

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Машинобудівний навчально-науковий інститут

Кафедра двигунів
внутрішнього згоряння,
установок та технічної
експлуатації

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри
Олексій ГОГОРЕНКО

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ НА ПАЛИВНУ ЕКОНОМІЧНІСТЬ І ПОТУЖНІСТЬ ТЕПЛОВОЗНОГО ДВИГУНА

Спеціальність 142 – Енергетичне машинобудування

Для здобуття другого (магістерського) рівня вищої освіти

Керівник роботи

Здобувач освіти



Олексій ГОГОРЕНКО



Юрій ЛІСКОВИЧ

Миколаїв 2025

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Машинобудівний навчально-науковий
Кафедра Двигунів внутрішнього згоряння, установок та технічної експлуатації
Ступінь Магістр
Спеціальність 142 Енергетичне машинобудування
(шифр і назва)
Освітня програма Двигуни внутрішнього згоряння

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ДВЗ, У та ТЕ
 О. А. Гогоренко
« » 20 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧЕВІ ОСВІТИ

Лісковичу Юрію Олександровичу

1. Тема роботи Дослідження впливу температури наддувного повітря на паливну економічність і потужність тепловозного двигуна

2. Керівник роботи канд. техн. наук, доцент Гогоренко О. А.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 15 ” 10 2025 року № 1226-уч

4. Вихідні дані до роботи Двигун 16ЧН 17/21,5 (Caterpillar 3516); потужність двигуна – 2944 кВт; частота обертання колінчатого валу – 1800 хв⁻¹; ступінь стиску – 13; температура навколишнього середовища – 40 °С.

5. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) застосування двигуна на тепловозі; дослідження впливу температури наддувного повітря на показники двигуна; економічна оцінка зменшення температури наддувного повітря двигуна; охорона праці та захист навколишнього середовища при експлуатації тепловозних двигунів

6. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Поперечний переріз двигуна; індикаторна діаграми, діаграми динаміки, графіки
залежностей досліджуваних параметрів

7. Консультанти розділів роботи

[illegible]

8. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Здобувач освіти

Керівник роботи

(підпис)

/Юрій ЛІСКОВИЧ/
(прізвище та ініціали)

/Олексій ГОГОРЕНКО/
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження впливу температури наддувного повітря на експлуатаційні показники тепловозного дизельного двигуна Caterpillar 3516. Шляхом термодинамічного моделювання в програмному середовищі Blitz-PRO проаналізовано зміну параметрів робочого циклу при зниженні температури наддувного повітря з 135 °C до 44 °C (шляхом підвищення ефективності охолоджувача наддувного повітря). Встановлено, що зниження температури призводить до суттєвого покращення паливної економічності: питома витрата палива зменшується на 3,5 % (з 0,2131 до 0,2056 кг/(кВт·год)). Для підтримки номінальної потужності потрібна менша ступінь стиску повітря в компресорі (зниження з 3,07 до 2,77). Одночасно значно знижується теплове навантаження на системи двигуна та викиди оксидів азоту (NO_x) – на 15...20 %. Економічні розрахунки підтверджують високу доцільність модернізації: додаткові капітальні витрати окупаються менш ніж за 10 місяців за рахунок економії палива. Робота містить розділи щодо практичного застосування двигуна, економічної оцінки та питань охорони праці та захисту навколишнього середовища.

Ключові слова: тепловозний двигун, температура наддувного повітря, паливна економічність, термодинамічне моделювання, охолоджувач наддувного повітря.

ABSTRACT

The qualification thesis presents a comprehensive study of the influence of the charge air temperature on the operational performance of the Caterpillar 3516 diesel locomotive engine. Through thermodynamic modeling in the Blitz-PRO software, changes in the engine cycle parameters were analyzed as the charge air temperature decreased from 135 °C to 44 °C (by increasing the efficiency of the intercooler). It was found that the temperature reduction leads to a significant improvement in fuel efficiency: specific fuel consumption decreases by 3,5 % (from 0,2131 to 0,2056 kg/(kW·h)). Maintaining nominal power requires a lower boost pressure ratio (reduced from 3.07 to 2,77), indicating increased turbocharger system efficiency. Simultaneously, the thermal load on engine systems and nitrogen oxide (NO_x) emissions are significantly reduced – by 15...20 %. Economic calculations confirm the high feasibility of modernization: additional capital costs are paid back in less than 10 months due to fuel savings. The work includes sections on the practical application of the engine, economic evaluation, and issues of occupational safety and environmental protection.

Keywords: locomotive engine, charge air temperature, fuel efficiency, thermodynamic modeling, intercooler.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА CATERPILLAR 3516 НА ТЕПЛОВОЗАХ ТЕ33А	8
1.1 Загальна характеристика тепловоза ТЕ33А	8
1.2 Вимоги до тепловозних двигунів	11
1.3 Режими роботи двигуна на тепловозі.....	13
1.4 Висновок до розділу.....	17
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ НА ПОКАЗНИКИ ДВИГУНА	19
2.1 Загальна характеристика двигуна Caterpillar 3516	19
2.2 Аналіз шляхів підвищення паливної економічності і потужності тепловозного двигуна	23
2.3 Загальний підхід до моделювання робочого циклу двигуна в Blitz-PRO	27
2.4 Моделювання робочого циклу двигуна та аналіз результатів	30
2.5 Висновок до розділу.....	45
РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗМЕНШЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ ДВИГУНА CATERPILLAR 3516.....	47
3.1 Обґрунтування доцільності зменшення температури наддувного повітря.....	47
3.2 Оцінка економічної доцільності експлуатації двигуна зі зменшеною температурою наддувного повітря.....	48
3.3 Висновок до розділу.....	52
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕПЛОВОЗНИХ ДВИГУНІВ	53
4.1 Вступ та актуальність проблеми	53
4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при обслуговуванні та ремонті тепловозних двигунів.....	55
4.3 Основні напрямки забезпечення охорони праці при роботі з тепловозними двигунами	59

4.4 Захист навколишнього середовища від впливу тепловозних двигунів.....	60
4.5 Правові, організаційні та економічні механізми забезпечення охорони праці та захисту навколишнього середовища	65
4.6 Висновки до розділу.....	67
ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		4

ВСТУП

Сучасний розвиток залізничного транспорту, як ключового ланки транспортної системи України, пов'язаний із підвищенням ефективності, надійності та екологічності тягового рухомого складу. Особливе місце в цьому процесі займають тепловози, обладнані високопотужними дизельними двигунами внутрішнього згоряння. Серед них значну увагу привертають тепловози серії ТЕ33А, які використовують сучасні дизель-генераторні установки світового виробництва, зокрема двигун Caterpillar 3516. Ефективність роботи таких двигунів значною мірою залежить від роботи системи турбонаддуву, що забезпечує підвищення потужності та економічності шляхом збільшення масового заряду повітря, що надходить у циліндри.

Одним із ключових параметрів, що впливає на ефективність системи наддуву, є температура наддувного повітря після його стиснення в компресорі та охолодження в інтеркулері. Відомо, що підвищення температури повітря знижує його щільність, що призводить до зменшення масового заряду, погіршення процесу згоряння палива та, як наслідок, до зниження потужності двигуна та збільшення питомої витрати палива. Водночас недостатньо вивченим залишається кількісний вплив температури наддувного повітря на експлуатаційні показники саме тепловозних двигунів у характерних для них режимах тривалих та змінних навантажень.

Актуальність дослідження зумовлена потребою у підвищенні енергоефективності залізничного транспорту, зниженні експлуатаційних витрат на паливо та дотриманні суворих екологічних стандартів. Оптимізація температури наддувного повітря представляється важливим резервом для покращення техніко-економічних показників тепловозних силових установок без кардинальних змін їх конструкції.

Метою даної роботи є дослідження впливу температури наддувного повітря на паливну економічність та потужність тепловозного двигуна на прикладі двигуна Caterpillar 3516, встановленого на тепловозі ТЕ33А.

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
						5
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні завдання:

Проаналізувати застосування двигуна Caterpillar 3516 на тепловозах ТЕ33А та вимоги до сучасних тепловозних силових установок.

Дослідити теоретичні засади впливу температури наддувного повітря на робочий цикл двигуна.

Провести моделювання робочого циклу двигуна Caterpillar 3516 за допомогою програмного комплексу Blitz-PRO для оцінки зміни експлуатаційних показників залежно від температури наддувного повітря.

Виконати економічну оцінку ефективності зниження температури наддувного повітря.

Розглянути питання охорони праці та захисту навколишнього середовища при експлуатації тепловозних двигунів.

Об'єктом дослідження є процес роботи тепловозного дизельного двигуна з турбонаддувом.

Предметом дослідження – вплив температури наддувного повітря на паливну економічність, потужність та екологічні показники двигуна Caterpillar 3516.

Теоретичною основою роботи стали праці вітчизняних та зарубіжних учених в галуні двигунобудування, термодинаміки, а також нормативно-технічна документація.

Методи дослідження включають аналіз науково-технічної літератури, термодинамічне моделювання робочого циклу двигуна в програмному середовищі Blitz-PRO, методи техніко-економічного аналізу.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному кількісному дослідженні впливу температури наддувного повітря на експлуатаційні показники тепловозного двигуна Caterpillar 3516 за умов характерних режимів його роботи.

Практична цінність отриманих результатів полягає в можливості їх використання для оптимізації роботи систем наддуву тепловозних двигунів з метою підвищення їх ефективності, зниження витрати палива та викидів шкідливих

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
						6
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

речовин. Результати дослідження можуть бути застосовані при проектуванні, модернізації та експлуатації тепловозних силових установок на залізничному транспорті України.

Структура роботи включає вступ, чотири розділи, висновки та список використаної літератури. У першому розділі розглядається застосування двигуна Caterpillar 3516 на тепловозах ТЕ33А та вимоги до тепловозних двигунів. Другий розділ присвячений моделюванню впливу температури наддувного повітря на робочий цикл двигуна. У третьому розділі виконується економічна оцінка ефективності запропонованого технічного рішення. Четвертий розділ охоплює питання охорони праці та захисту навколишнього середовища при експлуатації тепловозних двигунів.

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
						7
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1. ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА CATERPILLAR 3516 НА ТЕПЛОВОЗАХ ТЕ33А

1.1 Загальна характеристика тепловоза ТЕ33А

Тепловоз ТЕ33А (рис. 1.1) є сучасним вантажним двосекційним тепловозом, призначеним для обслуговування вантажних перевезень на магістральних залізницях з шириною колії 1520 мм. Він розроблений для ефективної роботи в складних кліматичних умовах, зокрема в регіонах з різким перепадом температур, та здатний вести важкі та довгі склади на ділянках з горбистим профілем шляху [1].



Рис. 1.1. Тепловоз ТЕ33А

Його основним завданням є заміна застарілого парку радянських тепловозів (таких як 2ТЕ10, 2ТЕ116 тощо), забезпечуючи при цьому значно вищу економічність, надійність та відповідність сучасним екологічним нормам.

Тепловоз ТЕ33А є продукцією одного з найбільших машинобудівних підприємств СНД – АТ «Луганський тепловозобудівний завод» (АТ «ЛТЗ»). Розробка та початок виробництва ТЕ33А припали на період, коли завод прагнув створити сучасну конкурентоспроможну продукцію для оновлення парку залізниць країн пострадянського простору. Конструкція тепловоза була спроектова-

на з використанням ключових імпортних компонентів (дизелів, електроніки) для забезпечення якості та надійності. Через події на сході України виробничі потужності заводу були порушені, що вплинуло на подальше виробництво та обслуговування цієї моделі. ТЕ33А, будучи створеним для широкої колії 1520 мм, знайшов застосування переважно в країнах СНД та східної Європи. До 2014 року та на початковому етапі після його появи, невелика кількість ТЕ33А потрапила на Українські залізниці (УЗ). Однак через подальші політичні та економічні обставини, а також через проблеми з постачанням запчастин і сервісом, їх експлуатація в Україні не набула масового характеру.

Основні технічні дані та параметри:

Тип тяги: Вантажний, двосекційний;

Осьова формула: 2(3o-3o) (Кожна секція має три візки з трьома осями, кожна вісь приводиться в рух окремим тяговим електродвигуном);

Ширина колії: 1520 мм;

Конструкційна швидкість: 120 км/год;

Зчіпна маса: $2 \times 126 \text{ т} = 252 \text{ т}$;

Діаметр коліс: 1050 мм;

Довжина по осях автозчіпок: $2 \times 22\,250 \text{ мм}$ (загалом ~45 м).

Ключовою особливістю тепловоза ТЕ33А є використання сучасних дизель-генераторних установок (ДГУ) світових виробників, що забезпечує його високі експлуатаційні якості. На тепловозах серії ТЕ33А встановлюються двигуни Cummins QSK60 або Caterpillar 3516 – це 4-тактні, V-подібні, 16-циліндрові двигуни з турбонаддувом та проміжним охолодженням повітря. Номінальна потужність двигунів на одну секцію може сягати 2500...4000 к.с. в залежності від налаштувань. Загальна потужність двосекційного тепловоза сягає до 5900 кВт (≈ 8000 к.с.).

Електрична передача тепловоза ТЕ33А служить для ефективного перетворення та передачі механічної потужності від дизельного двигуна до колісних пар. На цих локомотивах застосована сучасна електрична схема. Тип передачі — змінно-постійного струму, що є класичним та надійним рішенням для ван-

					КРМ.142.6221м.25.13.01.ПЗ.	Лист
						9
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

тажних тепловозів, хоча на пізніших модифікаціях може встановлюватися більш прогресивна передача змінного струму.

Серцевиною передачі є головний синхронний генератор змінного струму, який безпосередньо приводиться в обертання від коленчатого вала дизеля. Цей генератор виробляє змінний електричний струм. Потім цей струм випрямляється за допомогою напівпровідникової випрямної установки в струм постійний.

Отриманий постійний струм живить тягові електродвигуни. Кожна секція тепловоза обладнана шістьма тяговими електродвигунами постійного струму, по одному на кожну вісь. Ці двигуни призначені для тривалої роботи в умовах високих навантажень та мають великий запас потужності та крутного моменту. У варіантах із передачею змінного струму замість двигунів постійного струму використовуються асинхронні тягові електродвигуни, які відрізняються ще вищою надійністю та економічністю. У будь-якому випадку передача забезпечує плавне регулювання сили тяги в широкому діапазоні швидкостей.

Допоміжне обладнання тепловоза ТЕ33А формує комплекс сучасних систем, що забезпечують безпеку, економічність та надійність його експлуатації. Важливу роль відіграє система електричного гальмування, а саме реостатного. Вона дозволяє ефективно гальмувати важкий потяг на довгих спусках, перетворюючи кінетичну енергію руху на електричну та розсіюючи її у вигляді теплоти через потужні гальмівні реостати. Це значно зменшує знос механічних гальмівних колодок та покращує безпеку руху.

Управління всіма процесами, від запуску дизеля до регулювання тяги, здійснюється сучасною системою мікропроцесорного управління та діагностики. Ця система в режимі реального часу постійно контролює сотні параметрів роботи тепловоза, таких як тиск масла, температура води, потужність двигуна та стан електричних кіл. Вона не лише оптимізує роботу всіх агрегатів, але й попереджає машиніста про можливі несправності, фіксуючи їх у бортовому журналі для подальшого аналізу.

Для підвищення економічної ефективності та ведення обліку на тепловозі встановлена система контролю енергорозподілу та параметрів руху. Вона авто-

					КРМ.142.6221м.25.13.01.ПЗ.	Лист
						10
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

матично фіксує витрату палива, електроенергії, пройдений шлях, час роботи та простою, що дозволяє точно аналізувати ефективність використання локомотива та формувати звітність.

Конструкція тепловоза ТЕ33А інтегрувала у себе ряд ключових особливостей, що визначають його конкурентні переваги. Висока економічність досягається завдяки використанню сучасних двигунів, які мають значно нижчу витрату палива в порівнянні з радянськими аналогами, що забезпечує суттєве зниження експлуатаційних витрат.

Важливим аспектом є екологічність локомотива, який відповідає строгим міжнародним нормам, таким як Tier 2, суттєво знижуючи шкідливі викиди в атмосферу.

Надійність тепловоза забезпечується застосуванням перевірених силових агрегатів світових виробників, що гарантує високий міжремонтний пробіг та зменшує простої.

Комфорт для локомотивної бригади створюється завдяки сучасній ергономічній кабіні машиніста, обладнаній ефективною шумоізоляцією, системою кондиціювання повітря та усіма необхідними засобами безпеки і контролю, що зменшує втому і підвищує уважність під час роботи.

Ремонтопридатність конструкції реалізована через модульну компоновку основних вузлів, що значно спрощує процеси технічного обслуговування та ремонту, скорочуючи час і витрати на їх проведення.

1.2 Вимоги до тепловозних двигунів

Питома маса дизельного агрегату є критичним параметром, що жорстко обмежується допустимим навантаженням від колісної пари на рейки. Згідно з експлуатаційною практикою, маса дизеля не повинна перевищувати 15...18 % від загальної маси тепловоза. Для стандартного навантаження 200...250 кН на вісь, встановленого для магістральних залізниць, дослідженнями визначено такі норми питомої маси: 6,1...6,8 кг/кВт для агрегатів потужністю близько 3000 кВт та 4,75...5,5 кг/кВт для потужніших двигунів від 4500 кВт і вище.

					КРМ.142.6221м.25.13.01.ПЗ.	Лист
						11
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Найважливішою вимогою є висока паливна ефективність на всіх експлуатаційних режимах. Це передбачає питому витрату палива на рівні 200...205 г/(кВт·год) та мастила – 1,4...1,8 г/(кВт·год). Критерієм якості є стабільна та економна робота на холостих ходах і малих навантаженнях, а також чистий перехід між режимами без побічних явищ, таких як викиди палива, розрідження мастила або закоксування. Для чотиритактних двигунів перспективною є технологія відключення половини циліндрів на неповних навантаженнях (до 40 % від номіналу), що передбачає припинення подачі палива і повітря. Також актуальною є вимога багатопаливності – здатність працювати на паливі різного фракційного складу, включаючи сорти з підвищеним вмістом сірки, а також на природному газі та синтетичних паливах.

