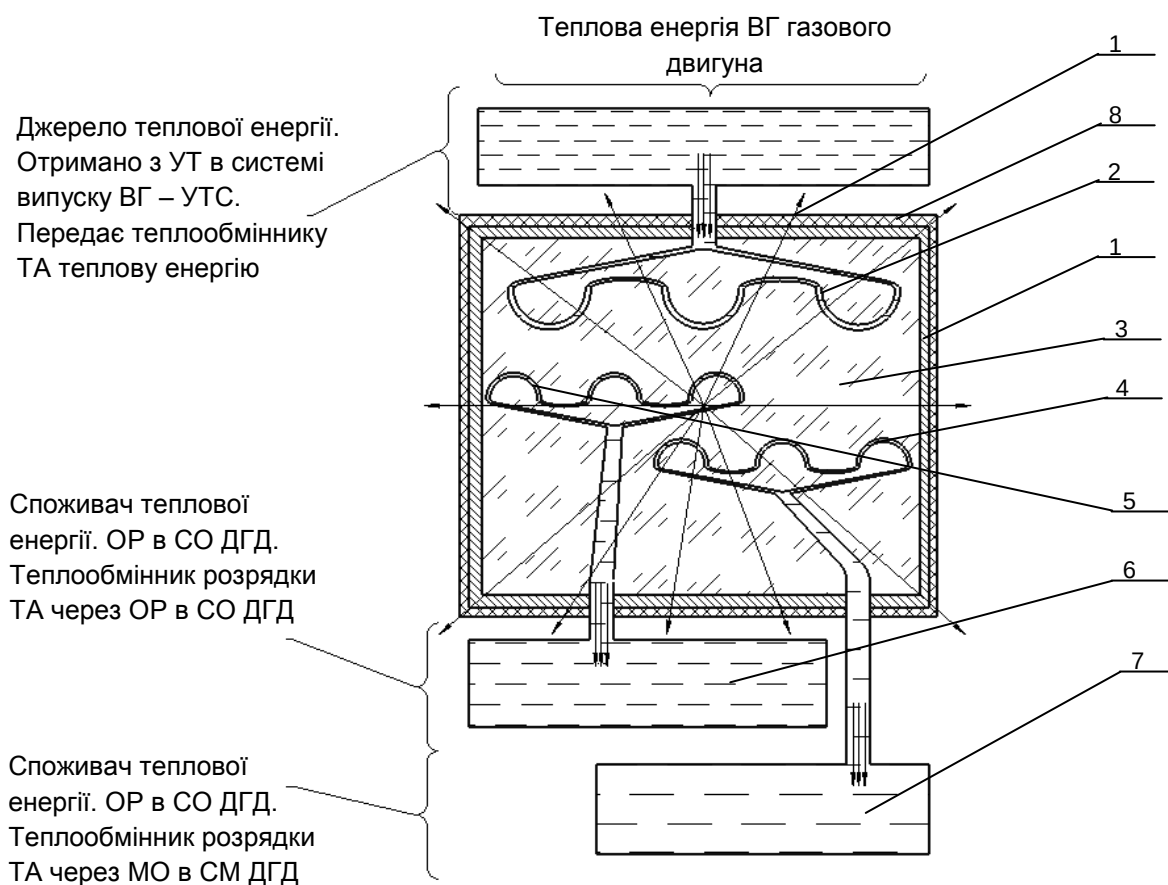


Рисунок 2.4 – Принципова схема функціонування ТА фазового переходу УТС в системі СТП дослідного газового двигуна: 1 – корпус ТА фазового переходу УТС, 2 – теплообмінник зарядки ТА фазового переходу, 3 – наповнювач ТА - ТАМ ФП, 4 – теплообмінник розрядки ТА фазового переходу МО для СМ ДГД; 5 - теплообмінник розрядки ТА фазового переходу ОР для СО ДГД; 6 – теплоносій ОР ДГД; 7 - – теплоносій МО ДГД; 8 – теплоізоляція ТА; 9 - напрямки «стоку» (розповсюдження) теплової енергії

Головними вихідними параметрами удосконаленої методики при оцінці конструктивної ефективності і роботоздатності ТА фазового переходу є: маса конструкції і елементів дослідного газового двигуна, об'єм СО і СМ газового двигуна, максимально низька температура навколишнього середовища при якій має бути забезпечена працездатність системи та час зберігання теплової

енергії ТА (залежить від інтервалів між сталою роботою ДГД, та ґрунтується на моніторингу процесу ОР в СО і МО в СМ ДГД). Результатами розрахунку ТА фазового переходу УТС є: потужність ТА в процесі накопичення теплової енергії (в залежності від режимів роботи ДГД), час зарядки та розрядки ТА, процес зберігання теплової енергії при зупиненому двигуні, характер зміни температури та тепловіддачі ТАМ ФП в процесах зарядки-розрядки, а також деякі конструктивні параметри роботи ТА. Принципова схема функціонування ТА фазового переходу УТС для СТП дослідного газового ДВЗ показана на рис. 2.4, яка сформована на основі схеми процесу плавлення ТАМ ФП в ТА фазового переходу УТС на рис. 3.7 [22, 24].

Процес прогріву ОР в СО детально розглянутий в роботі [22, 24], тому зупинимось тільки на розгляді рівнянь удосконаленої методики розрахунку для прогріву МО в СМ за допомогою ТА фазового переходу УТС.

Методика розрахунку процесу зарядки ТА фазового переходу УТС полягає у передачі теплової енергії ВГ за допомогою теплоносія, який циркулює через УТ в системі випуску ВГ двигуна. При накопиченні отриманої теплової енергії в ТА зростає температура ТАМ ФП, відбувається нагрів ТАМ ФП, а після досягнення температури фазового переходу ТАМ ФП відбувається його плавлення в квазіізотермічному режимі. Після цього продовжується накопичення теплової енергії розплавленою за рахунок фізичного накопичення речовиною ТАМ ФП. Теплова енергія, яку отримує ТА від утилізаційного теплообмінника:

$$Q_{ТА} = \eta_{ТА} \cdot Q_{ТО}; \quad (2.8)$$

де $Q_{ТО}$ – теплова енергія, що отримана УТ, Дж; $\eta_{ТА}$ – коефіцієнт втрат теплової енергії на шляху від УТ до ТА.

Процес передачі теплової енергії від УТ до ТАМ ФТ являє собою процес теплопередачі від одного середовища (теплоносій від УТ ВГ) до другого (ТАМ ФП) через теплообмінник та зводиться до визначення

коефіцієнту теплопередачі K_{TA} . З іншого боку, тепловий потік, який отримує ТАМ ФП від УТ може бути описаним рівнянням:

$$q_{TA} = K_{TA} \cdot dT_{TA} \cdot F_{TA}; \quad (2.9)$$

де dT_{TA} - середній температурний напір (перепад) в ТА, К; F_{TA} - площа теплообміну в ТА, м².

Середній температурний напір в ТА розраховується за залежністю:

$$dT_{TA} = \frac{(T_{W1} - T_{TAM2}) - (T_{TAM1} - T_{W2})}{\ln \frac{(T_{W1} - T_{TAM2})}{(T_{TAM1} - T_{W2})}}, K \quad (2.10)$$

де T_{TAM1}, T_{TAM2} - кінцева та початкова температури ТАМ ФП, К;
 T_{W1}, T_{W2} - початкова та кінцева температури рідини, К.

Коефіцієнт теплопередачі K_{TA} (Вт / (м²·К)) отримуємо за залежністю:

$$K_{TA} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{TA}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_W}}, \quad (2.11)$$

де α_{TA} - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до ТАМ ФП, Вт / (м²·К); α_W - коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінки, Вт / (м²·К); λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу трубок, Вт / (м·К); δ - товщина стінок, м. Коефіцієнт тепловіддачі від стінки трубки до ТАМ ФП знаходимо за залежністю:

$$\alpha_{TA} = \frac{2\lambda_{TAM}}{d_{30B} \ln \frac{dx}{d_{30B}}}, \quad (2.12)$$

де λ_{TAM} - коефіцієнт теплопровідності ТАМ ФП, Вт / (м·К); d_{30B} - зовнішній діаметр трубки теплообмінника, м; dx - зона фазового переходу, м.

Коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінки:

$$\alpha_w = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{d_B}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{ К}} \quad (2.13)$$

де λ_w – кінематична в'язкість рідини, $\text{Вт} \cdot \text{с}^2 / \text{кг}$; Nu_w – число Нусельта; d_B – внутрішній діаметр трубки теплообмінника, м.

Число Нусельта:

$$Nu_w = \begin{cases} 3,66, & Re_w \leq 2300 \\ (-6,55 + 0,0046 \cdot Re_w) \cdot Pr_w^{0,4}, & 2300 < Re_w \leq 5000 \\ (-3 + 0,0039 \cdot Re_w) \cdot Pr_w^{0,4}, & 5000 < Re_w \leq 10000 \\ 0,023 \cdot Re_w^{0,8} \cdot Pr_w^{0,4}, & 10000 < Re_w \end{cases} \quad (2.14)$$

де Re_w - число Рейнольдса для рідкого теплоносія:

$$Re_w = \frac{V_w d_B}{v_w}, \quad (2.15)$$

V_w – швидкість циркуляції рідини, м/с, Pr_w , - число Прандтля для рідкого теплоносія:

$$Pr_w = \frac{\rho_w v_w c_w}{\lambda_w} = \frac{\mu_w c_w}{\lambda_w}, \quad (2.16)$$

де ρ_w – щільність рідини, кг/м^3 ; c_w – теплоємність рідини, кДж/кг К ; λ_w – теплопровідність рідини, Вт/м К ; μ_w – динамічна в'язкість рідини, Па с .

Середній температурний напір в ТА визначається із залежності:

$$dT = \frac{\Delta T_B - \Delta T_M}{\ln \frac{\Delta T_B}{\Delta T_M}}, \text{ К} \quad (2.17)$$

де ΔT_B – більша різниця температур ТАМ ФП та рідини, К; ΔT_M – менша різниця температур ТАМ ФП та рідини, К.

Тепловий потік, який проходить через ТА фазового переходу УТС при заряджанні визначається із залежності:

$$q_{TA} = K_{TA} \cdot F_{TA} \cdot dT, \text{Вт}; \quad (2.18)$$

Теплова енергія, що необхідна для зарядки ТА складається із теплової енергії фізичного нагріву ТАМ ФП та теплової енергії фазового переходу:

$$Q_{TA} = m_{TA} \cdot c_{TA} \cdot \Delta T_{TA} + m_{TA} \cdot L, \text{Дж}; \quad (2.19)$$

де m_{TA} – вага ТАМ ФП, кг; c_{TA} – теплоємність ТАМ ФП, Дж/ (кг·К); L – питома теплота фазового переходу ТАМ ФП, (Дж / кг), ΔT_{TA} - різниця температур ТАМ ФП.

Час зарядки ТА фазового переходу УТС можливо визначити від витрати теплоносія, що заряджає ТА:

$$t_{\text{зар}} = \frac{m_{TA} \cdot c_{TA} \cdot \Delta T + m_{TA} \cdot L}{G_W \cdot c_w \cdot \Delta T_W}, \text{с} \quad (2.20)$$

де G_W - витрата рідкого теплоносія, кг/с; c_w – теплоємність рідкого теплоносія, Дж / (кг·К); ΔT_W – різниця температур рідкого теплоносія на вході і виході із ТА.

Методика розрахунку процесу зберігання теплової енергії в ТА фазового переходу УТС полягає у тому, що ТА зберігає накопичену у ньому теплову енергію до певного значення температури, та готовий для використання у складі СТП газового двигуна. Зберігання теплової енергії в ТА відбувається за допомогою максимально можливої теплоізоляції ТАМ ФП від впливу оточуючого середовища за допомогою спеціального теплоізолюючого матеріалу або вакуумної капсули. В будь якому випадку втрати теплової енергії в ТА мають місце. Враховуючи це, стає можливим розрухувати коефіцієнт теплопередачі ТАМ ФП до оточуючого середовища:

$$K_{ТАМ} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{ТАМ}} + \sum_{i=0}^n \frac{\delta i}{\lambda i} + \frac{1}{\alpha_{СТ}}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.21)$$

де $\alpha_{ТАМ}$ - коефіцієнт тепловіддачі від ТАМ ФП до стінки, Вт / (м²·К), δi – товщина i - го шару теплоізоляції ТА, м; λi - коефіцієнт теплопровідності i - го шару теплоізоляції ТА, Вт / (м·К); $\alpha_{СТ}$ - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до оточуючого середовища, Вт / (м²·К).

Теплова енергія, яку буде втрачати ТА в одиницю часу складатиме:

$$q_{BT}(t) = K_{ТАМ} \cdot F_{ПОВ} \cdot (T(t) - T_{Поч}), \text{Вт} \quad (2.22)$$

де $F_{ПОВ}$ – площа поверхні ТА, м²; $T_{Поч}$ – початкова температура ТАМ ФП, К; $T(t)$ - температура ТАМ ФП через відрізок часу t від початку зберігання теплової енергії, К. Саме цю температуру можливо визначити із залежності:

$$T(t) = T_0 + (T_{Поч} - T_0) \cdot \exp \left[-\frac{K_{ТАМ} \cdot F_{ПОВ}}{c_{ТА}} \cdot t \right], \text{К} \quad (2.23)$$

де $T_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C} = 273 \text{ К}$.

Виходячи з вищевикладеного, час, за який температура ТАМ ФП в ТА знизиться до заданого значення становить:

$$t = \frac{6c_{ТА}}{K_{ТАМ} \cdot F_{ПОВ}} \ln \frac{T_{Поч} - T_0}{T_{кін} - T_0}, \text{с} \quad (2.24)$$

де $T_{кін}$ – задане кінцеве значення температури ТАМ ФП, К.

Методика розрахунку роботи ТА фазового переходу UTC в режимі розрядки є зворотною задачею розрахунку процесу зарядки ТА, тобто процес передачі теплової енергії, що накопичена ТАМ ФП, до МО також являє собою процес теплопередачі від одного середовища до другого через теплообмінник та аналогічно зводиться до розрахунку коефіцієнту

теплопередачі K_{TA} . Теплова енергія, яку отримує МО від ТА в одиницю часу може бути описана рівнянням:

$$q_{TA} = K_{TA} \cdot dT_{TA} \cdot F_{TA}, \text{Вт}; \quad (2.25)$$

де dT_{TA} - середній температурний напір, К; F_{TA} - площа теплообміну, м².

Середній температурний напір розраховується за залежністю:

$$dT_{TA} = \frac{(T_{TAM1} - T_{w1}) - (T_{TAM2} - T_{w2})}{\ln \frac{(T_{TAM1} - T_{w1})}{(T_{TAM2} - T_{w2})}} \quad (2.26)$$

де T_{TAM1}, T_{TAM2} – кінцева та початкова температури ТАМ ФП, T_{w1}, T_{w2} – початкова та кінцева температури МО.

Коефіцієнт теплопередачі K_{TA} отримуємо із наступної залежності:

$$K_{TA} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{TA}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_w}}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}} \quad (2.27)$$

де α_{TA} - коефіцієнт тепловіддачі від стінки до ТАМ ФП, Вт/(м²·К); α_w - коефіцієнт тепловіддачі від МО до контактуючої з нею стінки, Вт/(м²·К); λ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу трубок, Вт/(м·К); δ - товщина стінок, м.

Коефіцієнт тепловіддачі від стінки до ТАМ ФП:

$$\alpha_{TA} = \frac{2\lambda_{TAM}}{d_{30B} \ln \frac{dx}{d_{30B}}} \quad (2.28)$$

де λ_{TAM} - коефіцієнт теплопровідності ТАМ ФП, Вт / (м²·К); d_{30B} - зовнішній діаметр трубки теплообмінника, м, dx – зона фазового переходу, м. Коефіцієнт тепловіддачі від рідини до стінки:

$$\alpha_w = \frac{Nu_w \cdot \lambda_w}{d_B}, \quad (2.29)$$

де λ_w – кінетична в'язкість рідини, $\text{Вт} \cdot \text{с}^2 / \text{кг}$; Nu_w – число Нусельта, що визначається із залежності 2.14; $d_{\text{в}}$ – внутрішній діаметр трубки теплообмінника МО.

Середній температурний напір в ТА визначався із залежності (2.25). Тепловий потік, який проходить через ТА при розрядці визначається аналогічно залежності (2.26). Теплова енергія, яку ТА може віддати при розрядці, складається із теплової енергії фізичного охолодження ТАМ ФП та теплової енергії фазового переходу і має вигляд, аналогічно як і в (2.27). Час розрядки ТА можливо визначити від витрати теплоносія (МО з СМ), який розряджає ТА фазового переходу УТС аналогічно залежності (2.20).

2.3.5 На рівні *e* проводиться розрахунок режимів роботи контактного теплового акумулятора (КТА). В представленій методиці розглянута утилізації теплової енергії, що виділяється газовим двигуном протягом часу його роботи, оскільки він виконує теплоізолюючу функцію [11, 22 – 24, 33, 68, 72, 73, 82, 103]. КТА дослідного газового двигуна – це багат шаровий чохол, закріплений ззовні на блоці циліндра (сорочці) та піддоні двигуна. Робота КТА заснована на виділенні й поглинанні теплової енергії при зміні фазового стану ТАМ ФП, який, як складова у вигляді секцій-контейнерів, входить до складу його конструкції. Секції-контейнери з фазоперехідним ТАМ КТА дослідного газового двигуна закріплюються на поверхні блоку циліндрів і піддона двигуна так, щоб забезпечити їх щільне прилягання, зверху секції закриті теплоізоляційним чохлом, що складається з декількох шарів [79, 80, 82]. Застосування додаткового контактного блочного теплового акумулятору ДВЗ не вимагає внесення яких-небудь істотних змін у конструкцію двигуна й інших систем машини, він легко монтується, простий в обслуговуванні і не вимагає додаткового джерела енергії. Для урахування особливостей удосконаленої методики розрахунку параметрів роботи КТА розглянемо процес теплообміну в теплоізольованому теплонакопичувачі в контакті з оточуючим середовищем. Особливість протікання теплообмінних

процесів у виділеній системі характеризується тим, що на початку теплообмінних процесів ТАМ ФП перебуває в рідкому стані, а потім, при здійсненні поступового охолодження, температура ТАМ ФП досягає температури кристалізації. Після цього, на протязі деякого відрізка часу, температура ТАМ ФТ залишається незмінною, а вже потім, після закінчення процесу кристалізації ТАМ ФП, починається охолодження теплообмінної системи зі зміною температури ТАМ ФП, що знаходиться в твердому стані. На рис. 2.5 показана умовна схема теплообміну в досліджуваній системі КТА.

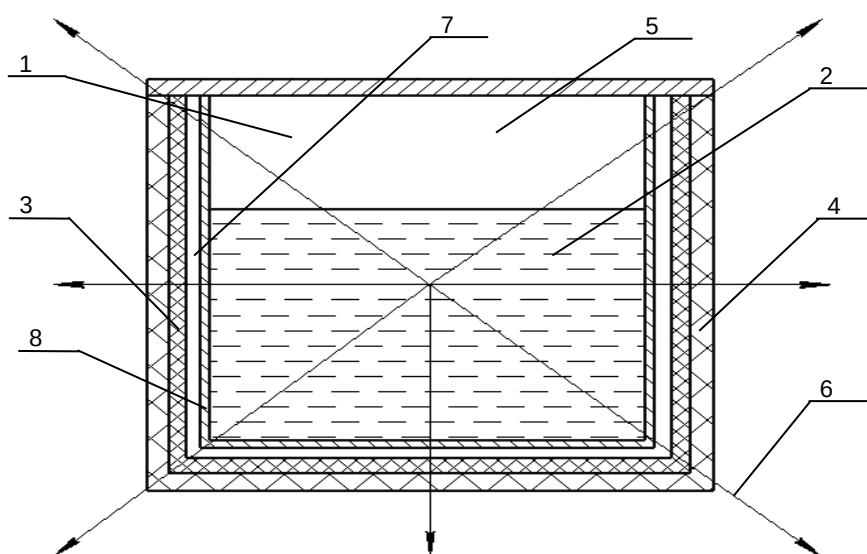


Рисунок 2.5 – Умовна схема теплообміну в системі КТА на основі ТА ДГД: 1 – порожнина блок-картера дослідного газового двигуна; 2 – МО в блок-картері двигуна; 3 – шар ТАМ ФП; 4 – шар поверхневої теплоізоляції; 5 – повітряний прошарок між МО і елементами дослідного двигуна; 6 – напрямки «стоку» (розповсюдження) теплової енергії; 7 – повітряний прошарок між поверхнею блок-картера дослідного газового двигуна і шару ТАМ ФП; 8 – товщина стінок блок-картера дослідного газового двигуна

Особливість роботи КТА можливо розглядати у вигляді трьох взаємопов'язаних окремих етапів, кінцеві значення температур у першому етапі (процес зарядки КТА) є початковими для другого етапу (процес

зберігання теплової енергії в КТА), а кінцеві другого етапу – початковими для третього (робота КТА в режимі розрядки) [174 - 177].

Методика процесу зарядки КТА полягає у передачі шляхом конвекції теплової енергії, виділеної або заздалегідь запасеної від різних зон двигуна, яка циркулює через секції-контейнери КТА з теплоакumuлюючим матеріалом фазового переходу. Під впливом отриманої теплової енергії зростає температура ТАМ ФП, при досягненні температури фазового переходу матеріалу відбувається його плавлення. Отримана тепла енергія у даному випадку йде на подальше плавлення ТАМ ФП в квазіізотермічному режимі. Після повного розплавлення ТАМ ФП відбувається подальше накопичення теплової енергії, але вже за рахунок фізичного накопичення речовиною ТАМ ФП.

Основне завдання що ставилось в удосконаленій методиці розрахунку за представленою методикою - визначити час, через який речовина ТАМ ФП почне кристалізуватися. Складаємо рівняння теплового балансу в диференціальній формі. Кількість теплоти dQ , яку втрачає маса елемента конструкції двигуна й МО з СМ в порожнині картеру:

$$dQ = (G_o c_o + G_{дв} c_{дв}) dt_{дв} \quad (2.30)$$

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 масова теплоємність елемента конструкції двигуна, Дж / (кг · К);

Кількість теплоти, яка проходить від піддону двигуна через наступні шари: повітряного прошарку, ТАМ, теплоізоляції:

$$dQ = k_1 F (t_{дв} - t_o) dt \quad (2.31)$$

де k - коефіцієнт теплопередачі від МО з СМ в піддоні картеру до ОС, Вт / (м² · К); F - поверхня теплообміну, м²; $t_{дв}$ - поточне значення температури

елементу конструкції двигуна і МО, °С; t_o - температура оточуючого середовища, °С.

Ліві частини рівнянь (2.30) і (2.31) дорівнюють одна одній за абсолютною величиною, однак вони мають різні знаки, оскільки при позитивному значенні dt величина $dt_{дв}$ від'ємна, це має місце тому, що охолодження теплообмінної системи відбувається на протязі відповідного часу. З урахуванням вище означеного дорівнюємо праві частини рівняння (2.30) і (2.31):

$$(G_o c_o + G_{дв} c_{дв}) dt_{дв} = -k_1 F (t_{дв} - t_o) d\tau \quad (2.32)$$

Рівняння (2.31) є диференціальним рівнянням зі змінними, що розділяються:

$$\frac{dt_{дв}}{t_{дв,1} - t_o} = -\frac{k_1 F}{G_o c_o + G_{дв} c_{дв}} d\tau \quad (2.33)$$

В рівняння (2.33) вводимо позначення:

$$\frac{k_1 F}{G_o c_o + G_{дв} c_{дв}} = A_1 \quad (2.34)$$

Рішення рівняння (2.33) з позначенням (2.34) має вигляд:

$$t_{дв,1} = t_o + (t_{дв,0} - t_o) \exp(-A_1 \tau_1) \quad (2.35)$$

де

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{зов}} + \frac{\delta_{із}}{\lambda_{із}} + \frac{\delta_{ТАМ}}{\lambda_{ТАМ,р}} + \frac{\delta_{пов}}{\lambda_{пов}}} \quad (2.36)$$

де τ_1 – поточний час процесу охолодження двигуна, С; $\delta_{із}$ - товщина шару теплоізоляції, мм; $\delta_{ТАМ}$ - товщина шару ТАМ ФП, мм; $\delta_{пов}$ - товщина шару повітряного прошарку, мм; $\lambda_{із}$ - коефіцієнт теплопровідності

теплоізоляційного матеріалу, Вт / (м · К); $\lambda_{нов}$ - коефіцієнт теплопровідності повітряного прошарку, Вт / (м · К); $\lambda_{ТАМр}$ - коефіцієнт теплопровідності ТАМ ФП, що знаходиться у рідкій фазі, Вт / (м · К).

Знаходимо вираз для визначення температури рідкого шару ТАМ ФП. Величина dQ у формулі (2.31) відображає кількість теплоти, що передається через шар площею F за час dt . Щільність теплового потоку q (Дж / (м²·с)) визначається співвідношенням:

$$q = \frac{1}{F} \cdot \frac{dQ}{dt} = k_1(t_{дв,1} - t_0) \quad (2.37)$$

В формулу (2.37) підставимо значення $t_{дв}$ згідно у відповідності до співвідношення (2.35):

$$q = k_1(t_{дв,0} - t_0)\exp(-A_1\tau_1) \quad (2.38)$$

де $t_{дво}$ - початкове значення температури елемента конструкції двигуна і МО з СМ, °С.

С іншого боку значення щільності теплового потоку можливо виразити, враховуючи перенесення теплоти через повітряний прошарок:

$$q = (t_{дв,1} - t_{ТАМ}) \frac{\lambda_{пов}}{\delta_{пов}} \quad (2.39)$$

Прирівнюємо праві частини рівнянь (2.38) і (2.39):

$$k(t_{дв,0} - t_0)\exp(-A_1\tau_1) = (t_{дв,1} - t_{ТАМ}) \frac{\lambda_{пов}}{\delta_{пов}} \quad (2.40)$$

З формули (2.40) знаходимо вираз для визначення температури $t_{ТАМ}$:

$$t_{ТАМ} = t_{дв,1} - k_1 \frac{\delta_{пов}}{\lambda_{пов}} (t_{дв,0} - t_0)\exp(-A_1\tau_1) \quad (2.41)$$

Після підстановки у формулу (2.41) значення $t_{\text{дв},1}$, у відповідності із залежністю (2.35), отримуємо:

$$t_{\text{TAM}} = t_o + (t_{\text{дв},o} - t_o) \left(1 - k_1 \frac{\delta_{\text{пов}}}{\lambda_{\text{пов}}}\right) \exp(-A_1 \tau_1) \quad (2.42)$$

Якщо в формулі (2.42) значення температури ТАМ дорівняти значенню температури кристалізації ТАМ ФП ($t_{\text{TAMкр}}$), то з цієї формули можливо знайти час τ , через який почнеться процес кристалізації ТАМ ФП.

$$\tau = \frac{1}{A_1} \left\{ \ln[(t_{\text{дв},o} - t_o) \left(1 - k_1 \frac{\delta_{\text{пов}}}{\lambda_{\text{пов}}}\right)] - \ln(t_{\text{TAMкр}} - t_o) \right\} \quad (2.43)$$

де τ – поточне значення часу, с.

Методика розрахунку процесу зберігання теплової енергії в КТА полягає у тому, що КТА зберігає і передає накопичену теплову енергію до різних зон двигуна як можливо більший час, для забезпечення безаварійного запуску після довготривалої зупинки, та готовий для використання у складі СТП газового двигуна. Зберігання теплової енергії в КТА відбувається за допомогою достатньої теплової ізоляції ТАМ ФП від оточуючого середовища (термоізоляція) за допомогою спеціального теплоізолюючого матеріалу, тому, що втрати теплової енергії в КТА мають місце, в будь якому випадку.

Основне завдання в розглядаємому процесі за представленою методикою розрахунку - визначити час процесу теплообміну при зберіганні теплової енергії, що характеризується закінченням кристалізації речовини ТАМ ФП. В умовах означеного завдання температура корпусних елементів дослідного двигуна і МО в ньому буде наближатися до температури кристалізації ТАМ ФП і, одночасно з цим, має місце теплообмін від шару кристалізації до різних частин двигуна і в оточуюче середовище. Для опису залежності температури двигуна та часу процесу кристалізації ТАМ ФП складемо рівняння теплового балансу. Кількість теплової енергії, що

втрачається масою двигуна й оливи в ньому, описується рівнянням типу (2.30). Кількість теплової енергії, що передається через повітряний прошарок (від двигуна до шару ТАМ ФП) описується рівнянням

$$dQ = F \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\delta_{\text{пов}}} (t_{\text{ДВ}} - t_{\text{ТАМ КР}}) d\tau \quad (2.44)$$

Порівнюємо праві частини рівнянь (2.30) і (2.44) з урахуванням від'ємного знака $dt_{\text{ДВ}}$:

$$(G_o c_o + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}) dt_{\text{ДВ}} = - F \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\delta_{\text{пов}}} (t_{\text{ДВ}} - t_{\text{ТАМ КР}}) d\tau \quad (2.45)$$

У рівнянні (2.45) розподіляємо змінні:

$$\frac{dt_{\text{ДВ}}}{t_{\text{ДВ}} - t_{\text{ТАМ КР}}} = - \frac{F \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\delta_{\text{пов}}}}{G_o c_o + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}} d\tau \quad (2.46)$$

В рівняння (2.46) вводимо позначення:

$$\frac{F \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\delta_{\text{пов}}}}{G_o c_o + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}} = A_2 \quad (2.47)$$

З урахуванням позначення (2.47) рішення рівняння (2.46) має вигляд:

$$t_{\text{ДВ,2}} = t_{\text{ТАМ КР}} + (t_{\text{ДВ,1}} - t_{\text{ТАМ КР}}) \exp[-A_2(\tau - \tau_1)] \quad (2.48)$$

Час закінчення процесу кристалізації ТАМ ФП (τ_2) визначаємо з умови рівності теплової енергії кристалізації й сумарного ефекту підведення й відведення теплової енергії від цього шару.

Кількість теплової енергії, що підводиться до шару ТАМ ФП з боку двигуна може бути визначена шляхом інтегрування рівняння (2.44),

підставивши в нього замість температури двигуна її значення, що визначається за рівнянням (2.48):

$$dQ = F \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\delta_{\text{пов}}} (t_{\text{ДВ},1} - t_{\text{ТАМ кр}}) \exp[-A_2(\tau - \tau_1)] d\tau \quad (2.49)$$

Після інтегрування рівняння (2.49) отримуємо наступний вираз:

$$Q_{\text{ДВ}} = -\frac{1}{A_2} F \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\delta_{\text{пов}}} (t_{\text{ДВ},1} - t_{\text{ТАМ кр}}) \{\exp[-A_2(\tau - \tau_1)] - 1\} \quad (2.50)$$

Кількість теплової енергії, що відводиться від шару ТАМ ФП у оточуюче середовище за час $(\tau - \tau_1)$ визначаємо за формулою:

$$Q_{\text{из}} = K_2 F (t_{\text{ТАМкр}} - t_0) (\tau - \tau_1), \quad (2.51)$$

де K_2 – коефіцієнт теплопередачі від шару ТАМ ФП до ОС, Дж / (м²·с·°С).

$$K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зов}}} + \frac{\delta_{\text{из}}}{\lambda_{\text{из}}}} \quad (2.52)$$

Кількість теплової енергії, що генерується у шарі ТАМ ФП за час його кристалізації визначається за співвідношенням:

$$Q_{\text{кр}} = M_{\text{ТАМ}} q_{\text{ТАМ}} \quad (2.53)$$

Очевидно, що кількість теплової енергії, яка генерується у процесі кристалізації, буде дорівнювати кількості теплової енергії, яка відводиться в оточуюче середовище через шар ізоляції за винятком теплової енергії, що підводиться до цієї речовини від газового двигуна, тобто:

$$Q_{\text{кр}} = Q_{\text{из}} - Q_{\text{ДВ}} \quad (2.54)$$

Розкриваємо члени рівняння (2.54) з урахуванням співвідношень (2.51), (2.53) і (2.50):

$$M_{\text{TAM}} q_{\text{TAM}} = K_2 F (t_{\text{TAM,кр}} - t_0) (\tau - \tau_1) + \frac{1}{A_2} F \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\delta_{\text{пов}}} (t_{\text{ДВ,1}} - t_{\text{TAM,кр}}) \{ \exp[-A_2 (\tau - \tau_1) - 1] \} \quad (2.55)$$

Для спрощення в рівняння (2.55) вводимо позначення:

$$K_2 F (t_{\text{TAM,кр}} - t_0) = B_1 \quad (2.56)$$

$$\frac{1}{A_2} F \frac{\lambda_{\text{в}}}{\delta_{\text{в}}} (t_{\text{ДВ,1}} - t_{\text{TAM,кр}}) = B_2 \quad (2.57)$$

тоді рівняння (2.55) можливо переписати у формі:

$$M_{\text{TAM}} q_{\text{TAM}} = B_1 (\tau - \tau_1) + B_2 \{ \exp[-A_2 (\tau - \tau_1) - 1] \} \quad (2.58)$$

Рівняння теплового балансу (2.54) допускає, що час τ в рівнянні (2.55) відповідає часу закінчення кристалізації ТАМ ФП. Позначивши цей час як τ_2 рівняння (2.58) приймає вигляд

$$M_{\text{TAM}} q_{\text{TAM}} = B_1 (\tau_2 - \tau_1) + B_2 \{ \exp[-A_2 (\tau_2 - \tau_1) - 1] \} \quad (2.59)$$

Відносно пошуку часу закінчення кристалізації ТАМ ФП τ_2 рівняння (2.59) є трансцендентним рівнянням. Цей час (τ_2) можливо визначити лише одним з методів числового рішення таких рівнянь.

Методика розрахунку роботи КТА в режимі розрядки є зворотною задачею розрахунку зарядки КТА, тобто процес передачі теплової енергії, що заздалегідь накопичена ТАМ ФП, до різних зон двигуна і являє собою процес теплопередачі від одного середовища до другого. Основне завдання що ставилось в удосконаленій методиці розрахунку - знайти залежність для визначення температури МО в картері і маси двигуна за заданий час після закінчення кристалізації ТАМ ФП. Після закінчення кристалізації шар ТАМ

ФП стає опором для проходження теплової енергії від маси конструкції двигуна та МО в ньому в оточуюче середовище. Спосіб вирішення завдання, як і в попередніх випадках, полягає в складанні рівняння теплового балансу в диференціальній формі й у подальшому рішенні цього диференціального рівняння. Кількість теплової енергії, що втрачається масою конструкції двигуна й МО в ньому виражається співвідношенням:

$$dQ = (G_o c_o + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}) dt_{\text{ДВ}} \quad (2.60)$$

Кількість теплової енергії, що проходить через шари: повітряний прошарок, шар ТАМ ФП, шар теплової ізоляції:

$$dQ = k_3 F (t_{\text{ДВ}} - t_o) d\tau \quad (2.61)$$

де

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зов}}} + \frac{\delta_{\text{пов}}}{\lambda_{\text{пов}}} + \frac{\delta_{\text{ТАМ}}}{\lambda_{\text{ТАМ},1}} + \frac{\delta_{\text{із}}}{\lambda_{\text{із}}}} \quad (2.62)$$

Праві частини рівнянь (2.60) і (2.61) дорівнюємо при умові, що вони мають різні знаки:

$$-(G_o c_o + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}) dt_{\text{ДВ}} = k_3 F (t_{\text{ДВ}} - t_o) d\tau \quad (2.63)$$

Перетворюємо рівняння (2.63), як це робилося раніше, при вирішенні першого етапу:

$$\frac{dt_{\text{ДВ}}}{t_{\text{ДВ}} - t_o} = -A_3 d\tau \quad (2.64)$$

де

$$A_3 = \frac{k_3 F}{G_o c_o + G_{\text{ДВ}} c_{\text{ДВ}}} \quad (2.65)$$

При вирішенні рівняння (2.64) поточне значення часу позначаємо τ_3 , а поточне значення температури МО в порожнині двигуна і температури МО двигуна $t_{\text{ДВЗ},3}$.

З рішення рівняння (2.64) отримуємо:

$$t_{\text{ДВЗ},3} = t_0 + (t_{\text{ДВ},2} - t_0) \exp[-A(\tau_3 - \tau_2)] \quad (2.66)$$

З рівняння (2.66) можливо отримати залежність для визначення загального часу теплообміну τ_3 , на момент якого температура МО в порожнині двигуна (картері) й маси двигуна будуть дорівнюють заданому значенню $t_{\text{ДВЗ},3}$:

$$\tau_3 = \tau_2 + \frac{1}{A_3} [\ln(t_{\text{ДВ},2} - t_0) - \ln(t_{\text{ДВЗ},3} - t_0)] \quad (2.67)$$

Таким чином, представленою удосконаленою методикою розрахунку ураховані особливості застосування КТА для випадку, коли теплообмін від ДГД здійснюється через встановлені з боків і знизу дослідного газового двигуна шарів ТАМ і шарів ізоляційного матеріалу.

2.3.6. На рівні f проводиться розрахунок режимів роботи накопичувача моторної оливи з тепловим акумулятором фазового переходу (НМО) СТП газового двигуна. В представленій удосконаленій методиці розрахунку розглянуті особливості роботи НМО фазового переходу СТП двигуна при зберіганні зливої в ємність розігрітої МО з СМ, оскільки він виконує теплоізолюючу функцію [110, 79, 80]. НМО включає в себе теплоізолюваний корпус теплонакопичувача (ємність) і елементи керування. Для врахування особливостей методики розрахунку параметрів роботи НМО у складі СТП розглянемо опис процесу теплообміну МО з СМ в теплоізолюваному теплонакопичувачі з оточуючим середовищем. На рис. 2.6 представлена умовна схема теплообміну робочої рідини – моторної оливи з системи

мащення в НМО довільної форми. Такий варіант прийнято для того, щоб врахувати можливість виготовлення різних варіантів форм НМО в умовах експлуатації дослідного газового двигуна ЕУ. Особливість роботи СТП дослідного двигуна з НМО полягає в накопиченні теплової енергії теплоносія шляхом зливу (подачі) з (до) картеру (порожнини) дослідного газового двигуна МО в процесі довготривалої зупинки двигуна [24, 110, 121, 122, 124] енергетичної установки. Кількість теплової енергії dQ_1 , що передається від МО в порожнині НМО в оточуюче середовище через стінку за час $d\tau$ виражається співвідношенням:

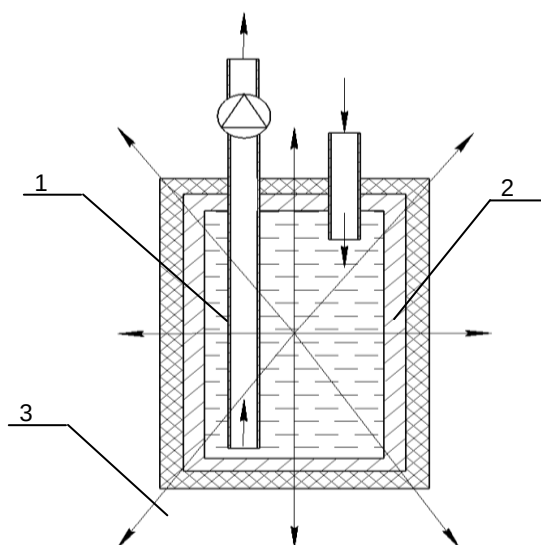


Рисунок 2.6 – Умовна схема теплообміну робочої рідини (МО) в накопичувальній ємності: 1 – МО в ємності, 2 – шар теплоізоляції; 3 – напрямок «стоку» (розповсюдження) теплової енергії

$$dQ_1 = kF(t_p - t_0)d\tau \quad (2.68)$$

де k - коефіцієнт теплопередачі від МО в порожнині НМО в оточуюче середовище, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$; F - зовнішня поверхня НМО, м^2 ; t_p - поточне значення температури робочої рідини в НМО, $^{\circ}\text{C}$; t_0 - температура оточуючого середовища, $^{\circ}\text{C}$; τ - інтервал часу, Дж; Q - кількість теплоти, переданої від МО в середині НМО в оточуюче середовище за деякий інтервал часу.

За цей час МО втратить теплову енергію в кількості:

$$dQ_2 = Gcdt_{\text{ж}} \quad (2.69)$$

У зв'язку із тим, що немає інших джерел надходження теплової енергії крім вже означених, то ліві частини рівнянь (2.68) і (2.69) повинні дорівнювати одна одній за абсолютною величиною. Оскільки при позитивному значенні $(t_p - t_0)$ у процесі теплообміну буде відбуватися охолодження МО в НМО, то зміна температури dt_p буде величиною від'ємною. Для прирівнювання правих частин рівнянь (2.68) і (2.69) перед одним зі складових рівнянь необхідно поставити знак «-», тобто

$$kF(t_p - t_0)d\tau = -Gcdt_p \quad (2.70)$$

де G - маса МО з СМ, кг; c - питома теплоємність МО, Дж/ (кг К).

Рівняння (2.70) є диференціальним рівнянням зі змінними, що розділяються. Це рівняння представимо у вигляді:

$$k \frac{dt_p}{(t_p - t_0)} = - \frac{kF}{Gc} d\tau \quad (2.71)$$

Рішення диференціального рівняння (2.71) дозволяє одержати залежність зміни температури робочої рідини в НМО t_p від часу в процесі теплообміну τ у вигляді:

$$t_p = t_0 + (t_{p0} - t_0) \exp\left(-\frac{kF}{Gc} \tau\right) \quad (2.72)$$

де t_{p0} - початкове значення температури МО з СМ в ТН, °С; τ - поточний час, с.

З рівняння (2.72) можливо одержати залежність терміну (часу) процесу теплообміну τ , за яку температура МО з СМ в ємності знизиться до заданого рівня t_p :

$$\tau = \frac{Gc}{kF} [\ln(t_{p0} - t_0) - \ln(t_p - t_0)] \quad (2.73)$$

У формулах (2.72) і (2.73) коефіцієнт теплопередачі k визначається з виразу:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{зовн}}} + \frac{\delta}{\lambda}} \quad (2.74)$$

де $\alpha_{\text{вн}}$ - коефіцієнт тепловіддачі від МО з СМ в ємності до стінки НМО, Вт/(м² К); $\alpha_{\text{зовн}}$ - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні в оточуюче середовище, Вт/(м² К); δ - товщина шару теплоізоляції, мм; λ - коефіцієнт теплопровідності ізоляційного матеріалу, Вт/(м К).

Зупинимось на особливостях визначення значень величин, що входять у формулу (2.74). Коефіцієнт (конвективної) теплопередачі від МО в НМО до його стінки, враховуючи достатню в'язкість МО й порівняно невеликий об'єм НМО, можливо прийняти в межах 20...70 Вт/(м² К) [119, 120]. Коефіцієнт (конвективної) тепловіддачі від зовнішньої поверхні НМО в оточуюче середовище при відсутності інтенсивного охолодження НМО можливо приймати в межах 3...10 Вт/(м² К) [119, 120]. Коефіцієнт теплопровідності шару теплоізоляції стінки НМО в загальному випадку визначається типом ізоляційного матеріалу. Відомо, що чим вище щільність матеріалу, тим вище коефіцієнт його теплопровідності. Вважається, що матеріал відноситься до ізоляційних, якщо його коефіцієнт теплопровідності нижче 0,2 Вт/(м² К), а коефіцієнт теплопровідності вакуумно-багатошарової теплоізоляції, що використовується для зберігання криогенних рідин становить $1 \cdot 10^{-4}$ Вт/(м² К) [119, 120].

2.3.7 На рівні g удосконаленої методики розрахунку проводиться оцінка передпускового і післяпускового процесу прогрівання газового двигуна за допомогою СТП. При виконанні оцінювання теплової підготовки в частині прогріву ДГД за допомогою СТП в різних варіантах комплектації виходили з того, що СТП являє собою поєднання чотирьох незалежних

підсистем: УТС (з ТА), ППД, КТА і НМО. Перші дві підсистеми забезпечують роботу ТА фазового переходу УТС і, працюючи спільно, фактично забезпечують роботу дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 при здійсненні передпускового і післяпускового прогріву двигуна. КТА забезпечує довготривале зберігання накопиченої теплової енергії МО і ОР у власному контактному ТА фазового переходу. НМО забезпечує довготривале зберігання накопиченої теплової енергії МО у власній ємності, оснащений ТА фазового переходу. Дослідження на цьому рівні ставило за мету оцінити і порівняти можливість використання при передпусковому і післяпусковому прогріві дослідного газового двигуна складових СТП, які працюють окремо і незалежно одна від одної, так і роботу всієї СТП, що можуть працювати одночасно при використанні всіх складових в різних комбінаціях взаємодії.

2.3.8 На рівні *g* удосконаленої методики розрахунку проводиться визначення результатів роботи дослідного газового двигуна з СТП в процесі теплової підготовки, а саме в період передпускового і післяпускового прогріву. Для оцінки впливу роботи СТП газового двигуна на паливну економічність та викиди шкідливих речовин з ВГ була використана наступна методика. Особливість її полягає в тому, що для кожного з температурних діапазонів теплової підготовки газового двигуна в залежності від умов експлуатації використовувались різні поліноміальні залежності 5-6 порядку. А економія палива і зниження викидів шкідливих речовин у ВГ від здійснення теплової підготовки визначались, як їх різниця при використанні варіантів ДГД зі ШС і ДГД з СТП.

Витрата газового палива ($\text{м}^3/\text{год}$) на забезпечення теплової підготовки на прогрів від температури оточуючого середовища до температури робочого стану ДГД відповідно для штатних СО і СМ і з СТП визначалась рівняннями у наступному вигляді:

$$G_{\text{нал.ШС}} = a_{G1} \cdot t^4 - a_{G2} \cdot t^3 + a_{G3} \cdot t^2 - a_{G4} \cdot t + a_{G5}, \text{ м}^3/\text{год}; \quad (2.75)$$

$$G_{нал.СТПА40} = -a_{G_{40}1} \cdot t^6 + a_{G_{40}2} \cdot t^5 - a_{G_{40}3} \cdot t^4 + a_{G_{40}4} \cdot t^3 - a_{G_{40}5} \cdot t^2 + a_{G_{40}6} \cdot t + a_{G_{40}7}, \text{ м}^3/\text{ГОД}; (2.76)$$

$$G_{нал.СТПА50} = -a_{G_{50}1} \cdot t^6 + a_{G_{50}2} \cdot t^5 - a_{G_{50}3} \cdot t^4 + a_{G_{50}4} \cdot t^3 - a_{G_{50}5} \cdot t^2 + a_{G_{50}6} \cdot t + a_{G_{50}7}, \text{ м}^3/\text{ГОД}; (2.77)$$

$$G_{нал.СТПА60} = -a_{G_{60}1} \cdot t^5 + a_{G_{60}2} \cdot t^4 - a_{G_{60}3} \cdot t^3 + a_{G_{60}4} \cdot t^2 - a_{G_{60}5} \cdot t + a_{G_{60}6}, \text{ м}^3/\text{ГОД}; (2.78)$$

де t – час теплової підготовки - прогріву ДГД зі штатними СО і СМ від температури ОС до температури «гарячого» пуску і з СТП при різних температурах прогріву, с; $a_{G1} \dots a_{G5}$; $a_{G401} \dots a_{G407}$; $a_{G501} \dots a_{G507}$; $a_{G601} \dots a_{G606}$ - коефіцієнти апроксимації.

Економія газового палива на прогрів при використанні СТП та без неї (зі ШС) складає:

$$G_{ЕК.нал.} = G_{нал.ШС} - G_{нал.СТПАi}, \text{ м}^3/\text{ГОД} \quad (2.79)$$

де $G_{нал.СТПАi}$ – витрата газового палива ($\text{м}^3/\text{ГОД}$) на забезпечення теплової підготовки на прогрів від температури оточуючого середовища до встановленої температури запуску ДГД ($40 - 60^\circ\text{C}$).

Аналогічно розраховуються викиди оксидів азоту з ВГ. Викиди оксидів азоту NO_x при здійсненні теплової підготовки на прогрів від температури оточуючого середовища до температури робочого стану ДГД відповідно для штатних СО і СМ і з СТП визначалась рівняннями у наступному вигляді:

$$G_{\text{NO}_x.ШС} = a_{\text{NO}_x1} \cdot t^5 - a_{\text{NO}_x2} \cdot t^4 + a_{\text{NO}_x3} \cdot t^3 - a_{\text{NO}_x4} \cdot t^2 + a_{\text{NO}_x5} \cdot t + a_{\text{NO}_x}, \text{ г/м}^3; (2.80)$$

$$G_{\text{NO}_x.СТПА40} = -a_{\text{NO}_{x40}1} \cdot t^6 + a_{\text{NO}_{x40}2} \cdot t^5 - a_{\text{NO}_{x40}3} \cdot t^4 + a_{\text{NO}_{x40}4} \cdot t^3 - a_{\text{NO}_{x40}5} \cdot t^2 + a_{\text{NO}_{x40}6} \cdot t - a_{\text{NO}_{x40}7}, \text{ г/м}^3; (2.81)$$

$$G_{\text{NO}_x.СТПА50} = -a_{\text{NO}_{x50}1} \cdot t^6 + a_{\text{NO}_{x50}2} \cdot t^5 - a_{\text{NO}_{x50}3} \cdot t^4 + a_{\text{NO}_{x50}4} \cdot t^3 - a_{\text{NO}_{x50}5} \cdot t^2 + a_{\text{NO}_{x50}6} \cdot t - a_{\text{NO}_{x50}7}, \text{ г/м}^3; (2.82)$$

$$G_{NO_x.CTII60} = -a_{NO_{x60}1} \cdot t^6 + a_{NO_{x60}2} \cdot t^5 - a_{NO_{x60}3} \cdot t^4 + a_{NO_{x60}4} \cdot t^3 - a_{NO_{x60}5} \cdot t^2 + a_{NO_{x60}6} \cdot t - a_{NO_{x60}7}, \text{ г/м}^3; (2.83)$$

де t – час теплової підготовки - прогріву ДГД зі штатними СО і СМ від температури ОС до температури «гарячого» пуску і з СТП при різних температурах прогріву, с; $a_{NOx1} \dots a_{NOx5}$; $a_{NOx401} \dots a_{NOx407}$; $a_{NOx501} \dots a_{NOx507}$; $a_{NOx601} \dots a_{NOx606}$ - коефіцієнти апроксимації.

Зниження викидів оксидів азоту з ВГ в процесі прогріву при використанні СТП та без неї (зі ШС) складає:

$$G_{EK.NO_x} = G_{NO_x.ШС} - G_{NO_x.CTIIi} \quad (2.84)$$

де $G_{NO_x.CTIIi}$ – викиди оксидів азоту NO_x при здійсненні теплової підготовки на прогрів від температури оточуючого середовища до встановленої температури запуску ДГД (40 – 60 °C).

2.4 Перевірка адекватності основних залежностей удосконаленої методики розрахунку процесів здійснення теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 під час передпускового і післяпускового прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини

Адекватність отриманих експериментальних і розрахункових графічних залежностей в проведеному дослідженні оцінювались наступними показниками: середньоквадратичним відхиленням; максимальним абсолютним відхиленням; коефіцієнтом множинної кореляції; коефіцієнтом детермінації [125].

Перевірка адекватності здійснювалась шляхом перевірки однорідності дисперсій, відтворюваності та адекватності, деякі результати наведені в розділах 3 і 4 на відповідних графіках залежностей .

Коефіцієнт детермінації моделі розрахунку залежності випадкової величини y від факторів x визначався наступним чином:

$$R^2 = 1 - \frac{V(y/x)}{V(y)} = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2} \quad (2.85)$$

де $V(y/x) = \sigma^2$ - умовна (за факторами x) дисперсія залежної змінної (дисперсія випадкової помилки моделі).

Дисперсія адекватності визначається за формулою:

$$S_{\text{Ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_0 - y_p)^2}{f_1} \quad (2.86)$$

де y_0 - експериментальне значення параметра; y_p - отримане за допомогою математичної моделі значення параметра; f_1 - число ступенів свободи, яке визначається як різниця між числом дослідів N та числом коефіцієнтів k апроксимації ($f_1 = N - k$).

Дисперсія дослідів визначається за формулою:

$$S_{[Y]}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{f_2} \quad (2.87)$$

де y_i - значення параметра, яке отримується в i -му досліді; $\bar{y}$ - середнє значення параметрів, які вимірюються; $f_2 = n - 1$, число ступенів свободи (число повторних дослідів).

Модель вважається адекватною з заданою відповідною ймовірністю, якщо коефіцієнт детермінації моделі залежності не перевищував відносну планку похибки 5%. Для перевірки адекватності і подальшого використання в дослідженнях були перевірені наступні характеристики: витрата палива при прогріві; викиди оксидів азоту; час прогріву; динаміка зміни температури МО в СМ; динаміка зміни температури ТАМ ФП в ТА фазового переходу СТП; динаміка зміни температури МО в СМ; динаміка зміни температури ОР

в СО в районі ВМТ, в районі НМТ; на виході з ДВЗ; в головці блоку ДВЗ. Отримані результати проведеної перевірки свідчать, що удосконалені методики розрахунку для часу прогріву двигуна до заданої температури, витрати палива, викидів шкідливих речовин та динаміки зміни температур ТАМ ФП, МО і ОР адекватно описують реальні процеси в досліджуваній системі ДГД з СТП. В подальшій роботі стає можливим проводити теоретичні дослідження за допомогою удосконаленої методики розрахунку процесів здійснення теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 під час передпускового і післяпускового прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини з СТП.

2.5 Висновки до розділу 2

1. Для забезпечення теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву дослідного стаціонарного газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) до температури, при якій можливо здійснювати навантаження двигуна, а потім до робочої температури та довготермінового підтримання їх у межах, обумовлених робочим процесом та конструкцією двигуна, розроблена система теплової підготовки з використанням акумульованої енергії (СТП), що конструктивно входить, як складова частина, до систем мащення і охолодження газового двигуна та виконує частину їх функцій й здійснює визначальний вплив на протікання робочого процесу, і складається з підсистем: ППД, УТС, КТА, НМО.

2. Розроблена загальна структура удосконаленої методики розрахунку і оцінки впливу прийнятих конструктивних рішень і температури оточуючого середовища на експлуатаційні (енергетичні, економічні, часові) та екологічні показники газового двигуна в процесі здійснення теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прискореного прогріву за допомогою СТП.

3. Розроблена 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. На основі укрупненої структурної схеми розроблена удосконалена методика розрахунку процесів роботи КТА і НМО, удосконалені та адаптовані методики розрахунку ТА фазового переходу УТС для прогріву МО, ППД, моніторингу системи для параметрів МО і ОР, УТ УТС, удосконалено методику розрахунку для оцінки і аналізу впливу роботи СТП та її складових на паливну економічність дослідного газового двигуна при прогріві, викиди шкідливих речовин з ВГ, а також час теплової підготовки - прогріву газового ДВЗ. Розроблена методика і враховані особливості спільного використання елементів і підсистем СТП при виконанні передпускового, післяпускового прогріву газового двигуна і міжзмінного його зберігання.

4. Перевірена адекватність апроксимованих залежностей, отриманих із експериментальних, за допомогою середньоквадратичного відхилення; максимального абсолютного відхилення; коефіцієнта множинної кореляції; коефіцієнта детермінації. Відносна планка похибки розрахункових та експериментальних залежностей не перевищує 5%.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМА, МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є отримання дослідних даних щодо перевірки адекватності та удосконалення методики розрахунку робочого процесу система теплової підготовки з використанням акумульованої енергії газового двигуна (СТП), оснащеної підсистемами: прискореного прогріву (ППД), утилізації теплової енергії ВГ тепловим акумулятором фазового переходу, контактним тепловим акумулятором (КТА), накопичувачем моторної оливи з тепловим акумулятором (НМО) при здійсненні передпускового і післяпускового прогріву.

Відповідно до поставленої мети програма експериментальних досліджень включала:

- удосконалення теплового акумулятора (АТ) фазового переходу УТС для забезпечення можливості одночасного прогріву моторної оливи і охолоджуючої рідини та отримання його характеристик;
- удосконалення системи прискореного прогріву (ППД) для забезпечення можливості одночасного прокачування МО і ОР двигуна;
- розробку системи теплової підготовки з використанням акумульованої енергії газового двигуна у складі підсистем: прискореного прогріву (ППД), утилізації теплової енергії ВГ тепловим акумулятором фазового переходу, контактним тепловим акумулятором (КТА) і накопичувачем моторної оливи з тепловим акумулятором (НМО);
- уточнення і визначення характеристик процесу охолодження СМ і СО попередньо прогрітого до робочої температури непрацюючого двигуна;

- визначення часових, енергетичних, економічних та екологічних показників двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) при здійсненні передпускового прогріву і прискореного прогріву після пуску;
- визначення характеристик складових елементів СТП дослідного газового двигуна для складання рівнянь удосконаленої методики розрахунку процесів їх роботи;
- розробку та апробацію алгоритму роботи СТП дослідного газового двигуна, перевірку правильності удосконалених методик розрахунку робочих процесів складових елементів СТП дослідного газового двигуна;
- перевірку працездатності, ефективності встановлення і використання СТП в СМ і СО двигуна, оцінку її впливу на покращення прогріву двигуна, на час теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву двигуна до можливості прийняття навантаження двигуном та температури, яка відповідає оптимальній робочій температурі газового двигуна, визначення впливу СТП на паливну економічність та екологічні показники роботи двигуна;
- перевірку адекватності та удосконалення методики розрахунку робочого процесу системи теплової підготовки з використанням акумульованої енергії газового двигуна.

Для досягнення поставлених цілей були вирішені наступні задачі:

- 1) визначення характеристик удосконаленого ТА фазового переходу для виконання прогріву МО і одночасного прогріву ОР і МО при здійсненні зарядки, розрядки та зберігання теплової енергії за варіантами комплектації СТП;
- 2) визначення характеристик насосів з модульованою подачею підсистеми ППД для СМ і СО двигуна;
- 3) визначення ефективності система теплової підготовки з використанням акумульованої енергії газового двигуна в процесі передпускового і післяпускового прогріву ДГД, часу прогріву до можливості

навантаження ДГД, витрати палива та викидів шкідливих речовин в процесі експлуатації ДГД з СТП.

Для виконання цих задач газовий двигун 6Ч 12/14 (К-159 М2) оснащено системою теплової підготовки з використанням акумульованої енергії та проведені експериментальні дослідження СТП дослідного газового двигуна, що встановлений на випробувальному стенді на основі агрегату ДГМА-48М1.

3.2 Об'єкти і обладнання експериментальних досліджень та вимірювальні прилади

Основним об'єктом експериментального дослідження є система теплової підготовки з використанням акумульованої енергії (СТП) газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) електроагрегату (табл. 3.1), що призначена для забезпечення теплової підготовки, а саме можливості одночасного передпускового і післяпускового прогріву МО і ОР газового двигуна. СТП газового двигуна складається з наступних підсистем: ППД, УТС (з ТА фазового переходу), КТА і НМО. Основні елементи СТП і вказаних підсистем (рис. 2.1): система керування; тепловий акумулятор фазового переходу УТС, контактний тепловий акумулятор, накопичувач моторної оливи з ТА; теплообмінник у випускному трубопроводі двигуна; циркуляційний насоси з модульованою подачею для зарядки ТА УТС; циркуляційні насоси з модульованою подачею МО і ОР підсистеми прискореного прогріву двигуна; циркуляційні насоси з модульованою подачею МО підсистеми НМО; електромагнітні клапани; термопари. Загальна схема експериментальної установки показана на рис 3.1.

Агрегат з газовим двигуном укомплектований генератором синхронним LSA 44.2 VS3 [124], який має параметри, представлені в табл. 3.1. На агрегаті встановлено шестициліндровий чотирьохтактний нереверсивний однорядний з вертикальним розташуванням циліндрів

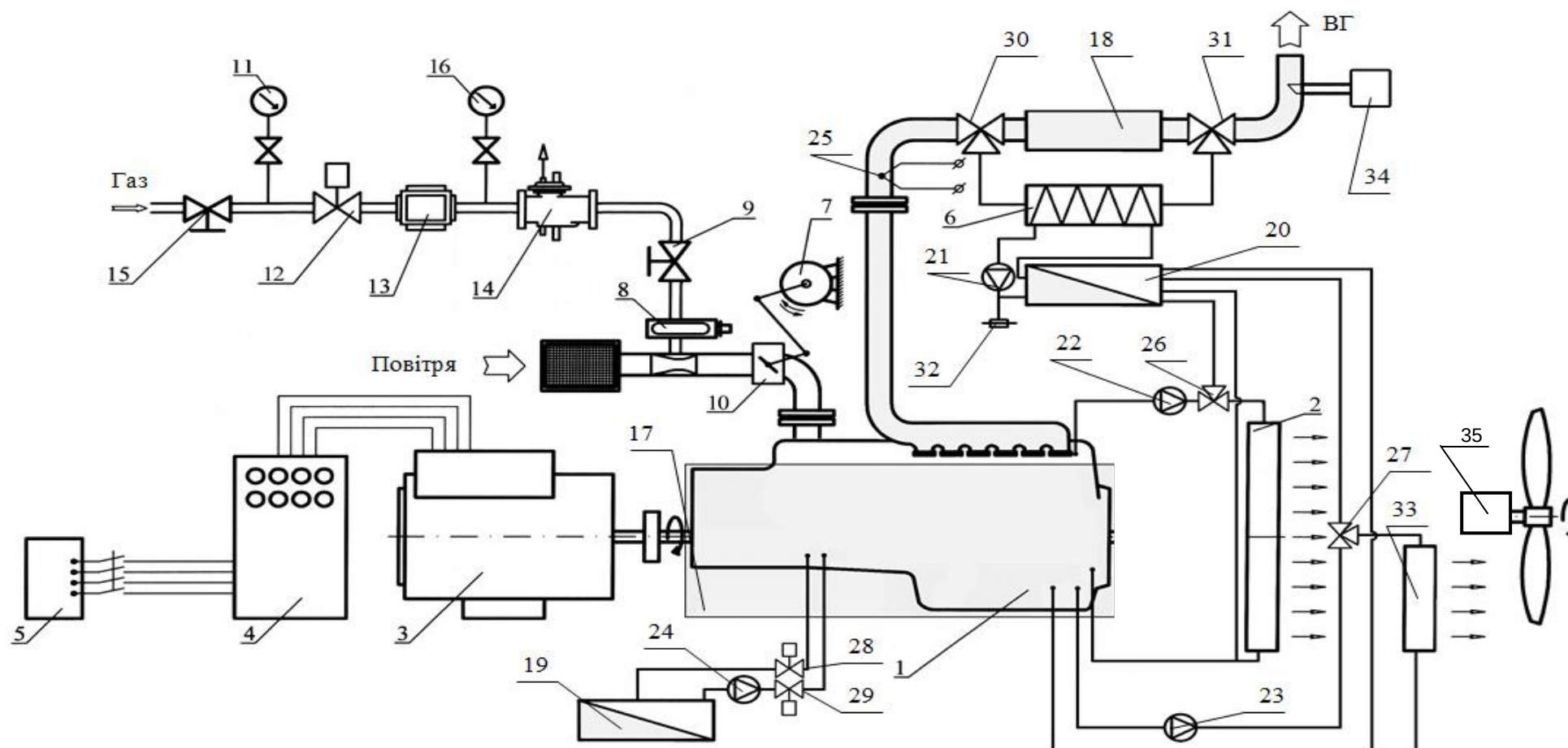


Рисунок 3.1 – Загальна схема системи теплової підготовки з використанням акумульованої енергії дослідного стаціонарного газового двигуна:

1 – газовий двигун 6Ч 12/14 (К-159 М2); 2 – радіатор системи охолодження; 3 – генератор; 4 – шафа керування; 5 - сухі реостати з можливістю ступінчастого включення; 6 – утилізаційний теплообмінник (УТ) ВГ; 7 – актуатор; 8 – витратомір газу; 9 – дозатор газу; 10 – газоповітряна заслінка; 11 – манометр; 12 – електромагнітний газовий клапан; 13 – газовий фільтр; 14 – газовий редуктор; 15 – вентиль; 16 – вимірювач напору; 17 – контактний тепловий акумулятор (КТА) фазового переходу; 18 – глушник; 19 – накопичувач моторної оливи з тепловим акумулятором фазового переходу (НМО); 20 – тепловий акумулятор (АТ) фазового переходу системи утилізації теплової енергії тепловим акумулятором; 21, 22, 23, 24 – циркуляційний насос з модульованою подачею; 25 – датчик температури ВГ; 26, 27, 28, 29 – електромагнітний рідинний клапан; 30, 31 – електромагнітний газовий клапан; 32 – бачок для розширювання теплоносія; 33 - радіатор системи мащення; 34 - газоаналізуюча апаратура; 35 – вентиляційна установка;

Таблиця 3.1 - Основні технічні характеристики
генератора синхронного LSA 44.2 VS3 [124]

№ п/п	Найменування параметру	Числове значення
1	Електрична потужність, кВт	44
2	Наруга, В	230 (400)
3	Струм	Змінний
4	Вага агрегату, кг, не більше	1755
5	Ступінь автоматизації	Перша

Таблиця 3.2 - Основні технічні характеристики газового двигуна
6Ч 12/14 (К-159 М2) [124]

№ п/п	Найменування параметру	Числове значення
1	2	3
1	Тип двигуна	6Ч 12/14 (К-159 М2)
2	Кількість циліндрів	6
3	Діаметр поршня, мм	120
4	Хід поршня, мм	140
5	Ступінь стискання	12
6	Порядок роботи циліндрів	1-5-3-6-2-4
7	Напрямок обертання колінчастого вала	Проти годинникової стрілки, якщо дивитися з боку маховика
8	Потужність кВт (к.с.): номінальна	59 (80)
	максимальна протягом години	65 (88)
9	Частота обертання колінчастого вала при номінальній потужності, хв^{-1}	1500
10	Мінімальна стійка частота обертання, хв^{-1}	700
11	Кут випередження запалювання до в.м.т. при такті стиснення, град (по повороту колінчастого валу)	24-26

газовий двигун внутрішнього згорання 6Ч 12/14 (К-159 М2), параметри якого представлені в табл. 3.2 [124]. Двигун призначено для автоматизованих за першим ступенем автоматизації електроагрегатів змінного струму.

Дослідний газовий двигун (заводський № 501086 / 6412714) у складі електроагрегату під час експериментальних досліджень встановлено в лабораторії відділу переробки і транспортування природного газу Інституту газу НАН України (м. Київ).

СТП дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) з підсистемами входить до СМ і СО (показана на рис. 3.2), як складова частина та виконує частину їх функцій, а саме забезпечує передпускову теплову підготовку, швидкий прогрів двигуна після пуску до робочої температури та підтримує її у межах, обумовлених робочим процесом та конструкцією двигуна.

Об'єктом безмоторних досліджень були також елементи СТП двигуна, а саме: тепловий акумулятор фазового переходу для забезпечення одночасного прогріву МО і ОР підсистеми УТС, що утилізує теплову енергію ВГ, контактний тепловий акумулятор, накопичувач моторної оливи з тепловим акумулятором (НМО) фазового переходу.

Тепловий акумулятор із ТАМ ФП фазового переходу [22 - 24] УТС був удосконалений для забезпечення можливості здійснення одночасного прогріву ОР і МО дослідного газового двигуна. Для цього, була виконана модернізація вже існуючого ТА [22 - 24], а саме було виготовлено додаткову секцію теплообмінника, виготовлену з латуні, яка була встановлена в уже існуючий корпус ТА, виготовлений з нержавіючої сталі. Додатково у корпусі ТА виготовлені два патрубки, поєднані з компенсаторами теплового розширення ТАМ ФП і входом термопар. В процесі випробувань зовнішня поверхня ТА була теплоізована подвійним шаром спіненого поліетилену, покритим з двох боків шарами алюмінієвої фольги.

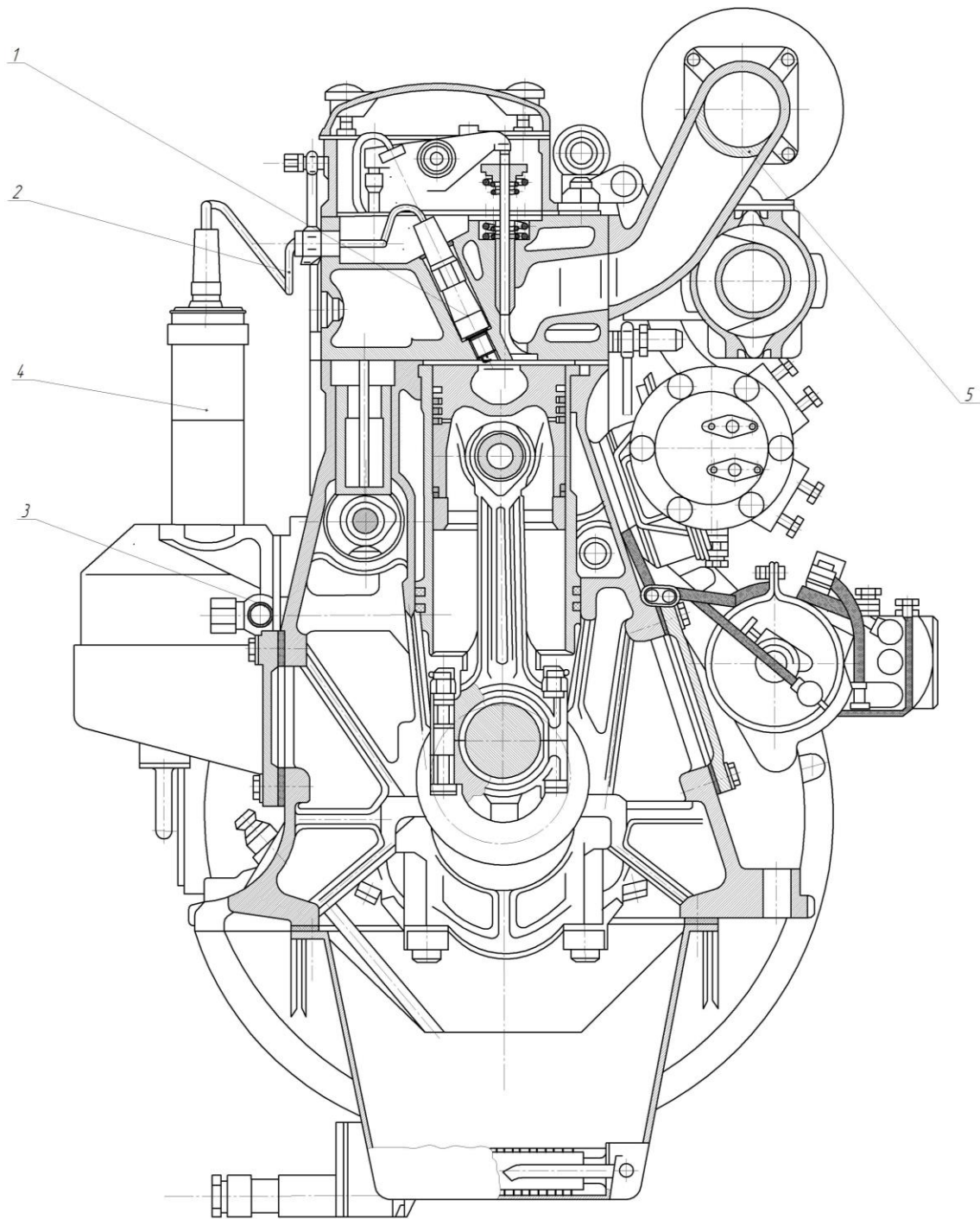


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд поперечного перерізу газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2): 1 - свіча запалювання; 2 - високовольтний провід; 3 – головна масляна магістраль; 4 – катушка; 5 – фрагмент газоповітряної заслінки

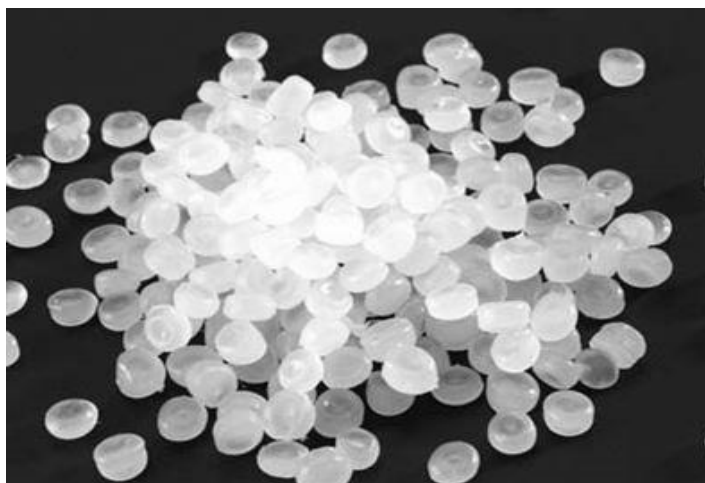


Рисунок 3.3 – Теплоакумулюючий матеріал – поліетилен високої густини.

Таблиця 3.3 - Технічна характеристика ТА фазового переходу УТС у складі системи теплової підготовки МО і ОР газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) і наповнюючого його ТАМ [19, 22 – 24, 72 - 78]

Найменування	Характеристика
Теплоакумулюючий матеріал з властивостями:	поліетилен високої густини
Густина, кг/м^3 , $\rho_{тв} / \rho_p$	925 / 800
Температура фазового переходу, К	408
Питома тепла енергія фазового переходу, кДж/кг	230
Питома теплоємність, кДж/(кг·К), $C_{тв} / C_p$	2,5 / 3,3
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К) , $\lambda_{тв} / \lambda_p$	0,25 / 0,04
Маса теплоакумулюючого матеріалу, кг	18,5
Маса теплового акумулятора з ТАМ, кг	32,75
Габаритні розміри ТА, мм	164x280x480
Теплоізолюючий матеріал	подвійний спінений поліетилен, покритий з обох сторін двома шарами алюмінієвої фольги
Матеріал корпусу ТА	нержавіюча сталь
Матеріал теплообмінника ТА	латунь
Теплова ємність ТА, кДж/К	46,25

В якості теплоакумулюючого матеріалу ТА фазового переходу використаний поліетилен високого тиску (рис. 3.3) [22 – 24, 72 - 78], характеристика якого представлена в табл. 3.3. В якості теплоакумулюючого матеріалу контактного теплового акумулятора фазового переходу і оболонки накопичувача моторної оливи з ТА фазового переходу була використана суміш високомолекулярних вуглеводнів C_{18} - C_{35} (рис.3.4) [22, 24, 72 - 78, 126,], характеристика якої представлена в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Технічна характеристика теплоакумулюючого матеріалу КТА і НМО системи теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) [124]

Найменування	Характеристика
Теплоакумулюючий матеріал за ГОСТ 23683-89 з властивостями:	парафін - суміш високомолекулярних вуглеводнів C_{18} - C_{35}
Стан	твердий
Температура плавлення, °С (К)	45-52 (318- 325)
Температура кипіння, °С (К)	350 (623)
Скрита теплота плавлення, кал	35
Питома теплова енергія фазового переходу, кДж/кг	190
Теплоізолюючий матеріал	Подвійний спінений поліетилен, покритий з обох сторін двома шарами алюмінієвої фольги



Рисунок 3.4 – Теплоакумулюючий матеріал – парафін – суміш високомолекулярних вуглеводнів C_{18} - C_{35} .

Запропонована конструкція КТА має вигляді чохла, який кріпиться зовні ДВЗ і дозволяє утилізувати теплову енергію, що виділяється корпусними елементами ДВЗ в процесі роботи для подальшого використання її для підтримання температури двигуна [55, 79, 80].

Для дослідження процесів теплообміну при зарядці й розрядці ТА фазового переходу УТС удосконалено, у порівнянні з [22, 24], безмоторний стенд для вивчення процесів теплообміну в ТА фазового переходу. До складу стенда увійшли: тепловий генератор із системою керування, ТА і вимірювальна апаратура ([22 - 24] рис. 3.1 *а*), а також додатково підключені магістралі з технологічною рідиною для імітації одночасної роботи СО і СМ двигуна в процесах теплообміну. Тепловий генератор (ТГ), що використовувався для імітації теплових процесів у випускній системі ДВЗ, являє собою циліндричну порожнину, з одного боку якого здійснюється підведення теплоносія (повітря) від нагнітача, з іншого боку - вихід цього теплоносія. У бічній циліндричній стінці корпусу ТГ є радіальний отвір із встановленим у ній керованим електронагрівачем. В якості нагнітача повітря було використано блок електроповітрянагнітача. Регулювання його продуктивності здійснювалось за рахунок зміни опору в електричному колі за допомогою лабораторного реостата. Керування витратою теплоносія й температурою нагрівача на вході в ТА здійснювалось шляхом зміни подачі повітря. Визначення витрати потоку повітря через ТА здійснювалось ротаційним газовим лічильником (рис. 3.5). Час прогріву фіксувався секундоміром.

Температури окремих елементів дослідних установок и складових безмоторного стенда і СТП вимірювали за допомогою інфрачервоних термометрів (пірометрів) DT-8811 і DT-8863 (рис. 3.6 *а, б*, табл. 3.5). Прилади, обладнання та методи випробування відповідали ГОСТ 14846-81 “Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний” [127 - 129].



Рисунок 3.5 – Ротаційний газовий лічильник



а)



б)



в)

Рисунок 3.6 – Прилади для вимірювання температури: інфрачервоні термометри (пірометри) DT-8811 (а) і DT-8863 (б) та вимірювач температури теплоносіїв КСПП УКТ 38-Щ4 «Овен» з термопарами ТХА-1172П (в)

Таблиця 3.5 - Технічні характеристики інфрачервоних термометрів DT-8811 і DT-8863 [128, 129]

Модель	DT-8811	DT-8863
Діапазон вимірювання	-20 °C ... 450 °C	-50...800 °C
Роздільна здатність	1 °C	0,1°C
Похибка вимірювання (в діапазоні)	±2% або ±2 °C (точність гарантується при температурі 18 °C ÷ 28 °C, вологості менше 80% і коефіцієнті випромінювання 0,95)	±2,5°C (-50...20°C) ±1°C ±1% (20...300°C)±1,5% (300...800°C)
Повторюваність	-	±1,3°C (-50...20°C) ±0,5°C ±0,5% (20...800°C)
Оптична роздільна здатність *	8:1	20:1
Час відгуку	1 с	150 мс
Коефіцієнт випромінювання	0,95	0,1...1,0 (за замовчуванням: 0,95)
Довжина хвилі	6 ~ 14 мкм	8...14 мкм
Живлення	9В батарея «Крона»	
Умови експлуатації	0...50°C, 10...90%RH	
Умови зберігання	-10...60°C, ≤80%RH	
Розміри	159 x 79 x 57 мм	146 x 104 x 43 мм
Вага	180 г	163 г

Таблиця 3.6 – Характеристики вимірювальних приладів для випробувань ТА фазового переходу підсистеми УТС, КТА і НМО

№ п/п	Найменування використовуваного обладнання, одиниця вимірювання	Ціна поділки	Максимальний показ приладу	Клас точності	Похибка вимірювань	
					Фактична	Допустима за ГОСТ 18509-88
1	Термопара, °C	0,5	600°C	1	±1	±1
2	Газовий витратомір G6, м ³ /год	0,001	10	2	±1,5	±2
3	Секундомір, с	0,01	-	1	±1	±1

Тиск на вході в ТА УТС вимірювався водяним п'єзометром, а температура потоку повітря і ТАМ ФП - мультиметром DT 838 з термопарами ХА. Крім цього, температура повітря після витратоміра повітря у повітряному патрубку, вимірювалась за допомогою термопар типу ХК з діапазоном вимірювання $-200...600\text{ }^{\circ}\text{C}$ і реєструвалась комп'ютером через аналогово-цифровий перетворювач, а температуру ТАМ ФП фіксували за допомогою трьох хромель-алюмелевих термопар з діапазоном вимірювання температур $-200...1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.6, в). Вимірювання температури ТАМ ФП проводилось в трьох фіксованих місцях ТА УТС: на вході, середині й виході з ТА. Контроль температури навколишнього повітря здійснювався за показниками лабораторного термометра, а атмосферного тиску - барометром. В табл. 3.6 наведені характеристики вимірювальних приладів щодо випробувань ТА.

Дослідження процесів теплообміну з МО при зарядці й розрядці НМО на спеціальному стенді. До складу стенда увійшли: накопичувач моторної оливи, контактний тепловий акумулятор, яким покритий накопичувач моторної оливи і вимірювальна апаратура [119, 120]. В процесі дослідження в НМО заливалась попередньо нагріта до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ моторна олива, аналогічна кількості моторної оливи з СМ газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2). Охолодження моторної оливи в НМО в умовах оточуючого середовища відбувалось при різних температурах. Час охолодження НМО фіксувався секундоміром. Підігрів НМО проводився за допомогою електронагрівача. Для оцінювання температури моторної оливи і температури теплового акумулятора НМО застосовувались термопар типу ХК з діапазоном вимірювання $-200...600\text{ }^{\circ}\text{C}$ і реєструвались покази комп'ютером через аналогово-цифровий перетворювач, а температуру ТАМ фіксували за допомогою трьох хромель-алюмелевих термопар з діапазоном вимірювання температур $-200...1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вимірювання температури ТАМ проводилось в трьох фіксованих місцях ТА УТС: на верхній стінці і двох бічних стінках НМО. Контроль температури навколишнього повітря здійснювався за

показниками лабораторного термометра, а атмосферного тиску - барометром. В табл. 3.6 наведені характеристики вимірювальних приладів для випробувань НМО.

Дослідження процесів теплообміну при зарядці й розрядці КТА проводилось спочатку в лабораторії, де досліджувались властивості ТАМ ФП для використання в КТА [119, 120], и безпосередньо на моторній установці. КТА уявляє собою чохол з теплоакумуючим матеріалом, що кріпиться зовні ДВЗ і дозволяє утилізувати теплову енергію, що виділяється корпусними елементами ДВЗ в процесі роботи. В процесі моторного дослідження КТА газовий двигун 6Ч 12/14 (К-159 М2) попередньо нагрівався до +85 °С. Охолодження моторної оливи і охолоджуючої рідини двигуна з КТА відбувалось при різних температурах оточуючого середовища. Час охолодження двигуна з КТА фіксувався секундоміром. Для оцінювання температури МО і ОР двигуна і температури теплового акумулятора КТА застосовувались термопари типу ХК з діапазоном вимірювання -200...600 °С і реєструвались покази комп'ютером через аналогово-цифровий перетворювач, а температуру ТАМ ФП фіксували за допомогою трьох хромель-алюмелевих термопар з діапазоном вимірювання температур - 200...1200 °С. Вимірювання температури ТАМ ФП проводилось в трьох фіксованих місцях КТА на нижній стінці картера і двох бічних стінках блока циліндрів двигуна. Контроль температури навколишнього повітря здійснювався за показниками лабораторного термометра, а атмосферного тиску - барометром. В табл. 3.6 наведені характеристики вимірювальних приладів для випробувань КТА.

Основні характеристики системи керування наведена в табл. 3.7. В якості циркуляційних насосів СТП були використані насоси фірми Grundfos моделі Alpha2 (Данія), які дозволяють змінювати подачу МО і ОР за допомогою керуючих команд. Це зроблено з міркувань того, що на різних режимах роботи і температурах ДВЗ необхідно отримувати різну витрату МО і ОР. Для ППД і НМО було використано насос Grundfos моделі Alpha2

типорозміру 25-40, а для УТС - Grundfos моделі Alpha2 типорозміру 32-40 (табл. 3.8). Вибір моделей насосів ґрунтувався на розрахункових величинах витрати робочої рідини через ППД, НМО та УТС [124].

Для керування потоками ОР і МО в різних підсистемах СТП дослідного газового двигуна використовувались електромагнітні клапани (табл. 3.9 [124]). В залежності від задач, що вирішувались а саме змінити напрямок потоку або перекрити його, використовувались двохпозиційні та нормально-закриті клапани. Клапани байпасу штатного насосу та теплообмінника у впускному трубопроводі - це нормально закриті клапани фірми «АРК Энергосервис» (Росія), для байпасу штатного насосу і НМО - моделі 2L25 GBP [131], а для НМО і теплообмінника у впускному трубопроводі - 2L50 GBP. Двохпозиційні клапани використовувались для зміни напрямку потоку через ТА УТС або радіатор СО, через мале коло або велике СО - це клапани фірми «АРК Энергосервис» (Росія) SB364.

Система керування СТП, в залежності від поставленого завдання, виконує наступні функції: зчитує значення датчиків температури МО і ОР; виконує порівняльний аналіз температурних характеристик з метою виявлення стану теплоносіїв; здійснює керування системою прогріву МО і ОР відповідно до отриманої інформації, а саме: вибір режимів прогріву; відключення відповідних елементів СТП у випадку збільшення температур теплоносіїв вище допустимої норми. З метою автоматизації керування тепловими потоками, були розроблені в мікропроцесорному блоці керування СТП елементи керування термopарами і порівнюючими пристроями. Опис системи керування СТП з ТА в автоматичному режимі з накопиченням теплової енергії в період роботи ДГД та віддачею теплової енергії на прогрів його у передпусковий і післяпусковий період представлений в [79, 80].

Таблиці 3.7 – Основні характеристики системи керування СТП [124]

Параметр	Значення
Мікросхема	КР-140 УД8
Напруга живлення (від перетворювача)	24 В
Напруга живлення перетворювача	110 В
Допустимі коливання напруги живлення перетворювача	– 60В ...+30 В
Сила струму живлення (пікова)	10 А
Потужність	200 Вт
Чуттєвість по аналоговим інформаційним входам	10 мВ
Кількість аналогових інформаційних входів	8
Час реєстрування інформаційних сигналів	$1,3 \cdot 10^{-5}$ с
Похибка по реєструванню температури	$\pm 3,7$ при 500 °С
Температурний дрейф нуля	ΔU_t 0,005 на 1К
Тривалість затримки по сигналам керування	2,3 мс
Кількість командних портів	16
Додаткові умови	Екран на інформаційних дротах

Таблиця 3.8 - Характеристики циркуляційних насосів Grundfos, що використані в системі теплової підготовки [124, 130 - 134]

Параметри циркуляційних насосів фірми Grundfos моделі ALPHA 2	Типорозмір насосів фірми Grundfos	
	25-40	32-40
1	2	3
Температура рідини	від +2 °С до +210 °С	
Максимальний тиск в гідросистемі	10 бар	
Клас захисту	IP42	
Монтажна довжина	180 мм	
Трубне приєднання	G1 1/2 "	G2"
Живлення	1 × 230 В -10% / +6%, 50Гц	
Потужність	5-22 Вт	5-45 Вт
Максимальний напір	4,1 м / 40 кПа	6,2 м / 60 кПа
Максимальна витрата	2,4 м ³ /год	3,1 м ³ /год

Таблиця 3.9 – Характеристика клапанів системи теплової підготовки ДГД з тепловими акумуляторами [124]

Параметр	2L25 GBP	2L50 GBP	SB364
Робоче середовище	Гаряча вода, пара, газ		
Матеріали	Корпус: латунь ущільнювач: PTFE		Корпус: латунь ущільнювач: Viton
Робочі температури клапана для ущільнювача	-20...210 °C		-40...120 °C
Робочий тиск	0.03...1.6 МПа		
З'єднання	Різьбове 1"	Різьбове 2"	Різьбове 1"
Котушки	Y42B 30 Вт(DC), IP65		SB257, 28BA, 20Вт
Живлення	DC: 24В		
Швидкість відкриття – закриття	0,5 с		-
Швидкість переключення положень	-		0,7 с

При випробуваннях СТП дослідного газового двигуна в процесі моторних досліджень використовувався широкий спектр вимірювальної апаратури та приладів який ставив за мету фіксацію температурних параметрів роботи ДВЗ, витрати палива і викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами. Датчики, яким вимірювали температуру охолоджуючої рідини ДГД, температури в районі головки блока, циліндра та в районі колінчастого валу були хромель - алюмелеві термопари типу ТХК з діапазоном вимірювання $-200 \dots 600$ °С. Температуру ТАМ ФП також вимірювали за допомогою термопари типу ТХК з діапазоном вимірювання $-200 \dots 600$ °С. Для фіксації значень температури охолоджуючої рідини з термопарами ТХК використовувався - мультиметр DT700C (табл. 3.10) і стаціонарний блок вимірювання температур СТП, двигуна і ВГ.

Витрата газового палива двигуном 6Ч 12/14 при здійсненні пуску і прогріву проводилась газовим лічильником РГ-65, а повітря - РГ-100, Хімолюмінісцентний газоаналізатор 344 ХЛ 01 (заводський номер № 021–86, рис. 3.7, табл. 3.11) використовувався для визначення вмісту у ВГ оксидів азоту NO_x з діапазонами вимірювання – $0 \dots 200$; $0 \dots 500$; $0 \dots 1000$; $0 \dots 2000$; $0 \dots 5000$ $млн^{-1}$.

Таблиця 3.10 – Основні характеристики цифрового мультиметру типу DT700C

Діапазон вимірювання, В	Роздільна спроможність, мВ	Точність, %
0,2	0,1	1,0
2	1	1,2
20	10	1,2
200	100	1,2
500	1000	1,5



Рисунок 3.7 – Газоаналізатор 344ХЛ04

Таблиця 3.11 – Вимірювальні прилади випробувань системи теплової підготовки дослідного газового двигуна

№ п / п	Найменування використовува ного обладнання	Одиниця вимірюва ння	Ціна поділк и	Максима льний показ приладу	Клас точно сті	Похибка вимірювань	
						Факти чна	Допуст има за ГОСТ 18509- 88
1	Термопари	°C	0,5	600°C	1	±1	±1
2	Секундомір	с	0,01	-	1	±1	±1
3	Газовий лічильник РГ- 65 природного газу	м ³	0,01	100	0,5	±1	±2
4	Газовий лічильник РГ- 40 повітря	м ³	0,001	40	0,5	0,001	±0,005G t
5	Газоаналізо р 344 ХЛ 01	млн ⁻¹	1	5000	0,5	0,01	0,01

Час передпускової підготовки, прогріву в режимі х.х. і охолодження газового двигуна фіксувався електронним секундоміром Nokia 7370 №357612005829909. Прилади, обладнання та методи випробування відповідали ГОСТ 14846-81 “Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний” [127].

3.3 Методика формування циклу передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 з використанням СТП на основі ТА

Застосування СТП для двигуна 6Ч 12/14 дає можливість виконувати швидкий передпусковий прогрів ДГД без його запуску і роботи в режимі х.х. від ТА УТС та підсистеми ППД на рівні 40-60 °С, швидкий прогрів до температури, при якій можливе навантаження двигуна, скоротити час прогріву до оптимальної, з точки зору робочого процесу двигуна, температури МО і ОР (на рівні 85 °С) та підтримувати її на заданому рівні, а також забезпечувати теплову підготовку - прогрів двигуна під час зупинки до температури 40-50 °С без роботи ДГД в режимі холостого ходу.

Одним з основних питань організації передпускового і післяпускового прогріву дослідного газового двигуна до температури, що дозволяє здійснювати приймання навантаження після пуску, є вибір режимів роботи СТП [106, 107]. Ці режими мають відповідати експлуатаційним вимогам до дослідного газового двигуна у складі енергетичної установки. Зважаючи на те, що питання прискореного пуску двигуна для виконання встановленої роботи має першочергове значення в організації їх застосування, доцільно в якості основних режимів теплової підготовки газового двигуна, оснащеного СТП, для дослідження використовувати розроблений цикл теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву (рис. 3.8).