Сучасний дизель повинен відповідати четвертому ступеню автоматизації згідно за ДСТУ 14228–80, що включає комплексне управління, захист і регулювання. Обов'язковими є підтримка стабільного теплового стану (температури охолоджуючої рідини та мастила) на всіх режимах експлуатації та наявність вбудованої системи діагностики відповідно до ДСТУ 2041–75, яка охоплює як двигун в цілому, так і його ключові компоненти.

Двигун повинен демонструвати безвідмовну роботу в широкому діапазоні умов: при температурах навколишнього середовища від -40°C до $+40^{\circ}\text{C}$, на висоті до 2000 метрів над рівнем моря та при вологості повітря до 70 %. Конструкція повинна враховувати вплив цих факторів на потужність, витрату палива та характеристики робочого процесу. Для тепловозних умов експлуатації особливо важливими є: мінімізація роботи на холостому ході для підтримки теплового режиму, можливість незалежної та одночасної роботи системи підігріву та двигуна, дистанційне керування та гарантований пуск незалежно від температурного стану.

Велика увага приділяється ергономічним показникам, дотриманню норм гігієни праці та техніки безпеки. Для відповідності ДСТУ 12.1.003–83 необхідно забезпечити повне динамічне урівноваження всіх рухомих мас, усунення заборонених критичних частот обертання за допомогою демпферів та встанов-

					КРМ.142.6221м.25.13.01.ПЗ.	Лист
						12
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

лення двигуна на віброізолюючі амортизатори. У контексті екології визначальними є вимоги до мінімальної токсичності (ДСТУ 24585–81) та димності вихлопних газів (ДСТУ 24028–80).

1.3 Режими роботи двигуна на тепловозі

Режим роботи двигуна визначається сукупністю основних параметрів робочого процесу, таких як ефективна потужність (N_e), середній ефективний тиск (p_e), крутний момент (M) та частота обертання (n) [4]. Розрізняють усталені та неусталені режими експлуатації.

Усталені режими характеризуються постійністю основних параметрів у часі та досягаються при балансі потужності, що розвивається двигуном, та потужності, яку споживає генератор змінного струму. До таких режимів належать: номінальний режим, економічний режим і режим холостого ходу.

Неусталені режими відрізняються змінністю параметрів у часі через зміну зовнішнього навантаження. До них відносять: пуск двигуна, зупинка, прогрів та перехід між усталеними режимами.

Сукупність режимів із постійними значеннями одного або декількох параметрів утворює характеристики роботи двигуна. В якості незмінних показників можуть виступати частота обертання колінчастого валу, потужність двигуна, циклова витрата пального тощо. Характеристики двигуна зображуються графічно і мають вигляд, що відповідає рис. 1.2.

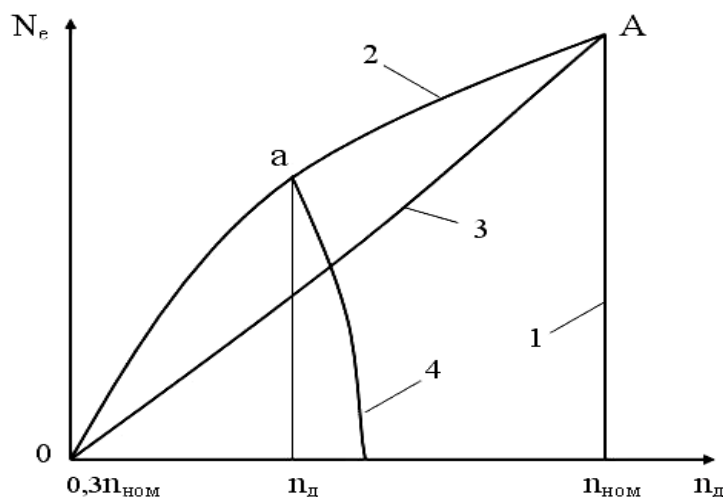


Рис. 1.2. Характеристики роботи тепловозних дизель-генераторів:

- 1 – навантаження;
- 2 – зовнішня;
- 3 – тепловозна (генераторна);
- 4 – регуляторна

Розрізняють наступні характеристики, за якими працюють тепловозні двигуни:

1) Навантажувальна характеристика – при постійному значенні частоти обертання колінчастого валу. Робота за цими характеристиками зумовлена впливом рукоятки контролера машиніста на затяжку пружини ізодромного регулятора, що підтримує постійну частоту обертання колінчастого валу за рахунок зміни положення рейки паливного насоса. Мінімальне значення потужності двигуна при будь-якому постійному значенню частоти обертання колінчастого валу відповідає режиму холостого ходу, тобто при навантаженні, зумовленому потужністю навісного обладнання.

2) Швидкісна характеристика – робота із сталою цикловою витратою палива. При номінальній витраті палива характеристика набуває назви зовнішньої швидкісної.

3) Тепловозна характеристика – робота за заданою схемою налаштування генератора. Система об'єднаного регулювання частоти обертання колінчастого вала та потужності двигуна, що встановлена на тепловозах типу ТЕ3ЗА, не дозволяє отримати монотонно змінні параметри роботи дизеля за тепловозною характеристикою. Тому на практиці дана характеристика являє собою ламану криву, що відповідає ступінчастому регулюванню частоти обертання валу двигуна, яке зумовлене положенням органу керування – рукоятки контролера машиніста. Як було сказано вище, головна рукоятка керування має 16 положень, що обіймають діапазон частоти обертання колінчастого валу 0, 350...1000 об/хв. Мінімальне значення номінальної ефективної потужності двигуна, що працює за тепловозною характеристикою, відповідає умові зрушення з місця состава з найбільшою допустимою вагою з урахуванням потужності навісних агрегатів, що приводяться від дизеля.

4) Економічна характеристика – забезпечує мінімальну питому витрату палива для всіх частот обертання. Ця характеристика також являє собою ламану криву. Економічна і тепловозна характеристики як правило не співпадають.

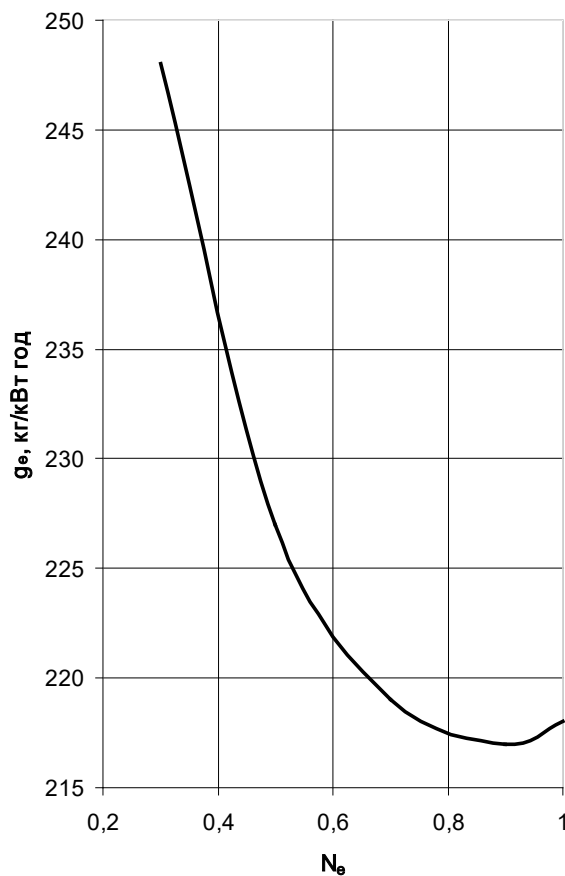
					КРМ.142.6221м.25.13.01.ПЗ.	Лист
						14
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

5) Обмежувальна характеристика – визначається максимально допустимою температурою деталей циліндро-поршневої групи.

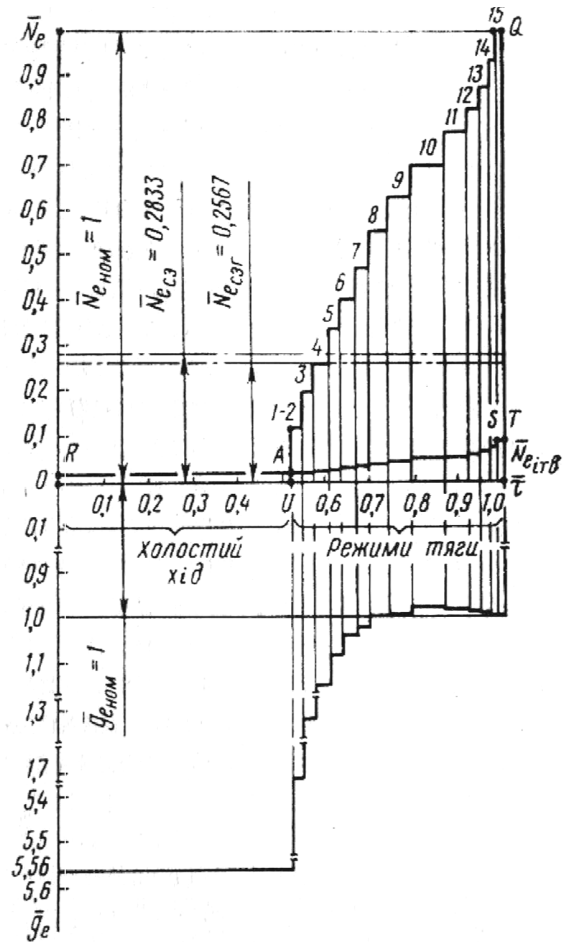
Визначені вище характеристики описують роботу двигуна виключно в усталених режимах за стандартних атмосферних умов та незмінних температур теплоносіїв. Їх отримують під час стендових випробувань на заводі-виробнику. Проте, даний набір характеристик не включає такі ключові експлуатаційні режими, як холостий хід, перехідні процеси та операції пуску та зупинки. Слід зазначити, що динамічні перехідні процеси, властиві реальній експлуатації тепловозних двигунів, суттєво відрізняються від усталених станів, що зумовлює необхідність їх окремого комплексного дослідження.

Оскільки тепловозні дизелі працюють переважно в усталених режимах, саме їх характеристики визначальним чином впливають на середньоексплуатаційну економічність як двигуна, так і тепловоза в цілому.

Критерієм економічності слугує витрата палива на одиницю пробігу – 10 тис. км. Цей показник залежить не лише від теплотехнічної досконалості двигуна, але й від умов експлуатації: швидкості руху, часу простою, маси складу та кліматичних факторів. Для його точного визначення необхідно мати дані про розподіл режимів роботи двигуна за час проходження вимірювача, тобто залежність ефективної потужності від часу $N_e = N_e(\tau)$. На рис. 1.3 зображено залежність відносної потужності і відносної витрати пального для тепловозного двигуна на кожному режимі його роботи, а також відносний час роботи двигуна на кожному окремому режимі.



а



б

Рис. 1.3. Вихідні дані для обчислення середньої експлуатаційної економічності тепловоза: а) залежність питомої витрати пального при роботі двигуна Caterpillar 3516 за тепловозною характеристикою; б) гістограма режимів роботи двигуна за термін пробігу 10 тис. км

Згідно з даними рис. 1.3, режим холостого ходу займає близько 50% експлуатаційного часу двигуна, що відповідає сумарній тривалості всіх інших робочих режимів. Це явище обумовлене такими факторами:

- регулярними зупинками в маршруті, під час яких потрібно підтримувати тиск у гальмовій системі;
- необхідністю живлення допоміжного обладнання та зарядки акумуляторів.

В умовах низьких температур час роботи на холостому ходу суттєво збільшується через вимоги до підтримки температурного режиму експлуатаційних

рідин у всіх системах тепловоза.

Згідно зі статистичними даними, частка палива, що витрачається тепловозними дизелями на режимах холостого ходу під час руху та прогріву на стоянках, сягає 16 % від загального споживання. Режимми з малим та середнім навантаженням займають 43...45 % експлуатаційного часу, тоді як робота на номінальних та близьких до номінальних режимах становить лише 5...7 % від загального часу роботи на інтервалі 10 тис. км.

Враховуючи це, номінальна потужність тепловозного двигуна має перевищувати на 10 % потужність, необхідну для зрушення складу максимальної маси. Відповідно, максимальна маса складу визначається з урахуванням цього запасу потужності для забезпечення надійного зрушення з місця.

Хоча частка номінальних та близьких до номінальних режимів у загальному балансі робочого часу незначна, їх абсолютна тривалість може бути значною – наприклад, під час подолання затяжних ухилів або динамічного розгону. Це вимагає повної технічної готовності всіх систем тепловоза до роботи в таких умовах.

1.4 Висновок до розділу

У першому розділі було розглянуто застосування двигуна Caterpillar 3516 на тепловозах ТЕ33А в контексті загальних вимог до сучасних тепловозних силових установок. Проведений аналіз дозволяє зробити такі ключові висновки:

Конструктивні особливості тепловоза ТЕ33А із застосуванням двигуна Caterpillar 3516 забезпечують йому значні переваги порівняно із застарілими моделями. Високі тягово-енергетичні показники, сучасна електрична передача, комплекс систем мікропроцесорного управління та безпеки роблять його ефективним рішенням для магістральних вантажних перевезень.

Двигун Caterpillar 3516 повною мірою відповідає суворим вимогам, що висуваються до тепловозних дизелів щодо масових характеристик, паливної економічності (питома витрата палива на рівні 200...205 г/(кВт·год)), екологіч-

					КРМ.142.6221м.25.13.01.ПЗ.	Лист
						17
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

ності (відповідність стандарту Tier 2), надійності та адаптації до різноманітних умов експлуатації.

Аналіз режимів роботи показав, що, незважаючи на переважання усталених режимів, динамічні навантаження та значні абсолютні тривалості роботи на номінальних потужностях вимагають від двигуна та систем тепловоза високого запасу міцності та експлуатаційної стійкості. Особливу увагу при експлуатації необхідно приділяти режимам холостого ходу, на які припадає до 50 % часу та 16 % витрати палива.

Таким чином, використання сучасного та енергоефективного двигуна Caterpillar 3516 на тепловозі ТЕ33А є обґрунтованим технічним рішенням, що забезпечує досягнення високих експлуатаційно-економічних показників та відповідність актуальним стандартам.

					КРМ.142.6221м.25.13.01.ПЗ.	Лист
						18
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. ЗАСТОСУВАННЯ ДВИГУНА CATERPILLAR 3516 НА ТЕПЛОВОЗАХ ТЕЗЗА

2.1 Загальна характеристика двигуна Caterpillar 3516

Caterpillar 3516 – це високопродуктивний дизельний двигун (рис. 2.1) з електронним управлінням, призначений для використання в складі тепловозних і морських енергетичних установок, де потрібна висока надійність, ефективність та довгий термін служби [2, 3]. Він підтримує різні режими роботи, включаючи тривале навантаження та роботу в умовах низьких температур. Двигун належить до серії 3500С і випускається у варіантах з 8, 12 та 16 циліндрами.

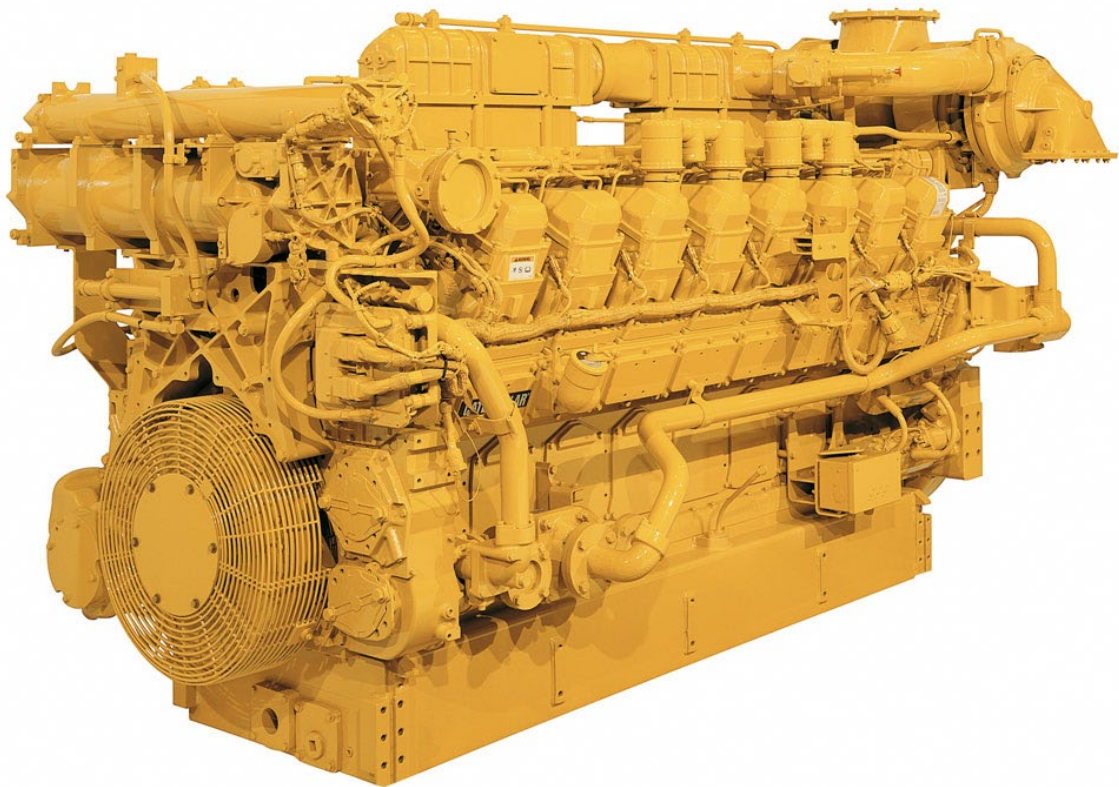


Рис. 2.1. Загальний вид двигуна Caterpillar 3516

Основні параметри:

Тип: 4-тактний дизельний двигун з турбонаддувом.

Розташування циліндрів: V-подібне, 60 градусів.

Кількість циліндрів: 8, 12 або 16.

Охолодження повітря: Проміжне охолодження за допомогою рідини

Система впорскування палива: Електронні інжектори (EUI).

Система запуску: Електричний стартер.

Ключові характеристики:

Робочий об'єм: Від 34.5 л (3508B) до 78 л (3516C).