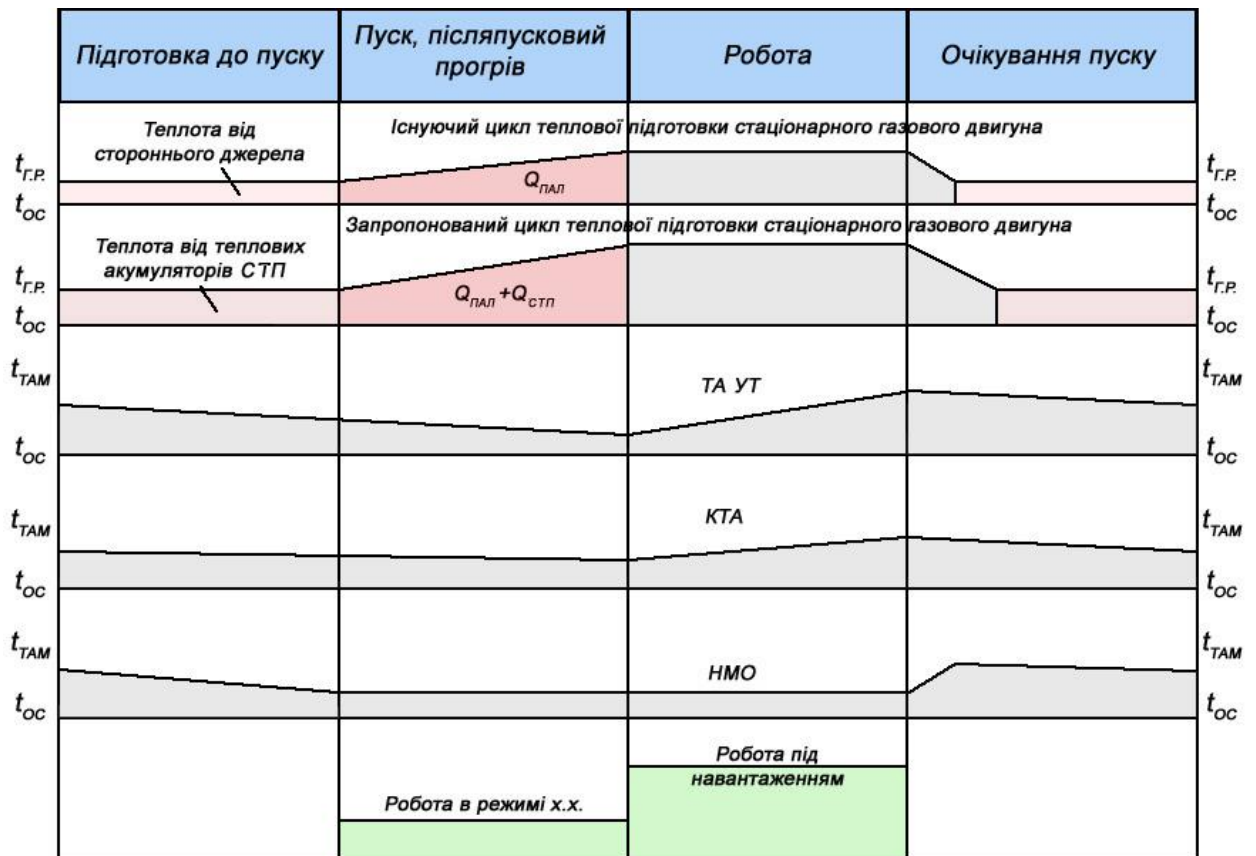


Рисунок 3.8 – Розроблений цикл передпускового і післяпускового прогріву дослідного газового двигуна, оснащеного СТП

Особливостями розробленого циклу роботи СТП (рис. 3.8) є те, що в точці 1 температура оточуючого середовища T_{oc} , а відповідно, ОР і МО, можуть змінюватися у широкому діапазоні, температура ТАМ теплового акумулятора УТС відповідно до алгоритмів роботи СТП та допущень теоретичних досліджень має бути постійною - 150 °С, що відповідає властивостям теплоакumuлюючого матеріалу ФП.

Після запуску СТП в інтервалі точок 1-2 відбувається передпусковий прогрів ДГД. Тривалість цього етапу залежить від T_{oc} і конструкції СО двигуна. Точка 2 цього циклу відповідає встановленим температурам МО і ОР «гарячого» пуску газового ДВЗ, та може змінюватись в залежності від рекомендацій виробника двигуна або технологічних вимог (для двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) $T_{ОР} \approx T_{МО} \approx 50$ °С). При прогріві ДГД від T_{oc} до

досягнення температури $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ необхідно витратити різну кількість накопиченої в ТА теплової енергії, тому температура $T_{\text{ТАМ}}$ в точці 2 може значно відрізнятись від початкової. Швидкість циркуляції МО і ОР в інтервалі точок 1-2, виходячи з конструктивних можливостей СТП, повинна бути максимальною і складати $0,22\text{ м/с}$, але може варіюватись в залежності від конструктивних особливостей СМ і СО двигуна і особливостей прогріву.

Після досягнення в СМ і СО температури «гарячого» пуску відбувається запуск двигуна (точка 2). В інтервалі 2-3 відбувається спільний прогрів двигуна від ТА УТС та теплової енергії згорання палива працюючого двигуна. Початкова температура МО і ОР в цьому інтервалі відповідає температурі в точці 2, а в кінці інтервалу – в точці 3, вона повинна відповідати значенню температури МО і ОР, яку рекомендує виробник двигуна в якості значення робочої температури МО і ОР. В цьому інтервалі триває подальше зниження температури ТАМ ФП, пропорційно початковій температурі $T_{\text{ос}}$. Тривалість цього інтервалу приблизно однакова для різних температур $T_{\text{ос}}$. Швидкість циркуляції МО і ОР на цьому етапі зменшується до $0,16\text{ м/с}$. В точці 3 циклу температура МО і ОР повинна становити відповідно $\approx 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $\approx 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рекомендовану виробником для 6Ч 12/14 (К-159 М2)). Після досягнення вказаної температури відключається додатковий електричний насос ППД для СМ і СО та двигун працює від штатних насосів.

В інтервалі 3-4 відбувається підтримання температури охолоджуючої рідини в межах $85\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а оливи – $80\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за допомогою зміни швидкості циркуляції МО і ОР, та протікає процес зарядки теплового акумулятора УТС. Тривалість цього етапу залежить від того, наскільки багато було використано теплової енергії ТА на прогрів двигуна. Точка 4 вибирається в залежності від досягнення значення температури ТАМ ФП в ТА, що дорівнює $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4 Алгоритм роботи СТП газового двигуна при виконанні передпускового і післяпускового прогріву та зберігання теплової енергії

Для забезпечення роботи газового двигуна за циклом прогріву було розроблено принципову схему забезпечення процесу передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна за допомогою СТП при взаємодії основних складових елементів (рис. 3.9) та алгоритми роботи СТП: для прогріву МО і ОР (рис. 3.10) і для зберігання теплової енергії МО і ОР дослідного газового двигуна (рис. 3.11). Конструктивною особливістю СТП є наявність елементів і підсистем у складі ТА, що спроможні здійснювати теплову підготовку одночасно в частині МО і ОР (рис. 3.8). Так, елементи СТП поряд з функцією передпускового і післяпускового прогріву (теплові акумулятори фазового переходу) виконують функцію примусового прокачування МО і ОР (ППД). Крім цього, СТП передбачає в своїй конструкції підсистему зберігання теплової енергії газового двигуна під час зупинки (ТА+ППД, КТА і НМО або КТА + НМО).

Розроблений алгоритм роботи СТП для прогріву дослідного газового двигуна, в процесі здійснення теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву (рис. 3.10), включає в себе декілька складових частин, що здійснюють одночасну дію на МО і ОР. Для цього використовуються основні підсистеми СТП, а саме УТС і ППД.

У блоці 1 (рис. 3.10) проводиться зчитування сигналів термодатчиків МО і ОР, що розташовані на вході і виході з ДГД; на виході з теплообмінника, на виході з ТА фазового переходу, в СМ і СО газового двигуна та датчиків температури ТАМ ФП в ТА. У блоці 2 проводиться нормування сигналу з указаних датчиків і перетворення їх аналогових сигналів у цифрове представлення для роботи електронних блоків СТП. У блоці 3 відбувається збереження даних в оперативному запам'ятовуючому пристрої (ОЗП). У блоці 4 проводиться аналіз накопичених в ОЗП значень для роботи електронних блоків СТП.

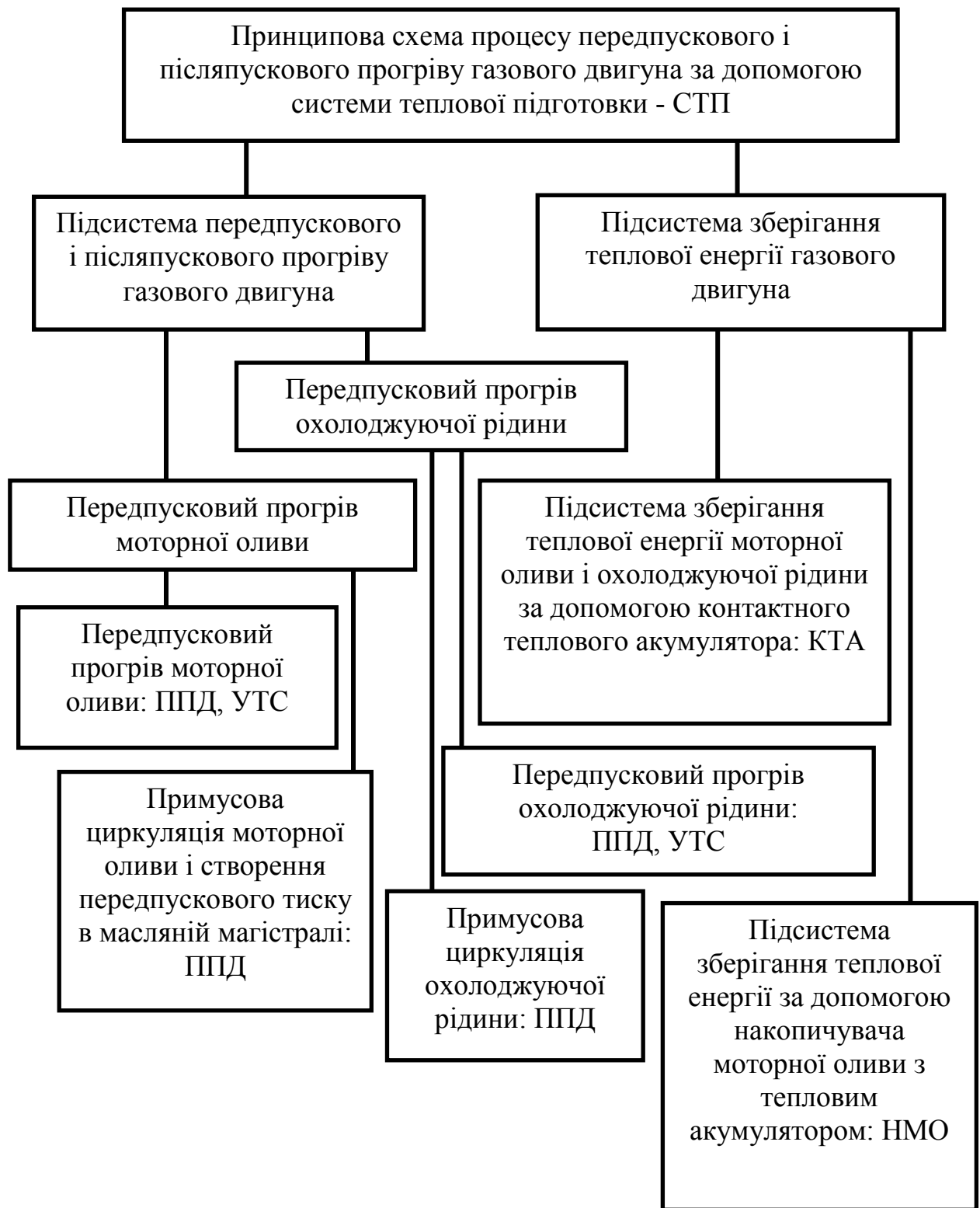


Рисунок 3.9 – Принципова схема забезпечення процесу передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна за допомогою СТП при забезпеченні взаємодії основних складових елементів

У блоці 5 перевіряється основна умова роботи СТП: «Робота ДГД – Зупинка ДГД». Якщо виконується вхідна вимога (умова) «Робота ДГД», тобто газовий двигун 6Ч 12/14 (К-159 М2) працює, то КСПП, діючи за розробленим алгоритмом переходить до блоків 6 і 7 для перевірки робочої температури ОР і МО двигуна.

Якщо виконується вхідна вимога (умова) або команда «Зупинка ДГД», тобто газовий двигун 6Ч 12/14 (К-159 М2) потрібно зупинити, то СТП, діючи за алгоритмом, переходить до блоків 12, 13 і 14 для проведення перевірки температури ТАМ ФП в ТА фазового переходу на можливість зупинення газового двигуна. У блоках 12 і 13 проводиться перевірка температури ТАМ ФП в ТА фазового переходу для МО і ОР газового двигуна, яка була накопичена в ТА на період часу його роботи перед зупинкою. Якщо температура ТАМ ФП в ТА фазового переходу $t_{ТАММО} \geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{ТАМОР} \geq 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тобто в ТА досягнута достатня температура ТАМ ФП, за якої можливий повторний запуск ДГД у відповідності до алгоритму роботи СТП), то газовий двигун може бути зупинений. Якщо температура ТАМ ФП в ТА менше значення $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в блоці 14 відбувається затримка зупинки двигуна і здійснюється примусова робота газового двигуна в режимі холостого ходу (рис. 3.10) до того моменту, поки умови в блоках 12 і 13 не будуть виконані. Як тільки умови в блоках 12 і 13 виконуються, то газовий двигун може бути зупинений.

В блоці 6 (рис. 3.10) проводиться перевірка робочої температури ОР двигуна: $t_{op} = 40 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Якщо умова виконується, то робота СТП

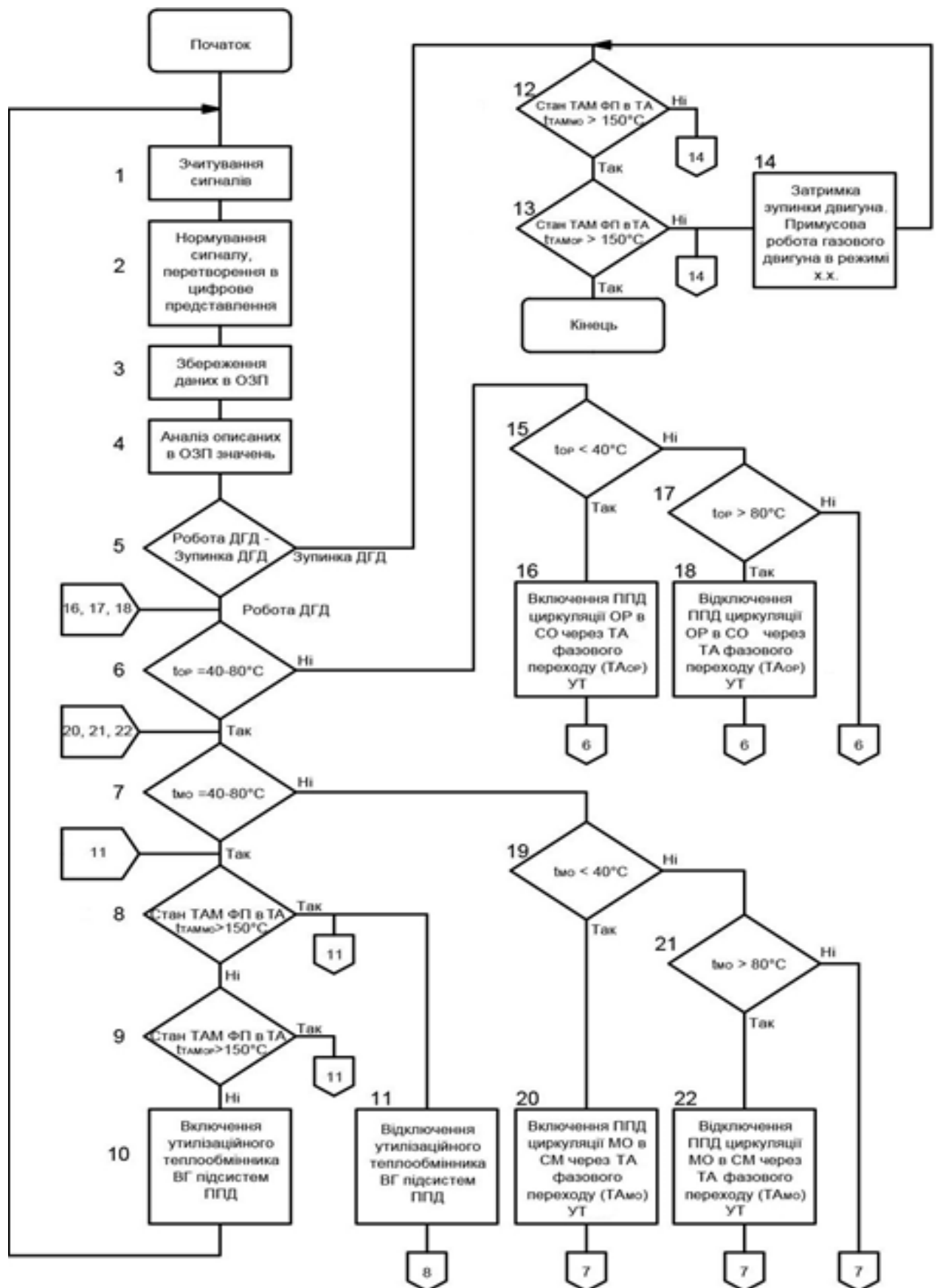


Рисунок 3.10 – Алгоритм роботи СТП для прогріву МО і ОР дослідного газового двигуна, в процесі теплової підготовки в частині здійснення передпускового і післяпускового прогріву

перевіряється в блоці 7, де проводиться перевірка робочої температури МО газового двигуна: $t_{mo} = 40 - 80$ °С, а після цього, якщо умова виконується, то робота СТП контролюється блоками 8 і 9, де проводиться перевірка температури ТАМ ФП в ТА фазового переходу для МО і ОР газового двигуна, що накопичена в ТА після здійснення передпускового і післяпускового прогріву двигуна. Якщо умова для підтримання температури ТАМ ФП в ТА фазового переходу $t_{ТАМмо} \geq 150$ °С і $t_{ТАМор} \geq 150$ °С не виконується, то в блоці 10 здійснюється включення утилізаційного теплообмінника ВГ підсистеми ППД для подальшого заряджання ТА від теплової енергії ВГ.

Якщо в блоці 6 (рис. 3.10) температура ОР двигуна менше або більше значень $t_{op} = 40 - 80$ °С, то, спочатку, в СТП проводиться перевірка в блоці 15, де перевіряється нижня межа робочої температури ОР двигуна. Якщо умова $t_{op} < 40$ °С виконується, то в блоці 16 подається команда на клапани ППД, які включають циркуляцію теплоносія (ОР) через ТА фазового переходу (АТ_{ор}) УТС, за допомогою якого температура ОР в СО газового двигуна підвищується до встановлених раніше меж, тобто $t_{op} = 40 - 80$ °С. Подальша перевірка після переходу проводиться в блоці 6. Якщо умова $t_{op} < 40$ °С в блоці 15 не виконується, то в блоці 17 проводиться перевірка $t_{op} > 80$ °С і, якщо там умова не виконується, то автоматика КСПП дає команду на перехід до блоку 6, де проводиться перевірка $t_{op} = 40 - 80$ °С і робота СТП продовжується далі за розробленим алгоритмом. Якщо умова в блоці 17 $t_{op} > 80$ °С виконується, то в блоці 18 подається команда на клапани ППД, які відключають циркуляцію теплоносія (ОР) через ТА фазового переходу (АТ_{ор}) СУТС. Подальша робота СТП проводиться в блоці 6.

Для виконання контролю температури МО в СМ двигуна в блоці 7 (рис. 3.10) перевіряється умова $t_{mo} = 40 - 80$ °С. Якщо умова виконується, то, як було описано вище, в блоках 8 і 9 проводиться перевірка температури ТАМ ФП в ТА фазового переходу для МО і ОР двигуна $t_{ТАМмо} \geq 150$ °С і

$t_{TAMop} \geq 150$ °С. Якщо температура МО двигуна менше або більше значень $t_{mo} = 40 - 80$ °С, то спочатку для СТП проводиться наступна перевірка в блоці 19, де перевіряється нижня межа температури МО газового двигуна. Якщо умова $t_{mo} < 40$ °С виконується, то в блоці 20 подається команда включення ППД на циркуляцію МО через ТА фазового переходу (АТ_{мо}) УТС, внаслідок чого температура МО двигуна підвищується до встановлених раніше меж, тобто $t_{mo} = 40 - 80$ °С. Подальша перевірка після переходу проводиться в блоці 7. Якщо умова в блоці 19 щодо температури МО $t_{mo} < 40$ °С не виконується, то в блоці 21 проводиться наступна перевірка $t_{mo} > 80$ °С. Якщо ця умова не виконується, то автоматика СТП дає команду на перехід до блоку 7, де робота СТП продовжується далі за розробленим алгоритмом. А якщо умова $t_{op} > 80$ °С виконується, то в блоці 22 подається команда на відключення ППД циркуляції МО через ТА фазового переходу (АТ_{мо}) УТС. Подальша робота СТП проводиться в блоці 7.

Після того, як температури МО і ОР газового двигуна та ТАМ ФП в ТА досягають встановлених алгоритмом меж, то подальша робота СТП продовжується в блоці 1.

Подальше зберігання температурних показників ДГД з СТП здійснюється за допомогою: або ППД + УТС (прокачування нагрітих МО і ОР при зупиненому двигуні (алгоритм не наводиться)), або контактного теплового акумулятора (КТА), або накопичувача моторної оливи з тепловим акумулятором (НМО), або при спільному виконанні функцій останніх двох підсистем. Це здійснюється в залежності від поставленої мети і часу зберігання МО і ОР. Розроблений алгоритм (укрупнений алгоритм наведений на рис. 3.11) роботи СТП для зберігання теплової енергії МО і ОР газового двигуна (для використання КТА, НМО і КТА + НМО) включає в себе декілька складових частин, що здійснюють одночасну або роздільну дію на МО і ОР.

Робота блоків 1-4 на рис. 3.11 аналогічна роботі описаних вище аналогічних блоків на рис. 3.10.

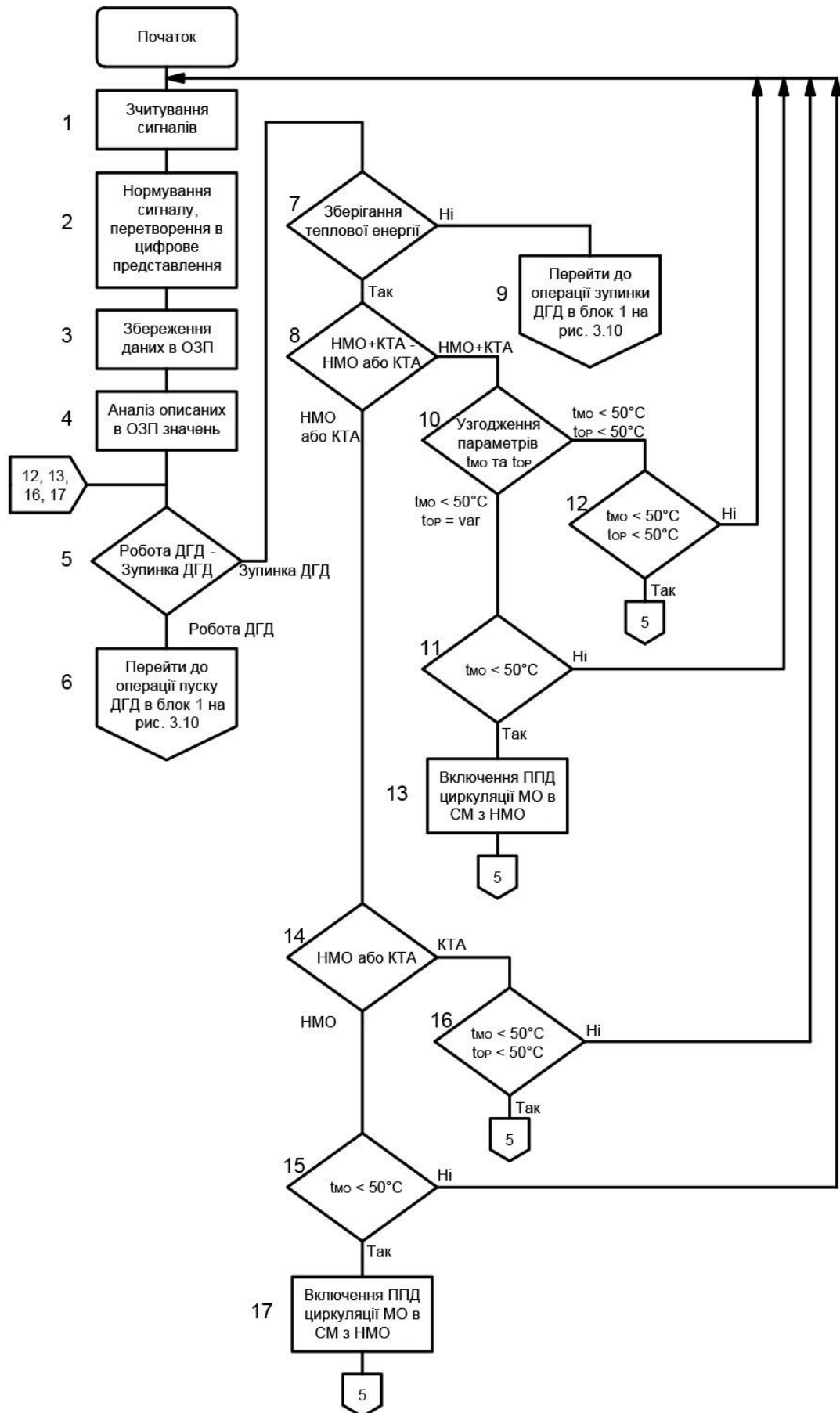


Рисунок 3.11 – Алгоритм роботи СТП для зберігання теплової енергії
МО і ОР дослідного газового двигуна

КТА газового двигуна (рис. 3.11) при роботі ДГД накопичує виділену від корпусних елементів блоку циліндрів, картеру і піддону газового двигуна теплоту на рівні вище теплоти «гарячого прогріву» ДГД. Завдяки використанню КТА у ДГД досягається мінімальна втрата теплоти з СМ і СО двигуна через корпусні деталі конвекцією, що виділяються двигуном протягом часу його роботи, оскільки КТА виконує теплоізолюючу функцію. В період зупинки і зберігання непрацюючого ДГД робочий процес КТА газового двигуна у складі СТП полягає в зворотньому віддаванні накопиченої теплоти речовиною ТАМ ФП для здійснення довготривалої підтримки температури МО і ОР газового двигуна.

При довготривалій зупинці двигуна, коли потрібно МО підтримати в межах «гарячого прогріву» на протязі тривалого часу, використовуємо термоізовану ємність НМО, в який моторна олива зливається через систему трубопроводів. За допомогою датчиків температури МО і ОР двигуна відбувається контроль роботоздатності СТП щодо теплових можливостей термоізованої ємності НМО і подальшого використання самої системи. Після проведених початкових перевірок в блоках 5 і 7 (рис. 3.11) при зберіганні накопиченої теплоти в блоці 8 проводиться наступна перевірка в частині використання: окремо НМО або КТА, або спільно НМО + КТА. Для спільного використання НМО + КТА в блоці 10 проводиться узгодження температур t_{op} і t_{mo} . Якщо ставиться одночасна вимога при зберіганні теплоти $t_{op} < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{mo} < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в блоці 12 здійснюється відповідна перевірка. Якщо вимога в блоці 12 не виконується (тобто одна з температур не відповідає встановленим вимогам), то здійснюється перехід в блок 1 СТП, а якщо виконується в повному обсязі, то виконується перехід в блок 5 (рис. 3.11). Якщо вимога в блоці 10 $t_{mo} < 50^{\circ}\text{C}$ і $t_{op} \approx var$ (тобто вимоги для t_{op} в часі не регламентуються), то в блоці 11 проводиться відповідна перевірка $t_{mo} < 50^{\circ}\text{C}$. Якщо вимога в блоці 11 не виконується, то здійснюється перехід в блок 1, а якщо виконується - то

включається ППД циркуляція МО двигуна з НМО та виконується перехід до блоку 5.

При використанні під час зберігання теплоти газового двигуна окремо підсистеми НМО або КТА, вибір підсистеми для зберігання теплоти проводиться в блоці 14. При використанні КТА в процесі одночасного зберігання теплоти МО і ОР в блоці 16 проводиться перевірка $t_{op} < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $t_{mo} < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Якщо вимога не виконується, то здійснюється перехід в блок 1, а якщо виконується (тобто обидві температури відповідають встановленим вимогам), то виконується перехід в блок 5. При використанні НМО в процесі зберігання теплоти МО в НМО в блоці 15 проводиться перевірка $t_{mo} < 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Якщо вимога не виконується, то здійснюється перехід в блок 1, а якщо виконується, то включається ППД циркуляція МО двигуна з НМО та виконується перехід до блоку 5.

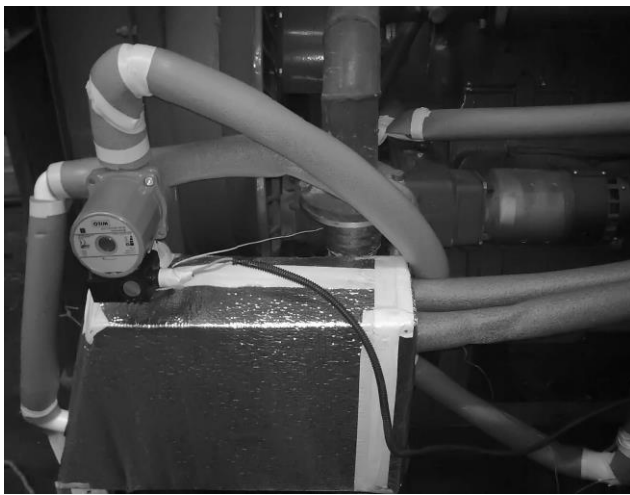
При зниженні температури МО і ОР ДГД нижче встановлених граничних умов в блоці 5 (рис. 3.11) дається команда на перехід до операцій пуску двигуна, а саме, з блоку 6 на рис. 3.11 у блок 1 рис. 3.10.

3.5 Методики проведення експериментальних досліджень

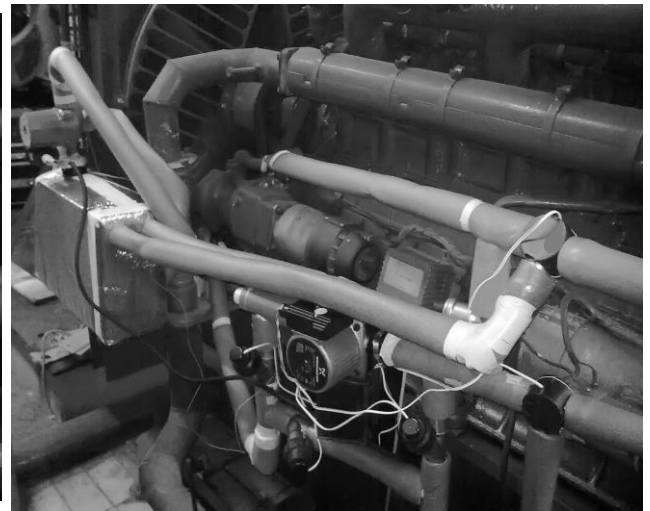
У зв'язку з різноманітним характером експериментальних досліджень, кожне з них проводилось за індивідуальними методиками (рис. 3.12, 3.13).

При дослідженні теплового акумулятора фазового переходу УТС системи теплової підготовки з використанням акумульованої енергії оцінювались: вплив температури теплоносія на період зарядки ТА, залежність часу розрядки ТА від швидкості теплоносія, час зберігання теплоти в ТА в залежності від температури.

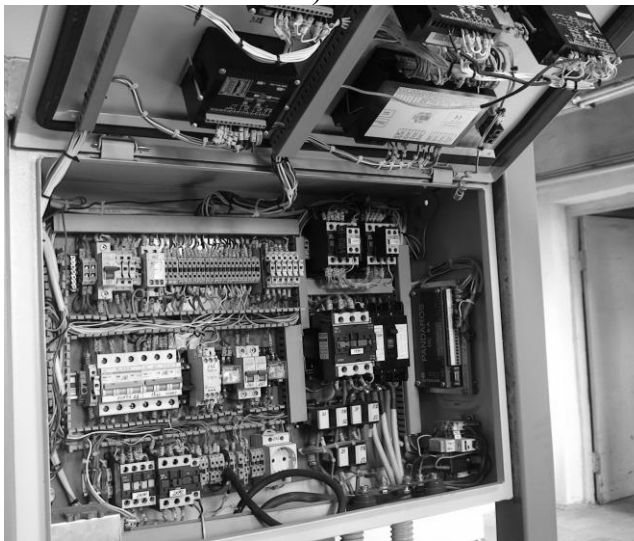
При виконанні досліджень, на першому етапі дослідження, ставились мета оцінити можливість здійснення теплової підготовки газового двигуна тільки за допомогою моторної оливи при використанні можливостей СТП. Після цього, для урахування особливостей робочого процесу саме газового



а)



б)



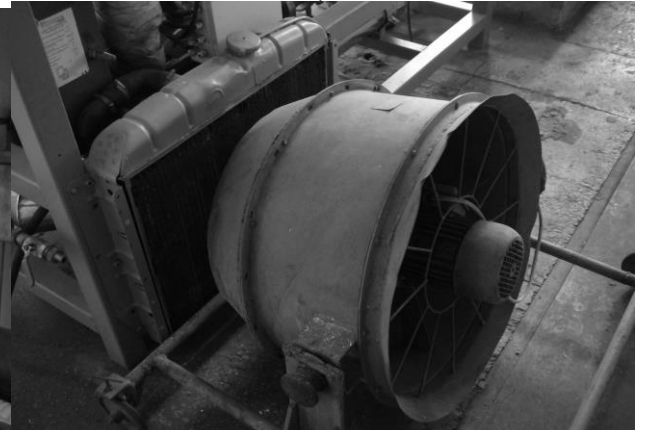
в)



г)



д)

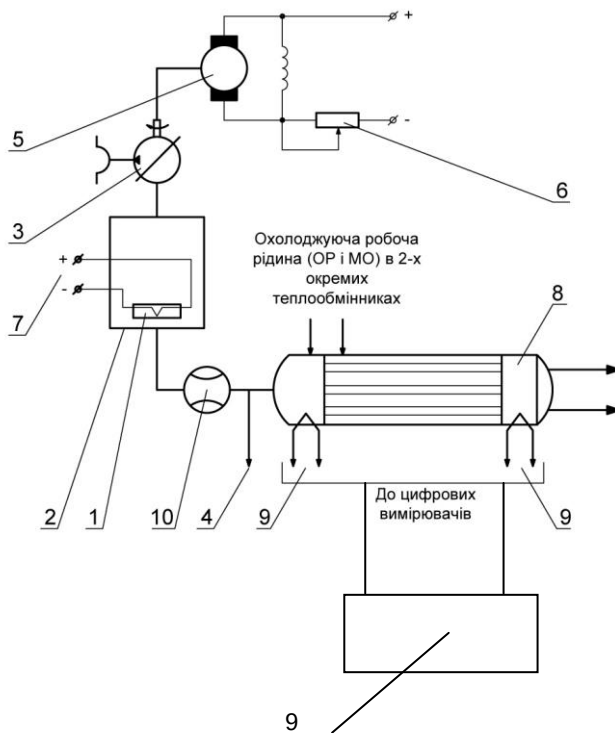


е)

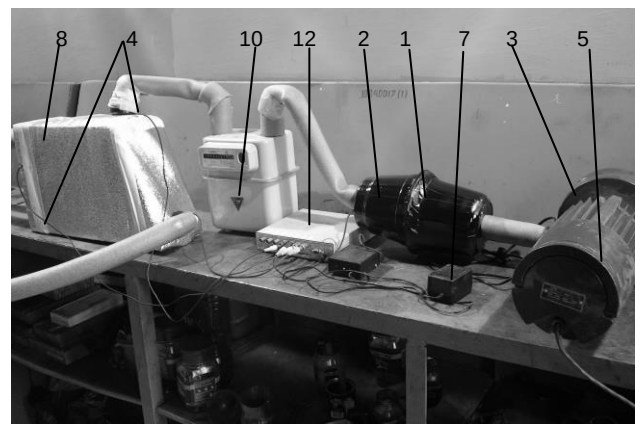
Рисунок 3.12 – Експериментальні установки для дослідження СТП ДГД і її складових: моторна установка для випробувань СТП газового двигуна 6Ч 12/14 на другому етапі дослідження (а, б [24, 38, 109]); шафа керування дослідним газовим двигуном з встановленим в ній обладнанням (в, г); система випуску двигуна з виходами газоаналізуючої і термометруючої апаратури (д); вентиляційна установка дослідницького стенда



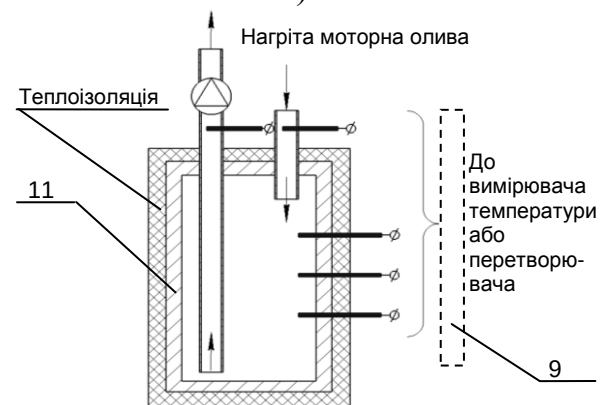
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.13 – Експериментальні установки для дослідження СТП ДГД і її складових: система підготовки газового палива з клапанами, манометром і лічильником газового палива (а); схеми та загальні вигляди установок при дослідженні: теплового акумулятора УТС (б і в [22 - 24, 38, 109]) і НМО (г): 1 – тепловий генератор; 2 – нагрівальний елемент; 3 – повітряний нагнітач; 4 – термopapa; 5 – двигун постійного струму; 6 – змінний опір; 7 – система регулювання нагрівальним елементом; 8 – тепловий акумулятор фазового переходу; 9 – аналогово-цифровий і цифро-аналоговий перетворювач сигналів; 10 – лічильник газового палива; 11 – накопичувач моторної оливи з тепловим акумулятором

двигуна при його роботі з СТП, на другому етапі, проводились дослідження прогріву ОР в СО (рис. 3.12, *a*). На цьому етапі дослідження найбільш доцільно було відслідкувати можливість забезпечення теплової підготовки в частині післяпускового прогріву газового двигуна при спільній роботі СТП і самого двигуна в режимі х.х. На третьому етапі проводились дослідження СТП в частині спільного використання її складових для забезпечення теплової підготовки МО і ОР за варіантами використання.

В умовах дослідницької лабораторії ІГ НАНУ і ДонІЗТ (в межах відповідного договору з ІГ НАНУ) було проведено випробування ТА фазового переходу УТС при здійсненні прогріву МО і ОР газового двигуна в режимі зарядки і розрядки з метою визначення часу зарядки і розрядки ТА при різних температурах теплоносія (робочої рідини) в утилізаційному теплообміннику (рис. 3.12, 3.13).

В основу безмоторних досліджень ТА фазового переходу УТС були покладені температурні режими ВГ та систем охолодження і мащення реального двигуна, з урахуванням розподілу інтервалів температур прогріву газового двигуна в умовах експлуатації. В процесі безмоторних досліджень ТА фазового переходу УТС на удосконаленій стаціонарній установці відтворювались режими прогріву двигуна за температурою вхідних і вихідних параметрів ТА при здійсненні передпускового і післяпускового прогріву за аналогією з параметрами ТА фазового переходу УТС в частині середовищ МО і ОР газового ДВЗ. Випробування полягали в тому, що здійснювалась зарядка удосконаленого ТА при виконанні прогріву МО і ОР до значень температури фазового переходу ТАМ ФП в ТА – тобто до $+135\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зарядка ТА фазового переходу УТС виконувалась по вісім разів з різними 7 температурами теплоносія, який заряджав його до відповідної температури ТАМ ФП, встановленої програмою випробувань, при здійсненні подачі теплоносія в два теплообмінника ТА, а саме ОР і МО (рис. 3.13 *б* і *в*). Після кожної зарядки ТА здійснювалась розрядка його до температури

ТАМ ФП $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ із різною швидкістю циркуляції теплоносія, після чого здійснювалась нова зарядка, але вже з іншою температурою теплоносія.

В процесі досліджень відбувалась зміна часу зарядки та розрядки ТА фазового переходу 8 (рис. 3.13 б і в). Зміна температури теплоносія (в якості якого використовувалось повітря) відбувалась за рахунок регулювання нагріву елементом 2 теплогенератора 1, а зміна швидкості потоку здійснювалась шляхом регулювання опору 6 двигуна постійного струму 5 нагнітача 3. За допомогою системи керування елементом нагріву теплогенератора встановлювалась фіксована температура теплоносія, після чого теплоносій примусово, за допомогою нагнітача 3 подавався до ТА фазового переходу 8. Випробовування проводились для 7 температур (з повторюваністю вісім разів), які охоплюють з рівним інтервалом експлуатаційні режими зарядки ТА фазового переходу УТС, при здійсненні подачі теплоносія в два теплообмінники, а саме ОР і МО. Відлік часу здійснювався з початку зарядки ТА фазового переходу УТС, тобто від температури ТАМ ФП в ТА $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ з інтервалом $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до заданої температури ТАМ ФП в дослідженні АТ - $+135\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналогічно проводили дослідження процесу розрядки ТА фазового переходу УТС для 8 швидкостей, які охоплюють основні режими роботи циркуляційного насосу ППД для СО і СМ газового двигуна. Після зарядки ТА фазового переходу для здійснення відбору теплової енергії підключався нагнітач 3 і фіксувалась швидкість з якою він подає теплоносій (повітря) та виконувалась фіксація часу розрядки кожні $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ падіння температури ТАМ ФП в ТА. Термін роботи для кожної швидкості на встановленому режимі становив три хвилини, перехід з одного режиму на інший здійснювали на протязі 30 с з витримкою в часі не менше 1,5-3 хвилин для забезпечення сталості теплового потоку повітря.

Властивості теплоакumuлюючих речовин контактного теплового акумулятора (КТА) і накопичувача моторної оливи з тепловим акумулятором (НМО) були обрані таким чином, щоб в обраному і технологічно

обґрунтованому діапазоні температур вони мали можливість забезпечити стабільні фазові переходи та були хімічно стійкими. Для дослідження їх теплоенергетичних характеристик була виготовлена фізична модель теплового акумулятору, виготовлені та повірені термопари, підібрано нагрівальне і вимірювальне обладнання, здійснене їх опробування. Фізична модель представляє із себе герметичну капсулу трубчастого типу, куди поміщали теплоакумуючу речовину, температуру якої вимірювали термопарою, яка поміщається в оболонку, що має безпосередній тепловий контакт з теплоакумуючою речовиною [124].

Дослідження КТА проводилось безпосередньо на дослідному газовому двигуні 6Ч 12/14. Для цього газовий двигун прогрівався до робочої температури $t_p = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ і працював ще деякий час таким чином, щоб оболонка КТА прогрівалась до робочої температури двигуна. Початок вимірювань часу підтримання температури в ДГД починався з того моменту, коли КТА був повністю заряджений ($\tau = 0$), а ТАМ ФП теплового акумулятора був розігрітий до $t_o = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ та знаходився в рідкому стані в оболонці КТА. В подальшому контактний ТА віддавав накопичену ТАМ ФП теплову енергію корпусним елементам ДГД, а саме блоку циліндрів, теплоносіям і картеру газового двигуна та оточуючому середовищу при температурі $t_{oc} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. На протязі інтервалу часу температура ТАМ ФП знижувалась за рахунок фізичного охолодження до значень температури фазового переходу $t_{fn} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і далі на протязі деякого часу характер залежності охолодження ТАМ ФП змінювався при здійсненні процесу кристалізації в квазіізотермічному режимі. Коливання температури ТАМ ФП в цей період відбувались в допустимих межах відносно температури $t_{fn} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19, 103]. Вимірювання часу зберігання теплоти проводилось секундоміром через кожні $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ від температури $t_o = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ до температури ТАМ ФП в КТА $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Заряджання КТА (нагрівання і розплавлення ТАМ) реєструвалось аналогічно процесу розряджання через кожні $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ від температури $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до робочої температури газового двигуна з КТА $- t_p = t_o = +85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Реєстрація параметрів процесу заряджання НМО від температури МО і зберігання теплової енергії МО проводилось за наступною методикою. Попередньо прогріта до температури $t_o = +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ МО заливалась в розміщену в лабораторії ІГ НАНУ теплоізольовану ємність НМО при заданій температурі оточуючого середовища (рис. 3.13 з). В початковий момент часу ($\tau = 0$), коли НМО починає заряджатися, ТАМ ФП теплового акумулятора знаходиться в твердому стані і починає нагріватися від МО ($t_o = +85\text{ }^{\circ}\text{C}$), температура якої вище температури фазового переходу ТАМ ФП у НМО $t_o = +50\text{ }^{\circ}\text{C}$. В подальшому, після нагріву, ТАМ ФП знаходилось в рідкому стані. Нагрів ТАМ ФП за рахунок теплової енергії МО в НМО фіксувався секундоміром. Після цього НМО утримувало і віддавало накопичену ТАМ ФП теплову енергію МО і оточуючому середовищу (при температурі $t_{oc} = -20 \dots +20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Вимірювання часу зберігання теплоти МО проводилось секундоміром через кожні $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ від температури МО $t_o = +85\text{ }^{\circ}\text{C}$ до заданої температури оточуючого середовища.

Дослідження підсистеми ППД для визначення швидкості прогріву ОР і МО газового двигуна проводилось на моторній установці в лабораторії ІГ НАНУ. При виконанні досліджень змінювалась швидкість обертання крильчатки додаткових електричних насосів СО і СМ. Основному дослідженню підлягали температури ОР і МО газового двигуна, які фіксувались датчиками. Зміна швидкості обертання крильчатки електричного насосу відбувалась за допомогою відповідних керуючих команд з блока керування СТП. Дослідження проводились для 8 швидкостей циркуляції потоку ОР і МО двигуна відповідно, які охоплюють з рівним інтервалом продуктивність штатного насосу СО і СМ, від мінімальної до максимальної, як від підсистеми ППД, так і від штатного насосу ДГД. Зміна циркуляції ОР і МО відбувалась за допомогою електромагнітних клапанів байпасу штатних насосів СО і СМ двигуна, які закривалися, а електромагнітні клапани включення штатних насосів СО і СМ дослідного газового двигуна відкривались. Випробування проводились наступним чином: за допомогою

системи керування СТП клапани спрямовували потоки ОР і МО через електричні насоси, швидкість обертання крильчатки яких встановлювалась також блоком керування СТП і відповідала необхідній для проведення досліджень. Після встановлення сталості потоків відбувалось фіксування часу, за який підвищується температура ОР і МО на 5 °С, а сумарний час прогріву двигуна - до 50 °С. Після кожного прогріву двигуна відбувалось його природне охолодження до температури +20 °С, після чого повторювались дослідження, але вже з іншою швидкістю потоку ОР і МО. При цьому виконувались вимірювання годинної витрати палива об'ємним методом, а екологічні показники роботи двигуна вимірювались за допомогою відповідної газоаналізуючої апаратури (розділ 3.1, 3.2).