Діаметр циліндра: 170 мм.

Хід поршня: 190 мм або 215 мм (залежно від моделі).

Номінальна потужність: Залежить від конфігурації та налаштувань.

Оберти: Від 1000 до 1925 об/хв.

Ступінь стиснення: 13.

Система змащення двигуна Caterpillar 3516 є комплексною та високоефективною системою, розробленою для забезпечення оптимального захисту всіх рухомих частин двигуна. Вона працює за принципом примусової циркуляції мастила під тиском, що забезпечує надійне змащення, охолодження та очищення критично важливих компонентів, таких як корінні та шатунні підшипники, поршневі пальці, кулачковий вал та зубчаста передача.

Основним елементом системи є масляний насос, який забирає мастило з картера та подає його під тиском до головного масляного каналу. Перед входом у основну магістраль мастило проходить через повнопотокові масляні фільтри, які видаляють з нього механічні домішки та продукти зношування. Для підвищення якості фільтрації двигун також може бути обладнаний допоміжним центробіжним фільтром, який відповідає за видалення найдрібніших частинок.

Для забезпечення безперебійної роботи навіть під час обслуговування фільтрів двигун часто комплектується дуплексною системою фільтрів. Ця конструкція дозволяє перемикати потік мастила між основним і допоміжним фільтрами, що дає змогу замінювати їх без зупинки двигуна. Тиск у системі змащення постійно контролюється за допомогою датчиків, а його значення відображається на приладовій панелі. Електронний модуль керування (ЕСМ) відстежує тиск масла та може активувати попередження або навіть аварійне зупинення двигуна у разі його небезпечного зниження.

					КРМ.142.6221м.25.13.02.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		20

Охолодження мастила здійснюється за допомогою масляного радіатора, який зазвичай інтегрований у систему охолодження двигуна. Це допомагає підтримувати оптимальну температуру мастила, що є критично важливим для збереження його змащувальних властивостей та запобігання тепловому розкладанню. Рівень мастила в картері слід регулярно перевіряти за допомогою масляного щупа, підтримуючи його між позначками «ADD» та «FULL».

Caterpillar рекомендує використовувати високоякісні мастила, такі як Cat DEO (Diesel Engine Oil), які відповідають строгим вимогам до продуктивності та захисту від зношування. Для моніторингу стану системи змащення та самого двигуна активно застосовується програма аналізу мастила S-O-S (Scheduled Oil Sampling). Ця програма дозволяє виявляти продукти зношування металів та інші забруднення, що дає змогу прогнозувати потенційні проблеми та планувати обслуговування.

Система охолодження двигуна Caterpillar 3516 є дво- або триконтурною системою, розробленою для ефективного відведення тепла та підтримки оптимальної робочої температури двигуна. Її головне завдання — запобігти перегріву критичних компонентів, таких як циліндри, головки блоків циліндрів та турбокомпресор, при цьому гарантуючи швидкий вихід на робочий температурний режим для мінімізації зношування та викидів.

Основним принципом роботи є циркуляція охолоджуючої рідини (антифризу) під тиском через «рубашку» охолодження блоку циліндрів та головок. Нагріта рідина потрапляє до теплообмінника (кільчастого охолоджувача або радіатора), де віддає тепло забортній воді або повітрю, і вже охолодженою повертається в двигун. Циклічність забезпечує термостат, який відкривається при досягненні заданої температури, спрямовуючи рідину через радіатор. Це запобігає роботі двигуна в занадто холодному режимі, що також шкідливо.

Двигун може використовувати дві основні схеми проміжного охолодження повітря (aftercooling):

1. Охолодження рідиною з рубашки (Jacket Water Aftercooling): Нагріте стиснене повітря з турбокомпресора охолоджується в спеціальному теплооб-

					KPM.142.6221м.25.13.02.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		21

міннику, через який циркулює основна охолоджуюча рідина двигуна. Ця система простіша, але менш ефективна.

2. Охолодження окремим контуром (Separate Circuit Aftercooling): Для охолодження повітря використовується незалежний контур із власним насосом, теплообмінником та рідиною, яка зазвичай має нижчу температуру. Це забезпечує кращу ефективність та потужність двигуна.

Система обладнана датчиками температури та тиску, інформація з яких постійно аналізується електронним модулем керування (ЕСМ). У разі перегріву охолоджуючої рідини або рідини в контурі проміжного охолодження ЕСМ може сповільнити двигун (режим derate) або ініціювати його аварійне зупинення, запобігаючи серйозним пошкодженням. Таким чином, система охолодження Caterpillar 3516 є інтелектуальною, надійною та невід'ємною частиною забезпечення довгого та безвідмовного терміну служби двигуна.

Паливна система двигуна Caterpillar 3516 є високотехнологічною системою з електронним управлінням, розробленою для забезпечення точної подачі палива, оптимального згорання та відповідності суворим вимогам щодо ефективності та викидів. Її основним компонентом є система електронних інжекторів (EUI - Electronic Unit Injector), яка поєднує функції високотискового насоса та форсунки в одному компактному вузлі.

Принцип роботи системи полягає в наступному: паливopідкачувальний насос низького тиску подає паливо з бака через фільтри до інжекторів. Електронний модуль керування (ЕСМ) на основі даних від численних датчиків (тиску, температури, положення валу тощо) обчислює оптимальний момент і тривалість упорскування. Потім він надсилає електричний імпульс до соленоїда кожного інжектора. Інжектор, використовуючи механічну енергію кулачка розподільчого валу, генерує вкрай високий тиск безпосередньо в своєму корпусі та впорскує паливо в циліндр. Така конструкція забезпечує високу точність, швидкість роботи та тиск впорскування, що досягає 2000 бар і більше.

Для забезпечення довговічності та безвідказності паливна система має кілька ступенів очищення. Включає первинний паливний фільтр/сепаратор води

					КРМ.142.6221м.25.13.02.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		22

та вторинний паливний фільтр тонкого очищення. Первинний фільтр зазвичай розташований між баком і паливопідкачувальним насосом і служить для видалення грубих механічних домішок та води, яка є найбільш руйнівним забруднювачем для прецизійних компонентів системи. Вторинний фільтр, розташований перед інжекторами, забезпечує остаточне очищення палива. Для зручності обслуговування без зупинки двигуна багато моделей обладнуються дуплексними фільтрами.

Електронне управління дозволяє системі адаптуватися до різних умов експлуатації. ЕСМ безперервно моніторить такі параметри, як тиск палива, його температура та рівень забруднення фільтрів (перепад тиску). У разі виявлення проблеми, наприклад, зниження тиску через засмічений фільтр, система може активувати попередження, а потім ініціювати зниження потужності двигуна, щоб запобігти його пошкодженню.

Якість палива є критичним фактором. Рекомендується використовувати якісне дизельне паливо з низьким вмістом сірки та механічних домішок. Для роботи в холодну пору року необхідно застосовувати паливо відповідних сортів (№1-D або спеціальні зимові суміші) або обладнувати систему паливними підігрівачами, щоб уникнути закупорки фільтрів через парафінізацію.

2.2 Аналіз шляхів підвищення паливної економічності і потужності тепловозного двигуна

Для тепловозних дизелів, які працюють в умовах тривалих навантажень та високих питомих тисків, ефективність системи наддуву є критично важливим фактором, що безпосередньо впливає на паливну економічність, потужність та ресурс. Ключовим параметром у цій системі є температура повітря після компресора турбокомпресора та на вході у циліндри. Дане дослідження спрямоване на аналіз цього впливу.

Принцип дії наддуву полягає в попередньому стисненні повітря, що надходить у циліндри, що призводить до збільшення його масової витрати та, від-

повідно, кількості кисню. Це, у свою чергу, дозволяє спалити більше палива в циклі, підвищуючи літрову потужність та загальний ККД двигуна [3, 4].

Двигуни, обладнані агрегатами наддуву, відносять до комбінованих двигунів внутрішнього згоряння (КДВЗ). Впровадження турбокомпресора (ТК) дозволяє або значно збільшити потужність та ефективність силового агрегату при тих же габаритах, або зменшити його масу та розміри при збереженні потужності порівняно з атмосферними аналогами.

Крім підвищення потужності, КДВЗ мають низку інших переваг:

Екологічність: У дизельних двигунах наддув дозволяє збільшити коефіцієнт надлишку повітря, що сприяє більш повному згорянню палива і відсуває межу виникнення димності. Це призводить до зменшення викидів твердих частинок (сажі).

Порівняння дизельних та бензинових КДВЗ: Дизельні двигуни з наддувом мають певні переваги перед бензиновими:

Відсутність дроселювання на впуску та високий коефіцієнт надлишку повітря ($\alpha = 1,4 \dots 3,5$) забезпечують більшу енергію вихлопних газів, що сприяє ефективнішій роботі турбіни.

Відсутність явища детонації дозволяє підвищувати тиск наддуву до межі міцності конструкційних елементів двигуна, на відміну від бензинових двигунів, де це явище є основним обмежуючим фактором.

Незважаючи на очевидні переваги, системи турбонаддуву мають суттєві недоліки:

Явище «турбоями»: На малих обертах колінчатого валу енергії вихлопних газів недостатньо для швидкого розкручування ротора ТК. Це призводить до затримки відгуку двигуна на дії машиніста – так званої «турбоями» [9].

Підвищені технічні вимоги: Висока частота обертання ротора ТКР вимагає вдосконаленої системи змащення та підвищених вимог до балансування деталей. Температура вихлопних газів (до 1000 °C) створює високі термічні навантаження, що висуває особливі вимоги до жароміцності матеріалів турбіни.

					КРМ.142.6221м.25.13.02.ПЗ.	Лист
						24
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Нагрівання повітря при стисненні: Стиснення повітря в компресорі супроводжується зростанням його температури, що є негативним фактором, оскільки гаряче повітря має меншу щільність [5].

Для боротьби з нагріванням повітря в системах турбонаддуву обов'язковим елементом є охолоджувач наддувного повітря (рис. 2.2).

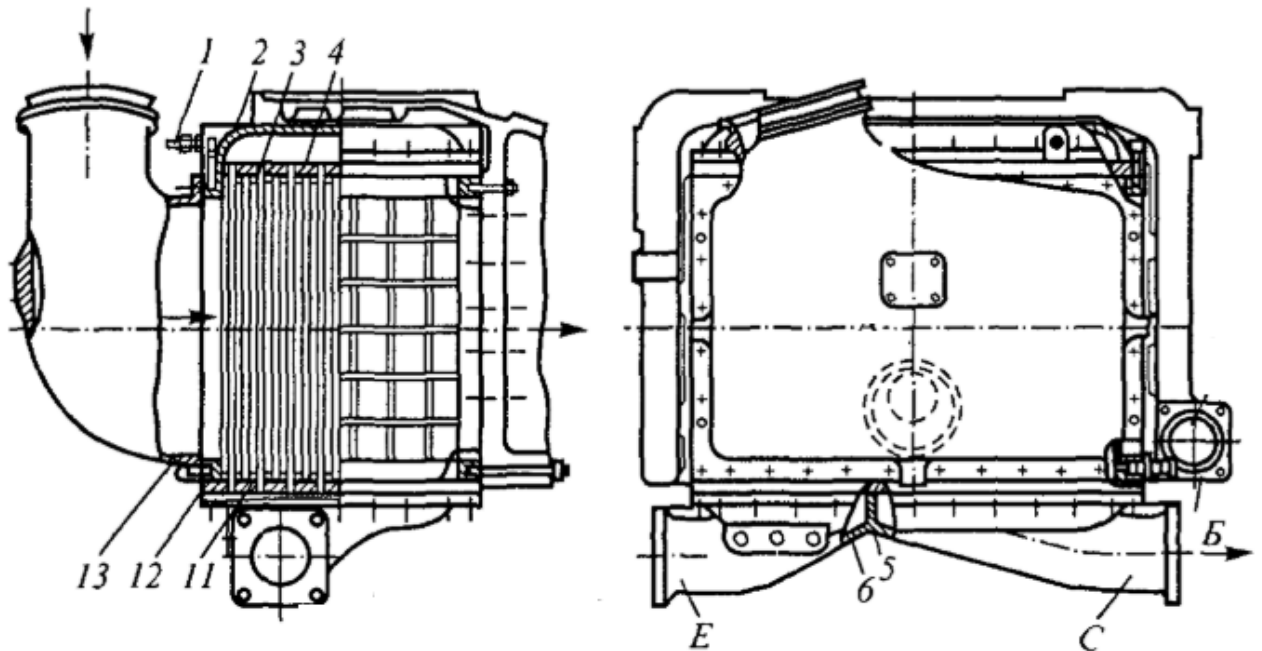


Рис. 2.2. Охолоджувач наддувного повітря тепловозного двигуна:

- 1 – трубка для відведення пари; 2 – верхня кришка; 3 – трубка; 4, 11 – трубні дошки; 5 – перегородка; 6 – нижня кришка; 7 – шпилька; 8 – кронштейн; 9 – болт; 10 – гумове кільце; 12 – корпус; 13 – патрубок; Б – фланець; Е, С – патрубки; Ж, І – канали

Його основне завдання – відведення теплоти від стиснутого повітря, що дозволяє значно підвищити його щільність і, відповідно, масовий заряд, що надходить у циліндри [11, 12].

При розробці охолоджувачів наддувного повітря необхідно враховувати кілька критеріїв, що часто суперечать один одному:

- Максимальна ефективність охолодження.
- Мінімальні втрати тиску повітряного потоку.
- Зменшення гідравлічної інерції системи для боротьби з «турбоямою».

Конструктори прагнуть знайти оптимальну форму трубок (пласкі для кращого теплообміну при турбулентному потоці, але круглі для менших втрат тиску при ламінарному) та конфігурацію теплообмінних поверхнь. Ефективність сучасних серійних охолоджувачів з повітряним охолодженням зазвичай обмежується діапазоном 50...80 % [6]. Ефективність сучасних водо-повітряних охолоджувачів наддувного повітря сягає 98 %.

Для підвищення ефективності застосовуються спеціальні технічні рішення, такі як:

- встановлення форсунок для подачі води в наддувне повітря, що інтенсифікує теплообмін за рахунок випаровування;
- використання окремого рідинного контуру охолодження. Така система компактніша та ефективніша за рахунок високої теплоємності рідини, проте є більш складною, дорогою та вимогливою в обслуговуванні [6].

Таким чином, системи газотурбінного наддуву є складним, але вкрай ефективним засобом модернізації ДВЗ. Охолоджувач наддувного повітря як ключовий елемент такої системи безпосередньо впливає на її ККД, а його комплексне дослідження та оптимізація залишаються актуальним завданням для подальшого вдосконалення двигунів.

Однак, незважаючи на загальновизнану важливість охолоджувача наддувного повітря, для тепловозних двигунів як найбільш потужних та енергонасичених представників дизелів з наддувом, кількісний вплив температури наддувного повітря на їх ключові експлуатаційні показники залишається недостатньо вивченим. Зокрема, потребує системного аналізу взаємозв'язок між температурою повітря на впуску, паливною економічністю та потужністю саме тепловозного двигуна в умовах його характерних режимів роботи – тривалих навантажень та змінних швидкісних режимів.

Саме тому метою даного дослідження є аналіз впливу температури наддувного повітря на паливну економічність і потужність тепловозного двигуна. Досягнення цієї мети потребує вирішення наступних завдань: встановити теоретичні залежності між температурою наддувного повітря, щільністю повітря-

ного заряду та масою палива, що може бути ефективно спалене в циліндрі; визначити вплив зміни температури на впуску на термодинамічні параметри робочого циклу (тиск, температуру, ККД); провести кількісну оцінку зміни ефективної потужності та питомої витрати палива при різних температурних режимах роботи системи наддуву тепловозного двигуна.

Актуальність такого дослідження зумовлена потребою у підвищенні енергоефективності залізничного транспорту, де оптимізація роботи системи наддуву може забезпечити істотну економію палива та збільшення потужностного потенціалу тепловозів без принципових змін у конструкції двигуна.

2.3 Загальний підхід до моделювання робочого циклу двигуна в Blitz-PRO

Для проведення кількісного аналізу впливу температури наддувного повітря на характеристики тепловозного двигуна в даному дослідженні запропоновано використання сучасного програмного комплексу Blitz-PRO [7].

Програмний комплекс Blitz-PRO реалізує термодинамічний підхід до моделювання робочого циклу ДВЗ на основі системи взаємопов'язаних відкритих термодинамічних систем (ВТС). Кожен елемент двигуна (циліндр, випускний колектор, впускний ресивер тощо) представлений як окрема ВТС, що обмінюються масою та енергією.

Для кожної ВТС розв'язується система рівнянь, що включає:

Рівняння першого закону термодинаміки

$$\left(\frac{dI_{fuel}}{d\phi} + \sum_1^{n_1} \frac{dI_j}{d\phi} \right) + \frac{\delta Q_{comb}}{d\phi} + \sum_1^{n_2} \frac{\delta Q_{wall,i}}{d\phi} = c_{vm} T \left(\sum_1^{n_1} \frac{dm_j}{d\phi} + \frac{dm_{fuel}}{d\phi} \right) + c_v m \frac{dT}{d\phi} + m T \frac{d(c_v)_T}{d\phi} + p \frac{dV}{d\phi}$$

де: I – ентальпія, Q – теплота, m – маса, p – тиск, T – температура, V – об'єм, c_v – питома теплоємність.

Рівняння стану реального газу

$$pV = Z \frac{m}{\mu} RT,$$

де Z – коефіцієнт стиснення, визначається з рівняння Бертело

$$Z = 1 + \frac{9}{128} \frac{\pi}{\theta} \left(1 - \frac{6}{\theta^2} \right)$$

Рівняння масового балансу

$$dm = \sum_1^{n_1} dm_j + dm_{fuel}$$

Для підвищення точності в окремих випадках застосовуються двозонні моделі:

Період згоряння: розділення на зону свіжого заряду та зону продуктів згоряння для розрахунку температур та формування NO_x та CO.

Продувка двотактних двигунів: для коректного опису газообміну.

Рециркуляція газів: врахування попадання продуктів згоряння у впускний ресивер.

У двозонній моделі тиск вважається уніфікованим, а температури та склад кожної зони розраховуються окремо.