Визначенні часу прогріву двигуна до 50 °С при роботі штатних насосів СО і СМ газового двигуна проводились в процесі моторних досліджень в лабораторії ІГ НАНУ. За допомогою системи керування електромагнітні клапани СТП закривалися, а клапани керування штатної системи відкривалися та спрямовували потоки ОР в СО і МО в СМ через штатний насос ОР і МО газового двигуна. Аналогічно попереднім випробуванням для ППД щодо ОР і МО після охолодження двигуна до температури +20 °С відбувався його прогрів та фіксування часу, за який підвищується температура ОР і МО на кожні 5 °С, та сумарний час прогріву двигуна до 50 °С. При цьому виконувались вимірювання годинної витрати палива об'ємним методом, а екологічні показники роботи двигуна вимірювались за допомогою відповідної газоаналізуючої апаратури (розділ 3.1, 3.2).

Визначення параметрів УТС на тривалість (час) прогріву газового двигуна проводилось в процесі моторних досліджень в лабораторії ІГ НАНУ. Дослідження проводилось за однією методикою, спочатку для визначення теплових параметрів прогріву і часу прогріву від зміни параметрів ОР, а потім - від ОР і МО. Всі вимірювання проводились від температури оточуючого середовища до температури, що визначалась методикою експериментальних досліджень.

Моторні дослідження з використанням складових СТП і системи в цілому складалися з трьох частин (табл. 3.12):

- в першій частині проводились випробування газового двигуна на терміни прогріву, витрату палива і шкідливі викиди, оснащеного тільки штатними системами, в режимі х.х.;

- в другій частині проводились випробування зупиненого двигуна при здійсненні прогріву з використанням тільки ТА УТС і тільки в частині моторної оливи. Аналогічні дослідження в частині тільки ОР описані в роботі [22, 24];

- в третій частині проводились випробування дослідного газового двигуна в режимі х.х., з використанням обладнання СТП, для забезпечення теплової підготовки в частині ОР і МО (за варіантами), діючи при цьому за програмою, розробленим циклом теплової підготовки (розділ 3.3) і алгоритмами роботи СТП (розділ 3.4).

Особливістю другої частини дослідження є те, що здійснювався прогрів газового двигуна 6Ч 12/14 від температури оточуючого середовища від запасеної в ТА теплової енергії УТС до температури 50 °С і до 85±5 °С двигуна при різній швидкості циркуляції потоку МО без запуску двигуна. Параметр, який змінювався – швидкість циркуляції МО. Параметр, який досліджувався – час прогріву двигуна при зміні циркуляції МО до 50 і 85±5. Газовий двигун запускався при температурі оточуючого середовища. При цьому відбувалось автоматичне регулювання швидкості циркуляції теплоносіїв (ОР (ОР + МО)) та прогрів двигуна від ТА СУТС. Прогрів двигуна виконувався на холостих обертах до температури 85 °С. Після цього відбувалось його природне охолодження до температури охолоджуючої рідини 20 °С. При цьому виконувались аналогічні вимірювання (як і у вище наведених дослідженнях), але з виключеною СТП. Мета цього етапу – порівняння показників: термінових, температурних, паливної економічності та екологічних показників.

Таблиця 3.12 – Особливості експериментальних моторних досліджень газового двигуна 6Ч 12/14, оснащеного СТП

Експериментальні моторні дослідження: температури теплоносіїв / режими / обладнання СТП						
Особливості експериментальних моторних досліджень	Частина	Етапи	тільки ШС		ШС + СТП	
			МО	ОР	МО	ОР
Двигун працював в режимі х.х. Частково, в частині ОР, дослідження описані в роботі [101], досліджувалась тільки зміна параметрів МО	1	1	0-50 °C / х.х. /	-	-	-
Двигун працював в режимі х.х. Урахування особливостей робочого процесу газового двигуна в частинах МО і ОР		2	50-85 °C / х.х. /	50-85 °C / х.х. /	-	-
Двигун зупинений. Частково, в частині ОР, дослідження описані в роботі [101], досліджувалась тільки зміна параметрів МО		3	85→50→0 °C / - /	-	-	-
Двигун зупинений	2	1	-	-	0-50 °C / - / ТА УТС	-
Двигун зупинений		2	-	-	50-85 °C / - / ТА УТС	-
Двигун зупинений		3	-	-	85→50→0 °C	-
Двигун зупинений	3	1	-	-	0-50 °C / - / за віріантами використання СТП	0-50 °C / - / за віріантами використання СТП
Двигун працював в режимі х.х.		2	-	-	50-85 °C / х.х. / за віріантами використання СТП	50-85 °C х.х. / за віріантами використання СТП
Двигун зупинений		3	-	-	85→50→0 °C / - / за віріантами використання СТП	85→50→0 °C / - / за віріантами використання СТП

На всіх етапах досліджень зміна швидкості обертання крильчатки ППД здійснювалась за допомогою відповідних керуючих команд з блока керування СТП. Проводились випробовування для 5 швидкостей, які охоплюють можливий на момент випробувань інтервал температур ОР в СО і МО в СМ.

Дослідження передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) за розробленою програмою прогріву, оснащеного КСПП полягали у тому, що відбувався поетапний (у відповідності з програмою і алгоритмом прогріву) прогрів двигуна (ОР (ОР + МО)) до досягнення температури ОР в СО і МО в СМ 85 °С.

Дослідження передпускового прогріву двигуна виконувалось без його запуску. При цьому теплова енергія, необхідна для підвищення температури ОР і МО та елементів конструкції двигуна, надходила від ТА фазового переходу УТС. Циркуляція ОР через оболонку СО і МО через магістралі СМ та ТА УТС відбувалась за допомогою ППД, а виконавчими елементами були електричні циркуляційні насоси з модульованою подачею. Прогрів двигуна продовжувався до досягнення температури ОР (ОР + МО) фіксованих значень 40, 50 або 60 °С.

Після цього проводився запуск прогрітого ДВЗ та виконувався післяпусковий прогрів ДВЗ до температури ОР і МО +85 °С. На цьому етапі теплова енергія, необхідна для прогріву ОР і МО та елементів конструкції двигуна, надходила вже не тільки від ТА фазового переходу УТС, а й від процесу згорання газового палива і продуктів згорання, коли частина теплової енергії передається елементам конструкції двигуна (стінка циліндра, головка блока циліндрів). Після досягнення температури ОР і МО +85 °С, відбувалась її стабілізація за допомогою складових, що працюють за алгоритмами роботи СТП.

Визначенні часу зарядки ТА фазового переходу УТС після виконання прогріву двигуна відбувалось за допомогою теплової енергії, необхідної для зарядки ТА УТС, що отримувалась від ВГ за допомогою встановленого в

випускному трубопроводі утилізаційного теплообмінника та трубопроводів, які з'єднували теплообмінник з самим ТА фазового переходу. Циркуляцію теплоносія в підсистемі УТС виконував також циркуляційний насос з модульованою подачею.

Дослідження процесу зберігання теплової енергії (зберігання температурних показників ДГД) прогрітого до 85 °С газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) проводилось (без) за допомогою контактного теплового акумулятору (КТА) або (і) накопичувача моторної оливи з тепловим акумулятором (НМО) та відбувалось у відповідності з розробленою методикою. Використання ТА для прогріву корпусних деталей і ОР двигуна 6ЧН 12/14 описано в роботі [22, 24]. В дослідженні проводилось вимірювання температур і часу зміни температур в ДГД, КТА або (і) НМО при охолодженні газового двигуна з КТА або (і) НМО під дією температур оточуючого середовища. Вимірювання проводилось для ОР і МО газового двигуна від температури ОР і МО +85 °С до температури 50 °С в тих же місцях при встановленні КТА або (і) в середині ємності НМО. Вимірювання температур проводилось через кожні 5 °С.

3.6 Результати експериментальних досліджень системи теплової підготовки

В процесі експериментальних досліджень під час здійснення теплової підготовки газового двигуна за допомогою прогрівання МО з'ясувалось, що використання тільки МО (без ОР), як теплоносія, не може повноцінно вирішити проблеми загальної теплової підготовки газового двигуна в умовах експлуатації. Це підтверджується отриманими даними. Згідно з якими, в результаті теплової підготовки за допомогою МО, було отримано прогрів тільки зони колінчастого валу і прилеглих до нього частин корпусних деталей. Підвищений тиск МО без запуску двигуна в режимі х.х. спільно з підвищеними температурами зони колінчастого валу забезпечують

благотворні умови для здійснення пуску газового двигуна в частині зменшення опору на провертання колінчастого валу і забезпечення необхідного передпускового тиску. Конструктивною особливістю двигуна 6Ч 12/14 є наявність винесеної головної масляної магістралі за блок циліндрів. Тому подальші дослідження доцільно проводити тільки в частині спільного використання складових СТП.

Подальші дослідження прогріву саме газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) за допомогою СТП, виходячи з особливостей його конструкції, потрібно проводити в першу чергу для теплоносія, що охоплює більшу частину блоку циліндрів - ОР в СО. Це пояснюється тим, що циліндро-поршнева група двигуна і гільза (втулка) двигуна охолоджується тільки ОР з СО, а МО з СМ не контактує з цими елементами газового двигуна. Тому процес прогріву в дослідженнях будемо розглядати в першу чергу для ОР в СО, а забезпечення благотворних умов для здійснення пуску – в частині МО в СМ.

Результати вимірювання часу зарядки і розрядки ТА фазового переходу від утилізаційного теплообмінника ВГ в залежності від температури теплоносія в підсистемі УТС наведено на рис. 3.14 *а* і *б* [74, 24]. З рис. 3.14 *а* видно, що час зарядки ТА фазового переходу УТС, який працює у складі СТП газового двигуна, до температури 130 °С, на яку відрегульований ТА УТС, складає 1850 сек. або 30,8 хв. для температури теплоносія 170 °С, а при температурі теплоносія 110 °С – 3650 сек. або 60,8 хв. Температура 85 °С, тобто оптимальна температура для СО газового ДВЗ, досягається за 1100 сек. або за 18,3 хв. Для всіх проміжних значень температури теплоносія значення часу зарядки ТА фазового переходу УТС знаходяться у допустимих межах, обмежених вказаними параметрами.

Характер зміни часу розрядки (відбирання теплової енергії) ТА фазового переходу УТС (див. рис. 3.14 *б*) в СО і (або) СМ газового двигуна від швидкості теплоносія, циркулюючого в його контурі, має характер протікання процесу, що аналогічний до рис. 3.14 *а*. Так, зі 130 °С до

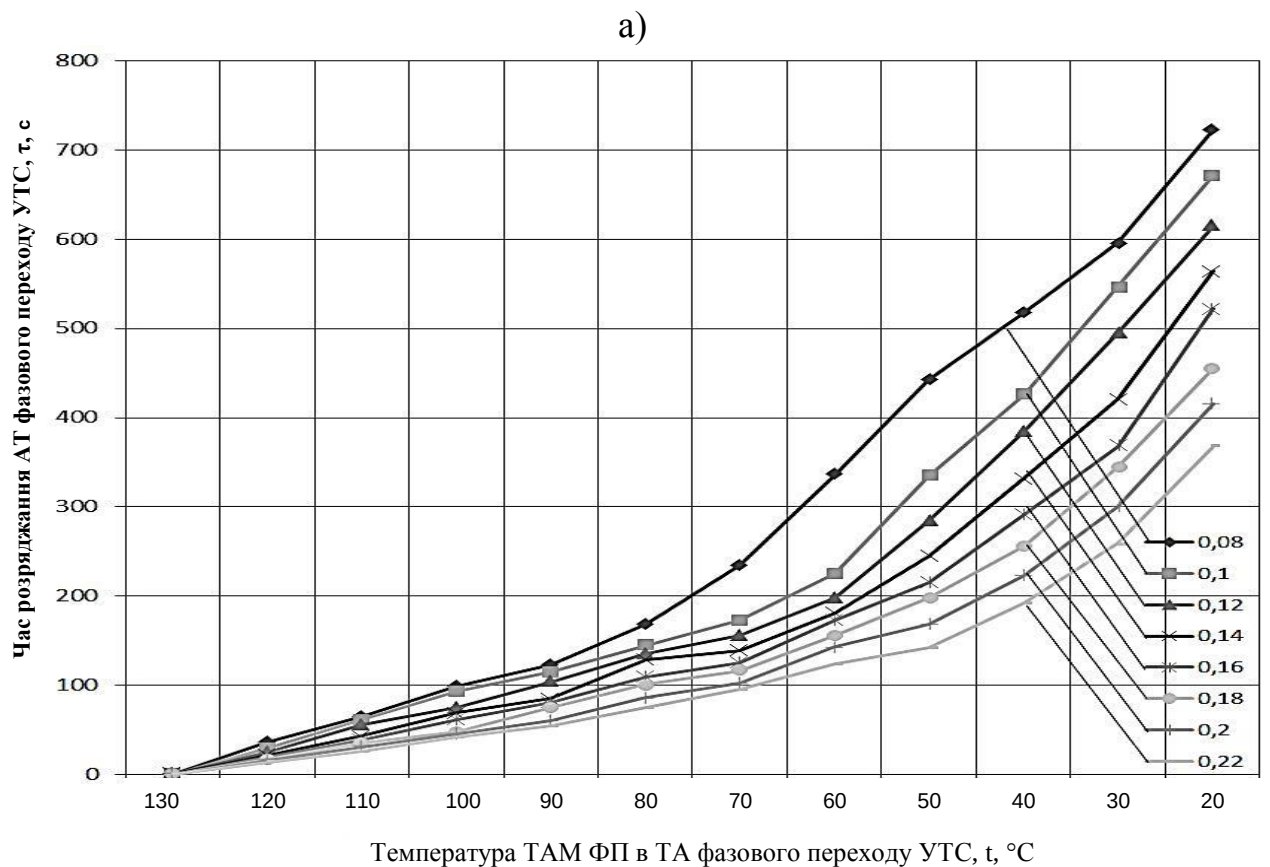
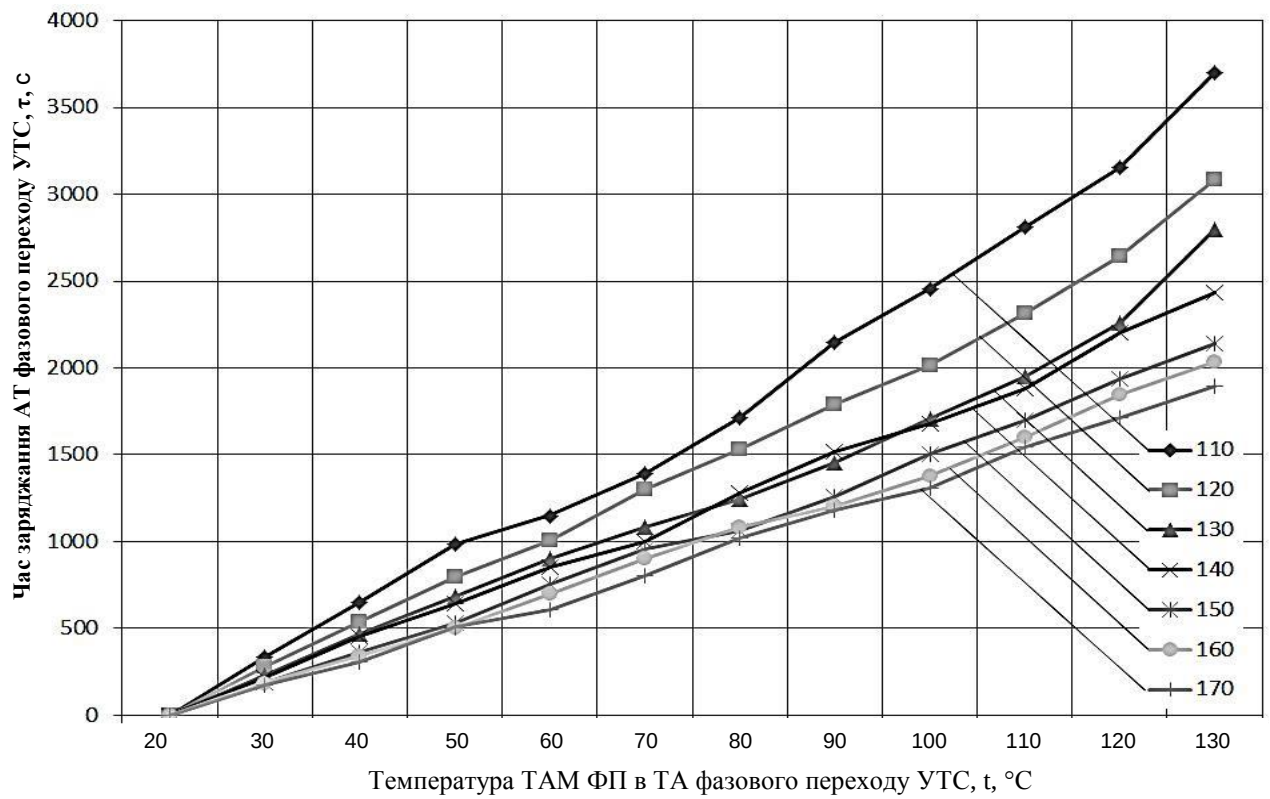


Рисунок 3.14 - Результати вимірювання:

- а) часу заряджання ТА фазового переходу UTC від температури теплоносія
 $(t_{менл} = t_{OP} (t_{MO}) = var, ^\circ C)$;
 б) часу розряджання ТА фазового переходу UTC від швидкості теплоносія
 $OP (MO) (w = var, м/с)$

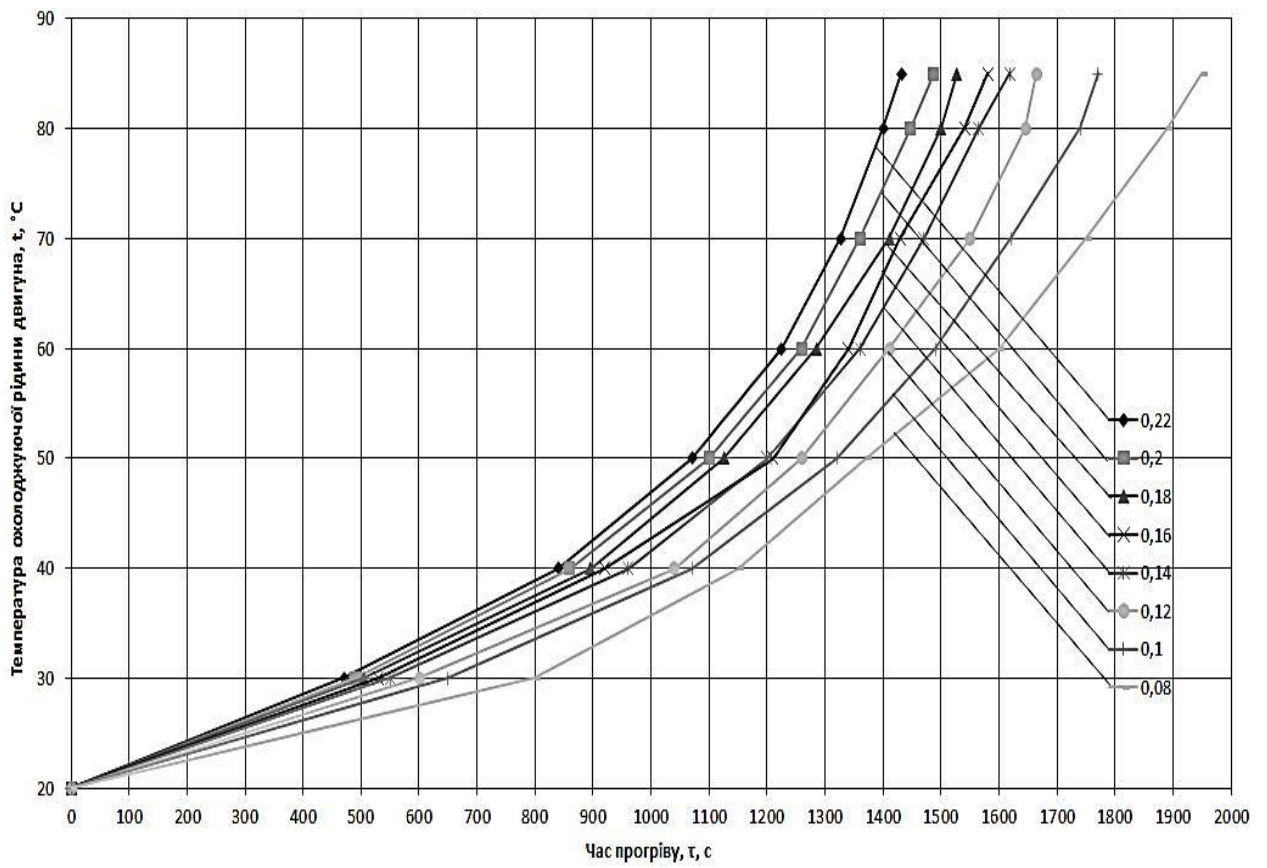
20 °С ТА фазового переходу УТС розряджається за 380 сек. або 6,3 хв. при швидкості теплоносія 0,22 м/сек., а при швидкості теплоносія 0,08 м/сек. - за 720 сек. або 12 хв. відповідно. Діапазон швидкостей теплоносія було вибрано в межах, які в повному обсязі може забезпечувати конструкція розробленої СТП газового двигуна, а також, штатний насос газового двигуна в СО.

Результати вимірювання часу прогріву ОР і МО газового двигуна 6Ч 12/14 з СТП від ППД наведено на рис. 3.15 а і б. Випробування СТП в процесі дослідження тривалості прогріву від ППД проводилось для ОР і для МО газового двигуна.

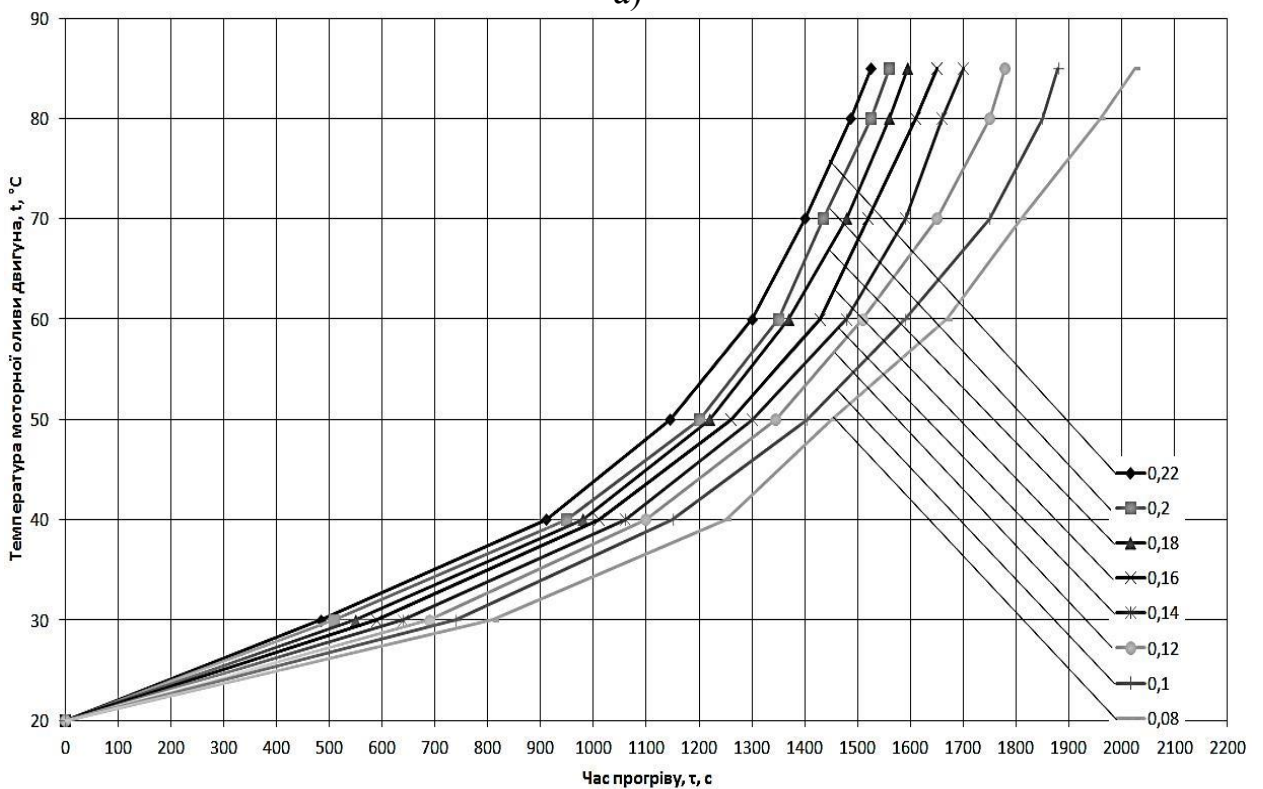
Отримані результати на рис. 3.15 а підтверджують, що при швидкості циркуляції 0,08 м/с, яка близька до швидкості циркуляції штатного насосу ОР газового двигуна в режимі холостого ходу, прогрів ОР до +85 °С відбувається за 1950 с. або за 32,5 хв., а у той же час, при збільшенні швидкості до 0,22 м/с, яка може бути створена циркуляційним насосом з модульованою подачею СТП в режимі холостого ходу і, яка відповідає максимальній швидкості штатного насосу ОР газового двигуна, час проріву до вказаної температури скорочується до 1432 с. або за 23,9 хв. Температура 50 °С, при вказаних вище умовах, досягається газовим двигуном відповідно без СТП за 1370 с. (22,8 хв.) і з СТП за 1070 с. (17,8 хв.).

Для СМ збільшення швидкості циркуляції МО також забезпечує позитивний результат (рис. 3.15 б). Збільшення швидкості циркуляції МО в СМ до 0,22 м/с забезпечує швидкий прогрів газового двигуна до 85 °С за 1525 с. (25,4 хв.) у порівнянні з прогрівом при швидкості циркуляції МО в СМ 0,08 м/с (штатна СМ газового двигуна) 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.).

Підтвердження зниження витрати палива, викидів шкідливих речовин двигуном стаціонарної електростанції з використанням системи прогріву з ТА фазового переходу УТС за рахунок теплової підготовки ОР не проводили тому, що це питання було достатньо детально розглянуто в роботі



а)



б)

Рисунок 3.15 - Результати вимірювання параметрів прогріву дослідного газового двигуна в залежності від швидкості теплоносія (w , м/с):

- а) часу прогріву ОР зі штатним насосом і насосом ППД;
- б) часу прогріву МО зі штатним насосом і насосом ППД

[22, 24] при використанні аналогічного ТА. Всі подальші дослідження проводились комплексно з метою показати відмінність отриманих результатів від попередніх дослідників саме в частині газового двигуна.

При проведенні передпускового і післяпускового прогріву проводились випробування СТП і її складових елементів і підсистем в умовах лабораторії ІГ НАНУ, при температурі оточуючого середовища $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 3.16 показана зміна температур теплоносіїв в системі ДГД + СТП з ТА ФП (ТАМ ФП, моторної оливи і охолоджуючої рідини) в різних ділянках (рис. 3.16 а) дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 в процесах теплової підготовки роботи під час повного циклу його розрядки – зарядки (рис. 3.16 б) в залежності від режимів роботи СТП в період передпускового і післяпускового прогріву при роботі за розробленим алгоритмом [59, 73, 107, 133]. При цих випробуваннях ставилось за мету отримання необхідних даних для проведення подальших досліджень за удосконаленою методикою розрахунку [104 - 110], а також проводилась перевірка адекватності залежностей удосконаленої методики розрахунку. При цьому виходили з припущення, що ТА фазового переходу УТС зможе працювати аналогічно при будь якій температурі оточуючого середовища, якщо забезпечити йому необхідну теплоізоляцію [103, 23, 24]. Особливості подачі ОР саме в нижній патрубок (а не через верхній) СО двигуна 6ЧН 12/14 було достатньо детально розглянуто в роботі [22, 24], тому для газового двигуна 6Ч 12/14, з однаковою конструкцією корпусних деталей, розглядати це питання ще раз вважаємо не доцільним. Зміна температури різних ділянок двигуна при підведенні гарячих теплоносіїв СТП з ТА фазового переходу УТС представлені: для спільного нагріву ОР і МО в табл. 3.13, а тільки для ОР – в табл. 3.14. Температури ТАМ ФП ТА фазового переходу УТС, як видно з рис. 3.16, за період часу $\tau = 460\text{ с}$. знижується до $t_{ТАМ} = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ і далі характер графіка охолодження ТАМ ФП змінюється з невеликими коливаннями: відбувається процес кристалізації в квазіізотермічному режимі. Коливання температури ТАМ ФП відбуваються відносно температури фазового

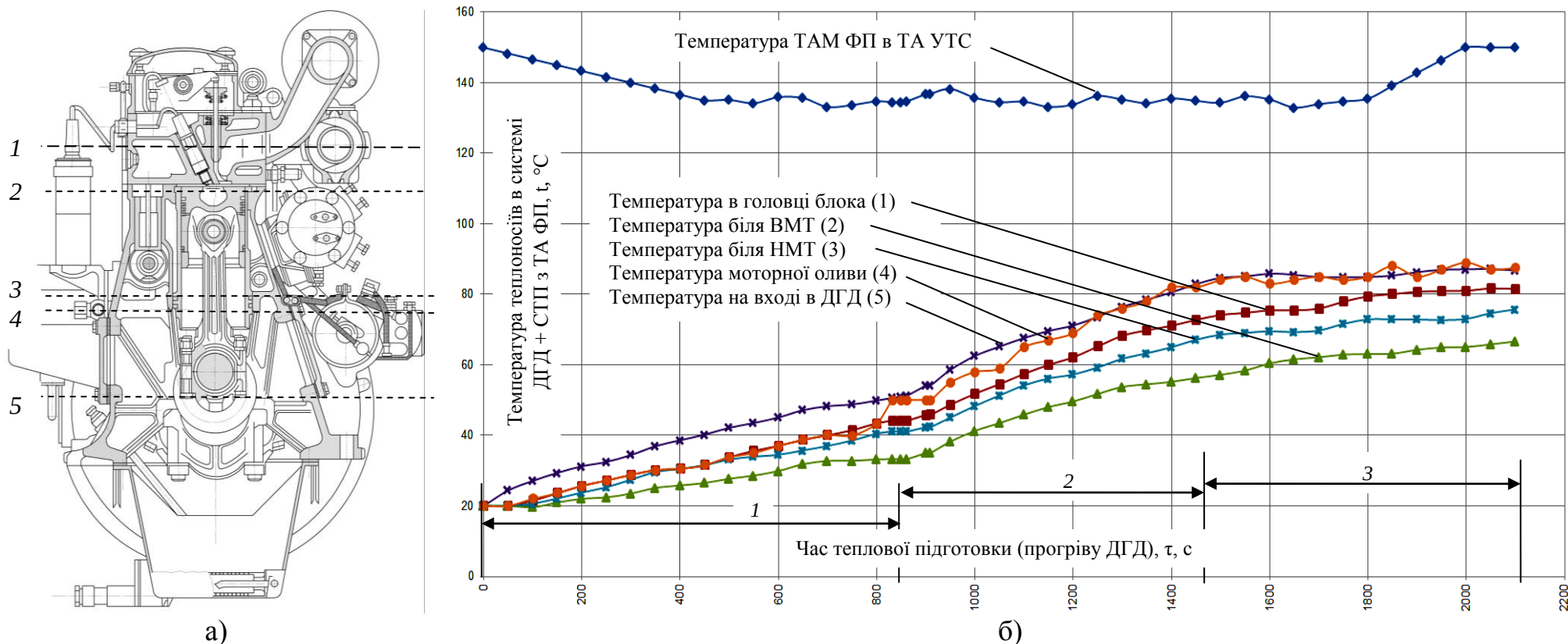


Рисунок 3.16 - Зміна температур теплоносіїв в системі ДГД з СТП на основі ТА фазового переходу (ТАМ ФП, моторної оливи і охолоджуючої рідини) в різних ділянках (а) дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 в процесах теплової підготовки під час повного циклу його розрядки – зарядки (б) в залежності від режимів роботи СТП в період передпускового і післяпускового прогріву при роботі за розробленим алгоритмом [59, 73, 107, 133]: 1 – тепла підготовка ДГД (прогрів) від ТА ФП підсистеми УТС СТП; 2 – запуск ДГД після виконання теплової підготовки від ТА ФП, подальша тепла підготовка при роботі ДГД в режимі х.х. (передбачена можливість навантаження ДГД); 3 – завершення теплової підготовки ДГД, початок зарядки ТА ФП

переходу $t_{ТАМ} = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає літературним даним [103, 134, 135]. Температура охолоджуючої рідини у цей час складає $41,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ на вході в ДГД, в головці - $31,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, біля ВМТ - $26,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, біля НМТ - $31,65\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура оливи досягає значення $30,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Як видно з табл. 3.13, після закачування гарячих теплоносіїв ОР в СО і МО в СМ з ТА фазового переходу УТС за $\tau = 862\text{ с}$. ($t_{ТАМ} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) в нижній патрубок блока циліндрів ДГД, температура ОР в якому була $t_{ДВЗ} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а МО в СМ - $t_{\text{мот. оливи}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на момент запуску ДГД після початку теплової підготовки за допомогою СТП, середня температура на вході в ДГД складає $t_{\text{ср.вх.д. ДВЗ}} = 51,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, середня температура поверхні головки блоку ДГД досягає значення $t_{\text{ср.головки}} = 44,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, середня температура біля положення поршня у ВМТ ДГД досягає значення $t_{ВМТ} = 33,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а середня температура біля положення поршня у НМТ ДГД досягає значення $t_{НМТ} = 41,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, при тому, що температура моторної оливи в головній магістралі досягає значення $t_{\text{мот. оливи}} = 48,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. За алгоритмом роботи системи

Таблиця 3.13 - Температура різних ділянок (рис. 3.16 а) газового двигуна 6Ч 12/14 при підведенні прогрітої ОР в оболонку охолодження СО і прогрітої МО в головну магістраль СМ від ТА фазового переходу УТС

Час циклу прогріву газового ДГД при повній розрядці – зарядці АТ УТС, с		0	460	862	1422	1677	1884
Температури ТАМ ФП і ділянок газового ДГД (ОР в СО)	ТАМ ФП ТА фазового переходу УТС, $^{\circ}\text{C}$	150	135	135	135	135	150
	на вході в ДВЗ, $^{\circ}\text{C}$	20	41,2	51,3	80,85	82,6	83,2
	в головці блока, $^{\circ}\text{C}$	20	31,5	44,2	71,6	73,6	77,6
	біля ВМТ, $^{\circ}\text{C}$	20	26,5	33,3	55,4	60,65	61,9
	біля НМТ, $^{\circ}\text{C}$	20	31,65	41,1	65,4	67,85	70,7
Температура МО в СМ дослідного газового двигуна		20	30,6	48,1	80,2	81,9	85

теплової підготовки ДГД, після того, як температура ОР на вході в ДГД досягає $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, виконується запуск газового двигуна та відбувається подальший більш інтенсивний прогрів [107] від різних джерел теплоти. В цей період ДГД вже може приймати навантаження для виконання основних виробничих функцій. На цьому етапі роботи ОР і МО двигуна отримують теплову енергію від ТА фазового переходу УТС та від теплової енергії, яка утворюється при згоранні палива. Після запуску ДГД температури ділянок продовжують підвищуватись до температури робочого стану ДГД, температура ТА УТС при цьому не знижується нижче значення температури фазового переходу ТАМ ФП - $t_{\text{ТАМ}} = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$. За відрізок часу $\tau = 561\text{ с}$. з моменту запуску двигуна температура ОР піднімається вище $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ на вході в ДГД. В період повного прогріву ДГД і початку зарядки ТА УТС за $\tau = 1422\text{ с}$. середня температура на вході в ДГД складає $t_{\text{ср.вхід. ДВЗ}} = 80,85\text{ }^{\circ}\text{C}$, середня температура поверхні головки блоку ДГД досягає значення $t_{\text{ср.головки}} = 71,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, середня температура біля ВМТ ДГД досягає значення $t_{\text{ВМТ}} = 55,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а середня температура біля НМТ ДГД досягає значення $t_{\text{НМТ}} = 65,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, при тому, що температура МО в головній магістралі СМ досягає значення $t_{\text{мот. оливи}} = 80,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Повний цикл зарядки ТА УТС завершується за $\tau = 1882\text{ с}$. при досягненні $t_{\text{ТАМ}} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ від початку циклу теплової підготовки ДГД. При цьому температури ділянок ДГД (рис. 3.16 а) досягають наступних значень: середня температура на вході в ДГД складає $t_{\text{ср.вхід. ДВЗ}} = 83,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, середня температура поверхні головки блоку ДГД досягає значення $t_{\text{ср.головки}} = 77,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, середня температура біля ВМТ ДГД досягає значення $t_{\text{ВМТ}} = 61,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, а середня температура біля НМТ ДГД досягає значення $t_{\text{НМТ}} = 70,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, при тому, що температура МО в головній магістралі СМ досягає значення $t_{\text{мот. оливи}} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Середня температура зони двигуна, найближча до корінних підшипників на момент пуску ДГД за $\tau = 862\text{ с}$. складала $t_{\text{НМТ}} = 41,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, за весь час проведення дослідження поступово зростала до значення $t_{\text{НМТ}} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ за $\tau = 1882\text{ с}$., а температура МО в головній

магістралі СМ досягає значень, відповідно, $t_{\text{мот. оливи}} = 48,1 / 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$, про що свідчать результати зведені в табл. 3.11.

Після досягнення температури охолоджуючої рідини вище $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ на вході в ДГД відключається СТП, та відбувається підтримка температури ОР і МО на досягнутому рівні за рахунок штатної СО і СМ двигуна. Паралельно відбувається зарядка ТА, що відображено на графіку спочатку за відрізок часу $\tau = 255 \text{ с}$ відбувається плавлення ТАМ ФП, а після цього температура рідкого ТАМ ФП піднімається з $135 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ за $\tau = 205 \text{ с}$. Стандартне відхилення температури $t_{\text{ТАМ}}$ на дослідній ділянці в процесі повного циклу розрядки – зарядки ТА відносно температури фазового переходу $t_{\text{ТАМ}}$ складає $\sigma = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, що повністю достатньо для подібних вимірювань. Співставлення розрахункових даних з отриманими результатами експериментальних даних підтверджує достатню точність для СО і СМ дослідного газового двигуна в цілому [133, 136].

Для порівняння приводимо в табл. 3.14 температури різних ділянок двигуна при підведенні тільки прогрітої ОР в оболонку охолодження СО

Таблиця 3.14 - Температура різних ділянок (рис. 3.16 а) газового двигуна 6Ч 12/14 при підведенні тільки прогрітої ОР в оболонку охолодження СО від ТА фазового переходу УТС

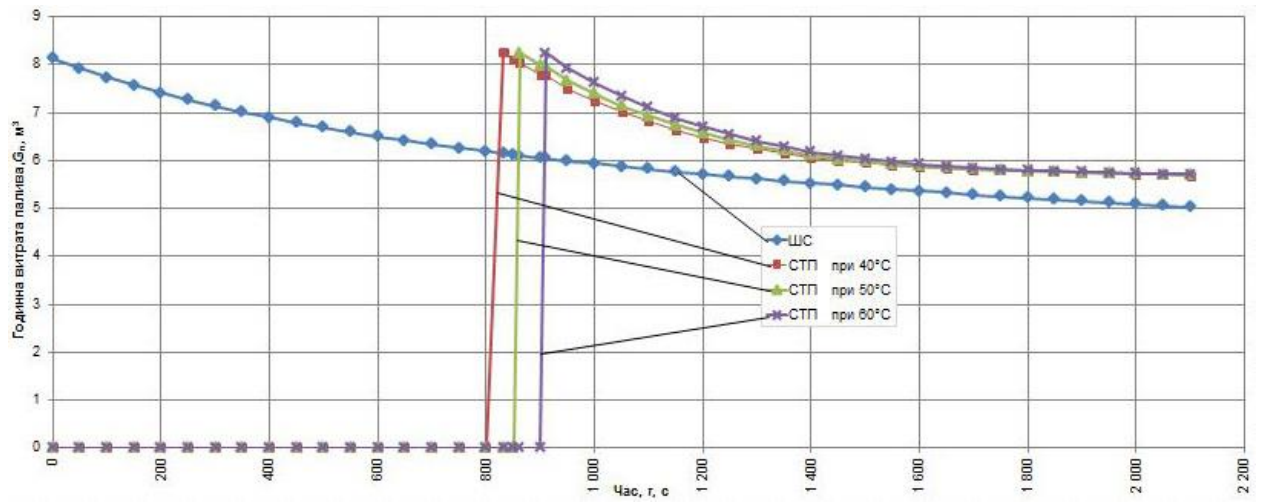
Час циклу прогріву газового ДГД при повній розрядці – зарядці АТ УТС, с		0	460	862	1422	1677	1884
Температури ТАМ ФП і ділянок газового ДГД (ОР в СО)	ТАМ ФП ТА фазового переходу УТС, $^{\circ}\text{C}$	150	135	135	135	135	150
	на вході в ДВЗ, $^{\circ}\text{C}$	20	40	50	80	81	85
	в головці блока, $^{\circ}\text{C}$	20	29	44,2	71,8	73,3	78,4
	біля ВМТ, $^{\circ}\text{C}$	20	29	41,2	65,9	67,4	71,3
	біля НМТ, $^{\circ}\text{C}$	20	19	33,3	55,7	56,9	57,7

від ТА фазового переходу УТС, тобто без підігріву МО. Різниця в значеннях температур охолоджуючої рідини в табл. 3.13 і 3.14 пояснюється конструктивними особливостями двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2), де головна масляна магістраль СМ знаходиться поза блоком циліндрів (рис. 3.2).

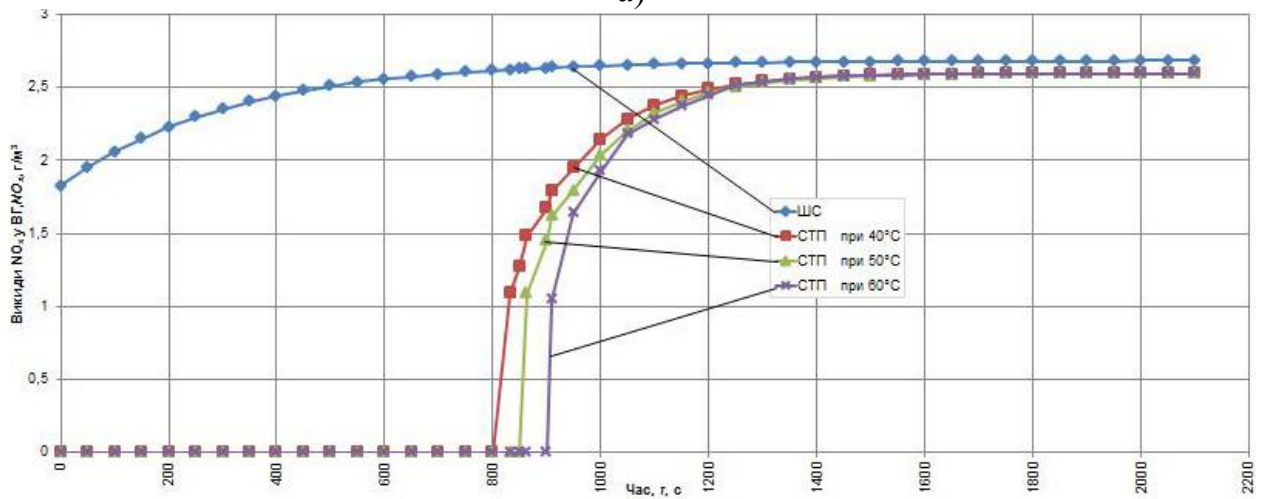
Виходячи з отриманих результатів можливо впевнено стверджувати, що передпусковий прогрів ОР і МО одночасно за розробленим алгоритмом роботи СТП дозволяє краще прогріти зону колінчастого вала двигуна, ніж у випадку, коли передпусковий прогрів проводиться тільки для ОР [133, 136]. Одночасно за допомогою СТП забезпечується передпускове підвищення тиску МО в СМ, що також є доцільним для зменшення тертя в кінематичних парах двигуна перед здійсненням пуску в умовах експлуатації.

Результати вимірювання часу прогріву, витрати палива та викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) з КСПП наведено на рис. 3.16 – 3.17 а - б.

Отримані результати підтверджують, що використання СТП з ППД та УТС дозволяє суттєво скоротити час теплової підготовки ОР і МО дослідного газового двигуна до здійснення запуску і прийняття навантаження шляхом забезпечення передпускового і післяпускового прогріву його від ТА фазового переходу УТС. Попередній прогрів стаціонарного дослідного газового двигуна без його запуску при температурі оточуючого середовища +20 °С за допомогою СТП зайняв 831 с (855 с / 895 с) для ОР і 815 с (851 с / 906 с) для МО до передпускової температури вказаних технічних рідин 40 °С (50 °С / 60 °С) відповідно. І це при тому, що час прогріву ОР дослідного газового ДВЗ зі штатними СО і МО до температури 50 °С склав 1370 с, тобто економія часу в процесі прогріву без запуску і аналогічного прогріву в режимі х.х. двигуна до часу прогріву, коли можливо прийняття навантаження, складає 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 МО в реалізації для різних температур. При цьому економія газового палива на прогрів двигуна з СТП для вказаного режиму склала відповідно від 1,678 до 1,939 м³ або 69 – 80% у



а)



б)

Рисунок 3.17 - Результати вимірювання годинної витрати палива (а), викидів NO_x у ВГ (б) при прогріві дослідного газового двигуна від 20 °С до 85 °С: ШС – штатна СО і СМ; СТП при 40 °С, СТП при 50 °С, СТП при 60 °С - передпусковий прогрів дослідного газового двигуна з СТП відповідно до температури 40 °С, 50 °С і 60 °С

порівнянні зі штатними системами, для яких витрата склала $2,424 \text{ м}^3$. Завдяки тому, що при здійсненні передпускового прогріву двигун взагалі не працює, тобто не зношується в процесах прогріву і не викидає шкідливих викидів з ВГ в оточуюче середовище, зниження викидів у порівнянні зі ШС ($3,1 \text{ г} / 0,34 \text{ мг}$) склало відповідно від 2,8 до 3 г або 70 – 80% для оксидів азоту.