Масові витрати між ВТС розраховуються на основі квазістаціонарного підходу, уточненого методом проф. Орліна для врахування нестационарних явищ:

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{w_{static} \cdot |w_{static}| - w \cdot |w|}{2L},$$

де w – швидкість газу, L – активна довжина каналу.

Теплообмін розраховується на основі закону Ньютона:

$$dQ_{wall} = \alpha_{gas} F (T - T_{wall}) d\tau,$$

де α_{gas} – коефіцієнт теплообміну, визначається за модифікованим рівнянням Вошні, що враховує швидкість поршня, тиск, температуру та геометрію камери згоряння.

Blitz-PRO підтримує різноманітні моделі згоряння залежно від типу двигуна: для дизельних двигунів: на вибір – модель Вібе або розширена кінетична модель Разлейцева. Модель Разлейцева враховує три стадії згоряння: горіння

пари палива, утвореної під час затримки запалювання, горіння під час уприскування та догорання.

Оксиди азоту (NO): розрахунок за механізмом Зельдовича з використанням кінетичних рівнянь для "термічного" NO. Враховується локальний коефіцієнт надлишку повітря α_{loc} та температура газів у двозонній моделі. Модель формування сажі базується на підході Разлейцева, що враховує кінетику утворення, полімеризацію, вигорання частинок та зміну концентрації через зміну об'єму.

Перехідні процеси (розгін, зміна навантаження) розраховуються шляхом послідовного циклу синтезу індикаторного процесу. Диференціальні рівняння динаміки описують зміну обертових моментів:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{60}{J_{rot}} \frac{P_e - P_{load}}{\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 n},$$

$$\frac{dn_{TC}}{dt} = \frac{60}{J_{TC}} \frac{P_{turb} - P_{compr}}{\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 n_{TC}},$$

Blitz-PRO дозволяє гнучко налаштовувати параметри розрахунку. Точність задається для щільності в циліндрі, ресивері, випускному колекторі, ККД турбокомпресора. Обчислювальна сітка: змінний крок за кутом повороту колінвалу для підвищення точності в ключові фази (уприскування, згорання, газообмін). Чисельний метод: на вибір – явний метод Ейлера (швидкий, менш точний) або неявний метод Рунге-Кутта 2-го порядку (стабільний, рекомендований). Можливість використання рівняння стану ідеального газу або рівняння Бертело для реальних газів (підвищує точність при високих тисках).

Таким чином, програмний комплекс Blitz-PRO реалізує сучасну термодинамічну методику розрахунку робочого циклу ДВЗ, що базується на системі рівнянь першого закону термодинаміки, масового балансу та рівняння стану реального газу для сукупності відкритих термодинамічних систем. Використання двозонних моделей, просунутих кінетичних моделей згорання, динаміки газообміну та механізмів формування викидів забезпечує комплексне та точне моде-

лювання як стаціонарних, так і перехідних режимів роботи двигунів різних типів. Гнучкі налаштування обчислювального ядра дозволяють знаходити компроміс між швидкістю розрахунків та їх точністю відповідно до поставлених завдань. Отже, використання програмного комплексу Blitz-PRO забезпечить репрезентативність та об'єктивність результатів дослідження, дозволивши отримати детальну картину впливу температури наддувного повітря на експлуатаційні показники тепловозного двигуна без виконання складних та ресурсомістких натурних експериментів.

2.4 Моделювання робочого циклу двигуна

Для проведення коректного моделювання робочого циклу двигуна в програмному комплексі Blitz-PRO необхідно задати комплекс вихідних даних, які можна умовно поділити на кілька груп:

1. Геометричні та конструктивні параметри двигуна;
2. Параметри системи наддуву;
3. Параметри палива та процесу згоряння;
4. Параметри теплообміну;
5. Початкові умови;
6. Параметри розрахунку.

Ці параметри формують вхідний набір даних для моделювання в Blitz-PRO, що дозволяє розрахувати індикаторні та ефективні показники, теплові потоки, характеристики газообміну, токсичність (NO_x), роботу системи наддуву. Далі наводяться копії програми з набором вихідних даних і результатів моделювання. Було проведено серію розрахунків, які відрізнялися ефективністю ОНП в діапазоні 0,4...1,0 з кроком 0,1. Така зміна ККД ОНП спричинила зміну температури наддувного повітря, яке потрапляє в циліндри двигуна в діапазоні 44...135 °С. Для отримання постійного значення потужності двигуна при кожному розрахунку доводилося корегувати ступінь підвищення тиску в компресорі (P_k). Зі збільшенням ККД ОНП ступінь підвищення тиску в компресорі зменшувалася з 3,07 до 2,77.

$N_e = 2944 \text{ кВт} = \text{const}; \eta_{\text{онп}} = 0,4 \dots 1,0; T_0 = 40^\circ\text{C}$									
№ п/п	Позначення	Од. виміру	132,9	116,6	100,9	85,7	71,4	57,5	44,3
1	D	м	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2	S	м	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215	0,215
3	i_z		16	16	16	16	16	16	16
4	n	об/хв.	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
5	N_e	кВт	2944,000	2944,000	2944,000	2944,000	2944,000	2944,000	2944,000
6	$a'_{\text{тр}}$	МПа	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000	0,1000
7	$b'_{\text{тр}}$	МПа·хв/об	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
8	λ		0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305	0,305
9	ϵ		13	13	13	13	13	13	13
10	$V_{\text{в.к}}/V_s$	м	6	6	6	6	6	6	6
11	i_{z1k}		8	8	8	8	8	8	8
12	$V_{\text{пр.к}}/V_s$		1	1	1	1	1	1	1
13	L_k		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
14	d_k		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
15	$V_{\text{н.р}}/V_s$		4	4	4	4	4	4	4
16	$i_{z1\text{нар}}$		2	2	2	2	2	2	2
17	$V_{\text{в.р}}/V_s$		12	12	12	12	12	12	12
18	$i_{z1\text{р}}$		16	16	16	16	16	16	16
19	μF_s		0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
20	$\mu_{\text{к.Г}}$		1	1	1	1	1	1	1
21	$\mu_{\text{к.η}}$		1	1	1	1	1	1	1
22	$\mu_{\text{к.Пк}}$		1	1	1	1	1	1	1
23	$\mu_{\text{т.Пт}}$		1	1	1	1	1	1	1
24	$\mu_{\text{т.η}}$		0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
25	$\mu_{\text{т.Г}}$		0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955
26	$\mu_{\text{к.Г2}}$		1	1	1	1	1	1	1
27	$\mu_{\text{к.η2}}$		1	1	1	1	1	1	1
28	$\mu_{\text{к.Пк2}}$		1	1	1	1	1	1	1
29	$\mu_{\text{т.Пт2}}$		1	1	1	1	1	1	1
30	$\mu_{\text{т.η2}}$		0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
31	$\mu_{\text{т.Г2}}$		0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955	0,955
32	$f_{\text{п1}}$	м ²	0	0	0	0	0	0	0
33	$f_{\text{п2}}$	м ²	0	0	0	0	0	0	0
34	$\eta_{\text{а.к}}$	К	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке
35	$\eta_{\text{а.т}}$		по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке
36	$\eta_{\text{м.т}}$		0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
37	μF_t		по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке	по х-ке
38	T_0		313	313	313	313	313	313	313
39	p_0		99	99	99	99	99	99	99
40	$\Pi_{\text{к1}}$		3,0686342	3,04345706	3,000551229	2,94	2,8613937	2,81927353	2,77445122
41	$\Pi_{\text{к2}}$		1	1	1	1	1	1	1

42	Δp_{k1}	кПа	4	4	4	4	4	4
43	$T_{w1OHВ1}$	К	313	313	313	313	313	313
44	$\eta_{OHВ1}$		0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1
45	Δp_{k2}		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
46	$T_{w1OHВ2}$	К	313	313	313	313	313	313
47	$\eta_{OHВ2}$		0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70
48	$F_{OHВ2}$	м ²	0,00300	0,00300	0,00300	0,00300	0,00300	0,00300
49	Δp_t	кПа	7	7	7	7	7	7
50	Φ		1	1	1	1	1	1

51	δ_{BT}	м	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
52	$\delta_{кр}$	м	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
53	δ_n	м	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
54	λ_{BT}	кВт/(м·К)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
55	$\lambda_{кр}$	кВт/(м·К)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
56	λ_n	кВт/(м·К)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
57	$R_{ст. BT}$	(м ² ·К)/кВт	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
58	$R_{ст. кр}$	(м ² ·К)/кВт	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
59	$R_{ст. пр}$	(м ² ·К)/кВт	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
58	$h_{пр}$	м	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
59	$h_{о. BT}$	%	100	100	100	100	100	100
60	$a_{трw}$		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
61	$a_{трm}$		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
62	$a_{w TK}$		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
63	$a_{m TK}$		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
64	$\alpha_{w BT}$	кВт/(м ² ·К)	5	5	5	5	5	5
65	$\alpha_{w кр}$	кВт/(м ² ·К)	5	5	5	5	5	5
66	$\alpha_{m пр}$	кВт/(м ² ·К)	3	3	3	3	3	3
67	$\alpha_{w кар}$	кВт/(м ² ·К)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
68	$T_{w BT}$	К	363	363	363	363	363	363
69	$T_{w кр}$	К	363	363	363	363	363	363
70	$T_{m пор}$	К	368	368	368	368	368	368
71	$T_{w кар}$	К	355	355	355	355	355	355
72	$a_{вп.к}$		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
73	$b_{вп.к}$	К	10	10	10	10	10	10
74	$d_{э.вп}$	м	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
75	$C_{вп.возд}$		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
76	$d_{э.вып}$	м	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
77	$\delta_{ст.вып}$	м	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
78	$\delta_{из.вып}$	м	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$\delta_{ст.нар}$	м	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
79	$\lambda_{ст.вып}$	кВт/(м·К)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
80	$\lambda_{из.вып}$	кВт/(м·К)	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005	0,00005
81	$\lambda_{ст.нар}$	кВт/(м·К)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025

82	$R_{\text{ст.вып}}$	$(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{кВт}$	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
83	$C_{\text{вып.ог}}$		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
84	$C_{\text{в/ог}}$		0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
85	$\alpha_{\text{w вып}}$	$\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
86	$T_{\text{w вып}}$	К	370	370	370	370	370	370	370

87	$\eta_{\text{м ППК}}$		1	1	1	1	1	1	1
88	$d_{\text{шт}}$	м	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
89	$a_{\text{м}}$	м	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
90	$f_{\text{пер}}$	м^2	0	0	0	0	0	0	0
91	$\rho_{\text{вс}}$	кПа	5	5	5	5	5	5	5
92	$T_{\text{вс}}$	К	360	360	360	360	360	360	360

93	$\Phi_{\text{н.впр}}$	град.	343,25	343,25	343,25	343,25	343,25	343,25	343,25
94	$\Phi_{\text{впр}}$	град.	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00	33,00
95	$\Phi_{\text{о.вып}}$	град.	480,5	480,5	480,5	480,5	480,5	480,5	480,5
96	$\Phi_{\text{з.вып}}$	град.	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5	40,5
97	$\Phi_{\text{о.вп}}$	град.	663	663	663	663	663	663	663
98	$\Phi_{\text{з.вп}}$	град.	208	208	208	208	208	208	208
99	$\Phi_{\text{п.о.вп}}$	град.	125	125	125	125	125	125	125
100	$\Phi_{\text{п.о.вып}}$	град.	125	125	125	125	125	125	125
101	$\Phi_{\text{п.з.вп}}$	град.	125	125	125	125	125	125	125
102	$\Phi_{\text{п.з.вып}}$	град.	125	125	125	125	125	125	125

103	$d_{\text{вп.кл}}$	м	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
104	$n_{\text{вп.кл}}$		2	2	2	2	2	2	2
105	$d_{\text{вып.кл}}$	м	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
106	$n_{\text{вып.кл}}$		2	2	2	2	2	2	2
107	$h_{\text{кл.вп}}$	м	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
108	$h_{\text{кл.вып}}$	м	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
109	$\alpha_{\text{кл}}$	град.	45	45	45	45	45	45	45
110	$\mu_{\text{вп.к}}$		0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79
111	$\mu_{\text{вып.к}}$		0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
112	$D_{\text{вс.к}}$	м	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
113	$d_{\text{вс.к}}$	м	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
114	$n_{\text{вс.к}}$		3	3	3	3	3	3	3
115	$D_{\text{н.к}}$	м	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
116	$d_{\text{н.к}}$	м	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
117	$n_{\text{н.к}}$		3	3	3	3	3	3	3
118	$h_{\text{вс.к}}$	м	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
119	$h_{\text{н.к}}$	м	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
120	$\mu_{\text{вс.к}}$		0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
121	$\mu_{\text{н.к}}$		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

122	$C_{\text{пр}}$	Н/м	100	100	100	100	100	100	100
123	$F_{\text{ст}}$	Н	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
124	$m_{\text{тар}}$	кг	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
125	g_c	кДж/кг	0,869	0,869	0,869	0,869	0,869	0,869	0,869
126	g_H		0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131	0,131
127	g_s	кДж/кмоль	0	0	0	0	0	0	0
128	g_o		0	0	0	0	0	0	0
129	Q_H	м	43000	43000	43000	43000	43000	43000	43000
130	E_a		22500	22500	22500	22500	22500	22500	22500
131	B_0	с ⁻¹	0,0000038	0,0000038	0,0000038	0,0000038	0,0000038	0,0000038	0,0000038
132	k_n		0,00016	0,00016	0,00016	0,00016	0,00016	0,00016	0,00016
133	i_c	кг/м ³	9	9	9	9	9	9	9
134	d_c		0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
135	E_c	Па·с	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
136	$A_{z,i}$		8	8	8	8	8	8	8
137	ρ_T	Н/м	825	825	825	825	825	825	825
138	μ_T		0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
139	σ_T	м	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028
140	$a^{\text{впр}}$		4	4	4	4	4	4	4
141	$b^{\text{впр}}$	с	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
142	$c^{\text{впр}}$		2,62688546	2,62688546	2,62688546	2,62688546	2,62688546	2,62688546	2,62688546
143	$m^{\text{впр}}_1$	м ³ /(кг·с)	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
144	$m^{\text{впр}}_2$		2	2	2	2	2	2	2
145	$m^{\text{впр}}_3$	с	2	2	2	2	2	2	2
146	$m^{\text{впр}}_4$		6	6	6	6	6	6	6
147	$\phi^{\text{впр}}_1$	м ³ /(кг·с)	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
148	$m^{\text{пр}}$		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
149	D_ϕ	град.	3	3	3	3	3	3	3
150	$L_{\text{ст}}$		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
151	$A_{\text{ст}}$	м	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055
152	χ_0		0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
153	a_0	с	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
154	a_1		0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
155	a_2	м ³ /(кг·с)	20	20	20	20	20	20	20
156	m^{n2}		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
157	b_0	град.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
158	$\Delta\phi_k$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
159	ϕ_{z0}	с	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
160	$\xi_{\text{во}}$		0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
161	Δ_T	м ³ /(кг·с)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
162	m		0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
163	X_z	град.	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98

164	T_{m1}^{OPF}	К	360	360	360	360	360	360	360
165			2	2	2	2	2	2	2
166	η^{OPF}		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
167	f_n^{PF}	m^2	0	0	0	0	0	0	0
168	C_1	м/с	2490	2490	2490	2490	2490	2490	2490
крок розрахунку (1/Δφ)			4	4	4	4	4	4	4
№ п/п	Позначення	Од. виміру	Значення	Значення	Значення	Значення	Значення	Значення	Значення
1	N_e	кВт	2946,94	2946,64	2946,50	2944,46	2946,59	2946,51	2946,48
2	$N_{e\text{вн}}$	кВт	2946,94	2946,64	2946,50	2944,46	2946,59	2946,51	2946,48
3	$N_{e\text{ппк}}$	кВт	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
4	$N_{н.х}$	кВт	22,64	13,69	3,84	-6,28	-17,41	-26,39	-35,14
5	N_i	кВт	3432,46	3432,59	3432,50	3430,19	3431,76	3431,64	3431,49
6	g_e	кг/(кВт·год)	0,2131	0,2116	0,2102	0,2090	0,2080	0,2068	0,2056
7	g_i	кг/(кВт·год)	0,1829	0,1816	0,1805	0,1794	0,1786	0,1775	0,1765
8	η_e		0,3929	0,3957	0,3982	0,4005	0,4025	0,4049	0,4073
9	η_i		0,4546	0,4591	0,4634	0,4674	0,4712	0,4752	0,4792
10	η_m		0,8643	0,8619	0,8594	0,8568	0,8543	0,8521	0,8500
11	$P_{к1}$		3,069	3,043	3,001	2,941	2,861	2,819	2,774
12	$P_{к2}$		н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
13	$P_{кпп}$		н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
14	$P_{к\Sigma}$		3,069	3,043	3,001	2,941	2,861	2,819	2,774
15	$\Phi_{сг}$	град.	194,87	188,50	182,48	176,56	170,87	165,31	159,70
16	$\Phi_{з.в}$	град.	4,25	4,50	4,75	5,25	5,75	6,25	7,00
17	$\Phi_{н.сг}$	град.	347,50	347,75	348,00	348,50	349,00	349,50	350,25
18	$\Phi_{dX/d\phi_{max}}$	град.	373,0	372,8	372,3	372,0	372,0	372,0	372,0
19	$\sigma_{jз.}$		0,087	0,094	0,100	0,114	0,128	0,141	0,162
20	$\Phi_{ст}$	град.	350	350	351	351	351	351	351
21	$dp/d\phi_{max}$	кПа/град	336	343	349	359	372	391	430
22	$p_{впр}$	бар	838	827	818	808	801	792	784
23	p_z	кПа	12759,52	12806,24	12811,76	12782,24	12721,62	12716,84	12704,55
24	T_z	К	1897,55	1849,99	1810,67	1776,76	1753,89	1717,70	1683,57
25	p_i	кПа	1864,96	1865,03	1864,98	1863,73	1864,58	1864,52	1864,43
26	p_e	кПа	1601,16	1601,00	1600,92	1599,82	1600,97	1600,93	1600,91
27	$p_{н.х}$	кПа	12,30	7,44	2,08	-3,41	-9,46	-14,34	-19,09
28	p_s	кПа	298,50	295,96	291,51	285,62	277,92	273,73	269,30
29	T_s	К	405,85	389,61	373,89	358,69	344,36	330,53	317,25
30	p_{s1}	кПа	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
31	T_{s1}	К	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
32	p_c	кПа	7270,44	7317,68	7313,36	7327,66	7287,09	7327,23	7407,35
33	T_c	К	981,78	954,58	928,02	904,08	881,48	858,86	838,46

34	T_b	К	1261,8	1223,0	1190,1	1161,3	1139,9	1110,3	1082,4
35	p_b	кПа	1103,1	1098,8	1091,7	1082,2	1070,9	1063,9	1056,6
36	T_t	К	869,6	846,7	827,5	810,4	799,4	782,6	767,1
37	p_t	кПа	249,3	251,3	251,9	251,5	249,8	250,3	250,4
	T_{t1}	К	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
	p_{t1}	кПа	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
38	T_{zt}	К	739,5	718,8	701,9	687,3	678,7	663,9	650,5
39	$T_r^{РГ}$	К	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
40	$T_{вс}$	К	401,84	385,55	369,84	354,62	340,20	326,33	313,00
41	$p_{вс}$	кПа	299,8	297,3	293,1	287,1	279,3	275,1	270,7
42	$T_{рг}$	К	401,8	385,6	369,8	354,6	340,2	326,3	313,0
43	$p_{наг}$	кПа	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
44	$T_{наг}$	К	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
45	$\Delta p_{онп2}$	кПа	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
46	γ_r		0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	0,032
47	T_r	К	435,0	420,1	406,1	393,1	381,3	369,9	359,7
48	G	кг/с	5,17582	5,29024	5,36695	5,41340	5,41072	5,47614	5,52983
49	$G_{к1}$	кг/с	2,58791	2,64512	2,68348	2,70670	2,70536	2,73807	2,76492
50	$G_{к2}$	кг/с	2,58791	2,64512	2,68348	2,70670	2,70536	2,73807	2,76492
51	G_t	кг/с	5,33987	5,45274	5,52803	5,57247	5,56937	5,63345	5,68585
52	G_{t1}	кг/с	2,66499	2,72158	2,75950	2,78128	2,78090	2,81329	2,83987
53	G_{t2}	кг/с	2,66499	2,72158	2,75950	2,78128	2,78090	2,81329	2,83987
54	$G_{вс}$	кг/с	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
55	$G_{наг}$	кг/с	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
56	$G_{пер}$	кг/с	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
57	$G_{пер1}$	кг/с	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
58	$G_{пер}^{РГ}$	кг/с	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
59	$G_{пер}^{ДР}$	кг/с	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
60	p_k	кПа	303,79479	301,30225	297,05457	291,14871	283,27798	279,10808	274,67067
61	T_k	К	461,06242	458,10915	455,09611	451,74387	449,00706	446,27760	443,59799
62	$T_{к1}$	К	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
63	$\alpha_{гт}$	кВт/(м ² К)	0,547	0,553	0,558	0,560	0,560	0,564	0,567
64	$\alpha_{г.вып.т}$	кВт/(м ² К)	1,361	1,365	1,363	1,358	1,350	1,349	1,346
65	$\alpha_{в.вп.т}$	кВт/(м ² К)	0,319	0,330	0,339	0,348	0,355	0,365	0,375
66	$T_{ст.вт}$	К	480,6	475,5	470,7	466,3	462,5	458,2	454,1
67	$T_{ст.вт.пк}$	К	381,9	381,0	380,1	379,3	378,6	377,8	377,1
68	$T_{ст.кр}$	К	571,4	563,9	557,2	550,9	545,8	539,6	533,7
69	$T_{ст.пор.ог}$	К	595,4	587,1	579,6	572,7	567,2	560,3	553,8
70	$T_{ст.пор.охл}$	К	366,2	366,2	366,2	366,2	366,2	366,2	366,2
71	$T_{ст.диафр}$	К	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
72	$T_{ст.вып}$	К	805,1	785,2	768,5	753,5	743,9	729,3	715,7
73	$T_{ст.пр.к}$	К	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д
74	$T_{ст.вп.к}$	К	434,9	418,5	402,6	387,2	372,7	358,6	345,2

75	η_H	К	1,038	1,034	1,029	1,025	1,020	1,015	1,010
76	ΔT_a		21,071	21,943	22,802	23,744	24,719	25,506	26,346
77	λ_H		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
78	Φ_a		1,1004	1,0931	1,0852	1,0767	1,0668	1,0574	1,0470
79	α	Г	1,85983376	1,92721148	1,982022834	2,02694408	2,05480587	2,11057557	2,16500334
80	$q_{\text{ц}}$		1,30818222	1,29887819	1,290607097	1,28224692	1,27676025	1,26918788	1,26186504
81	$\eta_{a.k1}$		0,79919654	0,80846631	0,813337143	0,81529839	0,80724342	0,81034952	0,81223445
82	η_{t1}		0,75335377	0,75302998	0,752973649	0,75297478	0,75313697	0,7529844	0,75283906
83	$\eta_{a.k2}$	об/хв.	0,79919654	0,80846631	0,813337143	0,81529839	0,80724342	0,81034952	0,81223445
84	η_{t2}		0,75335377	0,75302998	0,752973649	0,75297478	0,75313697	0,7529844	0,75283906
85	ТМАР1								
86	ТМАР2								
87	$n_{\text{тк1}}$	об/хв.	27603,0611	27485,0717	27301,44344	27062,4935	26751,4988	26634,0778	26522,0019
88	$n_{\text{тк2}}$	об/хв.	27603,0611	27485,0717	27301,44344	27062,4935	26751,4988	26634,0778	26522,0019
89	N_{k1}	кВт	384,712978	385,375439	382,8465117	376,927094	369,431993	366,395819	362,550323
90	N_{t1}	кВт	384,653837	385,316195	382,7876573	376,992903	369,375201	366,339494	362,494589
91	N_{k2}	кВт	384,712978	385,375439	382,8465117	376,927094	369,431993	366,395819	362,550323
92	N_{t2}	кВт	384,653837	385,316195	382,7876573	376,992903	369,375201	366,339494	362,494589
93	$\Phi_{\text{расч}}$	%	1,575	1,566	1,558	1,552	1,547	1,539	1,531
94			0,238	0,230	0,225	0,219	0,216	0,210	0,206
95	δNO_x	г/(кВт·год)	14,82	14,74	14,73	14,62	14,49	14,41	14,43
96		ppm	2379,04978	2299,19418	2248,178321	2193,74946	2157,29109	2101,65055	2064,42417

1	Q_T	кВт	7500,24	7446,90	7399,48	7351,55	7320,09	7276,68	7234,69
2	N_e	кВт	2946,94	2946,64	2946,50	2944,46	2946,59	2946,51	2946,48
3	Q_r	кВт	2551,35	2467,50	2389,34	2311,06	2254,43	2182,41	2113,19
4	$Q_{w\text{то}}$	кВт	604,84	581,18	559,45	538,98	522,13	502,20	483,05
5	$Q_{w\text{тр}}$	кВт	218,48	218,68	218,70	218,58	218,33	218,31	218,26
6	$Q_{w\text{ТК}}$	кВт	14,28	14,30	14,21	13,99	13,71	13,60	13,45
7	$Q_{w\Sigma}$	кВт	1180,25	1140,23	1103,78	1075,10	1041,81	1008,81	977,25
8	$Q_{m\text{тр}}$	кВт	267,04	267,27	267,30	267,15	266,84	266,82	266,76
9	$Q_{\text{диафр}}$	кВт	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	$Q_{m\text{пр}}$	кВт	229,99	221,52	213,91	206,82	201,22	194,22	187,53
11	$Q_{m\text{ТК}}$	кВт	9,52	9,53	9,47	9,33	9,14	9,06	8,97
12	$Q_{m\Sigma}$	кВт	506,54	498,33	490,68	483,30	477,20	470,11	463,25
13	$Q_{\text{онв1}}$	кВт	312,16	390,32	464,70	533,30	596,54	664,97	730,49
14	$Q_{\text{онв2}}$	кВт	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	$Q_{\text{о.вып}}$	кВт	363,14	347,11	332,92	325,43	309,82	297,37	285,62
16	$Q_{\text{п.вп}}$	кВт	20,49	21,04	21,50	21,89	22,17	22,65	23,13
17	Q_{Σ}	кВт	7514,43	7461,26	7414,32	7367,67	7338,07	7295,47	7254,51

За результатами розрахунку побудовані залежності основних параметрів від температури наддувного повітря t_s (на виході із охолоджувача наддувного повітря). Залежності представлені на рис. 2.3...2.13.

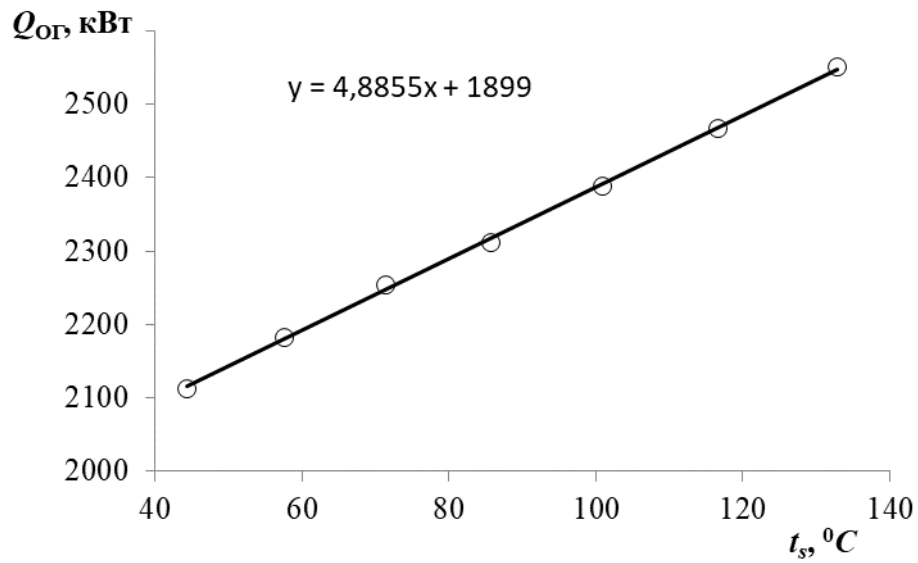


Рис. 2.3. Залежність кількості тепла, що відводиться з с відхідними газами від температури наддувного повітря

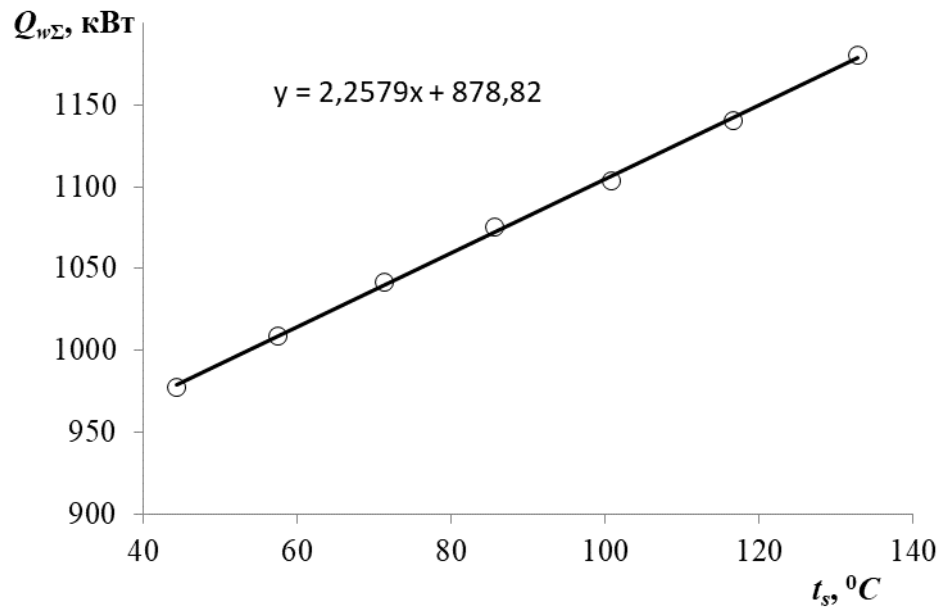


Рис. 2.4. Залежність кількості тепла, що відводиться в охолоджуючу рідину від температури наддувного повітря

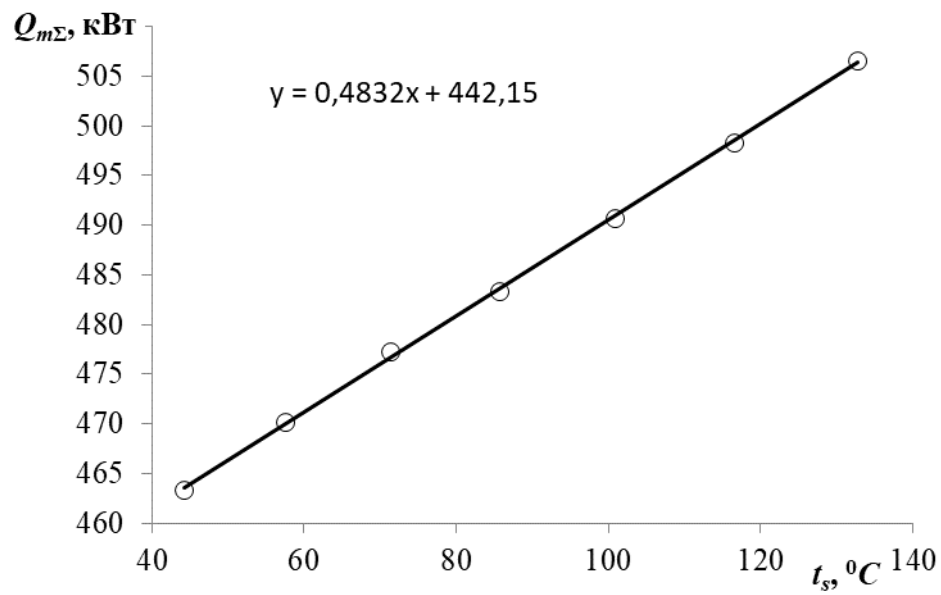


Рис. 2.5. Залежність кількості тепла, що відводиться в масло від температури наддувного повітря

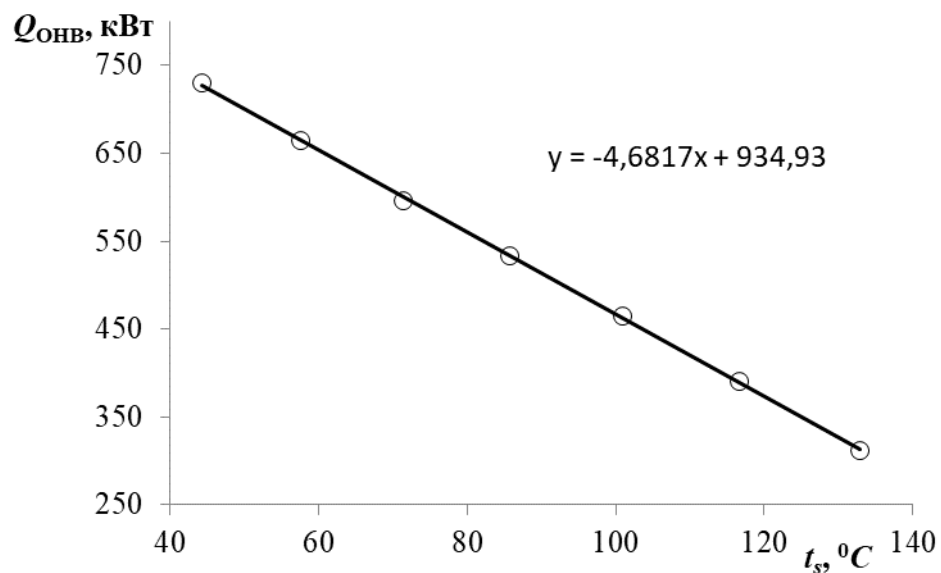


Рис. 2.6. Залежність кількості тепла, що відводиться в ОНП від температури наддувного повітря

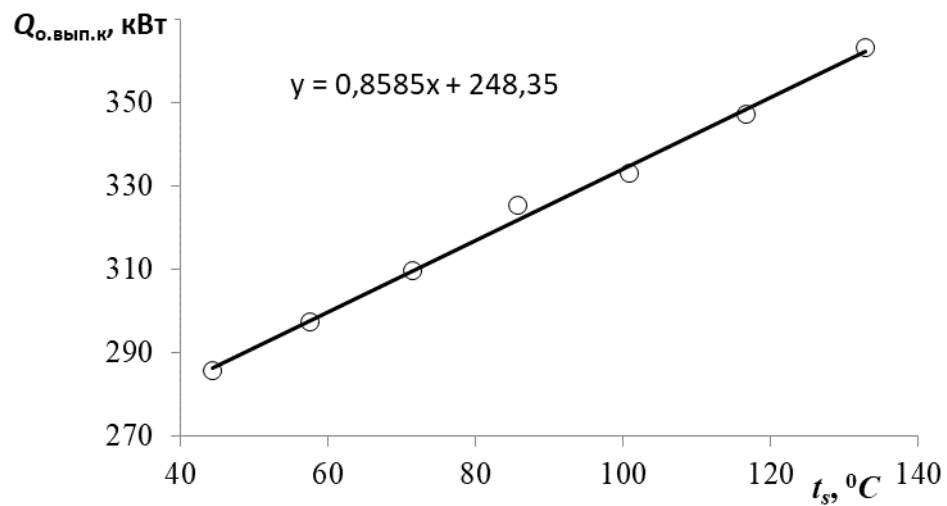


Рис. 2.7. Залежність кількості тепла, що відводиться в водяну рубашку випускного колектора від температури наддувного повітря