Для дослідження впливуна тепловий стан газового ДВЗ розробленої СТП було використано авторський цикл теплової підготовки, який включав в себе всі основні етапи роботи елементів і складових СТП і розроблені алгоритми СТП в частині взаємодії його складових, як на етапі віддачі теплової енергії, так і на етапах її прийняття ТА фазового переходу. В процесі експериментальних досліджень СТП проводились дослідження її складових елементів і підсистем в умовах лабораторії ІГ НАНУ, тобто при температурах оточуючого середовища, які можливо було створити в ній, а саме $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. При цих дослідженнях ставилась мета отримати необхідні дані для проведення подальших досліджень за удосконаленою методикою рорахунку [104 – 110], а також провести перевірку адекватності отриманих залежностей.

Оцінка спроможності ТА фазового переходу УТС на протязі тривалого часу підтримувати теплову здатність в частині повноцінного забезпечення «гарячого пуску» показана на рис. 3.18. З отриманих в умовах низьких температур оточуючого середовища залежностей видно, що повна розрядка дослідного ТА фазового переходу УТС здійснюється зі $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $135 \text{ }^{\circ}\text{C}$ за 57,5 - 36 годин при температурі оточуючого середовища $+20 \dots -20 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Цього повністю достатньо для забезпечення роботоздатності СТП з ТА фазового переходу УТС і виконання поставлених задач щодо здійснення режиму передпускового і післяпускового прогріву дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 від температури оточуючого скредовища до температури «гарячого пуску» та можливості прийняття навантаження.

Виходячи з особливостей умов дослідної моторної лабораторії ІГ НАНУ, а саме відсутність можливості підтримувати сталі температури

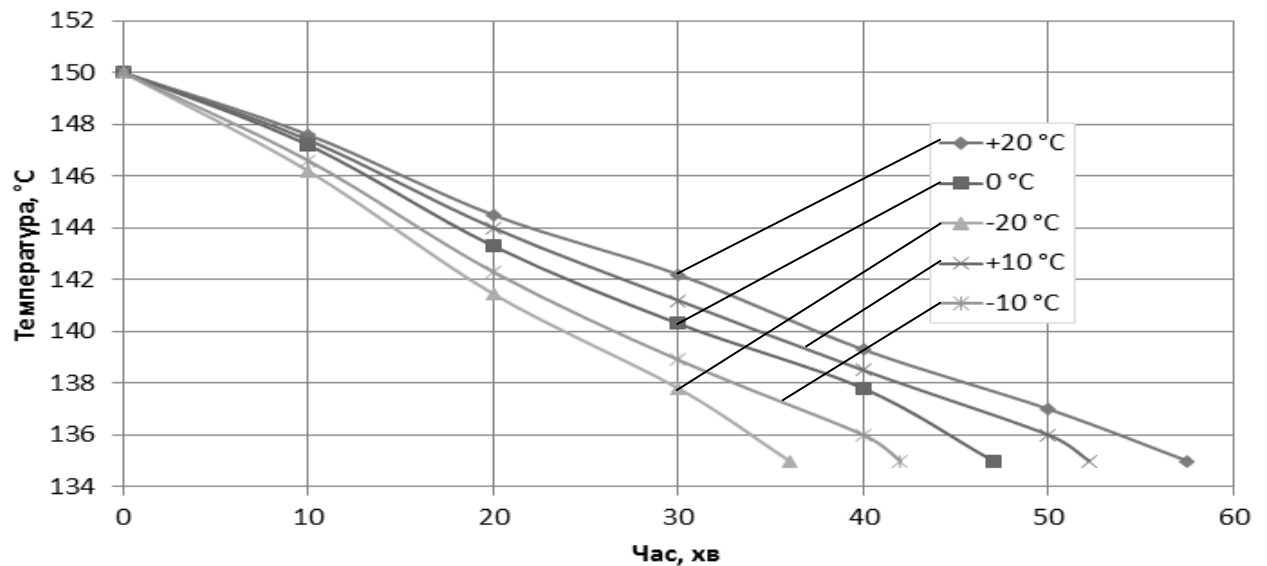


Рисунок 3.18 - Результати дослідження ТА фазового переходу УТС у режимі зберігання накопиченої теплоти при різних температурах ОС



Рисунок 3.19 - Результати дослідження КТА у режимі зберігання накопиченої теплоти від ДГД при температурі оточуючого середовища +20 °C

оточуючого середовища в широких межах, випробування складових елементів СТП, саме КТА і НМО проводили тільки в лабораторії при температурі +20 °C. Використання КТА (накопичення і зберігання теплової енергії) для ДГД (рис. 3.19) в частині ОР і МО дозволяє на протязі 962 хв. Підтримувати температуру в межах $+50 \pm 5$ °C. Подальше заряджання КТА проводиться до $+85 \pm 5$ °C для накопичення КТА запасу теплової енергії. Накопичення теплової енергії відбувається в межах 200 ± 10 хв. Застосування

НМО для ДГД (рис. 3.20) в частині МО в СМ дозволяє на протязі 962 хв. зберігати робочу температуру МО в межах $+50 \pm 5$ °С. В подальшому потрібно проводити запуск і прогрів газового двигуна до $+85 \pm 5$ °С. Час прогріву МО в ДГД до $+85 \pm 5$ °С аналогічний часу прогріву двигуна в комплектації ШС. Стандартне відхилення температури t_{TAM} на дослідній ділянці зміни температур в процесі повного циклу розрядки ТА відносно температури фазового переходу t_{TAM} складає $\sigma = 5$ °С. Таке значення повністю достатньо для аналогічних вимірювань. Співставлення розрахункових даних з отриманими результатами експериментальних даних підтверджує достатню точність проведення досліджень для СО і СМ, СТП і ДГД в цілому [137].

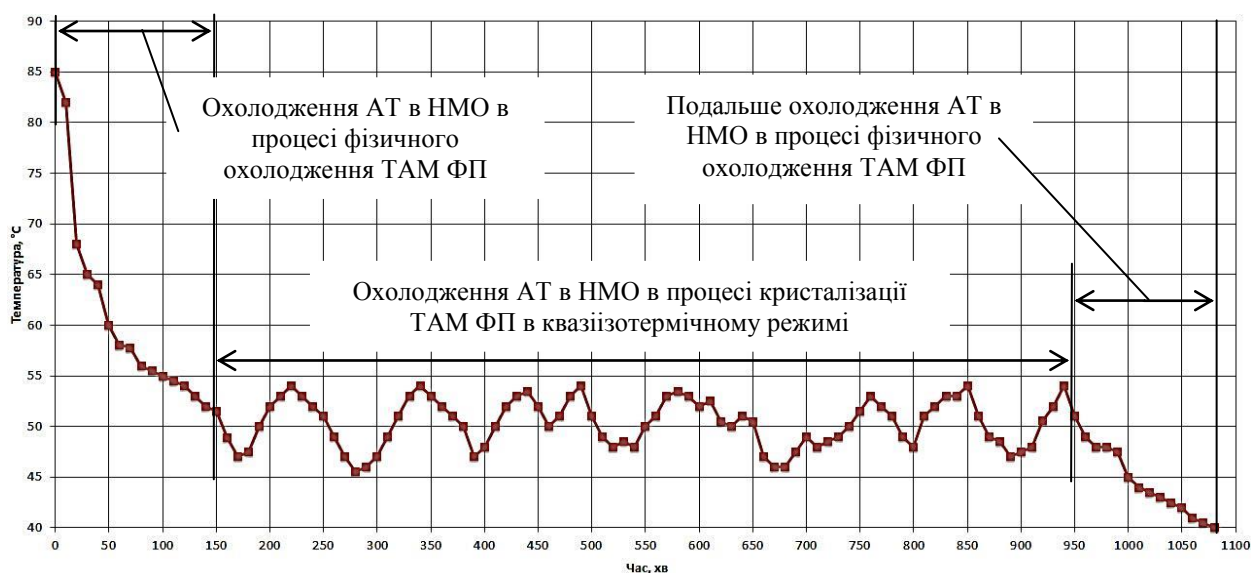


Рисунок 3.20 - Результати дослідження НМО у режимі зберігання накопиченої теплоти від МО з СМ при температурі ОС $+20$ °С

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 у міжзмінний період.

3.7 Висновки до розділу 3

1. Для проведення експериментальних досліджень передпускового і післяпускового прогріву проведено оснащення системою теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) у складі електроагрегату в лабораторії ІГ НАНУ, встановлення елементів підсистем прискореного прогріву і утилізації теплової енергії ВГ тепловим акумулятором фазового переходу, контактним тепловим акумулятором фазового переходу і накопичувачем моторної оливи з тепловим акумулятором. Також дослідну установку оснащено спеціалізованим обладнанням для проведення експериментальних досліджень та вимірювальними приладами.

2. Для формування основ організації теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 до температури, що дозволяє здійснювати приймання навантаження після пуску і вибору режимів роботи СТП, розроблено цикл теплової підготовки - передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна, оснащеного СТП.

Розроблено алгоритм роботи СТП газового двигуна з підсистемами і складовими при здійсненні передпускового і післяпускового прогріву. Алгоритм роботи СТП дозволяє забезпечити закономірності виконання теплової підготовки ДГД для зменшення часу прогріву, витрати палива й зниження шкідливих викидів за рахунок передпускового прогріву і прискореного післяпускового прогріву газового двигуна за допомогою СТП, а також автоматизувати процес контролю та регулювання необхідних температурних режимів у СО і СМ ДГД при здійсненні вказаних операцій. Застосування СТП з розробленим циклом та алгоритмом теплової підготовки дозволяє істотно скоротити час прогріву двигуна до робочої температури без роботи ДГД в режимі холостого ходу.

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

- 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 1850 сек. або 30,8 хв. при температурі теплоносія 170 °С, а при температурі теплоносія 110 °С – 3650 сек. або 60,8 хв. Зі 130 °С до 20 °С ТА фазового переходу СУТС розряджається за 380 сек. або 6,3 хв. при швидкості теплоносія 0,22 м/сек., а при швидкості теплоносія 0,08 м/сек. - за 720 сек. або 12 хв. відповідно;

- при швидкості циркуляції ОР в СО ДГД 0,08 м/с, яка близька до швидкості циркуляції штатного насосу ОР газового двигуна в режимі холостого ходу, прогрів ОР в СО до 85 °С відбувається за 1950 с. або за 32,5 хв., а у той же час, при збільшенні швидкості до 0,22 м/с, яка може бути створена циркуляційним насосом з модульованою подачею СТП в режимі х.х. і, яка відповідає максимальній швидкості штатного насосу 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 °С (50 °С / 60 °С) 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 ШС, для якої витрата склала 2,424 м³, а зниження викидів у порівнянні зі ШС (3,1 г / 0,34 мг) склало відповідно від 2,8 до 3 г або 70 – 80% для оксидів азоту.

4. 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.

5. 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 випробувань стали основою для розробки залежностей, що лягли в основу удосконаленої методики розрахунку робочого процесу теплової підготовки газового двигуна для дослідження впливу конструктивних та регулювальних параметрів на термінові, паливо-енергетичні та екологічні показники.

РОЗДІЛ 4

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГАЗОВОГО ДВИГУНА В ПРОЦЕСІ ПЕРЕДПУСКОВОГО І ПІСЛЯПУСКОВОГО ПРОГРІВУ З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ ТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ

4.1 Оцінювання впливу складових СТП на роботу двигуна

4.1.1 Вплив температури оточуючого середовища на час охолодження дослідного газового двигуна

За положеннями [44, 22, 24] було удосконалено методику розрахунку зміни теплових параметрів СО і СМ газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) за даними експериментально отриманих характеристик. В результаті проведеного розрахунково-експериментального дослідження в ІГ НАНУ (м. Київ) і в УкрДАЗТ (м. Харків) були отримані основні закономірності процесу охолодження ДГД. На рис. 4.1 зображені основні характеристики елементів СО і СМ газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) при їх охолодженні на протязі 2-х годин після зупинки ДВЗ при температурі оточуючого середовища $t_{oc} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналогічні залежності були отримані для температур $t_{oc} = +20\text{ (0) }^{\circ}\text{C}$.

В результаті аналізу отриманих залежностей на рис. 4.1 видно, що домінуючим параметром при виборі критерію допустимого охолодження СО дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 для ОР є температура в вхідному патрубку СО на вході в блок циліндрів двигуна (крива 4), а для СМ двигуна - температура МО в трубопроводі головної масляної магістралі СМ двигуна (крива 5). Ділянки зміни температур теплоносіїв показані на рис. 3.16 а. Особливість конструкції газового двигуна 6Ч 12/14 полягає в тому, що головна масляна магістраль двигуна знаходиться окремо від конструкції блоку циліндрів (рис. 3.2), тому й охолоджується найшвидше. Отримані

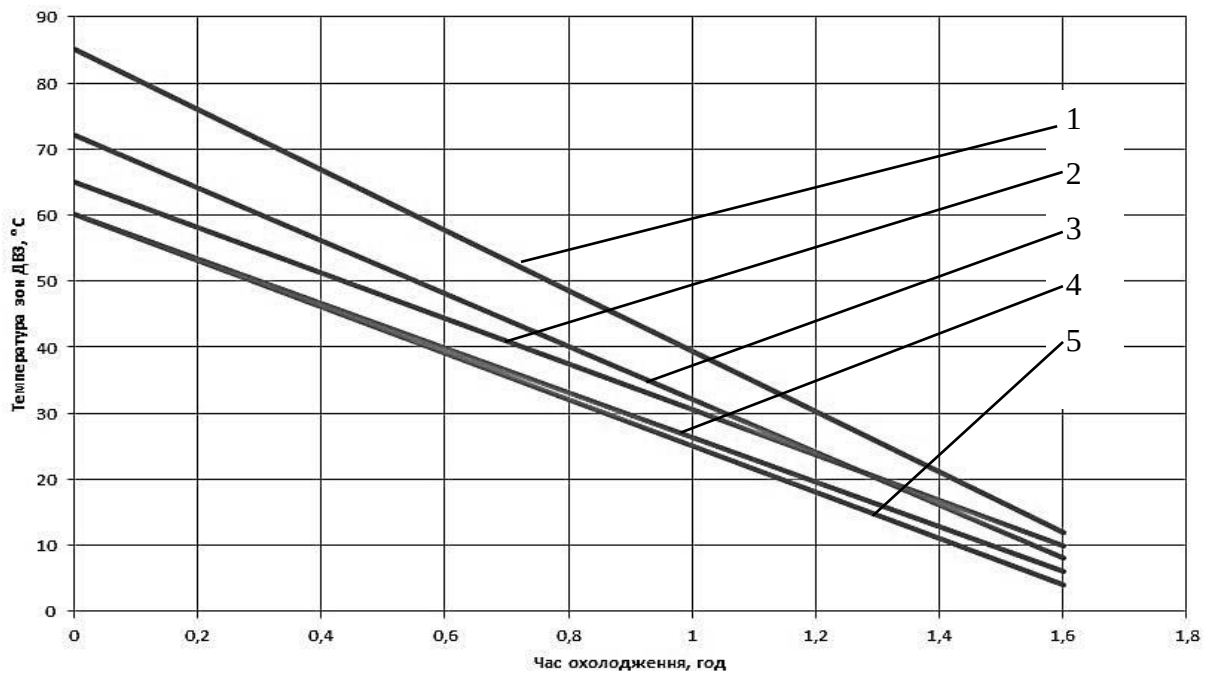


Рисунок 4.1 – Залежність температур ОР і МО дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) при охолодженні від часу: 1 – біля ВМТ, 2 – головка блока циліндрів ДГД, 3 – біля НМТ, 4 – вхідний патрубок СО до порожнини ОР блоку циліндрів; 5 – труботровід головної масляної магістралі СМ двигуна

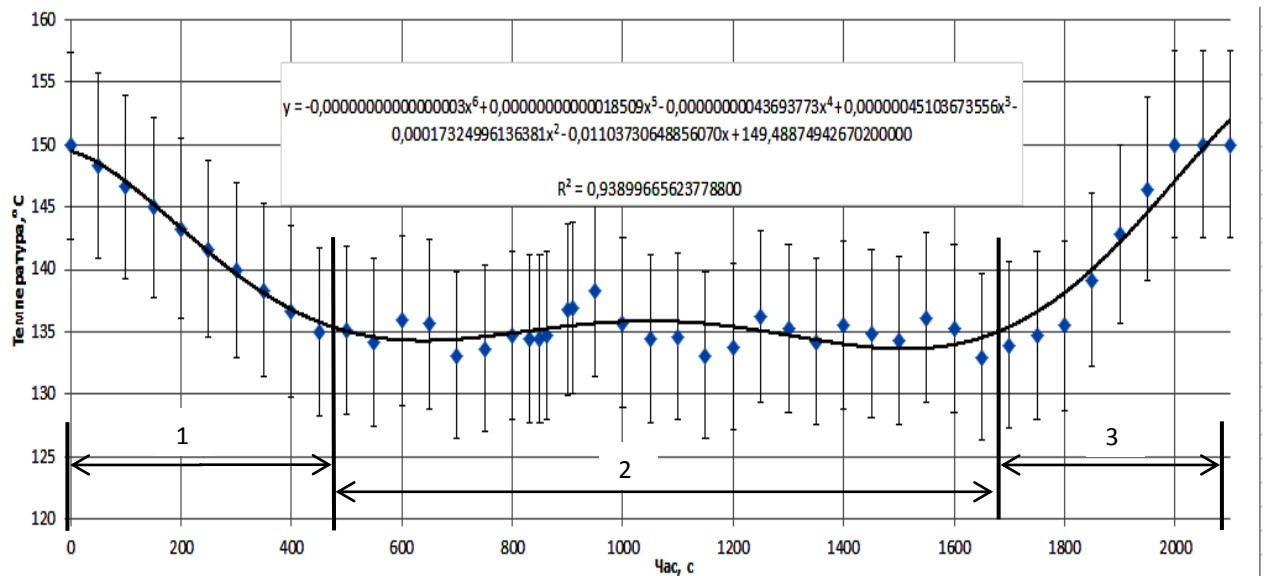


Рисунок 4.2 - Результати розрахункового перехідного процесу в ТАМ ФП в ТА фазового переходу в процесі циклу його розрядки – зарядки при здійсненні одночасного прогріву МО і ОР (з відносною планкою похибки 5%): 1 - охолодження ТА УТС в процесі фізичного охолодження ТАМ ФП; 2 - охолодження ТА в УТС в процесі кристалізації ТАМ ФП в квазіізотермічному режимі; 3 - нагрів ТА УТС в процесі фізичного нагріву ТАМ ФП

залежності після відповідної математичної обробки покладені в основу розрахунку процесу моніторингу двигуна з СТП на рівні ϵ в удосконаленій методиці розрахунку процесу теплової підготовки (розділ 2.3). Розроблена методика розрахунку моніторингу СО і СМ двигуна дає можливість прогнозувати динаміку падіння температурних показників СО і СМ двигуна у часі та давати відповідні рекомендації за кількістю, інтервалам та тривалістю передпускової підготовки ДГД від СТП.

4.1.2 Оцінювання впливу теплового акумулятору фазового переходу системи теплової підготовки на показники роботи двигуна

За допомогою удосконаленої методики розрахунку процесів теплової підготовки (розділ 2) були розраховані робочі процеси ТА фазового переходу СТП дослідного газового двигуна К-159 М2 під час повного циклу його розрядки – зарядки. В удосконаленій методиці розрахунку процесів теплової підготовки були враховані особливості конструкції ТА, УТС, ППД, КТА і НМО, як складових частин СО і СМ, при здійсненні теплової підготовки ОР і МО в процесі передпускового і післяпускового прогріву.

Результати розрахункового перехідного процесу в ТАМ ФП в ТА фазового переходу (з відносною планкою похибки 5%) показані на рис. 4.2. З аналізу отриманих результатів розрахункових досліджень видно, що в початковий момент часу $\tau = 0$, коли ТА заряджений, фазоперехідний ТАМ ФП теплового акумулятора нагрітий до $t_o = 150^\circ\text{C}$ та знаходиться в рідкому стані. Далі вмикається система теплообміну СТП і теплоносій в ТА починає відбирати теплову енергію накопичену ТАМ ФП і віддає її системам охолодження і мащення ДГД, яка знаходиться в цей час при температурі $t_{oc} = 20^\circ\text{C}$. Як видно з рис. 4.2, на протязі часу $\tau_{охол} = 450$ с. температура ТАМ ФП знижується за рахунок фізичного охолодження до температури фазового переходу $t_{fn} = 135^\circ\text{C}$ і далі характер залежності охолодження ТАМ ФП змінюється при здійсненні процесу кристалізації в квазіізотермічному

режимі. Коливання температури ТАМ ФП відбуваються в допустимих межах, відносно температури $t_{\phi n} = 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ [103]. Стандартне відхилення температури фазоперехідної речовини $t_{\phi n}$ на дослідній ділянці в процесі повного циклу розрядки – зарядки ТА відносно $t_{\phi n}$ складає $\sigma = 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в межах відносної планки похибки 5%), що повністю достатньо для подібних задач теплообміну [103]. Співставлення розрахункових даних з отриманими раніше результатами експериментальних досліджень підтверджує достатню адекватність розроблених розрахункових методик [137]. Коливання температури ТАМ ФП на ділянці фазового переходу в процесі повного циклу розрядки – зарядки ТА пояснюються неоднорідним температурним полем всередині ТА, а також із випадковим характером процесу утворення центрів кристалізації ТАМ ФП [19, 103 137].

На рис. 4.3 показані розрахункові залежності охолодження ТА фазового переходу при різних температурах в режимі зберігання теплової енергії, накопиченої в під час роботи СТП дослідного газового двигуна при використанні однакового теплоізолюючого матеріалу. З отриманих залежностей видно, що повна розрядка дослідного ТА здійснюється при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ зі $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $135\text{ }^{\circ}\text{C}$ за $57,5 \pm 1,2$ години, при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ за $47 \pm 1,2$ години, а при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ - за $36 \pm 1,2$ години, що повністю достатньо для забезпечення роботоздатності СТП й виконання поставлених задач щодо здійснення теплової підготовки в частині режиму передпускової і післяпускової теплової підготовки від температури оточуючого середовища до температури «гарячого пуску» та можливості прийняття навантаження.

4.1.3 Оцінювання впливу контактного теплового акумулятору фазового переходу системи теплової підготовки на роботу дослідного газового двигуна

За допомогою удосконаленої методики розрахунку процесів теплової підготовки (розділ 2) було розраховані робочі процеси КТА (рис. 4.4)

фазового переходу СТП в процесі повного циклу його розрядки - зарядки у складі СТП дослідного газового двигуна 6Ч 12/14. Результати розрахункового перехідного процесу в ТАМ ФП контактної ТА фазового переходу (з відносною планкою похибки 5%) і описом основних робочих процесів показано на рис. 4.4. З аналізу отриманих результатів видно, що в початковий момент часу $\tau = 0$, коли КТА заряджений, ТАМ ФП теплового акумулятора нагрітий до $t_o = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ та знаходиться в рідкому стані в оболонці КТА. В подальшому контактний ТА віддає (підтримує температурний стан) накопичену ТАМ ФП теплову енергію корпусним деталям газового двигуна - блоку і картеру та оточуючому середовищу при температурі $t_{oc} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Як видно з рис. 4.4, на протязі часу $\tau_{охол} = 160$ хв. температура ТАМ ФП знижується за рахунок фізичного охолодження до значень температури фазового переходу $t_{fn} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і далі характер залежності охолодження ТАМ ФП змінюється при здійсненні процесу кристалізації в квазіізотермічному режимі. Коливання температури ТАМ ФП відбуваються в допустимих межах відносно температури $t_{fn} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [126].

Заряджання КТА (нагрівання і розплавлення ТАМ ФП) відбувається за $\tau = 130$ хв. Стандартне відхилення температури фазоперехідної речовини на дослідній ділянці в процесі повного циклу розрядки – зарядки КТА відносно t_{fn} складає $\sigma = 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, що повністю достатньо для подібних задач теплообміну [103, 126]. Співставлення розрахункових даних з отриманими раніше результатами експериментальних досліджень підтверджує достатню адекватність розроблених розрахункових методик [137]. Коливання температури ТАМ ФП на ділянці фазового переходу в процесі повного циклу розрядки – зарядки КТА пояснюються неоднорідним температурним полем всередині КТА, а також, випадковим характером процесу утворення центрів кристалізації ТАМ ФП [19, 103, 137].

4.1.4 Оцінювання впливу накопичувача моторної оливи з тепловим акумулятором фазового переходу системи теплової підготовки на роботу дослідного газового двигуна

З використанням удосконаленої методики розрахунку процесів теплової підготовки (розділ 2) було розраховані робочі процеси роботи НМО фазового переходу в процесі повного циклу його зарядки – зберігання у складі СТП газового двигуна 6Ч 12/14.

Результати розрахункового перехідного процесу в НМО з ТА фазового переходу (з відносною планкою похибки 5%) показано на рис. 4.5. З аналізу отриманих результатів видно, що в початковий момент часу $\tau = 0$, коли НМО заряджається, ТАМ ФП теплового акумулятора знаходиться в твердому стані і починає нагріватися від залитої МО ($t_o = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$), температура якої вище температури фазового переходу ТАМ ФП НМО ($t_o = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) та в подальшому, після нагріву знаходиться в рідкому стані. Охолодження ТАМ ФП разом з втратою теплової енергії МО в НМО на першому етапі відбувається за $\tau = 130$ хв. (отримано з попередніх розрахунків). В подальшому НМО утримує і віддає накопичену за допомогою ТАМ ФП теплову енергію (утримує її) МО і оточуючому середовищу при температурі зовнішнього середовища. Як видно з рис. 4.5, на протязі часу $\tau_{охол} = 150$ хв. температура ТАМ ФП в НМО знижується до температури фазового переходу $t_{фн} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і далі, на протязі часу, характер залежності охолодження ТАМ ФП змінюється при здійсненні процесу кристалізації в квазіізотермічному режимі. Коливання температури ТАМ ФП в НМО відбуваються в допустимих межах відносно температури $t_{фн} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [126]. Подальша розрядка ТА в НМО відбувається до $t = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Подальше охолодження НМО і, відповідно, МО не бажано, виходячи з вимог «гарячого прогріву» і вимог, що ставиться до пуску двигуна. Стандартне відхилення температури фазоперехідної речовини на дослідній ділянці в процесі повного циклу розрядки – зарядки ТА в НМО відносно $t_{фн}$ складає $\sigma = 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, що повністю достатньо для подібних задач теплообміну [103, 126].

Співставлення розрахункових даних з отриманими раніше результатами експериментальних досліджень підтверджує достатню адекватність розрахункових методик [199]. Коливання температури на ділянці фазового переходу в процесі повного циклу розрядки – зарядки НМО пояснюються неоднорідним температурним полем всередині ТАМ ФП, а також із випадковим характером процесу утворення центрів кристалізації ТАМ [19, 126, 137].

4.1.5 Оцінювання впливу швидкості циркуляції теплоносія на час прогріву дослідного газового двигуна

Визначення теплових параметрів газового двигуна 6Ч 12/14 в режимі саме холостого ходу проводилось аналогічно раніше розробленим методикам [22, 24, 63], що автором були удосконалені в представленій дисертації.

Для формування бази вихідних даних в удосконаленій методиці розрахунку процесів теплової підготовки дослідного газового двигуна потрібні вихідні дані параметрів роботи ДГД в режимі х.х.. Вони були отримані за допомогою програмного комплексу Diesel-RK [143, 146, 63]. Більш детально вибір вихідних даних в методиках розрахунку систем теплової підготовки показаний в роботі [22, 24]. Аналогічно були отримані параметри дослідного газового двигуна при роботі в режимі холостого ходу для температур оточуючого середовища.

В розділі 2 наведені основні залежності удосконаленої методики розрахунку процесів теплової підготовки дослідного газового двигуна для визначення часу прогріву в залежності від швидкості циркуляції ОР в СО і МО в СМ.

З отриманих результатів проведених розрахункових досліджень в частині залежностей часу прогріву від швидкості циркуляції ОР і МО (рис. 4.6 і 4.7)

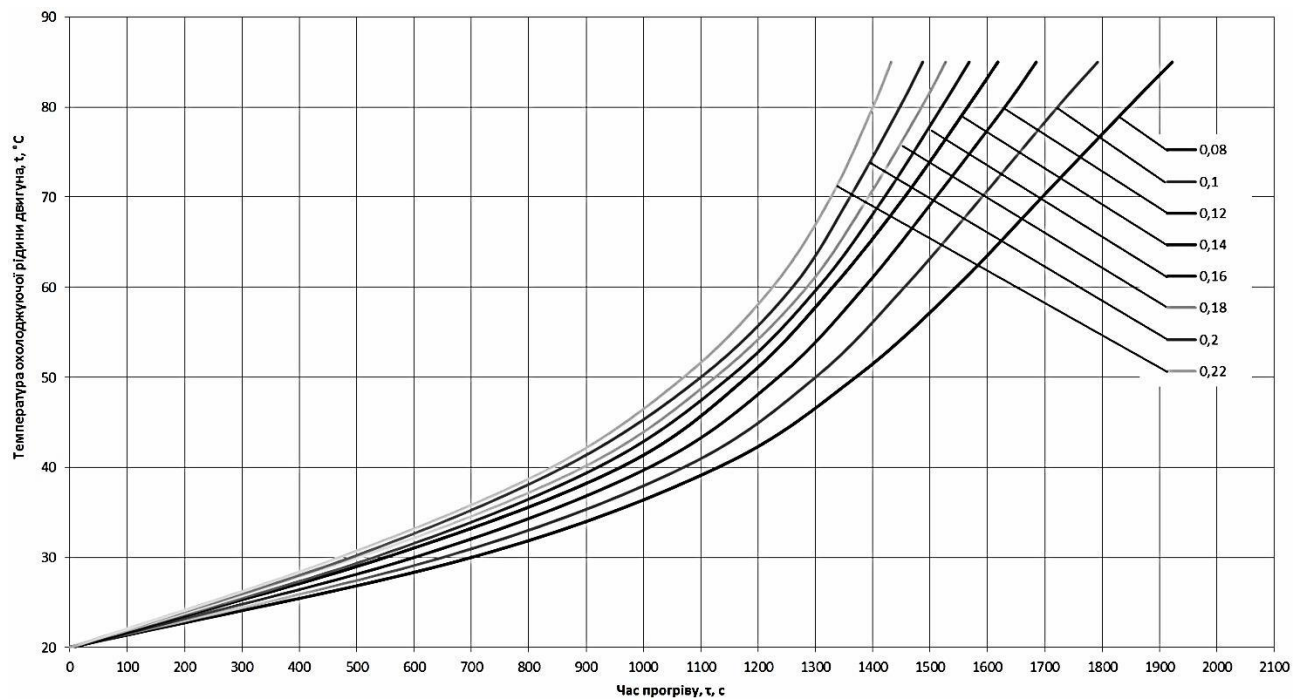


Рисунок 4.6 – Залежність температури охолоджуючої рідини газового двигуна 6Ч 12/14 від часу прогріву при різних швидкостях циркуляції: 0,08-0,12 м/с – швидкість циркуляції, яку забезпечує штатний рідинний насос ДГД при роботі в режимі х.х.; 0,12-0,22 м/с – швидкість циркуляції, яку може забезпечувати штатний рідинний насос двигуна при роботі на високих обертах, або насос з модульованою подачею СТП

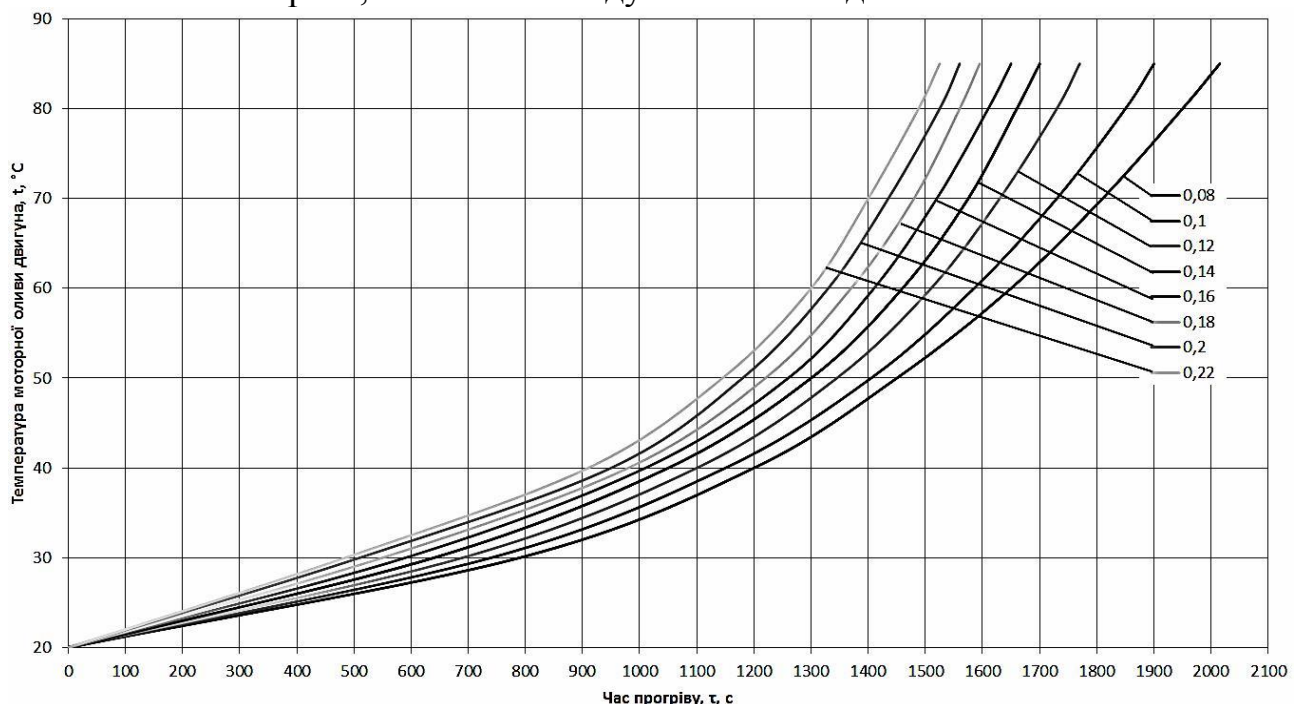


Рисунок 4.7 – Залежність температури моторної оливи газового двигуна 6Ч 12/14 від часу прогріву при різних швидкостях циркуляції: 0,08-0,12 м/с – швидкість циркуляції, яку забезпечує штатний масляний насос ДГД при роботі в режимі х.х.; 0,12-0,22 м/с – швидкість циркуляції, яку може забезпечувати штатний масляний насос двигуна при роботі на високих обертах, або насос з модульованою подачею СТП

видно, що з ростом швидкості циркуляції ОР і МО час прогріву двигуна зменшується. Досягти цього без змін в конструкції СО і СМ газового двигуна проблематично тому, що при роботі в режимі х.х. існує залежність швидкості обертання рідинного насосу і циркуляційного насосу МО від частоти обертання колінчастого валу і змінити їх не можливо. Для газового двигуна 6Ч 12/14 швидкість циркуляції ОР і МО в режимі х.х. не змінна і час прогріву до 85 °С буде становити 1922 і 2015 с. відповідно (рис. 4.6 і 4.7).

Для зменшення часу теплової підготовки в конструкцію газового двигуна при встановленні СТП внесені відповідні зміни в СО і СМ шляхом їх доповнення, а саме до штатного рідинного насосу і насосу для МО додатково встановлені електричні насоси з модульованою подачею, якими керує електронна система керування СТП відповідно до показів датчиків температури ОР і МО ДГД. В результаті проведення розрахункових досліджень за удосконаленою методикою розрахунків були отримані значення часу теплової підготовки, згідно з якими, зі збільшенням швидкості циркуляції ОР і МО до 0,22 м/с (рис. 4.7 і 4.8), за допомогою додаткових електричних насосів СТП, скорочується час прогріву дослідного газового двигуна 6С 12/14 (К-159 М2) до +85 °С з вказаних вище значень до 1432 і 1525 с. відповідно [22, 24, 63].

4.2 Оцінка впливу параметрів налаштування складових СТП на показники роботи дослідного газового двигуна

Розрахункове дослідження ДГД з СТП проводилось в три етапи: на першому етапі досліджувались тільки теплові процеси в СО дослідного газового двигуна за допомогою теплової підготовки від ТА фазового переходу СТП під час передпускового і післяпускового прогріву; на другому етапі досліджувались теплові процеси в СО і СМ дослідного газового двигуна за допомогою прогріву від ТА фазового переходу СТП під час передпускового і післяпускового прогріву; на третьому етапі досліджувались теплові процеси в СО і СМ газового двигуна за допомогою комплексного

прогріву від всіх елементів СТП під час передпускового і післяпускового прогріву [24, 63, 138 – 143].

Для забезпечення теплової підготовки ДГД з використанням удосконаленої методики розрахунку на першому етапі розрахункових досліджень формувався цикл передпускового прогріву і пуску дослідного газового ДВЗ (рис. 3.8) від початку розряджання теплового акумулятора (початок теплової підготовки ДГД) до повного його заряджання, що визначається температурою фазового переходу ТАМ ФП. При формуванні методики розрахунку розглядалися процеси передпускового прогрівання ОР газового двигуна 6Ч 12/14 при різних фіксованих температурах оточуючого повітря, а саме: 20 °С, 0 °С, -20 °С. Нагрів при цьому проводився до наступних температур ОР: $t\text{ }^{\circ}\text{C} = 40\text{ (50/60)}\text{ }^{\circ}\text{C}$. Процеси прогріву корпусних деталей двигуна серії 6Ч 12/14 за допомогою ОР детально описан в роботах [22, 24], тому отримані результати беремо за основу подальших розрахункових досліджень.

Аналіз отриманих результатів довів, що на досліджуємих температурних режимах тепла підготовка здійснюється наступним чином: прогрів ОР в СО двигуна від ТА фазового переходу СТП при 20 °С триває 865 с. (рис. 3.16 б і 4.8), 1438 с, 1996 с відповідно, потім, при досягненні температури ОР 50 °С в системі охолодження, відбувається запуск двигуна та продовжується прогрів ОР ДГД від теплового акумулятора СТП та, відповідно, за рахунок теплової енергії при згоранні палива двигуна до температури охолоджуючої рідини 85 °С за 580 с. Після досягнення температури ОР 85 °С відбувається зарядка теплового акумулятора СТП, яка триває 496 с. (рис. 3.16 б і 4.8), 1708 с, 1867 с відповідно. У той же час прогрів ОР класичним методом (без використання ТА фазового переходу) буде тривати 1370 с, 1864 с та 2849 с відповідно. Результати проведеного дослідження в частині прогріву газового ДГД з СТП до температури $t = 40\text{ (50/60)}\text{ }^{\circ}\text{C}$, витрати палива на прогрів і викидів азоту показані на рис. 4.9 – 4.10, а для порівняння представлені в табл. 4.1 [22, 24, 138 – 143].

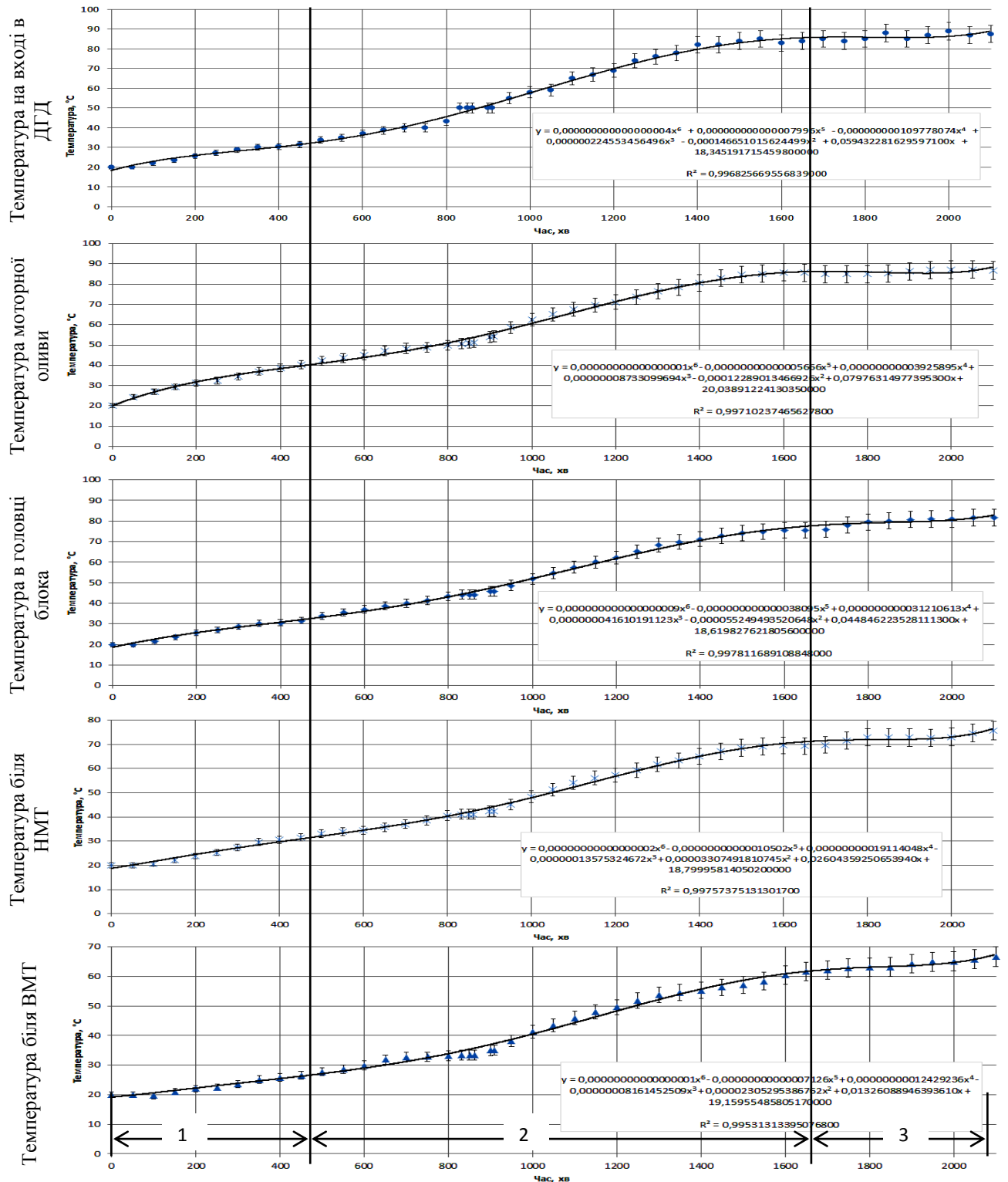


Рисунок 4.8 - Зміна температур теплоносіїв в різних ділянках дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 в процесах теплової підготовки під час повного циклу розрядки – зарядки ТА (з відносною планкою похибки 5%): 1 – передпусковий прогрів ДГД за рахунок охолодження ТА УТС в процесі фізичного охолодження ТАМ ФП; 2 – передпусковий і післяпусковий прогрів ДГД і робота газового двигуна в режимі х.х. спільно з охолодженням ТА в УТС в процесі кристалізації ТАМ ФП в квазіізотермічному режимі; 3 - робота газового двигуна в режимі х.х. (післяпусковий прогрів ДГД) для здійснення нагріву ТА УТС в процесі фізичного нагріву ТАМ ФП

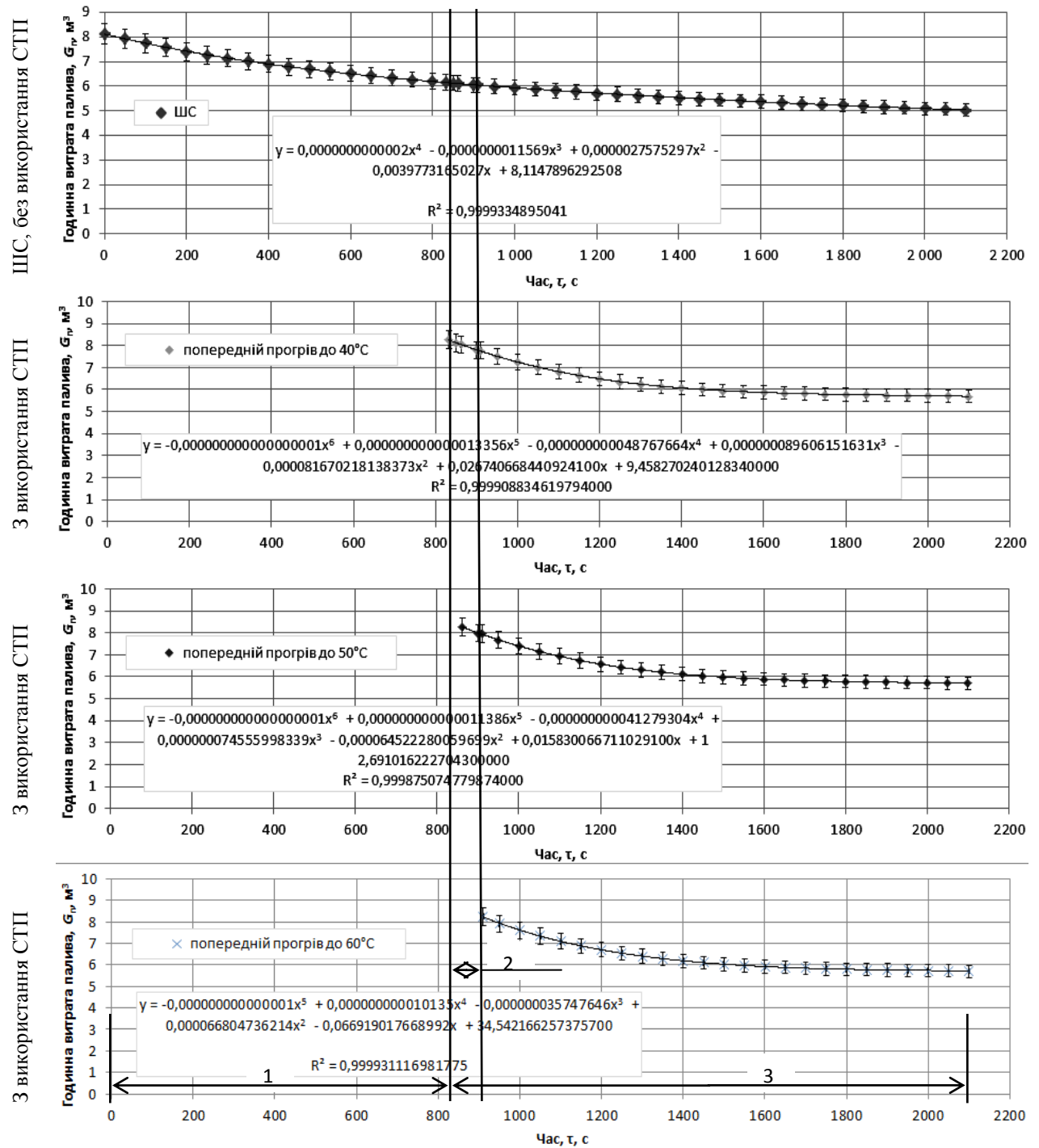


Рисунок 4.9 - Зміна годинної витрати G_T газового палива під час роботи ДГД 6Ч 12/14 без СТП – зі ШС з використанням СТП (з відносною планкою похибки 5%) в процесі повного циклу розрядки – зарядки ТА, в залежності від режимів роботи передпускового прогріву

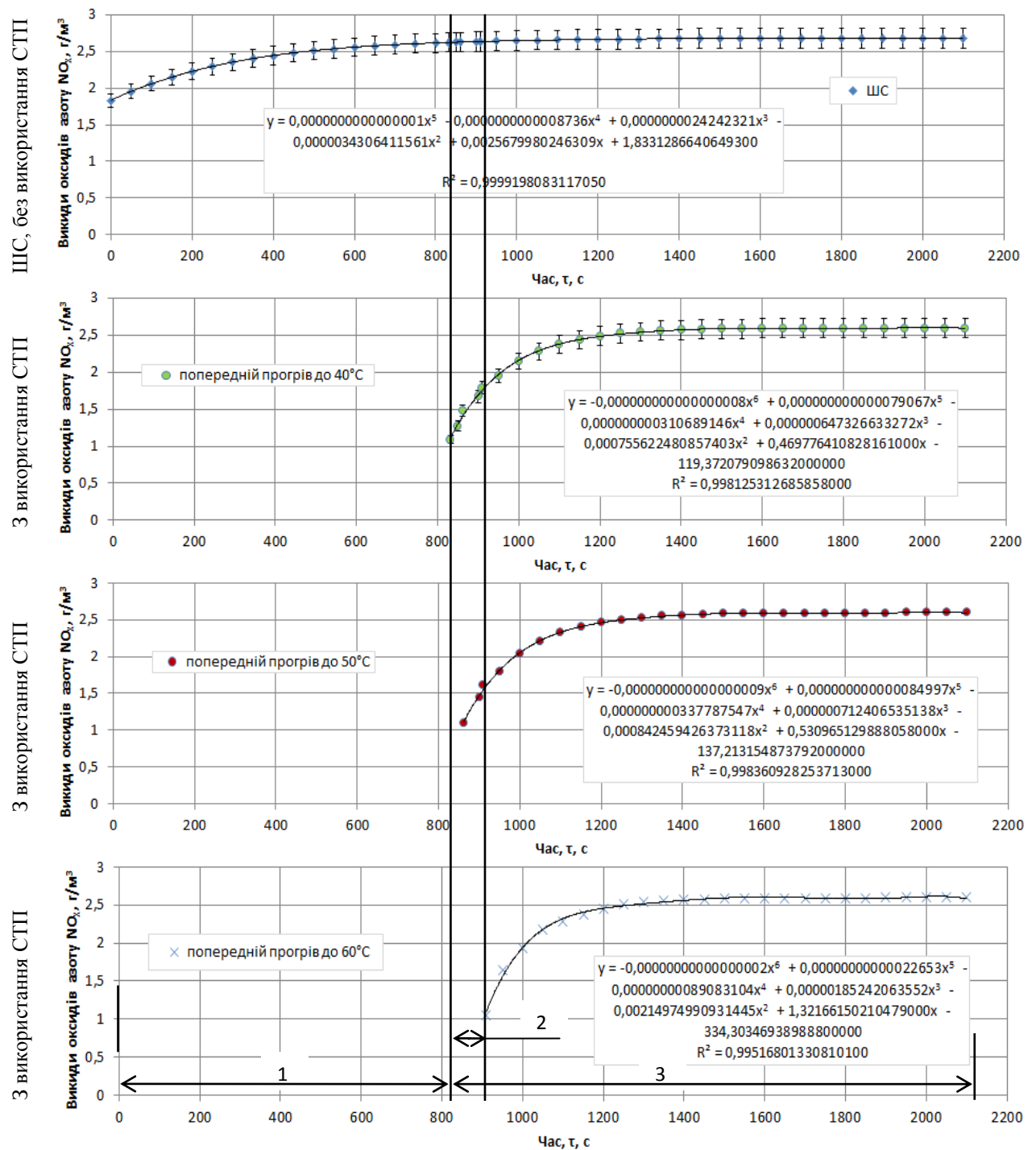


Рисунок 4.10 - Зміна питомих викидів оксидів азоту NO_x під час роботи ДГД 6Ч 12/14 без СТП – зі ШС з використанням СТП (з відносною планкою похибки 5%) в процесі повного циклу розрядки – зарядки ТА, в залежності від режимів роботи передпускового прогріву

З отриманих залежностей видно, що газовий двигун з ТА фазового переходу і прискорюючим насосом для прогріву двигуна прогривається до температури $t^{\circ}\text{C} = 40$ (50/60) $^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.9 – 4.10) відповідно за 831 (865/895) с., 1343 (1438/1541) с., 1846 (1996/2154) с., що менше на 539 с. (39,3%) (505 с. (36,9%) / 898 с. (34,7%)), на 521 с. (28%) (426 с. (23%) / 827 с. (44%)), на 1003 с. (35%) (853 с. (29,9%) / 853 с. (30%)) у порівнянні з прогрівом ДГД зі штатною системою охолодження до температури 50 $^{\circ}\text{C}$, яка становить 1370, 1864, 2849 с. відповідно для різних температур оточуючого середовища 20, 0, -20 $^{\circ}\text{C}$. Аналогічно МО ДГД прогривається до температури $t^{\circ}\text{C} = 40$ (50/60) $^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.9 – 4.10) відповідно за 815 (851/906) с., 136 (1498/1605) с., 1908 (2096/2213) с., що менше на 635 с. (44%) (599 с. (41%) / 544 с. (38%)), на 682 с. (34%) (500 с. (25%) / 393 с. (20%)), на 1123 с. (37%) (935 с. (31%) / 818 с. (27%)) у порівнянні з прогрівом МО ДГД зі штатною системою охолодження до температури 50 $^{\circ}\text{C}$, яка становить 1450, 1998, 3031 с. відповідно для різних температур оточуючого середовища 20, 0, -20 $^{\circ}\text{C}$. При цьому газовий двигун витрачає менше палива відповідно на 0,746 (0,636 / 0,485) м^3 , на 0,895 (0,789 / 0,643) м^3 , на 0,982 (0,933 / 0,861) м^3 що менше на 1,678 м^3 (69%) (1,788 м^3 (7,38%) / 1,939 м^3 (80%)), на 2,259 м^3 (72%) (2,359 м^3 (75%) / 2,504 м^3 (79%)), на 1,782 м^3 (73,9%) (2,831 м^3 (75,2%) / 2,903 м^3 (77,2%)) у порівнянні з прогрівом ДГД зі штатною системою охолодження до температури 50 $^{\circ}\text{C}$, що становить 2,424, 3,147, 3,764 м^3 відповідно [22, 24, 63]. Це пояснюється тим, що в процесі прогріву ДГД з СТП спочатку прогривається від накопиченої в ТА теплової енергії, коли ДГД взагалі не працює, а після запуску дизеля зразу ж прогривається від розробленої СТП, а не тільки від теплової енергії згорання палива за допомогою штатного водяного насоса (помпи) ДГД. При цьому, передпусковий прогрів здійснюється для різних температур ОР в СО ДГД, тобто до $t = 40$ (50/60) $^{\circ}\text{C}$, а вже після досягнення цієї температури запускається двигун і починає працювати СПП ДГД. Це здійснюється на відміну від ДГД зі штатною СО, коли двигун починає працювати на х.х. від моменту пуску до досягнення температури +50 $^{\circ}\text{C}$ («гарячого пуску», коли

можливо приймати навантаження), з усіма недоліками прогріву в режимі х.х. роботи двигуна.

На рис. 4.11 показані порівняльні діаграми значень: терміну (часу) прогрівання (а); годинної витрати палива на прогрів при здійсненні пуску і прогріву (б); викидів оксидів азоту при прогріві (в); ОР газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) з різними комплектаціями системи охолодження (без СТП і з СТП у складі тільки ТА і прискорюючого насосу) при різних температурах оточуючого повітря T_{oc} [63].

Таким чином, порівнюючи час прогріву τ , годинні витрати G_T газового палива, викиди оксидів азоту NO_x під час виконання пуску і прогріву його до температури «гарячого прогріву» видно, що СТП дозволяє суттєво зменшити час прогріву ОР (до 24-46%), час прогріву МО (до 20-44%), показники екологічності (для NO_x до 70-80%) й економічності (до 68-82%) ДГД при вирішенні проблем передпускової і післяпускової теплової підготовки й прискорення прогріву дослідного газового двигуна за допомогою розробленої системи теплової підготовки на основі ТА фазового переходу [22, 24, 63].

Для урахування особливостей застосування СТП на основі ТА фазового переходу в системах охолодження і мащення газового двигуна в удосконалену методику розрахунку [22, 24, 138 – 143] були закладено умови, основні припущення і модельні уявлення про ТА системи теплової підготовки, особливості робочого процесу системи керування СТП (при яких відбувається включення, робота і відключення СТП з ТА в частині СО і СМ [11]) газового двигуна. В удосконаленій методиці розрахунку були передбачені наступні варіанти використання підсистем СТП: ШС СО і СМ; ШС СО і СМ з працюючими додатковими прискорюючими насосами ППД для більш швидкої циркуляції технологічних рідин; при застосуванні ТА фазового переходу СТП в СО і СМ з працюючими прискорюючими насосами ППД для швидкої циркуляції технологічних рідин (ОР і МО) газового двигуна. За удосконаленою методикою формувався цикл

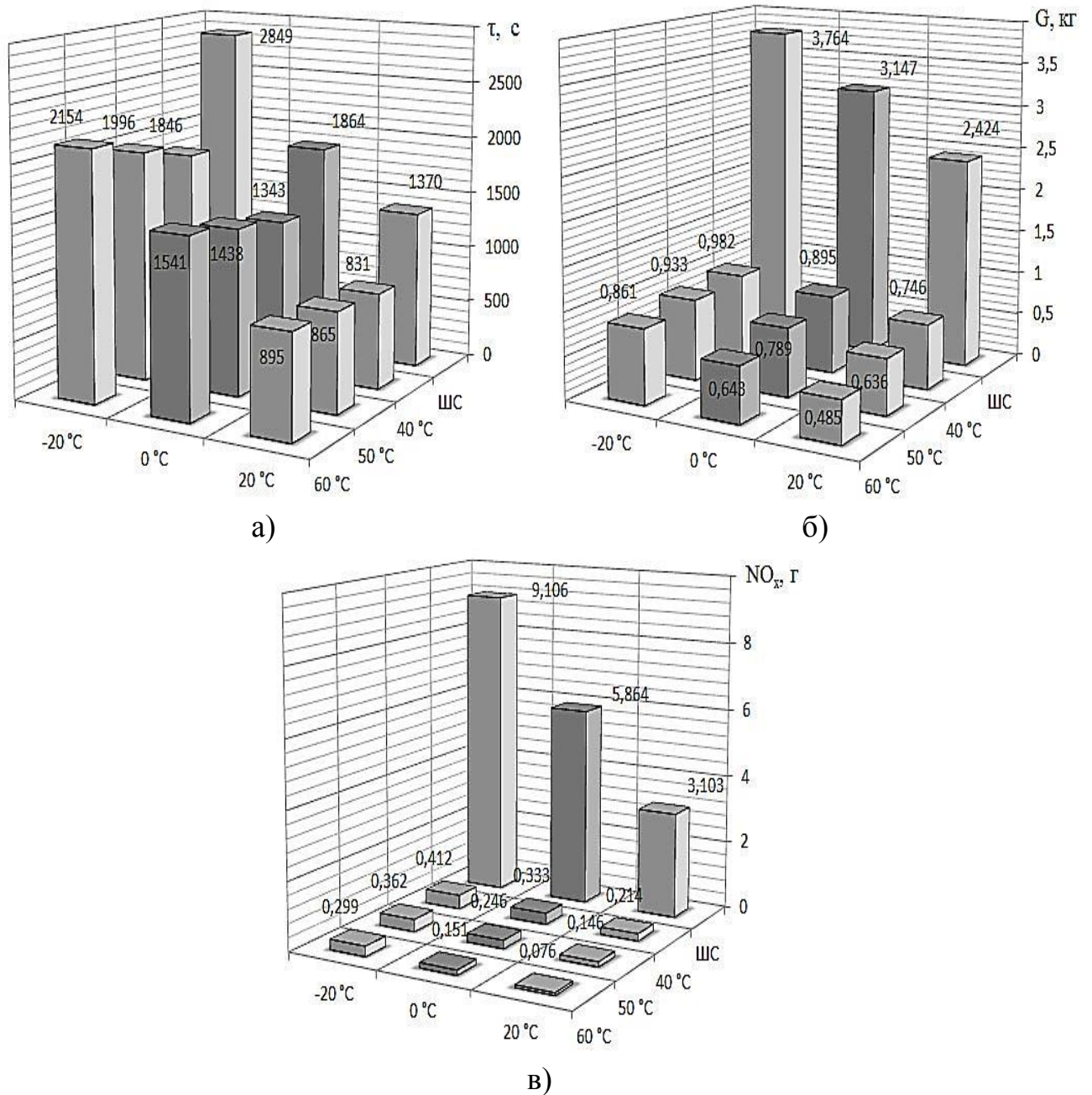


Рисунок 4.11 - Порівняльні діаграми отриманих значень: терміну (часу) прогрівання (а); годинної витрати палива на прогрів при здійсненні пуску і прогріву (б); викидів оксидів азоту при прогріві (в); ОР газového двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) з різними комплектаціями системи охолодження (без теплового акумулятора і з СТП у складі ТА і прискорюючого насосу) при різних температурах оточуючого повітря T_{oc} :

ШС – штатна система (без теплового акумулятора і прискорюючого насосу (при швидкості циркуляції охолоджуючої рідини 0,08 м/с));
 40 °C, 50 °C, 60 °C – температура ОР, до якої проводився попередній прогрів двигуна перед пуском (з ТА і прискорюючим насосом при швидкості циркуляції охолоджуючої рідини 0,22 м/с)

передпускового і післяпускового прогріву ОР і МО газового ДВЗ від початку розряджання ТА фазового переходу (початок теплової підготовки ДВЗ) до повного його заряджання від енергії ВГ, що визначається температурою фазового переходу ТАМ ФП. Розрахункове дослідження газового двигуна 6Ч 12/14 проводилось в інтервалі температур оточуючого повітря: 20 °С (рис. 4.9 – 4.10), 0 °С, -20 °С.

Роботу СТП в процесі теплової підготовки в частині передпускового і післяпускового прогріву ОР і МО умовно можливо розділити на декілька послідовних режимів [63, 107, 138 - 143]: 1 – накопичення теплової енергії ВГ в ТА СТП до температури вище фазового переходу ТАМ ФП для забезпечення передпускової підготовки; 2 – прискорена тепла підготовка - прогрів ОР і МО за допомогою СТП для СО і СМ газового двигуна 6Ч 12/14 до температур «гарячого пуску» в умовах експлуатації; 3 – пуск газового двигуна при температурі ОР і МО не менше 40-50 °С; 4 – заряджання ТА фазового переходу СТП тепловою енергією ВГ до температури вище фазового переходу ТАМ ФП.

В роботі [63] на рис. 3.29-3.34 показані отримані шляхом розрахунку за удосконаленою автором методикою, в залежності від часу τ , с. роботи СТП досліджуваного газового двигуна, при температурі оточуючого середовища +20 °С наступні залежності теплової підготовки газового ДГД: зміна температур t °С в ТА фазового переходу СТП і різних зонах ДГД, а в табл. 4.1 – 4.2 значення годинні витрати G_t газового палива, викиди оксидів азоту NO_x , під час передпускової теплової підготовки і виконання післяпускового прогріву його до температури «гарячого пуску» (50 °С) від різних температур оточуючого середовища (20 °С, 0 °С, -20 °С), а також термінові (часові) результати прогріву ДГД зі штатною СО і СМ двигуна та з СТП.

Виходячи з отриманих результатів теплової підготовки - прогріву ДГД за відповідними зонами можливо стверджувати, що передпусковий прогрів ОР і МО газового двигуна за розробленим алгоритмом роботи СТП

Таблиця 4.1 - Результати досліджень за удосконаленою методикою розрахунку роботи системи теплової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 від температури оточуючого середовища до температури «гарячого пуску» та можливості навантаження при здійсненні прогріву ОР і МО

Параметр		Температура оточуючого середовища, T_{oc}		
		20 °C	0 °C	-20 °C
1		2	3	4
Час попереднього прогріву охолоджуючої рідини ДГД				
До 50 °C без СП (ШС),	с	1370	1864	2849
До 40 °C з СП,	с	831	1343	1846
економія у порівнянні зі ШС,	с (%)	539 (39,3%)	521 (28%)	1003 (35%)
До 50 °C з СП,	с	865	1438	1996
економія у порівнянні зі ШС,	с (%)	505 (36,9%)	426 (23%)	853 (29,9%)
До 60 °C з СП,	с	895	1541	2154
економія у порівнянні зі ШС,	с (%)	475 (34,7%)	827 (44%)	853 (30%)
Час попереднього прогріву моторної оливи ДГД				
До 50 °C без СП (ШС),	с	1450	1998	3031
До 40 °C з СП, с	с	815	1316	1908
економія у порівнянні зі ШС,	с (%)	635 (44%)	682 (34%)	1123 (37%)
До 50 °C з СП, с	с	851	1498	2096
економія у порівнянні зі ШС,	с (%)	599 (41%)	500 (25%)	935 (31%)
До 60 °C з СП, с	с	906	1605	2213
економія у порівнянні зі ШС,	с (%)	544 (38%)	393 (20%)	818 (27%)
Годинна витрата палива при здійсненні теплової підготовки ДГД				
До 50 °C без СП (ШС),	м ³	2,424	3,147	3,764
До 40 °C з СП,	м ³	0,746	0,895	0,982
економія у порівнянні зі ШС,	м ³ (%)	1,678 (69%)	2,252 (71,6%)	2,782 (73,9%)
До 50 °C з СП,	м ³	0,636	0,789	0,933
економія у порівнянні зі ШС,	м ³ (%)	1,788 (73,8%)	2,358 (74,5%)	2,831 (75,2%)
До 50 °C з СП,	м ³	0,485	0,643	0,861
економія у порівнянні зі ШС,	м ³ (%)	1,939 (80%)	2,504 (79,6%)	2,903 (77,1%)
Викиди оксидів азоту при здійсненні теплової підготовки ДГД				
До 50 °C без СП (ШС),	г	3,103	5,864	9,106
До 40 °C з СП,	г	0,214	0,333	0,412
зменшення у порівнянні зі ШС,	г (%)	2,889 (93%)	5,531 (94%)	8,694 (95,4%)
До 50 °C з СП,	г	0,146	0,246	0,362
зменшення у порівнянні зі ШС,	г %	2,957 (95%)	5,618 (96%)	8,744 (96%)
До 60 °C з СП,	г	0,076	0,151	0,299
зменшення у порівнянні зі ШС,	г %	3,027 (97,6%)	5,713 (97%)	8,807 (96,7%)

Таблиця 4.2 - Термінові (часові) результати передпускового і післяпускового прогріву ДГД зі штатною системою та з СТП

Температура навколишнього середовища	Прогрів ОР від ТА до 50 °С, с	Прогрів МО від ТА до 50 °С, с	Прогрів ОР і МО від 50 °С до 85 °С СТП+ДГД, с	Зарядка ТА від ДГД, с	Прогрів ОР ДГД класичним методом до 50 °С, с	Прогрів МО ДВЗ класичним методом до 50 °С, с
20 °С	865	851	580	1355	1370	1450
0 °С	1438	1498	580	1830	1864	1998
-20 °С	1996	2096	580	2795	2849	3031

дозволяє краще прогріти зону колінчастого валу двигуна, ніж у випадку, коли передпусковий прогрів проводиться тільки для однієї ОР [22]. Це пояснюється особливостями конструкції газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2), де оболонка СО є єдиним елементом, що сполучається з гільзою циліндра ззовні і суттєво впливає на її тепловий стан, а головна масляна магістраль СМ двигуна винесена за конструкцію блоку циліндрів і охолоджується повітрям та не впливає на тепловий стан двигуна в цілому при здійсненні передпускового і післяпускового прогріву. Одночасно забезпечується передпускове підвищення тиску в системі мащення, що також є доцільним для зменшення тертя в кінематичних парах двигуна перед здійсненням пуску в умовах експлуатації.

На представлених температурних режимах СТП працює наступним чином: прогрів ОР ДВЗ від ТА триває 865 с, 1438 с, 1996 с відповідно, а МО - 851 с, 1498 с, 2096 с відповідно, потім при досягненні температури $OP \geq 50$ °С і $MO \geq 50$ °С відбувається запуск ДГД і здійснюється комбінований прогрів СО і СМ двигуна від ТА СТП та теплової енергії згорання палива до температури ОР +85 °С за 580 с, після досягнення температури ОР 85 °С відбувається зарядка ТА СТП, яка триває 1355 с, 1830 с, 2795 с. відповідно. У той час як прогрів ОР ДГД зі штатною системою буде тривати 1370 с., 1864 с. та 2849 с. відповідно, а МО - 1450 с., 1998 с. та 3031 с. відповідно.

Більш детальні в частині значень економії (%) результати досліджень за представленою удосконаленою методикою розрахунку процесів роботи системи теплової підготовки ДГД 6Ч 12/14 в інтервалі від температури оточуючого середовища до температури «гарячого пуску» та можливості навантаження наведені в табл. 4.1 і 4.2. Порівнюючи час прогріву охолоджуючої рідини ДГД видно, що СТП з ТА дозволяє суттєво покращити показники часу прогріву (до 24-46%), а час прогріву моторної оливи ДГД – до 21-45,2% у порівнянні зі штатними системами двигуна. При цьому сумарна витрата палива на прогрів двигуна зменшується на 68-82%, викиди оксидів азоту – на 70-80%, що добре узгоджується з показниками теплової підготовки МО двигуна. Також суттєвим позитивним моментом при здійсненні прогріву теплової підготовки ДГД в частині МО є додатковий передпусковий прогрів зони колінчастого валу двигуна.

4.3 Оцінка доцільності прийнятих рішень щодо передпускової і післяпускової підготовки газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП

При оцінюванні роботи СТП в різних варіантах комплектації виходили з наступних міркувань. СТП являє собою поєднання чотирьох незалежних підсистем: УТС (з ТА ФП), ППД, КТА і НМО [204]. Перші дві підсистеми забезпечують роботу ТА і, працюючи спільно, фактично забезпечують роботу газового двигуна 6Ч 12/14 при виконанні передпускового і післяпускового прогріву двигуна (розділ 2). КТА забезпечує довготривале зберігання накопиченої теплової енергії ОР і МО у власному контактному ТА. НМО забезпечує довготривале зберігання накопиченої теплової енергії МО у власній ємності, оснащений ТА. Дослідження на цьому етапі ставило за мету оцінити і порівняти можливість використання при передпусковому і післяпусковому прогріві газового двигуна складових СТП, які працюють окремо і незалежно одна від одної, так і роботу всієї СТП, що працює

одночасно при використанні всіх складових в різних комбінаціях здійснення теплової підготовки.

Виходячи з розроблених алгоритмів передпускового і післяпускового прогріву СО і СМ газового двигуна були складені 11 варіантів для виконання аналізу використання складових розробленої СТП (табл. 4.3). 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 $T_{OP} \approx 50$ °С і $T_{MO} \approx 50$ °С, хв., прогрів ОР і МО від 50 °С до 85 °С, хв. Аналіз параметрів роботи проводився окремо для СО і СМ двигуна при різних температурах оточуючого середовища: 20 °С, 0 °С, -20 °С. Результати передпускового і післяпускового прогріву за часом теплової підготовки ОР і МО газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП показані в додатку В, а за витратою палива і за викидами оксидів азоту при здійсненні теплової підготовки ОР і МО в додатку В. Порівняння показників для кожного з варіантів комплектації і технології використання СТП в абсолютних величинах і в % проводилось шляхом співставлення кожного з отриманих показників для відповідного варіанту системи з аналогічним для ШС газового двигуна 6Ч 12/14 (рис. 4.12 – 4.15).

Виходячи з отриманих результатів передпускового і післяпускового прогріву ОР і МО газового двигуна за відповідними варіантами комплектації СТП можливо стверджувати, що використання означених засобів прогріву за розробленими алгоритмами роботи системи дозволяє виконати з покращеними показниками, як передпусковий, так і прискорений післяпусковий прогрів дослідного газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2), а також покращення теплових показників в період довготривалої міжзмінної зупинки двигуна з використанням спеціальних розроблених засобів без роботи двигуна в режимі х.х. При цьому дослідний газовий двигун знаходиться в режимі передпускової теплової готовності за відповідною

Таблиця 4.3 – Варіанти для аналізу використання складових розробленої СТП для виконання передпускового і післяпускового прогріву газового двигуна 6Ч 12/14

№ варіанта	Комплектація СТП (позначення варіанта)	Конструкційні і технологічні особливості комплектування і використання варіанта СТП
1	ШС без СТП	Післяпусковий прогріву виконується тільки самим газовим двигуном зі штатною комплектацією СО і СМ. Передпусковий прогрів двигуна від зовнішніх джерел енергії неможливий.
2	ШС з ППД	Для виконання прискореного післяпускового прогріву використовуються тільки додаткові електричні насоси СО і СМ з модульованою подачею підсистеми ППД. Передпусковий прогрів двигуна від зовнішніх джерел енергії не можливий. При підтриманні $T_{OP} \approx T_{MO} \approx 50^\circ\text{C}$ ППД не використовувалась.
3	АТ	Для виконання передпускового і прискореного післяпускового прогріву використовуються: ТА фазового переходу, додаткові електричні насоси СО і СМ з модульованою подачею підсистеми ППД, підсистема утилізації теплової енергії ВГ з тепловим акумулятором УТС.
4	КТА	Для довготривалого зберігання накопиченої теплової енергії від нагрітих корпусних частин газового двигуна використовувався контактний тепловий акумулятор КТА. Передпусковий прогрів від зовнішніх джерел енергії не можливий. Для післяпускового прогріву і зберігання використовувались штатні системи СО і СМ газового двигуна без ППД.
5	НМО ($T_{TAM} = T_{o.c.}$)	Для довготривалого зберігання накопиченої теплової енергії МО газового двигуна використовувався накопичувач моторної оливи з тепловим акумулятором фазового переходу НМО, у якого $T_{TAM} = T_{o.c.}$. Передпусковий прогрів від зовнішніх джерел енергії не можливий. Для післяпускового прогріву і зберігання використовувались штатні системи СО і СМ газового двигуна без ППД.
6	НМО ($T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$)	Для довготривалого зберігання накопиченої теплової енергії МО газового двигуна використовувався попередньо прогрітий до $T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$ накопичувач моторної оливи з тепловим акумулятором фазового переходу НМО. Передпусковий прогрів від зовнішніх джерел енергії не можливий. Для післяпускового прогріву і зберігання використовувались штатні системи СО і СМ газового двигуна без ППД.
7	АТ + КТА	Комбінація ТА і КТА
8	АТ + НМО	Комбінація ТА і НМО, у якого $T_{TAM} = T_{o.c.}$
9	АТ + НМО ($T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$)	Комбінація ТА і попередньо прогрітого до $T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$ НМО
10	АТ + КТА + НМО	Комбінація ТА, КТА і НМО, у якого $T_{TAM} = T_{o.c.}$
11	АТ + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$)	Комбінація ТА, КТА і попередньо прогрітого до $T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$ НМО

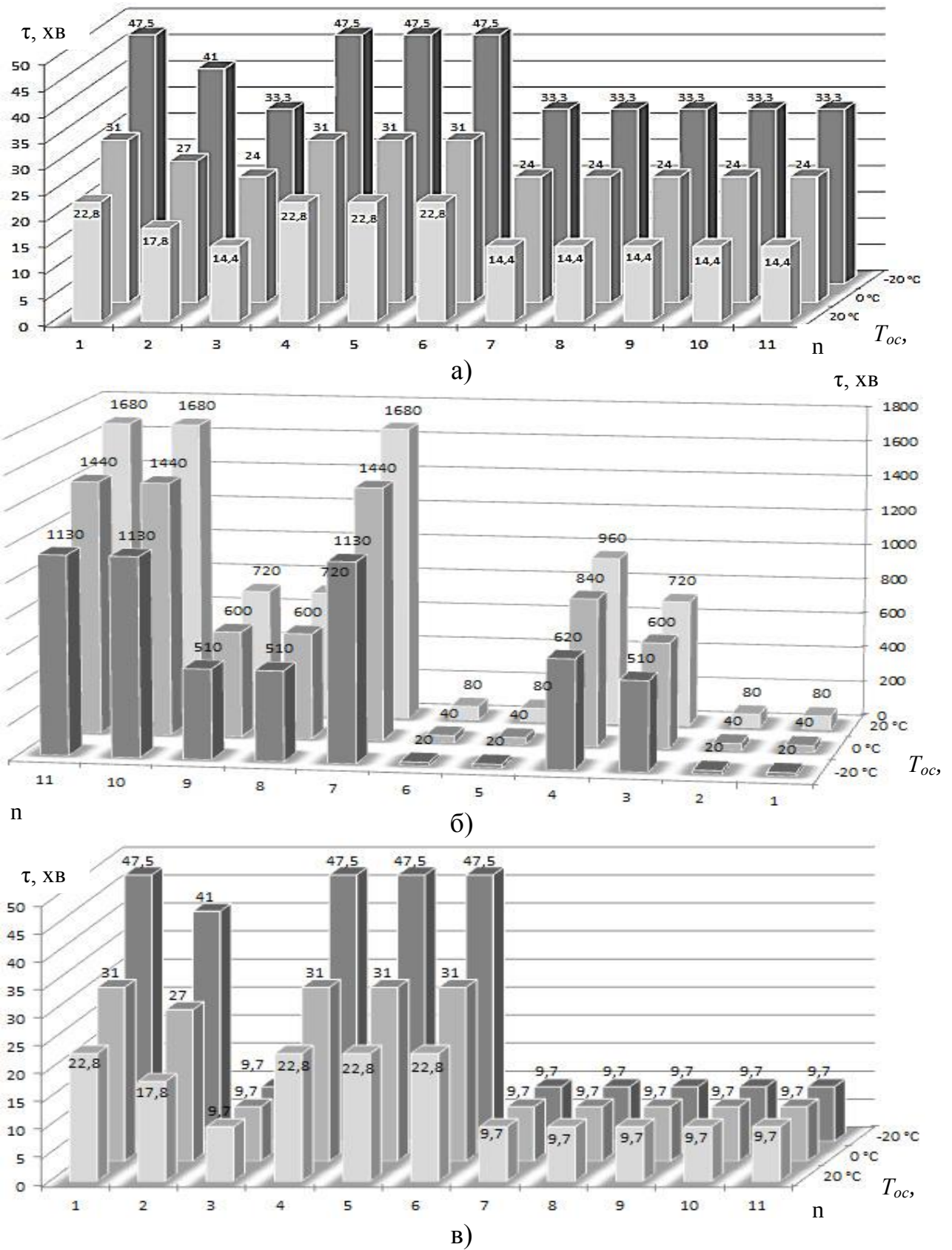
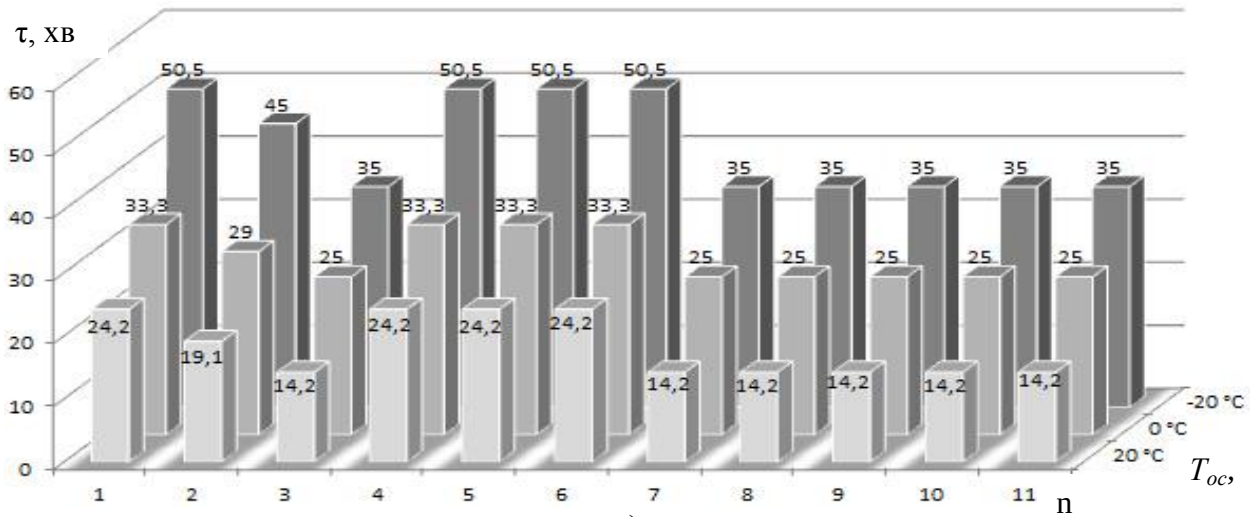
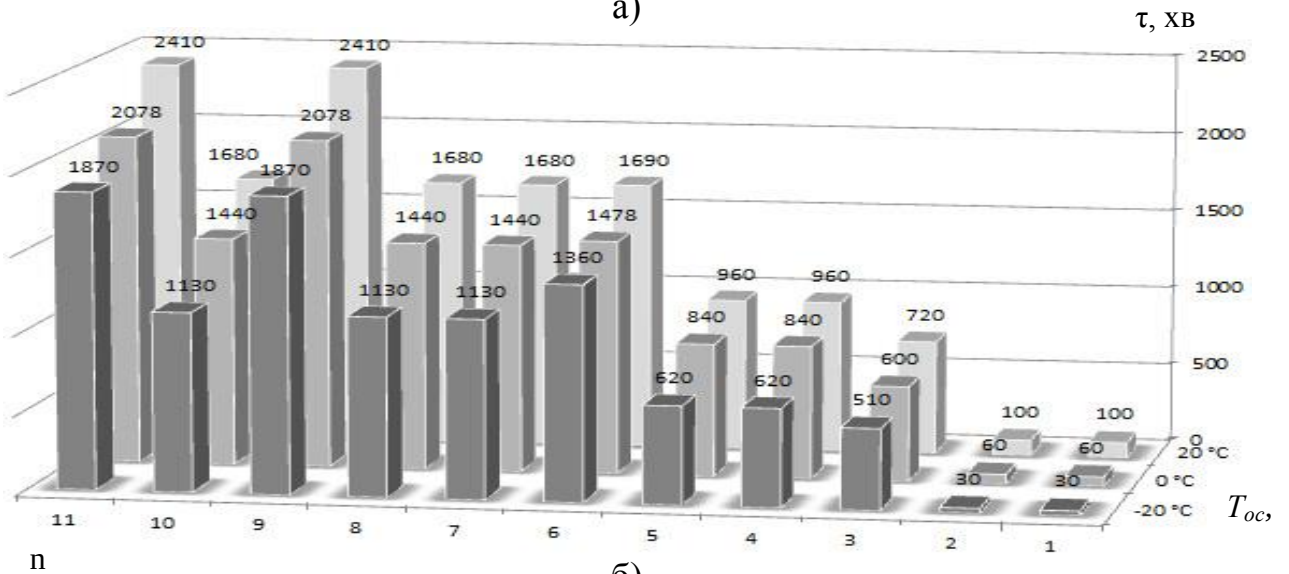


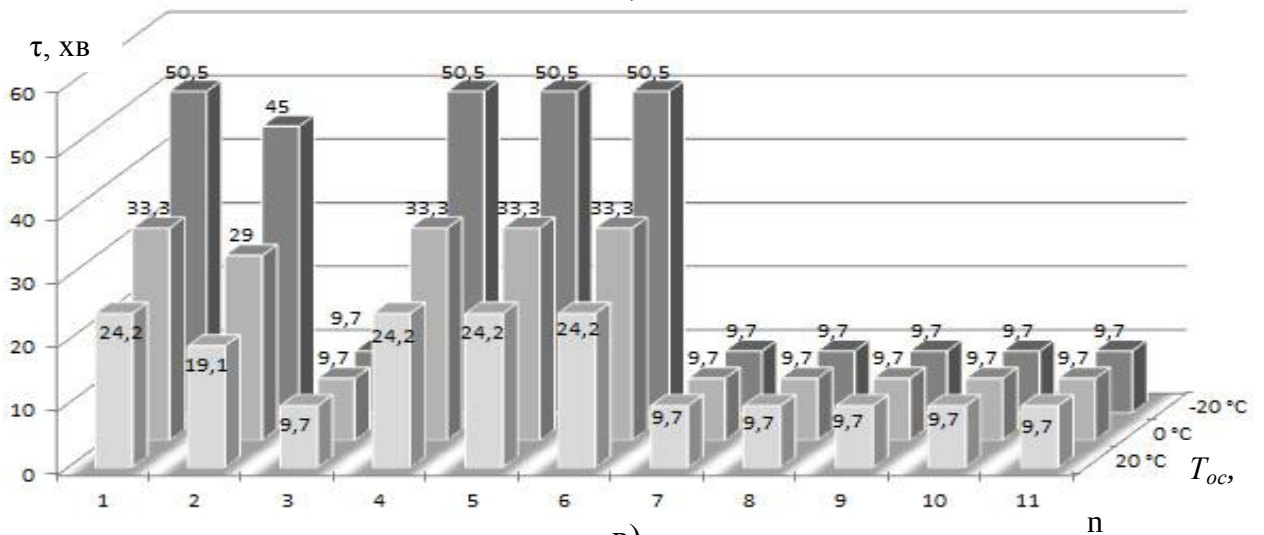
Рисунок 4.12 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за часом теплової підготовки ОР: а) прогрів ОР від T_{oc} до 50 °C, хв.; б) підтримання $T_{OP} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв.; в) прогрів ОР від 50 °C до 85 °C, хв.



а)



б)



в)

Рисунок 4.13 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за часом теплової підготовки МО: а) прогрів МО від T_{oc} до 50 °С, хв.; б) підтримання $T_{MO} \approx 50$ °С, хв.; в) прогрів МО від 50 °С до 85 °С, хв.

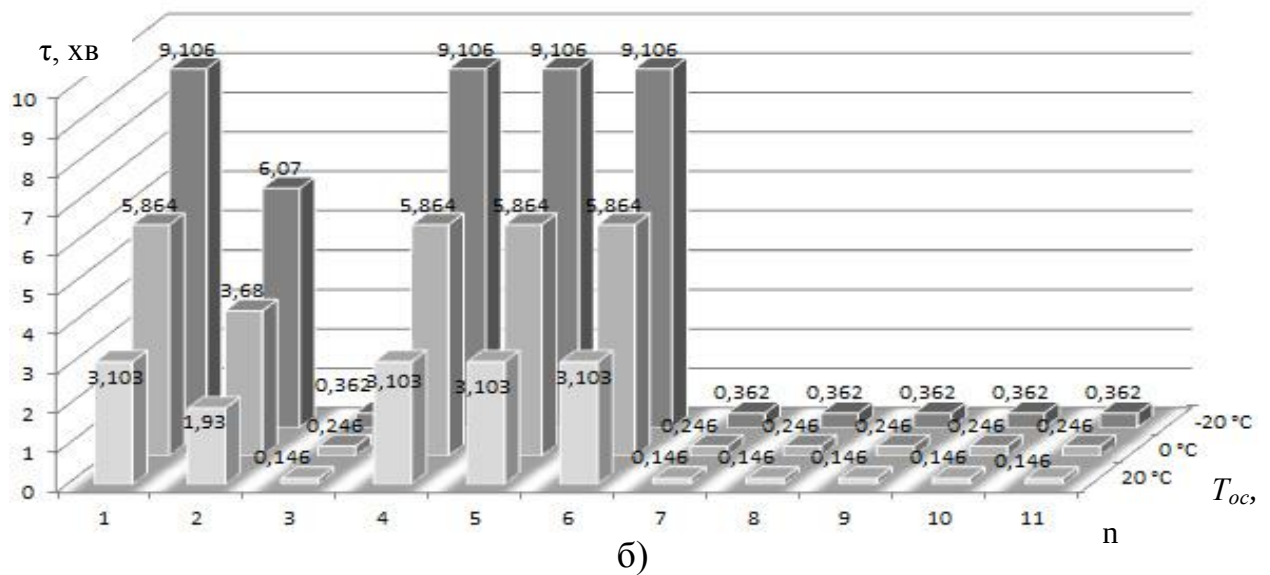
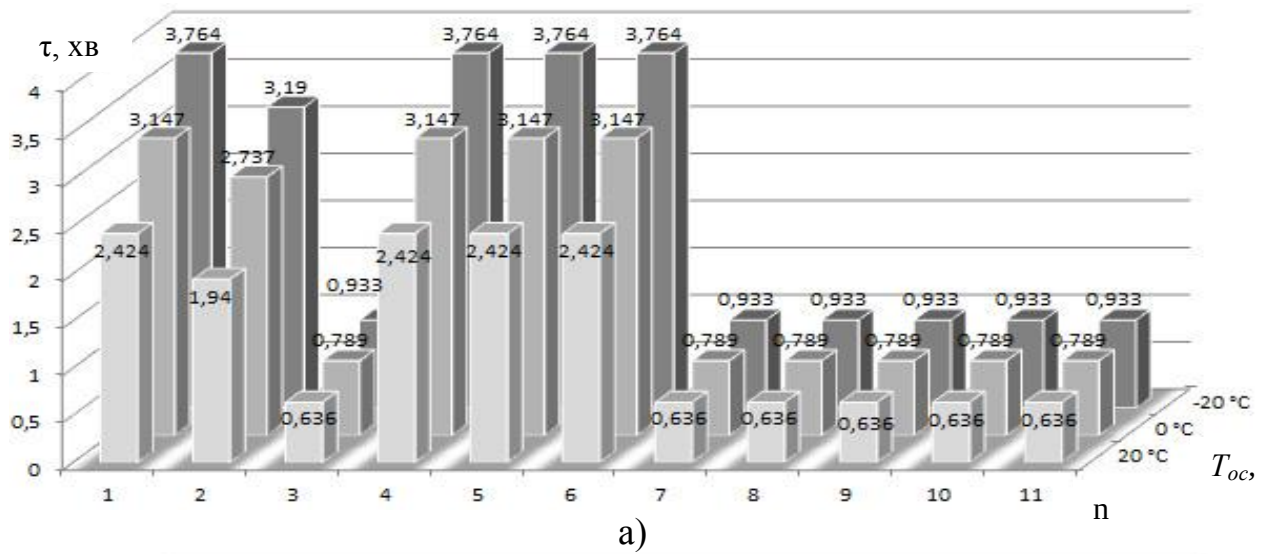
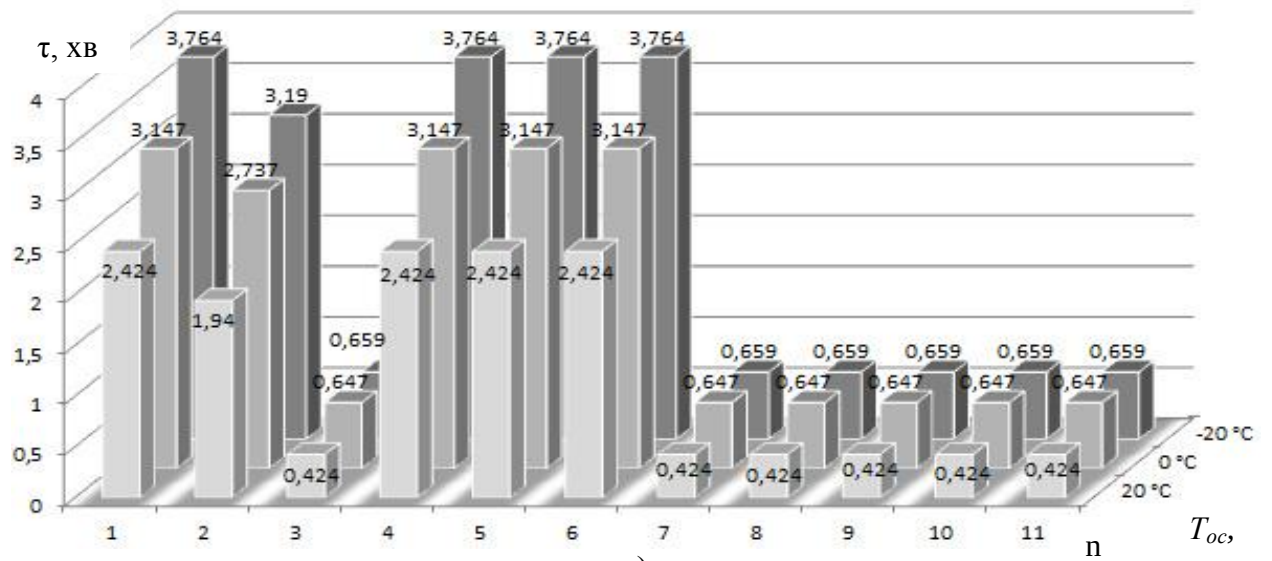
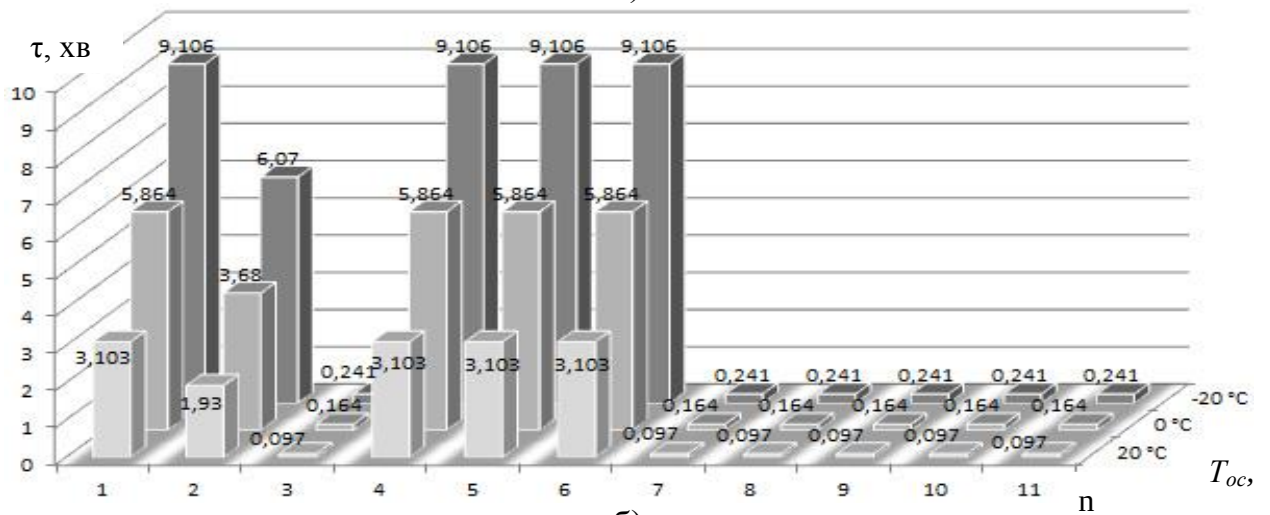


Рисунок 4.14 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за витратою палива (а), м³), за викидами оксидів азоту (б), г.), при здійсненні теплової підготовки ОР і МО від T_{oc} до 50 °C



а)



б)

Рисунок 4.15 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за витратою палива а), м^3), за викидами оксидів азоту (б), г.), при здійсненні теплової підготовки ОР і МО від 50 °C до 85 °C

температурою ОР і МО ($OP \geq 50$ °С і $MO \geq 50$ °С), при якій можливо здійснювати приймання навантаження.