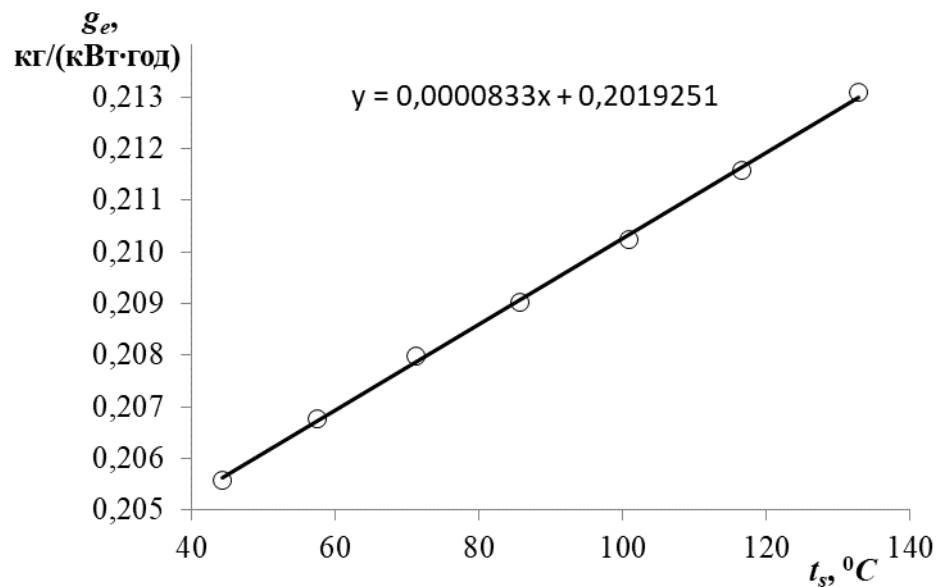


Рис. 2.8. Залежність питомої ефективної витрати палива від температури наддувного повітря

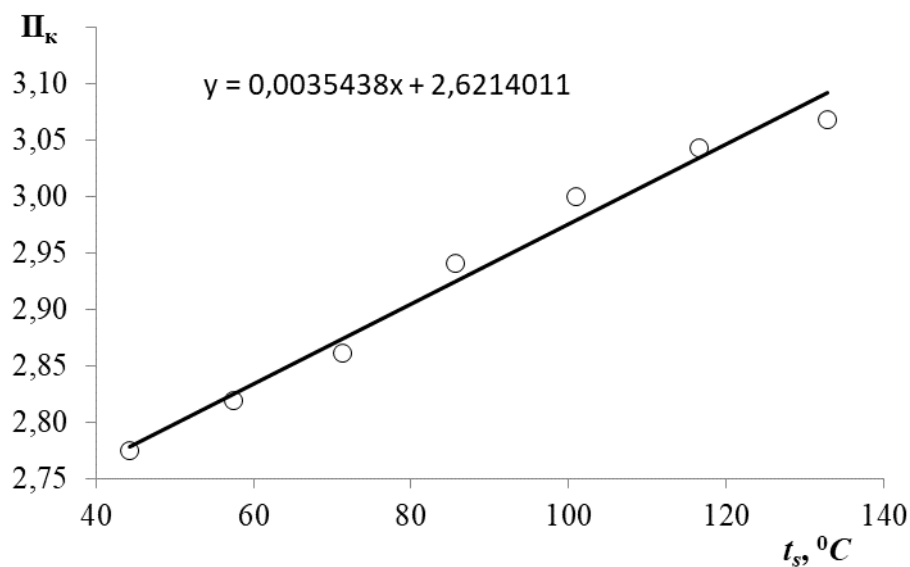


Рис. 2.9. Залежність ступені підвищення тиску в компресорі від температури наддувного повітря

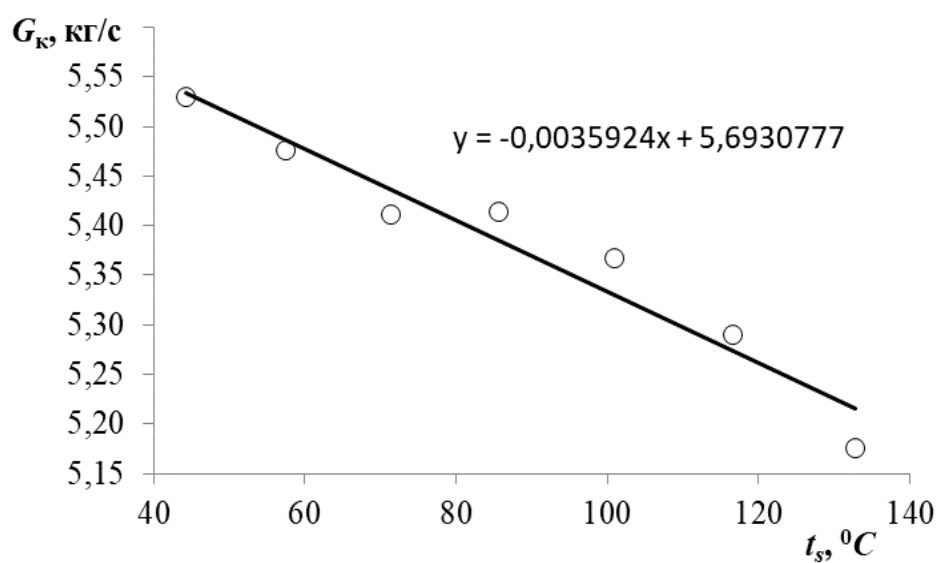


Рис. 2.10. Залежність витати повітря двигуном від температури наддувного повітря

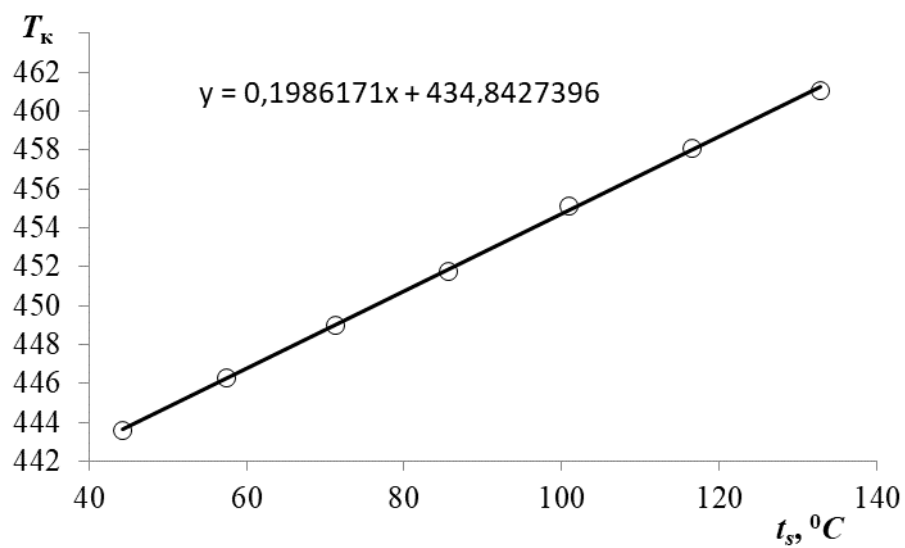


Рис. 2.11. Залежність температури повітря за компресором від температури наддувного повітря

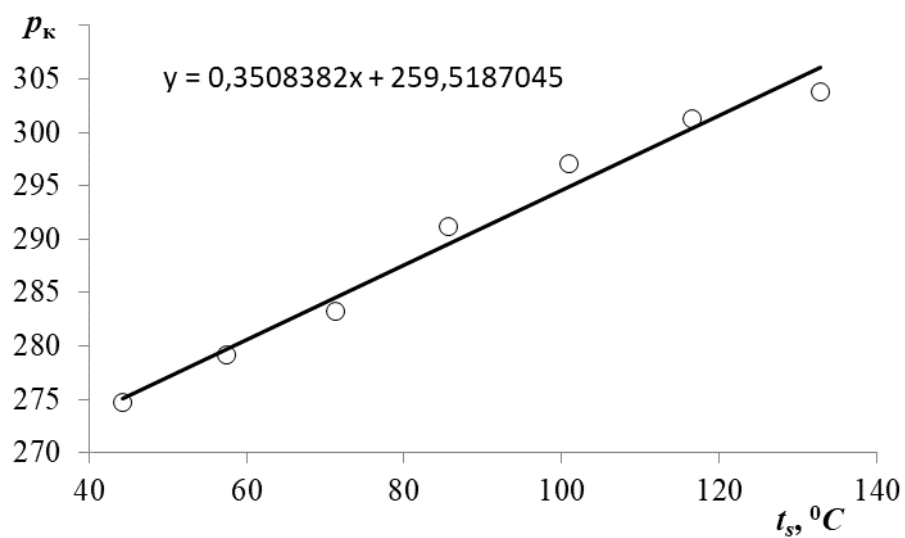


Рис. 2.12. Залежність тиску повітря за компресором від температури наддувного повітря

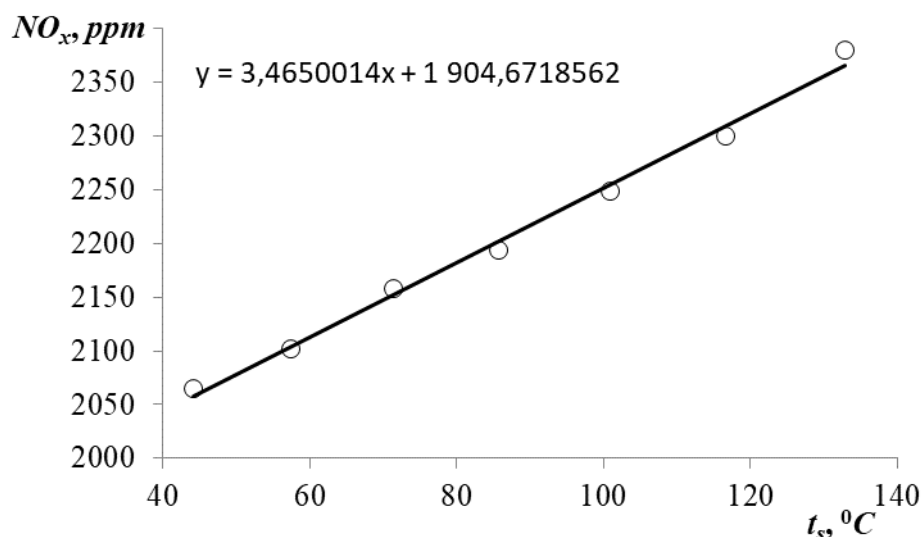


Рис. 2.13. Залежність вмісту оксидів азоту у відхідних газах від температури наддувного повітря

На підставі проведеного моделювання в програмному комплексі Blitz-PRO та побудованих графіків можна зробити низку важливих висновків щодо впливу температури наддувного повітря на експлуатаційні показники тепловозного двигуна.

Зі зниженням температури наддувного повітря спостерігається зменшення кількості теплоти, що відводиться з відхідними газами (див. рис. 2.3). Це пояснюється тим, що більш холодне повітря покращує наповнення циліндрів, сприяє більш повному згорянню палива та зниженню середньої температури циклу. Зменшення температури наддувного повітря призводить до зниження теплового навантаження на систему охолодження (див. рис. 2.4), що підтверджується зменшенням теплоти, що відводиться в охолоджуючу рідину. Аналогічна тенденція спостерігається і для системи змащення (див. рис. 2.5) – зниження температури наддувного повітря зменшує теплове навантаження на масляну систему. Зі зниженням температури наддувного повітря кількість теплоти, що відводиться в охолоджувач наддувного повітря, закономірно зменшується (див. рис. 2.6), оскільки менша вихідна температура повітря після компресора потребує меншого охолодження. Зниження тепловідведення через стінки випускного колектора також підтверджує зменшення загального теплового наван-

таження на двигун при покращенні охолодження наддувного повітря (див. рис. 2.7).

Найважливіший висновок: зі зниженням температури наддувного повітря спостерігається значне покращення паливної економічності двигуна (див. рис. 2.8). Це пояснюється: підвищенням щільності повітряного заряду, кращим наповненням циліндрів, підвищенням повітряного коефіцієнта та більш повним згорянням палива та зменшенням теплових втрат.

Для підтримки постійної потужності двигуна (2950 кВт) зі зниженням температури наддувного повітря необхідно зменшувати ступінь підвищення тиску в компресорі з 3,07 до 2,77 (див. рис. 2.9). Це доводить, що ефективне охолодження наддувного повітря дозволяє досягти необхідної потужності при менших енерговитратах на наддув.

Зі зниженням температури наддувного повітря спостерігається збільшення витрати повітря через двигун (див. рис. 2.10), що безпосередньо пов'язано зі збільшенням щільності повітря.

Зниження температури наддувного повітря на вході в ОНП призводить до закономірного зниження температури повітря після компресора (див. рис. 2.11).

Відповідно до зменшення ступеня наддуву, спостерігається зниження тиску повітря після компресора (див. рис. 2.12).

Зі зниженням температури наддувного повітря спостерігається зменшення вмісту NO_x у відхідних газах (див. рис. 2.13). Це пояснюється зниженням пікових температур у камері згоряння, що є основним чинником утворення «термічних» NO_x .

Таким чином, проведені дослідження підтвердило, що температура наддувного повітря є критично важливим параметром, що впливає на всі основні показники тепловозного двигуна: покращення охолодження наддувного повітря дозволяє значно підвищити паливну економічність двигуна; зниження теплового навантаження на всі системи двигуна сприяє підвищенню його надійності та ресурсу; покращення екологічних показників (зниження NO_x) робить двигун більш екологічно чистим; зменшення необхідного ступеня наддуву дозволяє

знизити навантаження на турбокомпресор та покращити динамічні характеристики двигуна.

Оптимізація роботи системи охолодження наддувного повітря є ефективним засобом для підвищення енергоефективності та екологічності тепловозних двигунів без принципових змін у їх конструкції.

2.5 Висновок до розділу

У другому розділі було розглянуто застосування двигуна Caterpillar 3516 на тепловозах ТЕ33А, проаналізовано шляхи підвищення його паливної економічності та потужності, а також проведено моделювання робочого циклу двигуна за допомогою програмного комплексу Blitz-PRO.

Встановлено, що двигун Caterpillar 3516 є високоефективним, надійним та пристосованим до роботи в складних експлуатаційних умовах завдяки сучасним системам управління, турбонаддуву та охолодження. Особливу увагу приділено ролі системи наддуву, зокрема впливу температури наддувного повітря на ключові експлуатаційні показники двигуна.

За допомогою середовища Blitz-PRO було проведено серію розрахунків, які показали, що зниження температури наддувного повітря в діапазоні від 135 °С до 44 °С (при збільшенні ККД охолоджувача наддувного повітря з 0,4 до 1,0) суттєво впливає на характеристики двигуна:

Паливна економічність покращується за рахунок збільшення щільності повітряного заряду, більш повного згоряння палива та зниження теплових втрат.

Теплове навантаження на системи охолодження, змащення та випускних газів зменшується, що сприяє підвищенню надійності та ресурсу двигуна.

Екологічні показники покращуються за рахунок зниження викидів оксидів азоту (NO_x) на 15...20 %.

Ступінь наддуву може бути знижена з 3,07 до 2,77 без втрати потужності, що свідчить про ефективніше використання енергії турбокомпресора.

					КРМ.142.6221м.25.13.02.ПЗ.	Лист
						45
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Таким чином, оптимізація роботи системи охолодження наддувного повітря є важливим резервом підвищення енергоефективності, екологічності та надійності тепловозних двигунів, що має значний практичний потенціал для впровадження без кардинальних змін у конструкції двигуна і відкриває нові можливості для підвищення ефективності залізничного транспорту.

					КРМ.142.6221м.25.13.02.ПЗ.	Лист
						46
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ЗМЕНШЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ ДВИГУНА CATERPILLAR 3516

3.1 Обґрунтування доцільності зменшення температури наддувного повітря

Зменшення температури наддувного повітря (НП) дизельного двигуна Caterpillar 3516 розглядається не просто як технічна модифікація, а як ключовий техніко-економічний важіль для підвищення загальної ефективності та конкурентоспроможності тепловозної силової установки. В умовах перманентного зростання вартості дизельного палива та невинно посилюваних екологічних стандартів, що регулюють викиди на залізничному транспорті, оптимізація температурного режиму НП набуває стратегічної актуальності.

З позиції теорії двигунів внутрішнього згоряння, охолодження наддувного повітря після його стиснення в турбокомпресорі (проміжне охолодження) має прямий і вирішальний вплив на термодинамічний цикл та кінцеві експлуатаційні показники. Головний фізичний принцип полягає у зміні густини повітря. Згідно з рівнянням стану ідеального газу, зниження температури при фіксованому тиску призводить до пропорційного зростання густини. Дослідження, проведені в попередніх розділах, підтвердили, що зниження температури наддувного повітря з 133°C до 44°C дозволяє збільшити масовий заряд повітря і покращити процес згоряння. Більша маса повітря в одиниці об'єму камери згоряння забезпечує можливість спалювання більшої кількості палива. При зростаючому коефіцієнті надлишку повітря відбувається повне, чисте та ефективне згоряння палива, зменшуючи утворення сажі та оксидів азоту. Крім того, зменшення температури повітря на вході в циліндр призводить до зниження середньої температури робочого циклу. Це критично важливо для теплонапружених елементів, таких як поршні, головки циліндрів та випускні клапани.

Ключовим завданням цього розділу є переведення вищезазначених технічних переваг у чіткі та вимірні економічні показники. Економічна оцінка

					КРМ.142.6221м.25.13.03.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		47

вимагає порівняння двох альтернативних варіантів експлуатації двигуна Caterpillar 3516: традиційний режим роботи з температурою наддувного повітря $t_s = 133\text{ }^{\circ}\text{C}$ і режим роботи із запропонованим оптимізованим значенням $t_s = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Найвагомішим економічним фактором є зниження питомих витрат палива g_p . Покращення згоряння та підвищення ефективності циклу, спричинені більш щільним і холодним повітряним зарядом, безпосередньо призводять до зменшення споживання палива на одиницю виробленої потужності. З табл. 3.1 видно, що питома витрата палива знижується з 0,2131 до 0,2056 кг/(кВт·год). При річному наробітку $t = 7500$ годин та потужності $Ne = 2944$ кВт, ця різниця є джерелом значної річної економії.