Порівнюючи за результатами розрахункового дослідження показники теплового стану ДГД при здійсненні післяпускового прогріву штатних СО і СМ газового двигуна без СТП і за допомогою ППД (табл. 4.4) видно, що прогрів ОР від ДВЗ від температури оточуючого середовища до 50 °С і прогрів ОР від 50 °С до 85 °С за допомогою ППД покращує час прогріву на 5 (4/6,5) хв. або на 22 (12,9/14) %, а прогрів МО від ДГД від температури оточуючого середовища до 50 °С і прогрів МО від 50 °С до 85 °С за допомогою ППД покращує час прогріву на 5,1 (4,3/5,5) хв. або на 21 (12,9/10,89)% відповідно при $T_{oc} = 20$ (0/-20) °С. При цьому відбувається зниження витрати палива на 0,484 (0,41/0,574) м³ або на 20 (13/15) % відповідно при вказаних вище T_{oc} і зниження викидів для NO_x на 1,2 (2,18/3,05) г. або на 38,7 (37,1/37,1) % відповідно за рахунок тільки прискорення циркуляції ОР і МО. При довготривалому зберіганні теплового стану в межах $T_{OP} \approx 50$ °С і $T_{MO} \approx 50$ °С при непрацюючому двигуні і ППД час підтримання температур ДГД склав: 80 (40/20) хв. для ОР, 100 (60/30) хв. для МО при відповідних T_{oc} .

При співставленні варіантів дослідження використання окремих підсистем СТП для прогріву газового двигуна, а саме ТА, КТА і НМО (табл. 4.5), отримали, що для прискореного прогріву ОР і МО двигуна краще використовувати ТА, а для зберігання двигуна в прогрітому стані під час довготривалого міжзмінного простою – КТА (для СО) і НМО при $T_{ТАМ} = 85$ °С (для СМ). Аналіз параметрів роботи підсистем СТП показав, що використання ТА з власними підсистемами забезпечує покращення показників: за часом прогріву ОР від ТА від T_{oc} до 50 °С на 8,7 (7,8/14,8) хв. або на 37 (23,9/30)% відповідно, а прогріву МО від ТА від T_{oc} до 50 °С на 12 (9,8/16,5) хв. або на 41,8 (25,6/32,6)% відповідно; підтримання $T_{OP} \approx 50$ °С на 640 (560/490) хв. або у 9,80 (15,1/25,5) разів відповідно, а підтримання $T_{MO} \approx 50$ °С на 640 (600/510) хв. або у 6,3 (9,5/17) разів відповідно; прогрів ОР

від 50 °C до 85 °C на 13,1 (21,4/37,8) хв. або на 57,5 (69/79,6)% відповідно, прогрів МО від 50 °C до 85 °C на 14,5 (23,6/40,8) хв. або на 60 (71/80,8)% відповідно.

При цьому відбувається зниження витрати палива (додаток В): при здійсненні прогріву ОР і МО від ТА від T_{oc} до 50 °C на 1,788 (2,358/2,831) м³ або на 73,8 (74,5/75,2)% відповідно при вказаних вище T_{oc} і зниження викидів для NO_x на 2,957 (5,618/8,744) г. або на 75 % відповідно за рахунок використання накопиченої теплової енергії ТА при не працюючому двигуні в режимі х.х.; прогрів ОР і МО від 50 °C до 80 °C на 2 (2,5/3,105) м³ або на 82,5 (79,4/82,5)% відповідно при вказаних вище T_{oc} і зниження викидів для NO_x на 3,006 (5,7/8,86) г. або на 78% за рахунок використання одночасно теплової енергії при спалюванні палива в циліндрі двигуна і накопиченої теплової енергії ТА. При здійсненні підтримання $T_{OP} \approx 50$ °C двигун не працює, паливо не використовується, викиди відсутні, підтримання теплової енергії ОР і МО здійснюється тільки за рахунок ТА з підсистемою ППД.

При підтриманні $T_{OP} \approx 50$ °C газового двигуна з використанням окремих елементів (варіантів) СТП, а саме ТА, КТА і НМО (додаток В), доцільно використовувати контактний тепловий акумулятор КТА, який покращує показники теплової підготовки ОР для дослідного двигуна на 880 (800/600) хв. або у 11,5 (20,2/30,3) разів відповідно. Для підтримання $T_{MO} \approx 50$ °C газового двигуна доцільно використовувати НМО, який покращує показники теплової підготовки МО для дослідного двигуна на 1590 (1418/1330) хв. або у 16,2 (24/45) разів відповідно. Це пояснюється тим, що МО, при зливанні її в НМО, попадає відразу в теплоізольовану з усіх боків ємність, яка заздалегідь підігріта до $T_{TAM} = 85$ °C та втрати теплової енергії для фазового переходу ТАМ ФП не потрібні (як у випадку з варіантом 5 для НМО при $T_{TAM} = T_{oc}$), у зв'язку із тим, що він вже відбувся заздалегідь. При здійсненні підтримання $T_{OP} \approx T_{MO} \approx 50$ °C двигун не працює, паливо не використовується, викиди відсутні, підтримання теплової енергії ОР і МО здійснюється тільки за рахунок накопиченої в ТА і НМО теплової енергії.

При використанні комбінації варіантів поєднання підсистем в СТП (додаток В) найбільш доцільним залишається варіант з використанням ТА (або варіанти комплектації СТП з його участю), як для прогріву ОР і МО від T_{oc} до 50 °С, хв., так і для прогріву ОР і МО від 50 °С до 85 °С, хв. Покращення параметрів прогріву ОР і МО газового двигуна в такому варіанті розглянуто вище. Для довготривалого підтримання $T_{MO} \approx 50$ °С при не працюючому двигуні найбільш доцільно використовувати варіант поєднання підсистем СТП у вигляді ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85$ °С). Таке поєднання елементів і підсистем дозволяє покращити теплові показники газового двигуна для МО на 2350 (2022/1842) хв. або у 16,5 (35/63,2) разів відповідно. В той же час, для довготривалого підтримання $T_{OP} \approx 50$ °С при не працюючому двигуні найбільш доцільно використовувати наступні варіанти поєднання підсистем СТП: ТА + КТА, ТА + КТА + НМО і ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85$ °С). Таке поєднання елементів і підсистем дозволяє покращити теплові показники газового двигуна для ОР на 1650 (1430/1148) хв. або у 22 (34,8/56,2) разів відповідно.

В проведеному дослідженні можливо говорити про логічність і достовірність отриманих значень, що може бути підтверджені результатами раніше проведених досліджень авторів [22, 24, 33, 62, 66, 82, 103].

Для оцінки можливостей використання розробленої системи СТП з ДГД за багатоцільовим призначенням в умовах експлуатації (у відповідності до формули в табл. 2.1) скористались удосконаленою методикою (розділ 2) і стандартними вимогами до енергетичних і транспортних засобів з його можливим використанням (розділ 1). Розглядали наступні варіанти: 1 - застосування ДГД в якості джерела енергії на залізничному транспорті (вагони рефріджератори) 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 досліджуємих варіантів (табл. 4.3) 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. 4.16 – 4.17. Використання накопичувача охолоджуючої рідини (НОРТА), запропонованого автором роботи [12], в досліджуємих варіантах використання стаціонарної енергетичної установки з ДГД не можливо з технічних і технологічних міркувань. Тому в подальшому його не розглядаємо.

На рис. 4.16 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 задовільняють 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 °С і – 20 °С. Для ДГД експлуатація при температурах 0 °С і – 20 °С в умовах суднової енергетичної установки (СЕУ) на річковому і морському транспорті не можлива із-за того, що такі температури СЕУ не допускаються. Тому, можливо вважати, що ТА також можливо використовувати в означеному варіанті. Використання ж СТП для роботи автономної стаціонарної електростанції з інтервалом зберігання двигуна 720 хв. можливо, якщо температура оточуючого середовища знаходиться в межах тільки +20 °С. Для зберігання ДГД в межах 1400 хв. (залізничний транспорт) доступні повноцінно тільки 2 варіанти комплектації - ТА + НМО ($T_{TAM} = 85\text{ °C}$) і ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85\text{ °C}$), варіанти комплектації ТА+КТА; ТА+НМО і ТА+КТА+НМО для виконання вказаної задачі можуть використовуватись тільки в діапазоні температур + 20 °С і

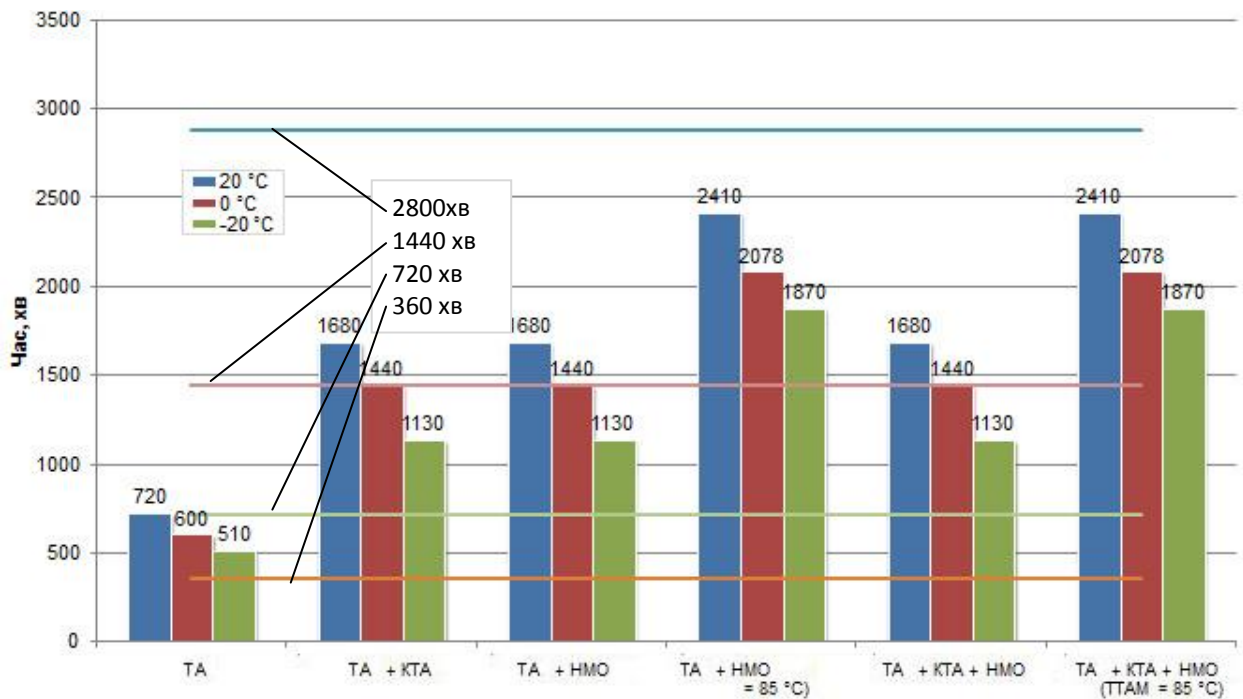


Рисунок 4.16 - Результати дослідження впливу варіантів комплектації СТП на час підтримання температури МО газового двигуна в межах ≈ 50 °C

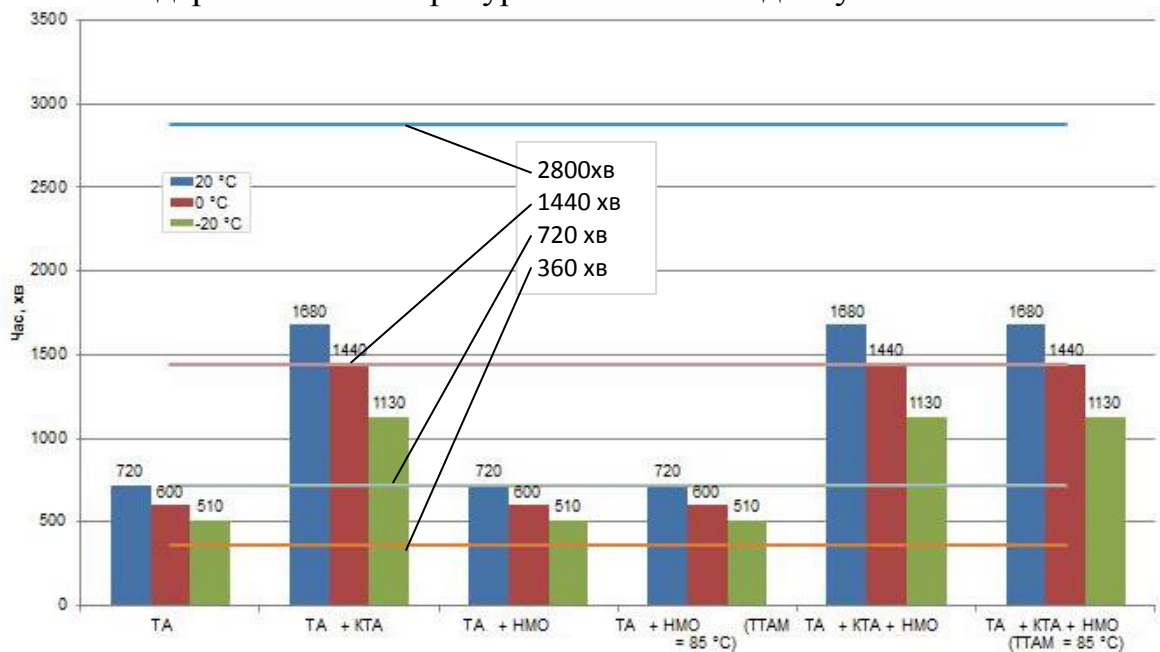


Рисунок 4.17 - Результати дослідження впливу варіантів комплектації СТП на час підтримання температури ОР газового двигуна в межах ≈ 50 °C



Рисунок 4.18 – Орієнтовна вартість варіантів комплектації СТП ДГД

0 °С. Термін зберігання 2800 хв. для МО, жоден з варіантів забезпечити не зміг.

В той же час, інтервали часу зберігання ОР ДГД (рис. 4.17) 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 ($T_{ТАМ} = 85\text{ °С}$) в інтервалі температур оточуючого середовища + 20 °С і 0 °С.

Орієнтовна вартість досліджуємих варіантів комплектації СТП ДГД показана на рис. 4.18.

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 °С до 85 °С за 9,7 хв. з витратою палива на виконання операції 0,424 м³. 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 ($T_{ТАМ} = 85\text{ °С}$), який може, з обмеженнями в частині ОР, в інтервалі температур оточуючого середовища + 20 °С і 0 °С використовуватись в умовах експлуатації.

В цілому можливо стверджувати, що використання СТП (додаток В, рис. 4.12 – 4.15) 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.

4.4 Висновки до розділу 4

1. Удосконалено методику розрахунку зміни і моніторингу теплових параметрів СО і СМ газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) за даними натурної характеристики СО і СМ, яка включена до загальної методики розрахунку процесів роботи СТП газового двигуна і дає можливість прогнозувати зміну температурних параметрів СО і СМ двигуна в динаміці досліджуваної системи.

2. Удосконалено методику розрахунку процесів 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 ФП в квазіізотермічному режимі.

3. Для формування бази вихідних даних удосконаленої методики розрахунку процесів теплової підготовки за допомогою СТП дослідного газового двигуна вихідні дані теплових параметрів при роботі ДГД в режимі х.х. були отримані за допомогою програмного комплексу Diesel-RK.

4. За допомогою досконаленої методики розрахунку процесів теплової підготовки визначений вплив швидкості циркуляції ОР і МО газового двигуна на час його прогріву, який показав, що за рахунок збільшення швидкості циркуляції ОР і МО в СТП до 0,22 м/с можливо скоротити час прогріву ОР і МО двигуна на 8-9 хв.

5. Оцінка впливу конструктивних параметрів та параметрів налаштування СТП на час передпускового і післяпускового прогріву, паливну економічність та викиди шкідливих речовин газового двигуна 6Ч 12/14 (К-159 М2) підтвердила покращення термінових показників прогріву, показників паливної економічності при роботі газового двигуна за розробленим циклом прогріву із застосуванням системи теплової підготовки, а також ефективність застосування СТП, як одного з дієвих напрямків

покращення екологічних показників ДГД без погіршення паливної економічності.

Порівнюючи час прогріву охолоджуючої рідини ДВЗ видно, що СТП з тепловим акумулятором дозволяє суттєво покращити показники часу прогріву (до 24-46%), а час прогріву моторної оливи ДВЗ – до 21-45,2% у порівнянні зі штатними системами двигуна. При цьому сумарна витрата палива на прогрів двигуна зменшується на 68-82%, викиди оксидів азоту – на 70 – 80%, що співпадає з показниками прогріву ДГД з СТП без прогріву МО двигуна. Суттєвим позитивним моментом при здійсненні прогріву МО ДВЗ є додатковий прогрів зони колінчастого валу дослідного газового двигуна.

При використанні СТП у варіантах використання його складових найбільш доцільним є використання ТА або різноманітні варіанти комплектації СТП з його участю. Для підтримання $T_{MO} \approx 50^\circ\text{C}$ при не працюючому двигуні доцільно для МО використовувати варіант поєднання підсистем СТП в комплектації ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$), забезпечуючи при цьому покращення теплових показників газового двигуна для МО на 2350 (2022/1842) хв. або у 16,5 (35/63,2) разів відповідно.

За результатами дослідження, в частині застосування СТП ДГД за функціональним призначенням, використання варіанта з ТА у конструкції є найкращим варіантом для забезпечення зберігання ДГД в межах 360 хв. в 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 ($T_{TAM} = 85^\circ\text{C}$), 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.

ОСНОВНІ 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 теплова 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 економічності.

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 70-80%.

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 «Теплосюз Україна».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крамаренко Г.В. Безгаражное хранение автомобилей при низких температурах / Г.В. Крамаренко, В. А. Николаев, А. И. Шаталов. - М.: Транспорт, 1984. – 135 с.
2. Авдонькин Ф.Н. Оптимизация изменения технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации. - М.: Транспорт, 1993. - 350 с.
3. Бакуревич Ю.П., Толкачев С.С., Шевелев Ф.Н. Эксплуатация автомобилей на Севере. - М.: Транспорт, 1973. - 180 с.
4. Говорущенко Н.Я. Техническая эксплуатация автомобилей. - Харьков: Вшца школа, 1984. - 312 с.
5. Говорущенко Н.Я. Экономия топлива и снижение токсичности на автомобильном транспорте. - М.: Транспорт, 1990. - 135 с.
6. Лосавио Г.С. Эксплуатация автомобилей при низких температурах. - М.: Транспорт, 1973. - 120 с.
7. Резник Л.Г., Копотилов В.И. Эксплуатация автомобилей при низких температурах. - Тюмень: ТюмИИ, 1989. - 64 с.
8. Ертман С.А. Приспособленность автомобилей к зимним условиям эксплуатации по температурному режиму двигателей / С.А. Ертман // Дис. канд. техн. наук по специальности 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта / ТюмГНГУ - Тюмень, 2004, 180 с.
9. Гринберг Л.С. Запуск дизеля при низких температурах / Л.С. Гринберг, Н.Г. Коровин. // – М.: Механизация и электрификация сельского хозяйства, 1990. - № 2. -С.48.
10. Поликер Б.Е. Дизельные двигатели для электроагрегатов и электростанций / Б.Е. Поликер, Л.Л. Михальский, В.А. Марков, В.К. Васильев, Д.И. Буханец // – М.: Легион-Автодата, 2006. – 328с.
11. Карнаухов Н.Н. Повышение приспособленности мобильных строительных машин к суровым условиям эксплуатации / Н.Н. Карнаухов // Тюмень: ТюмИИ, 1993. - 223 с.

12. Грицюк А.В. Новые способы предпусковой подготовки автотракторных дизелей и их испытание в реальных условиях зимней эксплуатации / А.В. Грицюк, Д.В. Демиденко, А.Г. Белоус, Ю.Д. Ступин // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей: Материалы X Междунар. науч.-практ. конф. – Владимир: ВлГУ, 2005. – С. 58.

13. Карташевич А.Н. Улучшение пусковых качеств автотракторных дизелей в зимний период эксплуатации: Монография / А.Н. Карташевич, Г.М. Кухаренок, А.В. Гордеенко, Д.С. Разинкевич: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия. - Мн.: Изд. ООО «Красико-Принт», 2005. - 180 с.

14. Денисов А.С. Применение устройства предпусковой смазки для оптимизации работы подшипников коленчатого вала на пусковых режимах/ А.С. Денисов, Р.И. Альмеев // Журнал Автомобильных Инженеров №5 (70) 2011, с. 40-45.

15. Шеховцов А.Ф. Процессы в перспективных дизелях // Шеховцов А.Ф., Абрамчук Ф.И., Крутов В.И., Марченко А.П., Разлейцев Н.Ф., Сукачев И.И., Третьяк Е.И., Шокотов Н.К., Э. Эплер / Под ред. А.Ф.Шеховцова. – Х.: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. – 352 с.

16. Ткач М.Р. Утилизация низкопотенциального тепла малооборотных ДВС на базе гидридной технологии / М.Р. Ткач, Б.Г. Тимошевский, С.М. Доценко, Ю.Н. Галынкин // Миколаїв, НУК ім. Нахімова, Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2013, № 8 (105), с. 61-66, ISSN 1727-7337.

17. Ерощенко, С.А., Выбор рациональной системы прогрева тепловозных дизелей [Текст] / С.Г.Жалкин, В.Г.Пузырь, Д.С.Жалкин, В.М.Бочаров //Сб. науч. трудов. –Харьков, УкрГАЗТ, - 2008. – Вып. 96. – С. 174-185

18. Каграманян, А.О. Використання акумуляторів теплоти, як альтернативного джерела енергії при прогріві тепловозів / А. О. Каграманян,

А. В. Онищенко // Залізничний транспорт України : науково-практичний журнал. - 2011. - № 1. - С. 49-51

19. Гутаревич Ю.Ф., Александров В.Д., Грицук И.В., Постников В.А., Добровольский А.С., Адров Д.С. К выбору теплоаккумулирующих материалов теплового аккумулятора сохранения теплового состояния ДВС / Ю.Ф. Гутаревич, В.Д. Александров тощо // Вестник НТУ. – К.: НТУ. – 2012. – Вып. 26.

20. Пизинцали Л.В. Совершенствование процесса пуска судовых аварийных дизель-генераторов / Л.В. Пизинцали // Дис. канд. техн. наук по специальности 05.08.05 – Судовые энергетические установки / ОНМА - Одесса, 2006, 259 с.

21. Ерыганов А.В. Повышение надёжности пуска главного судового дизеля / А.В. Ерыганов // Дис. канд. техн. наук по специальности 05.05.03 – Двигатели и энергетические установки / ОНМА - Одесса, 2010, 199 с.

22. Адров Д.С. Покращення паливної економічності і екологічних показників двигунів внутрішнього згорання застосуванням системи комбінованого прогріву / Д.С. Адров // Автореф. ... канд. техн. наук / ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк, 2014. - 20 с.

23. Адров Д.С. Тепловий акумулятор як засіб підвищення ефективності пуску стаціонарного двигуна в умовах низьких температур / Д.С. Адров, І.В. Грицук, Ю.В. Прилепський, В.І. Дорошко // Збірник наук. праць ДонІЗТ, вип. 27.- Донецьк, 2011.- С. 117 – 126.

24. Грицук І.В. Концепція забезпечення оптимального температурного стану двигунів і транспортних засобів в умовах експлуатації: Дис... докт. техн. наук: 05.22.20 – експлуатація і ремонт засобів транспорту / ХНАДУ – Харків, 2016, 552 с.

25. Грицук І.В. Дослідження роботи системи передпускового підігріву і прискореного прогріву з тепловим акумулятором для двигунів внутрішнього згорання стаціонарних і мобільних машин будівельної галузі / І.В. Грицук,

Ю.В. Прилепський, І.Ф. Рибалко, Р.І. Рибалко, Д.С. Адров // Техніка будівництва.-2011. - №27. – С.4-10

26. Григорьев М.А., Пономарев Н.Н. Износ и долговечность автомобильных двигателей. - М.: Машиностроение, 1976, - 246 с.

27. Семенов Н.В. Эксплуатация автомобилей в условиях низких температур / Н.В. Семёнов. - М.: Транспорт, 1993. - 190 с.

28. Белоусов И.С. Пуск тракторных дизелей: Учеб. пособие / И.С. Белоусов, П.И. Федюнин / Новосиб. гос. аграр. ун-т. Инж. ин-т. - Новосибирск, 2007. - 120 с.

29. Гордеев А.В. Улучшение пусковых свойств и условий работы автотракторных дизелей в зимний период эксплуатации: Дис. кан. тех. наук: 05.20.03, 05.04.02.-Минск, 1997. 183 с.

30. Цуцоев В.И. Зимняя эксплуатация тракторов и автомобилей. - М.: Колос, 1993. 173 с.

31. Квайт С.М., Менделевич Я.А., Чижков Ю.П. Пусковые качества и системы пуска АТД. - М.: Машиностроение, 1990. 256 с.

32. Работа двигателей в условиях зимней эксплуатации // Сб. науч. тр. - Иркутск СХИ, 1986. - 37 с.

33. Вашуркин И.О. Тепловая подготовка и пуск ДВС мобильных транспортных и строительных машин зимой / Вашуркин И. О. – СПб.: Наука, 2002. – 145 с.

34. Пути снижения расхода топлива тепловозами в северном регионе эксплуатации / В.А. Четвергов, А.И. Володин, В.Т. Данковцев [и др.]. - М.: Транспорт, 1991. - 57 с.

35. Бахмат Г.В., Тюлькин В.А. Коэффициент приспособленности автомобиля к зимним условиям эксплуатации // Известия вузов. Нефть и газ, - 1999, №3. - С. 92 - 101.

36. Конев В.В. Совершенствование системы предпусковой тепловой подготовки двигателя землеройной машины (на примере двигателя

экскаватора ЭО-4121А) // Автореферат на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. - 18 с.

37. Копотилов В.И. Межсменное хранение автомобилей в зимнее время. - Тюмень: ТюмИИ, 1993. 67 с.

38. 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.

39. Дизельные электростанции различной мощности от компании "ВИАР-СЕРВИС" [Электронный ресурс] / V & R service. Решение проблем электроснабжения – Режим доступа: http://www.vr-service.org/index_diesel_power.html.

40. Атрощенко В.А. Технические возможности повышения ресурса автономных электростанций энергетических систем. Монография. / В.А. Атрощенко, Ю.Д. Шевцов, П.В. Яцынин, Р.А. Дьяченко, М.Н. Педько. // Краснодар: Издательский Дом - Юг, 2010. - 192 с. ISBN 978-5-91718-056-4

41. Чухланцев Ю.П. Анализ рабочих циклов и особенностей использования двигателей на тюменском Севере. - Тюмень: ТИИ, 1988. – 71 с.

42. Тюлькин В.А., Эртман С.А. Методика экспериментальных исследований по определению темпов прогрева двигателей автомобилей // Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях. Матер, науч.-практ. конф. 22-23 ноября 2001, Ч. 3. - Тюмень: Нефтегазовый университет, 2002. - С. 43-46.

43. Бахмат Г.В., Тюлькин В.А. Коэффициент приспособленности автомобиля к зимним условиям эксплуатации // Известия вузов. Нефть и газ, - 1999, №3. - С. 92- 101.

44. Сычушкин, И.В. Автоматизированная система идентификации

тепловых параметров водяной системы энергоустановки транспортного средства [Электрон. ресурс] / И.В. Сычушкин (Эффективность системы электроэнергетики и экономии электрической энергии) – Режим доступа: http://www1.nntu.nnov.ru/RUS/NEWS/futuretechnology_2005/section02.doc

45. Эртман С.А. Темп прогрева двигателя // Проблемы эксплуатации транспортно-технологических машин. Матер. науч.- практ. конф. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. с. 123- 127.

46. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник. - М.: Энергия, 1978. - 480 с.

47. Теплотехника: Учеб. для вузов / Под ред. Баскакова А.П. - М.: Энер- гоатомиздат, 1982. - 264 с.

48. Теплотехнический справочник / Под ред. Юренева Ю.Н., Лебедева П.Д. в 2-х т. Т.1. - М.: Энергия, 1975. - 744 с.

49. Конанов С.А. Исследование температурного режима системы смазки тракторного двигателя при его эксплуатации в холодное время года. Ав-тореф.дисс... кандидата.техн.наук.- Омск, 1972.- 22 с.

50. Суранов Г.И. Уменьшение износа автотракторных двигателей при пуске. -М.: Колос, 1982. - 143 с.

51. Овчинников В.М. Экономичные режимы самопрогрева дизелей / В.М. Овчинников, В.А. Золотаренко, В.А. Халиманчик и др. //Локомотив - 1996.- №2.-с. 27.

52. Устройство для прогрева тепловозных дизелей перед пуском после длительных стоянок и при работе на холостом ходу в холодное время года на железных дорогах США // Железнодорожный транспорт за рубежом. - Экспресс-информация. - Вып.2. – М., 1983. - с.12.

53. Кочергин С.В. Разработка и обоснование параметров устройства электроподогрева моторного масла с саморегулированием мощности в двигателях внутреннего сгорания: Дис... канд. техн. наук: 05.20.03, 05.20.02.- Тамбов, 2003. 192 с.

54. Варшамов А.В. Выбор перспективных схем теплоаккумулирующих систем предпускового прогрева двигателей внутреннего сгорания / А.В. Варшамов, В.В. Голеншин, М.Ю.Харитонов // Наукові праці. Техногенна безпека. Радіобіологія, Випуск 268. Том 280, Миколаївський університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, м. Миколаїв, 2016р. - С. 21-27.

55. Харитонов Ю.Н. Судовые теплоаккумулирующие комплексы [Электрон. ресурс] / Ю.Н. Харитонов, В.В. Голеншин, А.В. Варшамов // (Проблеми екології та енергозбереження в суднобудуванні. VII міжнародна науково-технічна конференція 2012.) – Режим доступа: <http://conference.nuos.edu.ua/catalog/files/lectures/14962.pdf> - 24.12.2015г.

56. Influence of Ambient Temperature Conditions Main engine operation of MAN B&W two-stroke engines [Электрон. ресурс] / – Режим доступа: <http://www.marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/influence-of-ambient-temperature-conditions.pdf?sfvrsn=26> - 24.12.2017 г.

57. Тріфонов Д.М. Поліпшення паливної економічності і екологічних показників автомобіля використанням теплових акумуляторів фазового переходу для прогріву двигуна: Дис... канд. техн. наук: 05.22.20 - експлуатація та ремонт засобів транспорту / НТУУ, Київ, 2018, 236 с.

58. Trapy J. An investigation of lubricating system warm-up for the improvement of cold start efficiency and emissions of SI automotive engines // J. Trapy, P. Damiral / SAE technical paper 902089: 1990.

59. Roberts A. Internal combustion engine cold-start efficiency: A review of the problem, causes and potential solutions // A. Roberts, R. Brooks, P. Shipway / Energy Conversion and Management, Volume 82, 2014, pp. 327–350.

61. Найман В.С. Все о предпусковых обогревателях и отопителях / В.С. Найман. // – АСТ.: Астрель, 2007. – 213с.

62. Романов В.А. Повышение эффективности поршневых двигателей внутреннего сгорания путем использования тепловых аккумуляторов энергии / В.А. Романов // Дис. ... докт. техн. наук по специальности 05.04.02. - Новосибирск, 2011. - 402 с.

63. Системи прогріву двигунів внутрішнього згорання: основи функціонування: монографія / В.П. Волков, І.В. Грицук, Ю.Ф. Гутаревич, В.Д. Александров, В.Й. Поддубняк, Ю.В. Прилепський, П.Б. Комов, Д.С. Адров, В.С. Вербовський, З.І. Краснокутська, Т.В. Волкова – Донецьк: Вид-во «Ноулідж» (Донецьке відділення), 2015.- 314с.

64. Чертыковцева Н.В. Разработка системы прогрева тепловозного дизеля на основе вторичных энергоносителей [текст] / Н.В. Чертыковцева, Д.Я. Носырев // Вестник РГУПС. - 2008. - №2. - С.35-42.

65. Несиоловский О.Г. Улучшение показателей экономичности автомобильного дизеля за счет регулирования его теплового состояния / О.Г. Несиоловский. – Ярославль: 1995. - 155с.

66. Левенберг В.Д. Аккумулирование тепла / В.Д. Левенберг //- Киев: Техника, 1991. - 112с.

67. Куликов А.Н. «Термос» под капотом / А.Н. Куликов //Наука и жизнь.- 1993. - №3. - с.62-64.

68. Нгуен Х.К. Использование водяного электронасоса для электронного регулирования температуры охлаждающей жидкости / - Х.К. Нгуен, Ж.Л. Мулен, П. Перрье, Э. д'Орсе // Препринт/ Ярославський політехнічний інститут: №88.-Я.: 1988. – 31 с .

69. Грицук І.В. Методика проектування комплексних систем комбінованого прогрева ДВС / І.В. Грицук // Новітні комп'ютерні технології. – Кривий Ріг : ДНВЗ «Криворізький національний університет». – 2013. – Вип. XI. – С. 169–172.

70. Одрин В. М. Метод морфологического анализа технических систем / В. М. Одрин. – М.: ВНИИПИ, 1989. – 314 с.

71. Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посіб. / М. Ф. Дмитриченко, В. П. Матейчик, О. К. Грицук, М. П. Цюман. – К.: НТУ, 2014. – 168 с.

72. 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.

73. 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>

74. Забезпечення теплової підготовки двигуна енергетичної установки за допомогою системи прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами / І.В. Грицук, В.С. Вербовський, О. Подпрыгора, О.М. Вольська, Д.С. Погорлецький, О.В. Вербовський, А.Ф. Сімагін // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С., 24-28 квітня 2019, Одеса (Україна) – Стамбул (Туреччина) - Одеса (Україна), Одеса, ОНМУ, 2019. 442с. - С. 108-121

75. 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

76. 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

77. Gritsuk, I., Volkov, V., Mateichyk, V., Gutarevych, Y. et al., "The Evaluation of Vehicle Fuel Consumption and Harmful Emission Using the Heating System in a Driving Cycle," SAE Int. J. Fuels Lubr. 10(1):236-248, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-26-0364>

78. Gritsuk, I., Mateichyk, V., Tsiuman, M., Gutarevych, Y. et al., "Reducing Harmful Emissions of the Vehicular Engine by Rapid After-Start Heating of the Catalytic Converter Using Thermal Accumulator," SAE Technical Paper 2018-01-0784, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0784> - Title from the screen.

79. 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.

80. 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.Гущин, 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.

81. Особливості передпускової і післяпускової теплової підготовки двигуна енергетичної установки в умовах низьких температур за допомогою комплексної системи передпускового прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами / Грицук І.В., Вербовський В.С. // Наукові праці міжнародної науково-практичної і науково-методичної конференції «Новітні технології в

автомобілебудуванні, транспорті і при підготовці фахівців», 20-21 жовтня 2016 року: збірник наукових праць / Міністерство освіти і науки України, Харківський національний автомобільно-дорожній університет [та інш.]. – Харків: ХНАДУ, 2016. – 265 с., с. 205-206

82. Карнаухов Н.Н., Пустовалов И.А., Яркін А.В. Тепловой аккумулятор для поддержания пусковой температуры ДВС в период межсменной стоянки строительной машины в зимний период // Отраслевой журнал «Автотранспортное предприятие». 2010, ноябрь. М.: НПП Транснавигация, Минтранс России. С. 45-48.

83. 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.

84. Грицук І.В. Алгоритм формування оперативної готовності двигуна внутрішнього згорання / І.В. Грицук, Д.С. Адров, Ю.В. Прилепский, Ю.Ф.Гутаревич, З.І. Краснокутська, В.С. Вербовський // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 43730 від 14.05.2012. Науковий твір «Алгоритм формування оперативної готовності двигуна внутрішнього згорання».

85. Шанин Ю.П. Исследование рабочего процесса газовых двигателей методом численного моделирования на ЭЦВМ / Ю.П.Шанин // Автореф. дис... канд. тех. наук: 05.04.02. – Ленинград, 1973.

86. Bartels T., Mollenhauer K. Simulation des Betriebverhaltens von Otto-Gasmotoren, №5 – MTZ. – 1994.

87. Mendis K.J., Stone C.R., Ladonimatoc N., Weller G. Modelling and Measurements From A Natural Gas Fueled Engine, – SAE Technical Paper No 930927.

88. Latent heat storage modules for preheating internal combustion engines: application to a bus petrol engine/ L.L. Vasiliev, V.S. Burak, A.G. Kulakov, D.A.

Mishkinis, P.V. o han // Applied Thermal Engineering. - 2000. - V. 20. - P. 913-923.

89. Young M.B., Cyclic Dispersion-Some Quantitativ Gause-and-Effect Relutionshis / M.B. Young // SAE Techn. Pap. Ser. - 1980, N 800459. - P. 33.

90. Дьяченко В.Г. Основы теории рабочих процессов в двигателях внутреннего сгорания / В.Г. Дьяченко //– К.:УМК ВО, 1988. – 95 с.

91. Яновський В.В. До вибору методу розрахунку робочого процесу газового двигуна / В.В. Яновський // Системні методи керування, технологія та організація виробництва, ремонту та експлуатації автомобілів. – 2002.– № 13. – С.157-162.

92. Программный комплекс Дизель РК - DIESEL-RK [электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.diesel-rk.bmstu.ru/Rus/index.php> – 03.08.2019 р.

93. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизация процесса сгорания в дизелях / Н.Ф. Разлейцев. – Харьков: Вища школа, 1980 – 169с.

94. Кулешов А.С. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливоподачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания / А.С. Кулешов, Л. В. Грехов. // – М.: МГТУ, 2000. - 64 с. ISBN 5-7038-1452-9

95. Woschni G. Untersuchungen zum Wärmeübergang in Verbrennungsmotor // Internal combustion engines conference. - Bucharest. - 1967. - P. 437 - 449.

96. ГОСТ 30574-98 «Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Выбросы вредных веществ и дымность отработавших газов. Циклы испытаний»

97. Максимов А.Л. Расчетная модель действительного цикла двигателя внутреннего сгорания / А.Л. Максимов, Б.Я. Черняк // Труды МАДИ, вып. 126. – М.: МАДИ. – 1976. – С. 74 –84.

98. Ken C.Tsao, Zhiyn Han. An Exploratory on Study on Combastion and Chamber Design of Natural Gas Engines. – SAE Technical Paper No 930312.

99. Иноземцев Н.В. Процессы сгорания в двигателях / Н.В. Иноземцев, В.К. Кошкин. – М.: Машгиз., 1949. – 235 с.
100. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателей. Скорость сгорания и рабочий цикл двигателей / И.И. Вибе. // – М.: Свердловск, 1962. – 271 с.
101. Глаголев Н.М. Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания / Н.М. Глаголев. // – М.: Машгиз, 1950. -368 с.
102. 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.
103. Шульгин В.В. Тепловые аккумуляторы транспортных средств / В.В. Шульгин. // - СПб.: Издательство Политехн. ун-та, 2005. - 268 с.
104. 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.
105. 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, 2012. – Випуск №45, - с.64-71.
106. 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.
107. 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.

108. Грицук І.В. Особливості математичного моделювання параметрів роботи контактного теплового акумулятора фазового переходу системи регулювання температури охолоджуючої рідини й моторної оливи ДВЗ / І.В. Грицук, А.М. Гущин, Д.С. Адров, В.С.Вербовський, З.І. Краснокутська // Збірник наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2014 – Випуск №37., с.120-128.

109. 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.

110. 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. Гущин, Д.С. Адров, В.С.Вербовський, З.І. Краснокутська // Збірник наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2013 – Випуск №36., с.156-161.

111. Альмеев Р.И. Анализ устройств для предпусковой смазки деталей ДВС / Р.И. Альмеев // Проблемы транспорта и транспортного строительства: межвуз. науч. сб. — Саратов: СГТУ, 2008. — С. 125-132.

112. Адров, Д.С. Математичне моделювання роботи системи охолодження двигуна внутрішнього згорання утилізаційної установки при визначенні часу прогріву / Д.С. Адров //Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту. - Донецьк: ДонІЗТ, 2011 – №27. С. 105-112.

113. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: пособие для вузов/ А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 4-е стер. – М.: Высш. Шк., 2008. – 496с.: ил.
114. Рафалес-Ламарка Э.Э., Николаев В.ГР. Некоторые методы планирования и математического анализа биологических экспериментов. - Киев: Наук, думка. 1971. 119 с.
115. Особливості математичного моделювання теплової підготовки транспортного двигуна за допомогою теплового акумулятора і методики її використання / Грицук І.В., Вербовський В.С., Погорлецький Д.С., Марченко В.В., Михайлов Р.І. // Матеріали V міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології», 20-21 листопада 2017 р ХНАДУ, Харків, 2017,С. 28 – 29
116. Долганов К.Е. Автомобильные двигатели. Основы теории поршневых двигателей / К.Е. Долганов.// – К.: КАДИ, 1990. – 80 с.
117. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей/ Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. // М , 1983, 375 с.
118. CurveExpert v. 1.34 – Режим доступа: <http://www.ntscom.com/~dhyams/cvxpt.htm>
119. Кутателадзе С.С., Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. // - М., Госэнергоиздат, 1958. - 415с.
120. Исаченко В.П. Справочник по теплопередаче / В.П. Исаченко, В.А. Осипов.// - М., 1986, 456с.
121. Котенко Э.В. Разработка математической модели и методики расчета аккумуляторов теплоты на фазовом переходе / Э.В. Котенко // Автореф. ... канд. техн. наук / Курск, гос. техн. ун-т. - Воронеж, 1996. - 15 с.
122. Ложкин Н.Н. Теория и практика применения тепловых аккумуляторов фазового перехода для улучшения экологических и топливно-экономических показателей автотранспортных средств / Н.Н. Ложкин, В.В. Шульгин // Вопросы охраны атмосферы от загрязнения: Информационный

бюллетень № 2(22) / НТК «Атмосфера» при ГГО им. А.И. Воейкова. - СПб., 2000. - С. 40-53.

123. Куколев М.И. Основы проектирования тепловых накопителей энергии / М.И. Куколев // Петрозаводск, Петрозавод. гос. ун-т., 2001. – 240с.

124. Розробка і дослідження системи передпускового прогріву газового двигуна на основі теплового акумулятора в процесі здійснення пуску і прогріву / Дослідження системи передпускового розігріву газового двигуна внутрішнього згорання K159M2 (6Ч 12/14): Звіт про НДР / Національний транспортний університет (НТУ) – Інститут газу Національної академії наук України (ІГ НАНУ) – Донецький інститут залізничного транспорту (ДонІЗТ); Керівники – Ю.Ф.Гутаревич, О.І. П'ятничко. / Виконавці – І.В.Грицук, В.С. Вербовський тощо. Держ. реєстр. № 0113U007127; Держ. облік № 0214U008184; Інвентарний № ІК НТП № 0714U006348. Київ. 2014. – 45 с.

125. Планирование и организация измерительного эксперимента /Володарский Е.Т., Малиновский Б.Н., Туз Ю.М. - К.: Вища школа, 1987. - 280 с.

126. Парафин.УРАcom. ООО «Украинская парафиновая компания» [электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.ukr-prom.com/cat-himicheskaya-prodykciya/nefteprodykti/10609/>

127. ГОСТ 14846-81 “Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний”.

128. 226. DT-8811. Operation Manual Infrared Thermometer. Инструкция по эксплуатации.

129. 227. Бесконтактные инфракрасные термометры (пирометры) DT-8862 и DT-8863 Руководство по эксплуатации V. 27-01-2010 AMV/МІТ.

130. 183. Каталог продукции «Циркуляционные насосы Grundfos», режим доступа: grundfos.ru

131. Общий каталог продукции «АРК Энергосервис», С.-Петербург, 2012, 306с.

132. ДП «Квазар-ИС» Этикетка изделия. КР-140 УД8 ТУ. 6K0.348.095-

06ТУ.

133. Гутаревич Ю.Ф. Особливості розігріву газового двигуна при використанні системи передпускового прогріву / Ю.Ф. Гутаревич, І.В. Грицук, О.С. Добровольський, Д.С. Адров, В.С.Вербовський, З.І. Краснокутська // Науковий журнал «Управління проектами, системний аналіз і логістика». – К.: НТУ, 2014. – Випуск 13, - с. 41-50.