Повна економічна доцільність оцінюється шляхом зіставлення загальних експлуатаційних витрат та додаткових капітальних вкладень [13], які враховують додаткові одноразові витрати на модернізацію системи охолодження для досягнення $t_s = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кінцевим критерієм є розрахунок річного економічного ефекту та терміну окупності додаткових капітальних витрат. Економічна ефективність вважається високою, якщо термін окупності є меншим за нормативний коефіцієнт порівняння економічної ефективності

Таблиця 3.1. Основні техніко-економічні показники двигунів для порівняння

Найменування показників		Позначення	Двигун з $t_s = 133\text{ }^{\circ}\text{C}$	Двигун з $t_s = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$
Потужність, кВт		Ne	2944	2944
Частота обертання, хв ⁻¹		n	1800	1800
Діаметр циліндра, м		D	0,17	0,17
Хід поршня, м		S	0,215	0,215
Вага, т		G	7800	7800
Габарити, м:	довжина	L	3190	7930
	ширина	B	1790	3635
	висота	H	2370	4840
Питомі витрати палива, кг/(кВт·год.)		g_p	0,2131	0,2056
Питомі витрати масла, кг/(кВт·год.)		g_m	0,0005	0,0005
Механічний ККД		η_m	0,8643	0,850

Число контрольних ремонтів	η	1	1
Сумарний коефіцієнт по капітальних ремонтах	$\varepsilon_{\min}$	1,1	1,1
Коефіцієнт використання потужності	K_{Π}	1	1
Коефіцієнт частини вартості роботи	b	0,05	0,05
Коефіцієнт частини вартості капітального ремонту	$K_{\text{кр}}$	0,3	0,3
Час роботи за рік, год.	t	7500	7500
Ресурс двигуна до першого перебирання, год.	$t_{\text{пер}}$	30000	25000
Ресурс двигуна до капітального ремонту, год.	$t_{\text{кр}}$	80000	75000
Ціна установки, грн.	Π	38000000	46000000
Ціна палива, грн./т	Π_{Π}	66000	66000
Ціна масла, грн./т	$\Pi_{\text{м}}$	120000	120000
Нормативний коефіцієнт порівняння економічної ефективності	E	0,15	0,15

3.2 Оцінка економічної доцільності експлуатації двигуна зі зменшеною температурою наддувного повітря

Річну продуктивність установки можна визначити за формулою, кВт за рік:

$$N = K_{\Pi} \cdot N_e \cdot t.$$

Для двигуна з $t_s = 133$ °C (1) і для двигуна з $t_s = 44$ °C (2) відповідно маємо

$$N_1 = 1 \cdot 2944 \cdot 7500 = 22080000 \text{ кВт за рік,}$$

$$N_2 = 1 \cdot 2944 \cdot 7500 = 22080000 \text{ кВт за рік.}$$

Термін служби установки визначається за формулою, років:

$$T = \frac{t_{\text{кр}}}{t}.$$

Для двигуна з $t_s = 133$ °C і для двигуна з $t_s = 44$ °C відповідно маємо:

$$T_1 = \frac{80000}{7500} = 10,67 \text{ років,}$$

$$T_2 = \frac{75000}{7500} = 10,0 \text{ років.}$$

Річні поточні витрати на паливо визначаються за формулою, грн.:

$$З_{\Pi} = g_{\Pi} \cdot N \cdot \Pi_{\Pi} \cdot 10^{-3}.$$

Для двигуна з $t_s = 133$ °C і для двигуна з $t_s = 44$ °C відповідно маємо:

					КРМ.142.6221м.25.13.03.ПЗ.	Лист
						49
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

$$З_{п1} = 0,2131 \cdot 22080000 \cdot 66000 \cdot 10^{-3} = 310546368 \text{ грн.},$$

$$З_{п2} = 0,2056 \cdot 22080000 \cdot 66000 \cdot 10^{-3} = 299616768 \text{ грн.}$$

Річні поточні витрати на масло визначаються за формулою, грн.:

$$З_{м} = g_{м} \cdot N \cdot Ц_{м} \cdot 10^{-3}.$$

Для двигуна з $t_s = 133^\circ\text{C}$ і для двигуна з $t_s = 44^\circ\text{C}$ відповідно маємо:

$$З_{м1} = 0,0005 \cdot 22080000 \cdot 120000 \cdot 10^{-3} = 1324800 \text{ грн.},$$

$$З_{м2} = 0,0005 \cdot 22080000 \cdot 120000 \cdot 10^{-3} = 1324800 \text{ грн.}$$

Річні витрати на поточний ремонт визначаються за формулою, грн.

$$З_{пр} = \frac{b \cdot t \cdot Ц}{t_{пер}}.$$

Зниження ресурсу двигуна Caterpillar 3516 до першого перебирання (з 30000 год до 25000 год) та капітального ремонту (з 80000 год до 75000 год) при переході на режим із $t_s = 44^\circ\text{C}$ в економічному аналізі може бути обґрунтоване низкою технічних та експлуатаційних чинників, пов'язаних саме з модернізацією та зміною режиму роботи. Зміна температури наддувного повітря з 133°C до 44°C є радикальною і вимагає додаткових капітальних витрат на модернізацію. Це може включати встановлення більш потужного, ефективного та, ймовірно, багатосекційного проміжного охолоджувача наддувного повітря та супутніх систем (насоси, трубопроводи, клапани). Будь-яке ускладнення системи збільшує кількість потенційних точок відмови. Крім того, різниця температур (гаряче наддувне повітря/холодна охолоджуюча рідина) та робота на нижчих температурах можуть посилити ризик конденсації водяної пари або утворення агресивних середовищ у певних вузлах, що призводить до прискореної корозії та ерозії деталей.

Для двигуна з $t_s = 133^\circ\text{C}$ і для двигуна з $t_s = 44^\circ\text{C}$ відповідно маємо:

$$З_{пр1} = \frac{0,05 \cdot 7500 \cdot 38000000}{30000} = 475000 \text{ грн.}, \quad З_{пр1} = \frac{0,05 \cdot 7500 \cdot 46000000}{25000} = 810000 \text{ грн.}$$

Річні поточні витрати на капітальний ремонт визначаються за формулою, грн.

$$З_{кр} = \frac{K_{кр} \cdot t \cdot Ц}{t_{кр} \cdot \epsilon_{\min}}.$$

					КРМ.142.6221м.25.13.03.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		50

Для двигуна з $t_s = 133$ °C і для двигуна з $t_s = 44$ °C відповідно маємо:

$$z_{\text{кр1}} = \frac{0,3 \cdot 7500 \cdot 38000000}{80000 \cdot 1,1} = 971591 \text{ грн.}, \quad z_{\text{кр2}} = \frac{0,3 \cdot 7500 \cdot 46000000}{75000 \cdot 1,1} = 1472727 \text{ грн.}$$

Річні витрати у споживача визначаються за формулою, грн.

$$U = z_{\text{п}} + z_{\text{м}} + z_{\text{кр}} + z_{\text{пр}}.$$

Для двигуна з $t_s = 133$ °C і для двигуна з $t_s = 44$ °C відповідно маємо:

$$U_1 = 310546368 + 1324800 + 475000 + 971591 = 313317759 \text{ грн.},$$

$$U_2 = 299616768 + 1324800 + 810000 + 1472727 = 303224295 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект для споживача від застосування двигуна з $t_s = 44$ °C розраховується за формулою, грн.

$$E_{\kappa} = \left[\Pi_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \cdot \left(\frac{\frac{1}{T_1} + E_1}{\frac{1}{T_2} + E_2} \right) + \frac{U_3 - U_2}{\frac{1}{T_2} + E_2} \right] - \Pi_2,$$

$$\text{де } U_3 = \frac{N_2}{N_1} \cdot U_1 = \frac{22080000}{22080000} \cdot 313317759 = 313317759 \text{ грн.}$$

$$E_{\kappa} = \left[38000000 \cdot \frac{22080000}{22080000} \cdot \left(\frac{\frac{1}{10,67} + 0,15}{\frac{1}{10,0} + 0,15} \right) + \frac{313317759 - 303224295}{\frac{1}{10,0} + 0,15} \right] - 46000000 = 23423855$$

грн.

Термін окупності двигуна з $t_s = 44$ °C розраховується за наступною формулою, років

$$T_{\text{окуп}} = \frac{\Delta K}{\Delta S},$$

де ΔK – додаткові одноразові витрати на модернізацію системи охолодження для досягнення $t_s = 44$ °C, грн.;

ΔS – річна економія при експлуатації двигуна з $t_s = 44$ °C, грн.:

$$\Delta S = z_{\text{п1}} - z_{\text{п2}} + z_{\text{м1}} - z_{\text{м2}} + z_{\text{пр1}} - z_{\text{пр2}} + z_{\text{кр1}} - z_{\text{кр2}} = U_1 - U_2,$$

$$\Delta S = 313317759 - 303224295 = 10093463,6 \text{ грн.}$$

Отже, час окупності:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{8000000}{10093463,6} = 0,79 \text{ року.}$$

					КРМ.142.6221м.25.13.03.ПЗ.	Лист
						51
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

3.3 Висновок до розділу

У третьому розділі проведено комплексну економічну оцінку зменшення температури наддувного повітря двигуна Caterpillar 3516 на тепловозах ТЕ33А. Результати розрахунків підтвердили високу економічну ефективність даного заходу.

Встановлено, що зниження температури наддувного повітря з 133°C до 44°C забезпечує значне покращення експлуатаційних показників двигуна. Зокрема, питома витрата палива знижується з 0,2131 до 0,2056 кг/(кВт·год), що при річному наробітку 7500 годин дозволяє заощадити близько 2,67 млн грн на рік.

Розрахунок терміну окупності додаткових капітальних витрат на модернізацію системи охолодження показав, що одноразові інвестиції у розмірі 8 млн грн (різниця між вартістю установки з покращеним охолодженням та стандартною) окупляться менше ніж за 10 місяців завдяки економії на паливі.

Проведений аналіз доводить, що зменшення температури наддувного повітря є не лише технічно доцільним, але й економічно вигідним заходом. Впровадження цього рішення дозволить суттєво знизити експлуатаційні витрати на утримання тепловозного парку, підвищити енергоефективність тягових силових установок та забезпечити відповідність сучасним екологічним вимогам.

Отримані результати свідчать про доцільність широкого впровадження систем інтенсифікованого охолодження наддувного повітря на тепловозних двигунах Caterpillar 3516 в умовах експлуатації на залізницях України.

					КРМ.142.6221м.25.13.03.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		52

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕПЛОВОЗНИХ ДВИГУНІВ

4.1 Вступ та актуальність проблеми

Залізничний транспорт, будучи системою кровообігу національної економіки, виконує критично важливу функцію перевезення вантажів і пасажирів на великі відстані. На ділянках, що не мають електрифікованої контактної мережі, цю роль традиційно виконують тепловози, оснащені високопотужними дизельними двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), такими як Caterpillar 3516. Незважаючи на технічну надійність та перевірену десятиліттями експлуатації конструкцію, сам принцип роботи тепловозної тяги заснований на перетворенні хімічної енергії палива у механічну роботу, що супроводжується складними фізико-хімічними процесами. Саме ці процеси, з одного боку, забезпечують рух, а з іншого – генерують значну кількість супутніх факторів, що становлять потенційну загрозу як для безпеки та здоров'я людини, так і для стану навколишнього природного середовища.

У сучасних умовах глобалізації та інтеграції економічних і соціальних просторів питання охорони праці (ОП) та захисту навколишнього середовища (ЗНС) виходять за межі локальних технічних проблем і перетворюються на складові частини стратегії сталого розвитку держави та корпоративної соціальної відповідальності підприємств. Україна, рухаючись шляхом євроінтеграції, поступово гармонізує своє законодавство з вимогами Європейського Союзу, де норми безпеки праці та екологічні стандарти (такі як директиви щодо викидів для неавтошляхових машин Stage IIIB, IV, V, а також рамкові директиви з охорони праці) є надзвичайно жорсткими. Це створює об'єктивну необхідність для підприємств залізничного транспорту не лише формально відповідати мінімальним вимогам, але й активно впроваджувати проактивну політику у цих сферах.

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
						53
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Таким чином, актуальність дослідження проблем охорони праці та захисту навколишнього середовища при експлуатації тепловозних двигунів обумовлена низкою взаємопов'язаних факторів [14]:

Технологічний фактор. Сам характер роботи дизельного двигуна пов'язаний з утворенням високого рівня шуму, вібрації, інтенсивного тепловиділення, а також викиду в атмосферу складних сумішей продуктів згоряння, багато з яких є токсичними, канцерогенними або парниковими газами. Обслуговування та ремонт таких двигунів у депо створюють додаткові ризики для працівників через контакт із шкідливими речовинами, важкі фізичні умови праці та потенційну небезпеку травматизму.

Соціально-економічний фактор. Здоров'я та безпека працівників локомотивних бригад, ремонтних майстрів та обслуговуючого персоналу є основою стабільної роботи транспортної системи. Професійні захворювання, виробничий травматизм та інвалідність завдають серйозного соціального та економічного збитку як самому працівнику та його сім'ї, так і підприємству через втрату кваліфікованих кадрів, компенсаційні виплати та простої. Інвестиції в безпеку праці не є видатками, а інвестиціями в людський капітал та надійність виробництва.

Екологічний фактор. Транспорт залишається одним з основних джерел антропогенного забруднення атмосферного повітря в світі. Викиди тепловозних двигунів (оксиди азоту NO_x, тверді частки РМ, оксиди сірки SO_x) сприяють формуванню кислотних дощів, фотохімічного смогу, впливають на здоров'я населення територій, що прилягають до залізничних магістралей, та порушують екологічний баланс. Проблема зменшення вуглецевого сліду та адаптація до кліматичних змін також неможлива без удосконалення тягового рухомого складу.

Нормативно-правовий та іміджевий фактор. Дотримання високих стандартів у сфері ОП та ЗНС є потужним конкурентним перевагою та основою позитивного корпоративного іміджу. Це відкриває доступ до міжнародних

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
						54
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

ринків, сприяє залученню інвестицій та підвищує лояльність співробітників і суспільства в цілому.

Отже, аналіз та впровадження комплексних заходів з охорони праці та захисту навколишнього середовища при експлуатації тепловозних двигунів не є абстрактною теоретичною задачею. Це нагальна практична потреба, продиктована потрійним імперативом: технічного прогресу (покращення ефективності та ресурсу техніки), соціальної справедливості (забезпечення гідних умов праці) та екологічної відповідальності (збереження довкілля для майбутніх поколінь). Подолання цього виклику вимагає глибокого системного підходу, що починається з детальної ідентифікації всіх факторів ризику та завершується розробкою та реалізацією ефективної багаторівневої стратегії, що поєднує інженерні, організаційні, правові та економічні інструменти..

4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів при обслуговуванні та ремонті тепловозних двигунів

Експлуатаційний цикл тепловозного двигуна, такий як Caterpillar 3516, включає не лише безпосередню роботу на лінії, але й обов'язкові технологічні операції з технічного обслуговування (ТО), діагностики, поточного та капітального ремонту. Ці процеси, що здійснюються в умовах локомотивних депо та ремонтних цехів, створюють специфічне середовище з унікальною комбінацією професійних ризиків. Характер цих ризиків є комплексним і системним, оскільки поєднує в собі класичні небезпеки машинобудівного виробництва з особливими факторами, властивими тепловим машинам. Повний аналіз дозволяє структурувати їх за категоріями з урахуванням фізичної природи, джерела виникнення та характеру впливу на організм людини.

Фізичні фактори формують найбільш об'єктивну та поширену групу небезпек. Першочергове місце серед них займає акустичне забруднення. Шум у депо має змішаний характер: низько- та середньочастотний шум від роботи двигуна на холостому ходу та під навантаженням на випробувальних стендах, і високочастотний, імпульсний шум від механічної обробки деталей

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
						55
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

(обточування, шліфування, клепання), роботи пневмоінструменту та ударних механізмів. Енергетичні параметри такого шуму часто досягають 100...115 дБА, що значно перевищує гранично допустимий рівень (ГДР) в 80 дБА для восьмигодинного робочого дня. Хронічний вплив інтенсивного шуму призводить не лише до необоротного професійного нейросенсорного приглушення, а й викликає стійкі порушення з боку центральної нервової (підвищена дратівливість, порушення сну) та серцево-судинної систем (артеріальна гіпертензія, ішемія). Супутнім, але не менш важливим фактором є вібрація. Локальна вібрація, що передається через ручний механізований інструмент (дрилі, гайковерти, шліфувальні машини), спричиняє синдром, відомий як "вібраційна хвороба", з порушенням капілярного кровообігу, больовими відчуттями в суглобах кистей та втратою тактильної чутливості. Загальна вібрація від роботи великого обладнання (верстатів, вентиляторів, компресорів) негативно впливає на весь опорно-руховий апарат та вестибулярний апарат.

Кліматичні умови у виробничих зонах (мікроклімат) мають значні сезонні коливання та часто не відповідають санітарним нормам. У літній період інтенсивне тепловиділення від двигунів, що проходять обкатку, систем термообробки та самого обладнання може призводити до підвищення температури повітря до 28...32 °С і вище при підвищеній вологості, створюючи умови для теплового стресу організму працівників. У зимовий період, особливо в неопалюваних ангарах або при ремонті на відкритих майданчиках, низькі температури, поєднані з рухом повітря, сприяють переохолодженню та збільшують ризик простудних захворювань. Важливим, часто недооціненим фактором є запилення. Дрібнодисперсна аерозоль, що утворюється при абразивній обробці металу, зачистці деталей від нагару, роботі з ізоляційними матеріалами, містить частки металу, кремнію та вуглецю. Тривале вдихання такого пилу може спричинити розвиток хронічних бронхітів та алергічних захворювань легень. Також слід враховувати фактор недостатнього або нераціонального освітлення робочих місць, що призводить до зорового стомлення,

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
						56
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

знижує точність виконання операцій та є опосередкованою причиною травматизму.