134. Левенберг В.Д. Аккумулирование тепла. - М.: Наука, 1991. – 83 с.

135. Химическая энциклопедия, т. 4/ гл. ред. Зефиоров Н.С. – М.: Изд-во: Большая Российская Энциклопедия, 1995 г.

136. 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.

137. Адров Д.С. Експериментальні дослідження системи комбінованого прогріву двигуна з тепловим акумулятором / Д.С. Адров, І.В. Грицук, В.Д. Александров, В.А. Постников, Ю.В. Прилепський, В.І. Дорошко, В.С. Вербовський, З.І. Краснокутська // Збірник наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2012– Випуск № 31, с. 158-167.

138. Грицук І.В. Результати розрахунку паливної економічності 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.

139. 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.

140. 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.

141. Особливості розробки циклу теплової підготовки транспортного двигуна за допомогою теплового акумулятора / Грицук І.В., Вербовський В.С., Володарець М.В., Краснокутська З.І., Погорлицький Д.С., Бородін С.І. // Матеріали V міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Автомобіль і електроніка. Сучасні технології», 20-21 листопада 2017 р ХНАДУ, Харків, 2017, С. 25 – 27.

142. Особливості дослідження паливної економічності та екологічних показників двигуна внутрішнього згорання, оснащеного системою комбінованого прогріву, за циклом передпускового прогріву і пуску / Адров Д.С., Вербовський В.С., Краснокутська З.І., Грицук І.В. // Матеріали 8-ї міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 8-а Міжнародна науково-практична конференція, 28-29 вересня 2017 р. – Херсон: Херсонська державна морська академія. 508 с., с.188-193

143. Вербовський В.С. Оцінка доцільності проведення передпускової і післяпускової підготовки газового двигуна К-159 М2 за допомогою комплексної системи передпускового прогріву / В.С. Вербовський // Зб. наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2014 – Випуск №39., с.93-99.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Вербовський В. Оцінка доцільності застосування системи теплової підготовки з використанням акумульованої 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. – С.288 – 307 ISBN 978-966-2245-53-0

2. 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.

3. 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.

4. Грицук І.В. Результати розрахунку паливної економічності 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.

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. 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.

7. 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.

8. Грицук І.В. Особливості математичного моделювання параметрів роботи теплонакопичувача керованої передпускової системи нагріву двигуна внутрішнього згорання у складі системи комбінованого прогріву / І.В. Грицук, А.М. Гущин, Д.С. Адров, В.С.Вербовський, З.І. Краснокутська // Збірник наук. праць ДонІЗТ УкрДАЗТ. - Донецьк: ДонІЗТ, 2013 – Випуск №36., с.156-161.

9. 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.

10. 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.

11. 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 Фахове видання. НМБ

12. 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.Гущин, 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.

13. 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.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

14. 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.

15. 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

16. Забезпечення теплової підготовки двигуна енергетичної установки за допомогою системи прогріву з фазоперехідними тепловими акумуляторами / І.В. Грицук, В.С. Вербовський, О. Podprygora, 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

17. 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

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

18. 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.

19. 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.

20. 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>

21. 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.

Апробація результатів дисертації. Теоретичні, методичні та практичні положення дисертаційної роботи представлені та доповідались на:

- Міжнародному конгресі двигунобудівників, м. Рибаче-Харків, м. Коблево – Харків, 2009, 2013-2014 рр. (доповідь, публікація тез);

- V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем в умовах реформування залізничного транспорту: управління, економіка і технології», Київ, ДЕТУТ, 2011; (публікація тез)

- Міжнародній науково-практичній конференції «Стратегия качества в промышленности и образовании», м. Варна, Болгарія, 2011р. (публікація тез);

- Міжнародній науково-технічній конференції «Новітні комп'ютерні технології» - NOCOTE, м. Київ-Севастополь, 2010-2011 рр. (доповідь, публікація тез);

- Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2011», м. Херсон, 2011р. (публікація тез);
- Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобильный транспорт: проблемы и перспективы», м. Севастополь, 2013, 2014 рр. (доповідь, публікація тез);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні технології розвитку конструкції, виробництва, експлуатації, ремонту і експертизи автомобілів», м. Харків, ХНАДУ, 2014 р. (публікація тез);
- XXIV Міжнародній науковій конференції «Системи і засоби автомобільного транспорту" - SAKON, м. Жешув – Пшецлав, Польща, 2013 (публікація тез) ;
- Міжнародній науковій конференції «Science and Education - a New Dimension», Natural and Technical Science, Budapest, Угорщина, 2013. (публікація тез);
- XI Міжнародній науково-технічній конференції «Наука – образованию, производству, экономике», м. Мінськ, БНТУ, 2013р. (публікація тез);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», м. Херсон, ХДМА, 2017, 2019 р.р. (доповідь, публікація тез);
- Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми», Миколаїв, НУК, 2017 (доповідь, публікація тез);
- Міжнародній науково-практичній конференції присвяченій пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С., Одеса (Україна) – Стамбул (Туреччина) - Одеса (Україна), Одесса, ОНМУ, 2019 (публікація тез);
- Всеукраїнській науково-технічній конференції науково-педагогічних та інженерно-технічних працівників, м. Первомайськ в 2009, 2011, 2013 рр. (доповідь);

- Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Транспорт і логістика», м. Донецьк, 2012 р. (публікація тез);
- Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні технології і мехатроніка» м. Харків, ХНАДУ, 2014 (доповідь);
- Науково-практичній конференції науково-педагогічних працівників, аспірантів, студентів та структурних підрозділів університету НТУ в 2009-2010, 2012-2014 р.р. (доповідь, публікація тез);
- Міжвузівській науково-технічній конференції «Енерго- і ресурсозберігаючі технології при експлуатації машин та устаткування», м. Донецьк, ДонІЗТ, 2009-2013 р.р. (публікація тез).

**Фрагмент лістингу програми математичної моделі системи теплової
підготовки газового двигуна К-159 М2 при
здійсненні передпускового і післяпускового прогріву
в програмному середовищі MatLab**

**Розрахунок процесів в контактному теплому акумуляторі і
накопичувачі моторної оливи з тепловим акумулятором**

```
%расчет контактного теплового аккумулятора на заряде время
akwa=(Nkuwa*lyw)/kdwa;%коэффициент теплоотдачи жидкости в ТА
akta=(2*lygf)/(dkza*reallog(dx/dkza));%коэффициент теплоотдачи стенки ТАМу
khta=1/((1/akwa)+(sia/lyka)+(1/akta));%коэффициент теплопередачи
Tma1=kpot1*T1m;%температура жидкости на входе в ТА
Tma2=kpot2*T2m;%температура жидкости на выходе из ТА
dkTa=((Tkma1-Tkta2)-(Tkta1-Tkma2))/reallog((Tkma1-Tkta2)/(Tkta1-Tkma2));%средний
температурный напор в ТА
Fkta=3.14*dkza*Lka*(Nak1+Nak2)+3.14*dkza*((Nka1-1)+(Nka2-1));%площадь теплообмена
Qkta=akta*dkTa*Fkta;%тепло полученное ТА
Qktazarf1=mta*cta*(Tfta-Tta2);
Qktazarf2=mta*cta*(Tta1-Tfta);
Qktazarfaz=mta*cfta;
Qktazar=Qktazarf1+Qktazarf2+Qktazarfaz;%тепло необходимое для зарядки ТА
tkzar=Qktazar/(Gw*Cw*(Tma1-Tma2));%время зарядки
tkfaz=(mta*cfta)/(Gw*Cw*(Tma1-Tma2));%время фазового перехода
tkf1=(mta*cta*(Tfta-Tta2))/(Gw*Cw*(Tma1-Tma2));
tkf2=tf1+tfaz;
tkzar1=round(tkzar);
for j=1:tkzar1
    ikf j<=tf1
        Tta(j)=(j*Gw*Cw*(Tma1-Tma2)+mta*cta*Tta2)/(mta*cta);
    elseif j<=tf2
        Tkta(j)=Tfta+cos(j/25)+cos(j/50)+cos(j/75)+0.35*cos(j/150);
        elseif j>tf2
            Tkta(j)=((j-tf2)*Gw*Cw*(Tma1-Tma2)+mta*cta*Tfta)/(mta*cta);
        end
end
%plot (Tkta);

%расчет контактного теплового аккумулятора на режиме розрядки
Rkewa1=(w*dkwa1)/vox;%число рейнольдса для ТО в ТА
if Rewa1<=2300
    Nuwa1=3.66;
elseif 2300<Rewa1<=5000
    Nuwa1=(-6.55+0.0046*Rewa1)*Prw1^0.4;
elseif 5000<Reaw1<=10000
    Nuaw1=(-3+0.0039*Reaw1)*Prw1^0.4;
```

```

elseif Reaw>10000
    Nuwa1=0.023*Rewa1^0.8*Prw1^0.4;
end
akwa1=(Nuwa1*lyw1)/dwa1;%коэффициент теплоотдачи жидкости в ТА
akta1=(2*lygf)/(dza1*reallog(dx/dza1));%коэффициент теплоотдачи стенки теплообменника
ТА ТАМy
khta1=1/((1/awa1)+(sia1/lya1)+(1/ata1));%коэффициент теплопередачи между жидкостью и
ТАМ
Fhta2=Fta;%площадь теплообмена со стороны разрядки
dkTaR=Qta/(khta1*Fhta2)% средний температурный напор при разрядке
dkTaR2=Qtazar/(khta1*Fhta2)% средний температурный напор при разрядке

%расчет хранения теплоты контактного ТА
ata2=ata1;
khta2=1/((1/ast)+(sia2/lya2)+(1/ata2));%коэффициент теплопередачи между жидкостью и
ТАМ
ttapot=((ccta+cfta))/(khta2*FstTA))*reallog(Tta1/Ttadop);
aaa=round(ttapot);
for bb=1:aaa
    Ttam(bb)=Tta1*(exp(-(((khta2*FstTA)/(ccta+cfta))*bb)));
    aaaa(bb)=bb/3600;
end
%plot (aaaa,Ttam)
%расчет прогрева блока и головки
Fob=Fcl+Fnar;%общая поверхность теплообмена
Prbl=1/(0.06365807+0.005525183*(Tox2^0.95));
vbl=(1/(0.5062074+0.03270559*(Tox2^0.95)))*10^-6;
lybl=(1/(0.01829325-0.0003842775*(Tox2^0.5)))*10^-2;
Rebl=(w*(D+d))/vbl;
Nucl=0.27*Rebl^0.63*Prbl;
acl=(Nucl*lybl*10^-3)/(D+d);
abl=(Nus*lybl*10^-3)/hbl;
dTabl=((Tta1-Tst1)-(Tta2-Tst2))/reallog((Tta1-Tst1)/(Tta2-Tst2));%средний температурный
напор в ТА
Qtcl=(dTabl*Fcl)/acl;
Qtbl=(dTabl*Fnar)/abl;
Qob=Qtbl+Qtcl%тепло полученное блоком

```

Розрахунок процесів в накопичувачі моторної оливи з тепловим акумулятором

```

%расчет хранения теплоты в накопителе
anakta2=anakta1;
knakta2=1/((1/anakst)+(sia2/lyanak2)+(1/anakta2));%коэффициент теплопередачи между
жидкостью и ТАМ
tnaktapot=((ccta+cfta))/(knakta2*FstTA))*reallog(Tta1/Ttadop);
aaa=round(tnapot);
for bb=1:aaa
    Tnamt(bb)=Tta1*(exp(-(((knakta2*FstTA)/(ccta+cfta))*bb)));
    aaaa(bb)=bb/3600;
end
%plot (aaaa,Tnamt)

```

```

Fnakob=Fnakcl+Fnaknar;%общая поверхность теплообмена
Pnakrbl=1/(0.06365807+0.005525183*(Tnak2^0.95));
vnakbl=(1/(0.5062074+0.03270559*(Tnak2^0.95)))*10^-6;
lybl=(1/(0.01829325-0.0003842775*(Tnak2^0.5)))*10^-2;
Rebl=(w*(D+d))/vbnakl;
Nucl=0.27*Rebl^0.63*Prbnakl;
acnakl=(Nucl*lybl*10^-3)/(D+d);
abnakl=(Nus*lybl*10^-3)/hbl;
dnakTabl=((Tta1-Tst1)-(Tta2-Tst2))/reallog((Tta1-Tst1)/(Tta2-Tst2));%средний
температурный напор в ТА
Qnaktbl=(dTabl*Fcl)/acl;
Qnaktbl=(dTabl*Fnar)/abl;
Qnakob=Qnaktbl+Qnaktbl;%тепло полученное блоком
mdvz=pdvz*Fob*d;%масса прогреваемой части блока
Qdvz=mdvz*pdvz*(Tst2-Tst1);%тепло необходимое для прорыва ДВС
nprog=Qob/Qtazar;
tprogrnak=Qnakdvz/Qob
tprogrnak2=Qnakdvz2/(Qob+Qvod);
Gnakv=((3.14*dn^2)/4)*w;
tnakroz=Qnakazar/(Gv*cv*(Tnak2-Tnak1))%время розрядки физической теплоты ТАМ
trozfanakz=(mta*cta)/(Gv*cv*(Tnak2-Tnak1))%время фазового перехода при розряде
trfnak1=(mta*cta*(Ttanak1-Tnakfta))/(Gv*cv*(Tnak2-Tnak1));
trfnak2=trfnak1+trozfaznak;
Tnak(1)=Tnak1;
Tstnak(1)=Tstnak1+5;
zz=tprogr+tprogr2;%прогрев ДВС
zzz=zz+(tprogr2/2.2);%прогрев ДВС+фаз зарядка ТА 2.2 - соотношение между временем
зарядки и розрядки
zzzz=zzz+(tzar-tf2);%прогрев ДВС + физ зарядка ТА
f=zzzz+100;
for jj=1:f
    if jj<=trf1
        Troztanak(jj)=(mta*cta*Ttanak1-jj*Gv*cv*(Tnak2-Tnak1))/(mtanak*cta);
    elseif jj<=trf2
        Troztanak(jj)=Tftanak+cos(jj/25)+cos(jj/50)+cos(jj/75)+0.35*cos(jj/150);
    elseif jj>trf2
        Troztanak(jj)=(mtanak*cta*Tftanak-(jj-trf2)*Gv*cv*(Tnak2-Tnak1))/(mtanak*cta);
    end
end
end

```

Додаток В

Таблиця В.1 - Результати терміну прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за часом теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Час теплової підготовки ОР і МО дослідного газового двигуна при оснащенні СТП					
		ШС без СТП			ШС з ППД		
№ варіанта		1			2		
Місце впливу		СО					
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів ОР від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ППД +ДГД), хв
20 °С	хв.	22,8	80	22,8	17,8	80	17,8
економія часу	хв.	-	-	-	5	-	5
	%	0%	0%	0%	22%	0%	22%
0 °С	хв.	31	40	31	27	40	27
економія часу	хв.	-	-	-	4	-	4
	%	0%	0%	0%	12,90%	0%	12,90%
-20 °С	хв.	47,5	20	47,5	41	20	41
економія часу	хв.	-	-	-	6,5	-	6,5
	%	0%	0%	0%	14%	0%	14%
Місце впливу		СМ					
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від 50 °С до 85 °С (ППД+ДГД), хв
20 °С	хв.	24,2	100	24,2	19,1	100	19,1
економія часу	хв.	-	-	-	5,1	-	5,1
	%	0%	0%	0%	21%	0%	21%
0 °С	хв.	33,3	60	33,3	29	60	29
економія часу	хв.	-	-	-	4,3	-	4,3
	%	0%	0%	0%	12,90%	0%	12,90%
-20 °С	хв.	50,5	30	50,5	45	30	45
економія часу	хв.	-	-	-	5,5	-	5,5
	%	0%	0%	0%	10,89%	0%	10,89%

Таблиця В.2 - Результати терміну прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за часом теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Час теплової підготовки ОР і МО дослідного газового двигуна при оснащенні СТП													
		ТА		КТА		НМО ($T_{TAM} = T_{o.c}$)		НМО ($T_{TAM} = 85^{\circ}\text{C}$)							
№ варіанта		3		4		5		6							
Місце впливу		СО													
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ТА до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50^{\circ}\text{C}$ (тільки ППД), хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ТА + ДГД), хв	Прогрів ОР від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів ОР від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів ОР від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв		
		20 °С	хв.	14,4	720	9,7	22,8	960	22,8	22,8	80	22,8	22,8	80	22,8
		економія часу	хв. %	8,4	640	13,1	-	880	0	-	-	-	-	-	-
				36,9%	900%	57,5%	0%	1100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
		0 °С	хв.	24	600	9,7	31	840	31	31	40	31	31	40	31
		економія часу	хв. %	7,1	560	21,4	-	800	0	-	-	-	-	-	-
				22,9%	1400%	69,0%	0%	2000%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
-20 °С	хв.	33,3	510	9,7	47,5	620	47,5	47,5	20	47,5	47,5	20	47,5		
економія часу	хв. %	14,2	490	37,8	-	600	0	-	-	-	-	-	-		
		29,9%	2450%	79,6%	0%	3000%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%		
Місце впливу		СМ													
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ТА до 50 °С, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50^{\circ}\text{C}$ (тільки ППД), хв	Прогрів МО від 50 °С до 85 °С (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв		
		20 °С	хв.	14,2	720	9,7	24,2	960	24,2	24,2	960	24,2	24,2	1690	24,2
		економія часу	хв. %	10	620	14,5	-	860	0	-	860	0	-	1590	0
				41,3%	620%	60%	0%	860%	0%	0%	860%	0%	0%	1590%	0%
		0 °С	хв.	25	600	9,7	33,3	840	33,3	33,3	840	33,3	33,3	1478	33,3
		економія часу	хв. %	8,3	540	23,6	-	780	0	-	780	0	-	1418	0
				25%	900%	71%	0%	1300%	0%	0%	1300%	0%	0%	2363%	0%
-20 °С	хв.	35	510	9,7	50,5	620	50,5	50,5	620	50,5	50,5	1360	50,5		
економія часу	хв. %	15,5	480	40,8	-	590	0	-	590	0	-	1330	0		
		30,8%	1600%	80,8%	0%	1970%	0%	0%	1970%	0%	0%	4433%	0%		

Таблиця В.3 - Результати терміну прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за часом теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Час теплової підготовки ОР і МО дослідного газового двигуна при оснащенні СТП								
		ТА + КТА			ТА + НМО			ТА + НМО ($T_{ТАМ} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$)		
№ варіанта		7			8			9		
Місце впливу		СО								
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тільки ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, с	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тільки ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв
20 °C	хв.	14,4	1680	9,7	14,4	720	9,7	14,4	720	9,7
економія часу	хв.	8,4	1600	13,1	8,4	640	13,1	8,4	640	13,1
	%	36,9%	2000%	57,5%	36,9%	900%	57,5%	36,9%	900%	57,5%
0 °C	хв.	24	1440	9,7	24	600	9,7	24	600	9,7
економія часу	хв.	7,1	1400	21,4	7,1	560	21,4	7,1	560	21,4
	%	22,9%	3500%	69%	22,9%	1400%	69%	22,9%	1400%	69%
-20 °C	хв.	33,3	1130	9,7	33,3	510	9,7	33,3	510	9,7
економія часу	хв.	14,2	1100	37,8	14,2	490	37,8	14,2	490	37,8
	%	29,9%	5500%	79,60%	29,9%	2450%	79,60%	29,9%	2450%	79,60%
Місце впливу		СМ								
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв
20 °C	хв.	14,2	1680	9,7	14,2	1680	9,7	14,2	2410	9,7
економія часу	хв.	10	1600	14,5	10	1600	14,5	10	2310	14,5
	%	41,30%	2000%	60%	41,30%	2000%	60%	41,30%	1590%	60%
0 °C	хв.	25	1440	9,7	25	1440	9,7	25	2078	9,7
економія часу	хв.	8,3	1400	23,6	8,3	1400	23,6	8,3	2018	23,6
	%	25%	3500%	71%	25%	3500%	71%	25%	3363%	71%
-20 °C	хв.	35	1130	9,7	35	1130	9,7	35	1870	9,7
економія часу	хв.	15,5	1100	40,8	15,5	1100	40,8	15,5	1840	40,8
	%	30,80%	3670%	80,80%	30,80%	3670%	80,80%	30,80%	6133%	80,80%

Таблиця В.4 - Результати терміну прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 за допомогою СТП за часом теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Час теплової підготовки ОР і МО дослідного газового двигуна при оснащенні СТП							
		ТА + КТА + НМО			ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$)				
№ варіанта		10			11				
Місце впливу		СО							
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{Op} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів ОР від 50 °C до 85 °C (АТ+ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{Op} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв		
		20 °C	хв.	14,4	1680	9,7	14,4	1680	9,7
		економія часу	хв. %	8,4	1600	13,1	8,4	1600	13,1
				36,90%	2000%	57,50%	36,90%	2000%	57,50%
		0 °C	хв.	24	1440	9,7	24	1440	9,7
		економія часу	хв. %	7,1	1400	21,4	7,1	1400	21,4
				22,9%	3500%	69%	22,9%	3500%	69%
		-20 °C	хв.	33,3	1130	9,7	33,3	1130	9,7
економія часу	хв. %	14,2	1100	21,4	14,2	1100	21,4		
		29,9%	5500%	69,00%	29,9%	5500%	69,00%		
Місце впливу		СМ							
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{Mo} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів МО від 50 °C до 85 °C (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{Mo} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів МО від 50 °C до 85 °C (ТА + ДГД), хв		
		20 °C	хв.	14,2	1680	9,7	14,2	2410	9,7
		економія часу	хв. %	10	1600	14,5	10	2310	14,5
				41,30%	2000%	60%	41,30%	1590%	60%
		0 °C	хв.	25	1440	9,7	25	2078	9,7
		економія часу	хв. %	8,3	1400	23,6	8,3	2018	23,6
				25%	3500%	71%	25%	3363%	71%
		-20 °C	хв.	35	1130	9,7	35	1870	9,7
економія часу	хв. %	15,5	1100	40,8	15,5	1840	40,8		
		30,80%	3670%	80,80%	30,80%	6133%	80,80%		

Таблиця В.5 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 з СТП за витратою палива при здійсненні теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Сумарна витрата палива при здійсненні теплової підготовки ОР і МО газового двигуна з СТП					
		ШС без СТП			ШС з ППД		
№ варіанта		1			2		
Місце впливу		СО					
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ °С}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів ОР від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ °С}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ППД + ДГД), хв
20 °С	м ³	2,424	0	2,424	1,94	0	1,94
економія палива	м ³	-	-	-	0,484	-	0,484
	%	0%	0%	0%	20%	0%	20%
0 °С	м ³	3,147	0	3,147	2,737	0	2,737
економія палива	м ³	-	-	-	0,41	-	0,41
	%	0%	0%	0%	13,0%	0%	13,0%
-20 °С	м ³	3,764	0	3,764	3,19	0	3,19
економія палива	м ³	-	-	-	0,574	-	0,574
	%	0%	0%	0%	15%	0%	15%
Місце впливу		СМ					
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ °С}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50\text{ °С}$, хв	Прогрів МО від 50 °С до 85 °С (ППД+ДГД), хв
20 °С	м ³	2,424	0	2,424	1,94	0	1,94
економія палива	м ³	-	-	-	0,484	-	0,484
	%	0%	0%	0%	20%	0%	20%
0 °С	м ³	3,147	0	3,147	2,737	0	2,737
економія палива	м ³	-	-	-	0,41	-	0,41
	%	0%	0%	0%	13,0%	0%	13,0%
-20 °С	м ³	3,764	0	3,764	3,19	0	3,19
економія палива	м ³	-	-	-	0,574	-	0,574
	%	0%	0%	0%	15%	0%	15%

Таблиця В.7 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 з СТП за витратою палива при здійсненні теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Сумарна витрата палива при здійсненні теплової підготовки ОР і МО газового двигуна з СТП										
		ТА + КТА			ТА + НМО		ТА + НМО ($T_{ТАМ} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$)					
№ варіанта		7			8		9					
Місце впливу		СО										
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тільки ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, с	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тільки ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв		
		20 °C	м ³	0,636	0	0,424	0,636	0	0,424	0,636	0	0,424
		економія палива	м ³	1,788	-	2	1,788	-	2	1,788	-	2
			%	73,8%	0%	82,5%	73,8%	0%	82,5%	73,8%	0%	82,5%
		0 °C	м ³	0,789	0	0,647	0,789	0	0,647	0,789	0	0,647
		економія палива	м ³	2,358	-	2,5	2,358	-	2,5	2,358	-	2,5
			%	74,50%	0%	79,4%	74,50%	0%	79,4%	74,50%	0%	79,4%
-20 °C	м ³	0,933	0	0,659	0,933	0	0,659	0,933	0	0,659		
економія палива	м ³	2,831	-	3,105	2,831	-	3,105	2,831	-	3,105		
	%	75,20%	0%	82,5%	75,20%	0%	82,5%	75,20%	0%	82,5%		
Місце впливу		СМ										
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв		
		20 °C	м ³	0,636	0	0,424	0,636	0	0,424	0,636	0	0,424
		економія палива	м ³	1,788	-	2	1,788	-	2	1,788	-	2
			%	73,8%	0%	82,5%	73,8%	0%	82,5%	73,8%	0%	82,5%
		0 °C	м ³	0,789	0	0,647	0,789	0	0,647	0,789	0	0,647
		економія палива	м ³	2,358	-	2,5	2,358	-	2,5	2,358	-	2,5
			%	74,50%	0%	79,4%	74,50%	0%	79,4%	74,50%	0%	79,4%
-20 °C	м ³	0,933	0	0,659	0,933	0	0,659	0,933	0	0,659		
економія палива	м ³	2,831	-	3,105	2,831	-	3,105	2,831	-	3,105		
	%	75,20%	0%	82,5%	75,20%	0%	82,5%	75,20%	0%	82,5%		

Таблиця В.8 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 з СТП за витратою палива при здійсненні теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Сумарна витрата палива при здійсненні теплової підготовки ОР і МО газового двигуна з СТП					
		ТА + КТА + НМО			ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$)		
№ варіанта		10			11		
Місце впливу		СО					
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ІПД), хв	Прогрів ОР від 50 °C до 85 °C (АТ+ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ІПД), хв
20 °C	м ³	0,636	0	0,424	0,636	0	0,424
економія палива	м ³	1,788	-	2	1,788	-	2
	%	73,8%	0%	82,5%	73,8%	0%	82,5%
0 °C	м ³	0,789	0	0,647	0,789	0	0,647
економія палива	м ³	2,358	-	2,5	2,358	-	2,5
	%	74,50%	0%	79,4%	74,50%	0%	79,4%
-20 °C	м ³	0,933	0	0,659	0,933	0	0,659
економія палива	м ³	2,831	-	3,105	2,831	-	3,105
	%	75,20%	0%	82,5%	75,20%	0%	82,5%
Місце впливу		СМ					
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ІПД), хв	Прогрів МО від 50 °C до 85 °C (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ІПД), хв	Прогрів МО від 50 °C до 85 °C (ТА + ДГД), хв
20 °C	м ³	0,636	0	0,424	0,636	0	0,424
економія палива	м ³	1,788	-	2	1,788	-	2
	%	73,8%	0%	82,5%	73,8%	0%	82,5%
0 °C	м ³	0,789	0	0,647	0,789	0	0,647
економія палива	м ³	2,358	-	2,5	2,358	-	2,5
	%	74,50%	0%	79,4%	74,50%	0%	79,4%
-20 °C	м ³	0,933	0	0,659	0,933	0	0,659
економія палива	м ³	2,831	-	3,105	2,831	-	3,105
	%	75,20%	0%	82,5%	75,20%	0%	82,5%

Таблиця В.9 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 з СТП за викидами оксидів азоту при здійсненні теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Викиди оксидів азоту при здійсненні теплової підготовки ОР і МО газового двигуна з СТП							
		ШС без СТП			ШС з СТП				
№ варіанта		1			2				
Місце впливу		СО							
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ГДЗ до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ °С}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів ОР від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ °С}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ППД +ДГД), хв		
		20 °С	г.	3,103	0	3,103	1,93	0	1,93
		зниження	г.	-	-	-	1,2	-	1,2
		викидів	%	0%	0%	0%	38,7%	0%	38,7%
		0 °С	г.	5,864	0	5,864	3,68	0	3,68
		зниження	г.	-	-	-	2,176	-	2,176
		викидів	%	0%	0%	0%	37,10%	0%	37,10%
		-20 °С	г.	9,106	0	9,106	6,07	0	6,07
зниження	г.	-	-	-	3,04	-	3,04		
викидів	%	0%	0%	0%	33%	0%	33%		
Місце впливу		СМ							
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ °С}$, хв	Прогрів ОР від 50 °С до 85 °С (ДГД), хв	Прогрів МО від ДГД до 50 °С, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50\text{ °С}$, хв	Прогрів МО від 50 °С до 85 °С (ППД+ДГД), хв		
		20 °С	г.	3,103	0	3,103	1,93	0	1,93
		зниження	г.	-	-	-	1,2	-	1,2
		викидів	%	0%	0%	0%	38,7%	0%	38,7%
		0 °С	г.	5,864	0	5,864	3,68	0	3,68
		зниження	г.	-	-	-	2,176	-	2,176
		викидів	%	0%	0%	0%	37,10%	0%	37,10%
		-20 °С	г.	9,106	0	9,106	6,07	0	6,07
зниження	г.	-	-	-	3,04	-	3,04		
викидів	%	0%	0%	0%	33%	0%	33%		

Таблиця В.11 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 з СТП за викидами оксидів азоту при здійсненні теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Викиди оксидів азоту при здійсненні теплової підготовки ОР і МО газового двигуна з СТП										
		ТА + КТА			ТА + НМО			ТА + НМО ($T_{ТАМ} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$)				
№ варіанта		7			8			9				
Місце впливу		СО										
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тільки ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, с	Підтримання $T_{ОР} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (тільки ППД), хв	Прогрів ОР від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв		
		20 °C	г.	0,146	0	0,097	0,146	0	0,097	0,146	0	0,097
		зниження викидів	г.	2,957	-	3,006	2,957	-	3,006	2,957	-	3,006
			%	74%	0%	76,87%	95%	0%	76,87%	79%	0%	79,87%
		0 °C	г.	0,246	0	0,164	0,246	0	0,164	0,246	0	0,164
		зниження викидів	г.	5,618	-	5,7	5,618	-	5,7	5,618	-	5,7
			%	75%	0%	77,2%	96%	0%	77,2%	77,8%	0%	80,2%
		-20 °C	г.	0,362	0	0,241	0,362	0	0,241	0,362	0	0,241
зниження викидів	г.	8,744	-	8,86	8,744	-	8,86	8,744	-	8,86		
	%	76%	0%	77,30%	76%	0%	77,30%	79,2%	0%	79,30%		
Місце впливу		СМ										
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Підтримання $T_{МО} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, хв	Прогрів МО від $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТА + ДГД), хв		
		20 °C	г.	0,146	0	0,097	0,146	0	0,097	0,146	0	0,097
		зниження викидів	г.	2,957	-	3,006	2,957	-	3,006	2,957	-	3,006
			%	75%	0%	76,87%	75%	0%	76,87%	75%	0%	76,87%
		0 °C	г.	0,246	0	0,164	0,246	0	0,164	0,246	0	0,164
		зниження викидів	г.	5,618	-	5,7	5,618	-	5,7	5,618	-	5,7
			%	76%	0%	77,2%	96%	0%	77,2%	76%	0%	77,2%
		-20 °C	г.	0,362	0	0,241	0,362	0	0,241	0,362	0	0,241
зниження викидів	г.	8,744	-	8,86	8,744	-	8,86	8,744	-	8,86		
	%	76%	0%	77,30%	76%	0%	77,30%	76%	0%	79,30%		

Таблиця В.12 - Результати прогріву газового двигуна 6Ч 12/14 з СТП за викидами оксидів азоту при здійсненні теплової підготовки ОР і МО

Варіант комплектації СТП		Викиди оксидів азоту при здійсненні теплової підготовки ОР СО і МО СМ газового двигуна з СТП							
		ТА + КТА + НМО			ТА + КТА + НМО ($T_{TAM} = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$)				
№ варіанта		10			11				
Місце впливу		СО							
Температура навколишнього середовища		Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів ОР від 50 °C до 85 °C (ТА + ДГД), хв	Прогрів ОР від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{OP} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв		
		20 °C	г.	0,146	0	0,097	0,146	0	0,097
		зниження викидів	г.	2,957	-	3,006	2,957	-	3,006
			%	75%	0%	76,87%	75%	0%	76,87%
		0 °C	г.	0,246	0	0,164	0,246	0	0,164
		зниження викидів	г.	5,618	-	5,7	5,618	-	5,7
			%	76%	0%	77,2%	76%	0%	79,2%
-20 °C	г.	0,362	0	0,241	0,362	0	0,241		
зниження викидів	г.	8,744	-	8,86	8,744	-	8,86		
	%	76%	0%	77,30%	76%	0%	77,30%		
Місце впливу		СМ							
Температура навколишнього середовища		Прогрів МО від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів МО від 50 °C до 85 °C (ТА + ДГД), хв	Прогрів МО від ТА до 50 °C, хв	Підтримання $T_{MO} \approx 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (КТА + ППД), хв	Прогрів МО від 50 °C до 85 °C (ТА + ДГД), хв		
		20 °C	г.	0,146	0	0,097	0,146	0	0,097
		зниження викидів	г.	2,957	-	3,006	2,957	-	3,006
			%	75%	0%	76,87%	75%	0%	76,87%
		0 °C	г.	0,246	0	0,164	0,246	0	0,164
		зниження викидів	г.	5,618	-	5,7	5,618	-	5,7
			%	76%	0%	77,2%	76%	0%	77,2%
-20 °C	г.	0,362	0	0,241	0,362	0	0,241		
економія часу	г.	8,744	-	8,86	8,744	-	8,86		
	%	76%	0%	77,30%	76%	0%	77,30%		

Додаток Г

**Перелік розроблених матеріалів і зареєстрованих
Свідоцтв України про реєстрацію авторського права на твір, що
стосуються теми дисертаційного дослідження**

1. Комп'ютерна програма «Математична модель і результати розрахунку енергетичних показників теплообмінника утилізації теплового акумулятора (ТА) двигуна внутрішнього згорання, обладнаного системою прискореного прогрівання і ТА» / Грицук І.В., Адров Д.С., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Вербовський В.С. // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 43345 от 17.04.2012. Заявка від 16.02.2012 №43417. – 2 арк.

2. Комп'ютерна програма «Математична модель і результати розрахунку екологічних, енергетичних показників і паливної економічності двигуна внутрішнього згорання, обладнаного системою прискореного прогрівання і тепловим акумулятором (ТА на режимах передпускового прогрівання і прискореного прогрівання і зарядки ТА» » / Грицук І.В., Адров Д.С. Краснокутська З.І., Вербовський В.С., П'ятничко О.І. // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 43346 от 17.04.2012. Заявка від 16.02.2012 №43418 – 2 арк.

3. Науковий твір «Алгоритм формування оперативної готовності двигуна внутрішнього згорання» / Грицук І.В., Адров Д.С., Прилепский Ю.В., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Вербовський В.С. // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 43730 от 14.05.2012. Заявка від 13.03.2012 №43937 – 2 арк.

Перелік розроблених матеріалів і зареєстрованих свідоцтв про внесення до Реєстру виробників та розповсюджувачів програмного забезпечення України, що стосуються теми і основних положень дисертаційного дослідження

1. Програмний комплекс розрахунку паливної економічності і екологічних показників газопоршневого двигуна внутрішнього згорання К-159М2 (6ЧН 12/14) із застосуванням системи комбінованого прогріву при здійсненні пуску і прогріву / Грицук І.В., Адров Д.С., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Вербовський В.С. // Свідоцтво ВР №01589 про внесення відомостей до Реєстру виробників та розповсюджувачів програмного забезпечення. Дата реєстрації 28.11.2012р. Дата видачі 06.12.2012р. – 1 арк.

2. Програмний комплекс розрахунку екологічних, енергетичних показників і паливної економічності двигуна внутрішнього згорання, обладнаного системою прискореного прогрівання і тепловим акумулятором (ТА) на режимах передпускового прогрівання, прискореного прогрівання і зарядки теплового акумулятора / Грицук І.В., Адров Д.С., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Вербовський В.С. // Свідоцтво ВР №01592 про внесення відомостей до Реєстру виробників та розповсюджувачів програмного забезпечення. Дата реєстрації 28.11.2012р. Дата видачі 06.12.2012р. – 1 арк.

3. Програмний комплекс результати проектного розрахунку енергетичних показників теплообмінника утилізації теплового акумулятора (ТА) двигуна внутрішнього згорання, обладнаного системою прискореного прогрівання і теплового акумулятора / Грицук І.В., Адров Д.С., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Вербовський В.С. // Свідоцтво ВР №01595 про внесення відомостей до Реєстру виробників та розповсюджувачів

програмного забезпечення. Дата реєстрації 28.11.2012р. Дата видачі 06.12.2012р. – 1 арк.

4. Програмний комплекс для формування експертної оцінки щодо паливної економічності і екологічних показників газопоршневого двигуна внутрішнього згорання K159M2 (6Ч 12/14) із застосуванням системи комбінованого прогріву при здійсненні передпускової підготовки, пуску і прискореного прогріву після пуску / Грицук І.В., Адров Д.С., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Вербовський В.С. // Свідоцтво ВР №01592 про внесення відомостей до Реєстру виробників та розповсюджувачів програмного забезпечення. Дата реєстрації 28.11.2012р. Дата видачі 06.12.2012р. – 1 арк.

5. Програмний комплекс для формування експертної оцінки, розрахунку і аналізу екологічних, енергетичних показників і паливної економічності двигуна внутрішнього згорання, обладнаного системою прискореного прогрівання і тепловим акумулятором (ТА) фазового переходу на режимах передпускового прогрівання, прискореного прогрівання, пуску і зарядки теплового акумулятора після пуску / Грицук І.В., Адров Д.С., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Вербовський В.С., Єроценков С.А., Каграманян А.О., Ларін О.М. // Свідоцтво ВР №01689 про внесення відомостей до Реєстру виробників та розповсюджувачів програмного забезпечення. Дата реєстрації 26.06.2013р. Дата видачі 05.07.2013р. – 1 арк.

6. Програмний комплекс для формування результатів проектного розрахунку енергетичних показників утилізаційного теплообмінника теплового акумулятора (ТА) двигуна внутрішнього згорання, обладнаного системою прискореного прогрівання / Грицук І.В., Адров Д.С., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Вербовський В.С., Єроценков С.А., Каграманян А.О. // Свідоцтво ВР №01692 про внесення відомостей до Реєстру виробників

та розповсюджувачів програмного забезпечення. Дата реєстрації 26.06.2013р.
Дата видачі 05.07.2013р. – 1 арк.

**Перелік розроблених і зареєстрованих патентів України на корисну
модель і на винахід, що стосуються теми і основних положень
дисертаційного дослідження**

1. Патент на корисну модель № 62417, МКП F01P 3/22 (2006.01). Система регулювання температури охолоджуючої рідини газопоршневого електроагрегату з утилізацією теплоти з тепловим акумулятором / Грицук І.В., Краснокутська З.І., Адров Д.С., Вербовський В.С., Черняк Ю.В., Прилепський Ю.В., Гуцін А.М., Дорошко В.І. // Національний транспортний університет, UA, заявка № u2011 01845, дата подання 17.02.2011, Опубл.25.08.2011 Бюл. №16 – 5 арк.

2. Патент на корисну модель № 70814, МКП F01P 3/22. Тепловий акумулятор фазового переходу / Грицук І.В., Прилепський Ю.В., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Александров В.Д., Постніков В.А., Сергієнко М.І., Поддубняк В.Й., Дорошко В.І., Вербовський В.С., Адров Д.С. / Національний транспортний університет, UA, заявка № u2011 14659, дата подання 09.12.2011, Опубл.25.06.2012. Бюл. №12 – 6 арк.

3. Патент на корисну модель № 73133, МКП F01P 3/22 (2006.01). Система регулювання температури охолоджуючої рідини, оливи, палива двигуна внутрішнього згорання з утилізацією теплоти тепловим акумулятором / Грицук І.В., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Адров Д.С., Вербовський В.С., Добровольський О.С. // Національний транспортний університет, UA, заявка № u2012 03117, дата подання 16.03.2012, Опубл.10.09.2012. Бюл. №17 – 5 арк.

4. Патент на корисну модель № 75301 Україна, МПК F01P 3/22 (2006.01). Система регулювання температури охолоджуючої рідини двигуна внутрішнього згорання з утилізацією теплоти тепловими акумуляторами / Грицук І.В., Краснокутська З.І., Вербовський В.С., Адров Д.С. / (Україна); Заявник і патентовласник Національний транспортний ун-т. - № u2012 06152; заяв.21.05.2012,; опубл.26.11.2012, Бюл. №22.- 6 с.:іл..

5. Патент на корисну модель № 75713, МКП F01P 3/22 (2006.01). Система регулювання температури охолоджуючої рідини, оливи, палива двигуна внутрішнього згорання з утилізацією теплоти тепловим акумулятором і моніторингом теплових параметрів / Грицук І.В., Поддубняк В.Й., Сергієнко М.І., Гутаревич Ю.Ф., Краснокутська З.І., Добровольський О.С., Вербовський В.С., Адров Д.С., Комов А.П., Македонська Л.О., Комов Е.О. // Національний транспортний університет, UA, заявка № u2012 06657, дата подання 31.05.2012, Опубл.10.12.2012. Бюл. №23 – 6 арк.

6. Патент на корисну модель № 75809 Україна, МПК (2012.01) F01P 3/00, Система регулювання температури охолоджуючої рідини двигуна внутрішнього згорання з утилізацією теплоти тепловим акумулятором / Грицук І.В., Краснокутська З.І., Вербовський В.С., Адров Д.С. / (Україна); Заявник і патентовласник Національний транспортний ун-т. № u2012 07569; заяв.20.06.2012,; опубл.10.12.2012, Бюл. №23.-4с.:іл..

7. Патент на винахід № 106525 Україна, МПК F01P 3/22 (2013.01), B60H 1/04 (2013.01), «Система забезпечення оптимальних температур охолоджуючої рідини в двигуні внутрішнього згорання» Ю.Ф.Гутаревич, В.П.Матейчик, І.В.Грицук, В.П.Волков, А.О.Каграманян, П.Б.Комов, О.Б.Комов, В.Й. Поддубняк, М.І. Сергієнко, З.І.Краснокутська, С.А. Єрощенко, В.С. Вербовський, Д.С. Адров, Л.О. Македонська, А.П. Комов, Є.О. Комов (Україна); Заявник і патентовласник Національний транспортний ун-т, Харківський національний транспортний університет, Українська державна академія залізничного транспорту, Донецький інститут залізничного транспорту. Державний № ua 106525; заяв.16.10.2012 заявка: a2012 11919, опубл.10.09.2014, Бюл. №17.-17с.:іл..

8. Патент на корисну модель № 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. 27.11.2014; , Бюл. № 22.-6с.:іл.

9. Патент на корисну модель № 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.Гущин, 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.27.11.2014, Бюл. № 22.-6с.:іл.

Додаток Д

Результати впровадження дисертаційного дослідження

НАЦІОНАЛЬНА
АКАДЕМІЯ НАУК
УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ГАЗУ

03113 Київ, вул. Дегтярівська, 39
тел. (044) 456-44-71
факс (044) 456-88-30
E-mail: ig-secr@i.com.ua
<http://ingas.org.ua>



NATIONAL
ACADEMY OF SCIENCES
OF UKRAINE

THE GAS INSTITUTE

39 Degtjarivska St., 03113 Kiev, Ukraine
tel. (380 44) 456 44 71
fax (380 44) 456 88 30
E-mail: ig-secr@i.com.ua
<http://ingas.org.ua>

№ *94/01.1-75* Від *04.03.2021.*

ЗАТВЕРДЖУЮ

в.о. директора Інституту газу НАН України
д.т.н., завідувач відділу газових технологій,
Г.В.Жук



2021р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів дисертаційної роботи
Вербовського В.С. на тему:

«Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових
двигунів акумульованою енергією»

При виконанні науково-дослідних та проектних робіт в Інституті газу
НАН України були використані наступні результати дисертаційної роботи
Вербовського В.С.:

1. Математична модель процесу прогріву газового двигуна з комплексною системою передпускового прогріву за рахунок акумульованої теплової енергії при роботі двигуна.
2. Схема одночасного передпускового прогріву охолоджуючої рідини та моторної оливи з використанням теплових акумуляторів фазового переходу.
3. Теоретичні та експериментальні результати досліджень при розробці методики розрахунків, виборі матеріалів для системи утилізації теплоти та теплового акумулювання.

т.в.о. завідувача
відділу газових технологій, к.т.н.,

Вруч С.П.Крушневич



ООО «Теплосюз Украина»
Институт газа
Инженерный корпус, офис 12
Ул. Дегтяревская 39,
Киев 03113, Украина

Тел./факс: (38 044) 5025971
www.teplosoyuz.com

«__» _____ 2021р.

Довідка

Про використання результатів дисертаційної роботи Вербовського В.С. на тему «Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових двигунів акумульованою енергією»

Матеріали роботи, що використані в дисертації Вербовського В.С. на тему «Удосконалення процесу теплової підготовки стаціонарних газових двигунів акумульованою енергією» використані ТОВ «Теплосюз Україна» при проектуванні систем когенерації з газовими двигунами, що працюють на альтернативних паливних газах та при вирішенні проблем холодного пуску газових електростанцій.

Схема комплексної системи передпускового підігріву, запропонована Вербовським В.С., в поєднанні з існуючим блоком утилізації теплової енергії дозволяє суттєво покращити ефективність використання газового палива при пристосуванні газопоршневих агрегатів до умов експлуатації.

Використані також методика розрахунку обладнання, що використовує теплову енергію газового двигуна, та алгоритм управління комплексною системою передпускового прогріву.

Практичне використання результатів дисертаційної роботи Вербовського В.С. дозволить вирішити проблему холодного пуску газового двигуна в умовах коли неможливо підігріти двигун перед пуском від зовнішнього джерела та підвищити ККД когенераційної установки в процесі передпускової і післяпускової теплової підготовки за рахунок використання контактного теплового акумулятора

Заступник директора



Пустовойт Л.І.