Хімічні фактори представляють особливу небезпеку через свою токсикологічну агресивність та кумулятивний ефект. Повітря робочої зони в зонах розбирання, миття та ремонту двигунів є комплексним забруднювачем. Воно насичене органічними сполуками: парами дизельного палива (суміш вуглеводнів), мастильних олив, консистентних мастил, технологічних розчинників (бензин, дизелі, спеціальні миючі засоби). Крім того, на поверхнях деталей, особливо у випускній системі та ЦПГ, осідають продукти неповного та побічного згоряння. До них належать:

Сажа (тверді частки), яка має високоадсорбційну здатність і може транспортувати на своїй поверхні важкі метали та токсичні сполуки.

Оксиди азоту (NO , NO_2), що утворюються при високотемпературному окисненні атмосферного азоту. NO_2 спричинює набряк легень при гострій інтоксикації та хронічні обструктивні захворювання при тривалому впливі.

Оксиди сірки (SO_2 , SO_3), джерелом яких є сірка в складі палива. Ці сполуки, розчиняючись в слизових оболонках, утворюють кислоти, викликаючи подразнення дихальних шляхів і кон'юнктивіти.

Поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), серед яких найбільш вивчений канцероген бензпірен. Він утворюється при розкладанні палива в умовах недостатньої кількості кисню і має доведену здатність викликати пухлинні захворювання.

Систематичний інгаляційний та контакт через шкіру із леткими органічними сполуками (ЛОС), такими як формальдегід, ацетальдегід, бензол навіть при невисоких, але постійних концентраціях призводить до токсичних гепатитів, нефропатій, астеновегетативних синдромів, дерматитів, екзем, а також підвищує ризик онкологічної патології.

Фактори трудового процесу мають ергономічну та психофізіологічну природу. Фізичне динамічне навантаження досягає високих рівнів при монтажно-демонтажних роботах з важкими вузлами двигуна (блок циліндрів, ко-

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		57

лінчастий вал, головки блоків), вага яких часто перевищує 50...100 кг. Робота у вимушеній позі, тривале стояче положення або положення "лежачи під двигуном" створює значне статичне навантаження на м'язи спини, шиї та кінцівок, що є провідною причиною професійних остеохондрозів, радикулітів, варикозного розширення вен. Нервово-психічне навантаження обумовлене високою відповідальністю за складність та точність ремонту (недотримання допусків може призвести до аварії на лінії), необхідністю прийняття рішень в умовах дефіциту часу, а також монотонністю окремих операцій. Це сприяє розвитку хронічного стресу, синдрому емоційного вигорання та невротичних розладів.

Безпосередня небезпека травмування присутня на кожному етапі. До неї відносяться: рухомі частини верстатів і підйомно-транспортного обладнання; ризик падіння з висоти при роботі на стелажах або самому локомотиві; контакт з розігрітими до 300...500 °С поверхнями випускного колектора та турбіни; можливість опіків від гарячого теплоносія води; висока ймовірність пожеж та вибухів через наявність великої кількості легкозаймистих рідин (паливо, масла, розчинники), пари яких можуть утворювати з повітрям вибухонебезпечні суміші. Додатковим ризиковим фактором є використання несправного, непристосованого або зношеного ручного інструменту та пристосувань, що безпосередньо веде до механічних травм.

Таким чином, середовище депо є зоною комбінованого впливу широкого спектру професійних шкідливостей. Успішна нейтралізація цих ризиків неможлива без їх детальної ідентифікації, кваліфікації та розуміння механізмів взаємного посилення (наприклад, шум посилює шкідливу дію вібрації, а пил посилює токсичний ефект газів). Це знання є основою для розробки адекватної системи заходів колективного та індивідуального захисту, що розглядається в наступних підрозділах.

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
						58
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

4.3 Основні напрямки забезпечення охорони праці при роботі з тепло- возними двигунами

Для протидії виявленим небезпечним факторам необхідний комплексний підхід, який поєднує технічні, технологічні та організаційні заходи. Технічні заходи, перш за все, спрямовані на боротьбу з шумом і вібрацією. Це передбачає застосування двигунів з покращеною акустичною характеристикою, встановлення ефективних глушників та шумопоглинаючих кожухів, використання віброізолювальних підстав, а також облаштування ремонтних діляниць звукопоглинаючими облицюваннями. Важливою складовою є також забезпечення якісної вентиляції для видалення забрудненого повітря та місцевих відсмоктувачів біля джерел пило- та газоутворення. Механізація важких робіт за допомогою підйомних кранів, тельферів та спеціальних пристосувань дозволяє не лише знизити фізичне навантаження, але й мінімізувати ризик травматизму. Окрему увагу слід приділяти пожежній безпеці, облаштуванню систем автоматичного гасіння та забезпеченню первинними засобами пожежогасіння.

Однак технічних заходів недостатньо без чіткої організації процесів. Ключову роль відіграють організаційні заходи, такі як регулярне проведення інструктажів з охорони праці та навчання з питань пожежної безпеки та надання першої допомоги. Важливо встановити суворий порядок допуску до робіт підвищеної небезпеки з оформленням відповідних нарядів-допусків. Створення належних санітарно-побутових умов – гардеробних, душових, кімнат відпочинку – є обов’язковою умовою для підтримання здоров’я працівників. Обов’язковим елементом системи охорони праці є проведення попередніх та періодичних медичних оглядів для своєчасного виявлення професійних захворювань. Завершальною ланкою цього комплексу є забезпечення працівників ефективними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), такими як протишумні навушники, респіратори, захисні окуляри, спецодяг та взуття, що повинні видаватися безкоштовно відповідно до встановлених норм.

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
						59
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

4.4 Захист навколишнього середовища від впливу тепловозних двигунів

Питання безпеки праці та захисту навколишнього середовища при експлуатації тепловозів є двома сторонами однієї медалі, оскільки антропогенне навантаження, що виникає в процесі виробництва, неминуче трансформується та поширюється за межі цехів і депо, формуючи зовнішній екологічний вплив. Цей вплив має системний та багатокомпонентний характер, вражаючи всі основні природні середовища: атмосферне повітря, гідросферу, літосферу, а також формуючи акустичний фон навколишніх територій. Комплексний аналіз цих впливів дозволяє виявити як безпосередні, так і опосередковані екологічні ризики, що є основою для формування цільової природоохоронної політики.

Основним та найбільш масштабним за обсягами є забруднення атмосферного повітря. Тепловозний дизельний двигун є потужним мобільним джерелом викидів забруднюючих речовин, склад та кількість яких залежать від режиму роботи, технічного стану двигуна та якості палива. Основні компоненти викидів мають різний екологічний та токсикологічний потенціал:

Оксиди азоту (NO_x , переважно NO та NO_2). Їх утворення обумовлене високою температурою та тиском в камері згоряння, що сприяє окисненню атмосферного азоту. NO_x є ключовими прекурсорами утворення приземного озону (складової фотохімічного смогу) та кислотних дощів (шляхом перетворення в азотну кислоту HNO_3). Діоксид азоту (NO_2) є сильним шкідником для дихальної системи людини та тварин.

Тверді частки (Particulate Matter, PM). Це дисперсна фаза відпрацьованих газів, що складається з сажового ядра (елементарного вуглецю), на поверхню якого адсорбовані важкі органічні сполуки, в тому числі поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), та сульфати. Частки категорій PM_{10} та особливо $\text{PM}_{2.5}$ (діаметром менше 2,5 мкм) здатні проникати глибоко в легеневі альвеоли, викликаючи респіраторні та серцево-судинні захворювання, а деякі з

адсорбованих ПАВ (наприклад, бензпірен) мають доведену канцерогенну активність.

Оксиди сірки (SO_x). Їх викиди прямо пропорційні вмісту сірки в дизельному паливі. В атмосфері вони трансформуються в сульфатні аерозолі та сірчану кислоту, що призводить до закислення ґрунтів і водойм, пошкодження рослинності та архітектурних споруд.

Вуглеводні (HC) та оксид вуглецю (CO). Продукти неповного згоряння свідчать про низьку ефективність робочого циклу. Деякі вуглеводні беруть активну участь у реакціях смогутворення, а CO є токсичним газом, що знижує киснево-транспортну функцію крові.

Діоксид вуглецю (CO_2) та метан (CH_4). Будучи основними парниковими газами, вони вносять свій внесок у процеси глобального потепління та зміни клімату, що становить транснаціональну екологічну проблему.

Окрім газоподібних та аерозольних викидів, функціонування тепловозної інфраструктури породжує забруднення водних об'єктів. Стічні води з територій локомотивних депо, пунктів технічного обслуговування та мийних комплексів містять значну концентрацію нафтопродуктів (палива, мастил), важких металів та миючих засобів. Ці забруднювачі потрапляють у поверхневі та ґрунтові води внаслідок аварійних розливів, неорганізованого поверхневого стоку з територій, а також через несправність очисних споруд. Нафтова плівка на поверхні водойм перешкоджає газообміну, погіршує умови фотосинтезу водоростей та призводить до загибелі водних екосистем.

Забруднення ґрунтів є логічним продовженням процесу, що починається з забруднення води та повітря, а також відбувається безпосередньо внаслідок техногенних аварій. Розливи палива та мастил на коліях, територіях депо та навколо заправних колонок призводять до накопичення в ґрунтах токсичних вуглеводнів. Ці речовини руйнують ґрунтову структуру, пригнічують мікрофлору та кореневі системи рослин, а також мають властивість мігрувати, забруднюючи ґрунтові води. Важкі метали, що містяться в деяких експлуата-

ційних матеріалах та продуктах зношування, також накопичуються в ґрунтах, потрапляючи в харчові ланцюги.

Окремим серйозним викликом є утворення та поводження з небезпечними відходами. Процеси експлуатації, ТО та ремонту породжують великі обсяги відходів I-IV класів небезпеки, до яких належать:

Відпрацьовані моторні, трансмісійні та інші мастила.

Забруднені нафтопродуктами матеріали (фільтри, ганчір'я, абсорбенти).

Акумуляторні батареї, що містять свинець та сірчану кислоту.

Відпрацьовані рідини системи охолодження.

Ламповий брукт, електронні компоненти.

Металевий брукт та абразивні матеріали з забрудненнями.

Несанкціоноване розміщення або некоректна утилізація таких відходів призводить до тривалого, часто незворотного забруднення всіх компонентів довкілля.

Шумове забруднення від рухомого тепловозного складу створює значний антропогенний акустичний тиск на прилеглі до залізничних ліній території, включаючи населені пункти, рекреаційні зони та природоохоронні території. Хронічний вплив шуму порушує умови існування тварин (особливо птахів), сприяє деградації екосистем та значно погіршує якість життя населення.

Боротьба з цими різноплановими загрозами потребує застосування комплексної, багаторівневої стратегії, що поєднує превентивні технологічні втручання в сам процес роботи двигуна, системи кінцевого очищення, організаційно-господарські заходи та сувору систему обліку та контролю.

Найбільш ефективним та економічно виправданим є вдосконалення процесу згоряння з метою мінімізації утворення забруднювачів на стадії їх генерації. Це включає:

Використання високоякісного палива з ультранизьким вмістом сірки (менше 10 мг/кг за стандартом Євро-5), що кардинально знижує викиди SO_x та сприяє ефективній роботі систем каталітичного очищення.

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		62

Оптимізація системи уприскування палива за допомогою систем Common Rail з електронним керуванням, що забезпечує високий тиск, точну дозування та оптимальне фазування. Це забезпечує більш повне та "м'яке" згоряння, знижуючи утворення сажі, CO та HC.

Зниження температури наддувного повітря, що є центральним технічним рішенням у даній роботі. Охолодження заряду в інтеркулері значно підвищує його щільність. Це дозволяє забезпечити більш високий коефіцієнт надлишку повітря (α), покращити сумішоутворення та знизити пікову температуру циклу. Як наслідок, радикально зменшується утворення оксидів азоту (NO_x) за механізмом Зельдовича та частково зменшується утворення сажі. Таким чином, цей захід є потужним превентивним екологічним інструментом.

Для досягнення жорстких рівнів викидів за сучасними нормами (Stage IV, V, Євро VI) обов'язковим є впровадження систем доочистки відпрацьованих газів (aftertreatment systems):

Окисний каталітичний нейтралізатор (DOC – Diesel Oxidation Catalyst). За допомогою каталізаторів на основі платини та паладію окиснює залишкові вуглеводні (HC) та чадний газ (CO) до діоксиду вуглецю (CO_2) та води (H_2O). Також сприяє окисненню NO до NO_2 , що необхідно для ефективної роботи наступних систем.

Сажевий фільтр (DPF – Diesel Particulate Filter). Керамічний фільтр з сотовою структурою фізично затримує до 99 % твердих частинок (PM). Для запобігання засміченню періодично проводиться активна або пасивна регенерація – спалювання накопиченої сажі за високої температури.

Система селективного каталітичного відновлення (SCR – Selective Catalytic Reduction). Найефективніша технологія нейтралізації NO_x . Вихлопні гази змішуються з водним розчином сечовини (AdBlue), який при високій температурі розкладається на аміак (NH_3). На спеціальному каталізаторі аміак вступає в реакцію з оксидами азоту, перетворюючи їх на нейтральні азот

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
						63
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

(N₂) та водяну пару (H₂O). Ефективність системи SCR може сягати 90% і більше.

Окремим технічним прийомом є система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR – Exhaust Gas Recirculation), яка частково повертає інертні вихлопні гази у впускний колектор, знижуючи пікову температуру горіння і, відповідно, утворення NO_x. Часто застосовується в комбінації з іншими системами.

Організаційні та інфраструктурні заходи щодо захисту гідросфери та літосфери включають:

Будівництво та модернізацію локальних очисних споруд (ЛОС) для стічних вод депо, що повинні включати стадії механічного очищення (решітки, пісковловлювачі), фізико-хімічного очищення (нафтомасловловлювачі, флотатори, коагуляція) та, за необхідності, біологічного очищення.

Облаштування герметичних майданчиків для стоянки, ремонту, миття та заправки рухомого складу з укріпленням, непроникним для нафтопродуктів покриттям, нахилом та збірними лотками, які направляють стоки до очисних споруд або накопичувальних резервуарів.

Впровадження сухих методів очищення деталей та зменшення використання водних струменів для миття, де це можливо.

Система поводження з небезпечними відходами має ґрунтуватися на принципах європейської ієрархії: запобігання утворенню, підготовка до повторного використання, переробка (рециклінг), інше використання (в тому числі енергетичне), та лише як останній захід – знешкодження та захоронення. Обов'язковими елементами є інвентаризація, паспортизація, збір роздільними потоками, належне тимчасове зберігання на обладнаних майданчиках та передача на утилізацію ліцензованим підприємствам, що мають відповідні технології (регенерація масел, переробка акумуляторів, спалювання з енерговидобутком тощо).

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
						64
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

Таким чином, захист навколишнього середовища від впливу тепловозних двигунів є багатоаспектним інженерно-управлінським завданням. Його вирішення вимагає переходу до інтегрованого підходу, де екологічна ефективність закладається на етапі проектування та оптимізації технологічного процесу (зокрема, через зниження температури наддуву), посилюється сучасними системами доочистки та підкріплюється суворим адмініструванням на всіх стадіях життєвого циклу техніки та матеріалів.

4.5 Правові, організаційні та економічні механізми забезпечення охорони праці та захисту навколишнього середовища

Реалізація складних техніко-технологічних заходів з охорони праці та захисту довкілля буде неефективною, а часом і неможливою без створення адекватного правового, організаційного та економічного середовища. Ці механізми формують системний каркас, який трансформує ізольовані технічні рішення в частину стратегії сталого розвитку підприємства, визначає ролі та відповідальність, а також забезпечує ресурсну та мотиваційну складові.

Правове забезпечення слугує фундаментом усієї діяльності в цих сферах. В Україні воно ґрунтується на ряду ключових законодавчих актів. Зокрема, базовими законами є: Закон України «Про охорону праці» [17], який визначає права та обов'язки роботодавця і працівників, вимоги до організації робочого процесу, розслідування нещасних випадків; Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» [18], що встановлює правові та організаційні засади охорони довкілля; Закон України «Про поводження з відходами» [19], який регулює діяльність щодо утворення, збору, транспортування, утилізації та знешкодження відходів. Окрім того, діяльність підприємств залізничного транспорту регулюється спеціальними документами, як-от Правила технічної експлуатації залізниць України [22], що містять розділи з безпеки руху та праці, а також цілим комплексом державних будівельних норм (ДБН), державних стандартів (ДСТУ) [25], санітарних норм і правил (СанПіН). Важливим аспектом є також імплементація міжна-

родних вимог, зокрема, директив Європейського Союзу щодо викидів забруднюючих речовин від неавтошляхових мобільних машин (Stage IIIB, IV, V), які де-факто визначають технічні параметри сучасного рухомого складу. Державний нагляд за дотриманням цих норм здійснюють органи Державної служби України з питань праці та Державної екологічної інспекції, які мають право проводити перевірки, виписувати обов'язкові для виконання приписи та накладати адміністративні стягнення.

Організаційні механізми спрямовані на впровадження правових норм у повсякденну діяльність підприємства. Першочергова відповідальність за створення безпечних умов праці та дотримання екологічних вимог покладається безпосередньо на керівника підприємства. Від нього потрібно не лише формальне виконання закону, але й формування відповідної корпоративної культури, де безпека та екологія є пріоритетними цінностями. Організаційна структура повинна включати функціональні підрозділи або призначених спеціалістів з охорони праці та екологічної безпеки. Ці служби займаються розробкою локальних нормативних актів (інструкцій, положень), організацією навчання та інструктажів персоналу, проведенням оцінки професійних ризиків та екологічного аудиту, розслідуванням інцидентів. Важливим елементом є впровадження системи управління охороною праці (СУОП) та системи екологічного менеджменту (СЕМ) за міжнародними стандартами OHSAS 18001/ISO 45001 та ISO 14001 відповідно. Ці системи базуються на циклі PDCA (планування – виконання – перевірка – корекція) і забезпечують не одномоментне виконання вимог, а процес постійного вдосконалення. Вони вимагають визначення екологічних аспектів та небезпек, встановлення цілей та цільових показників, розподілу ресурсів, моніторингу та аналізу результатів. Сертифікація за цими стандартами є потужним інструментом для підвищення довіри клієнтів, інвесторів та суспільства, а також спрощує вихід на міжнародні ринки.

Економічні механізми відіграють вирішальну роль, оскільки будь-які інвестиції потребують фінансового обґрунтування. Вони можуть мати як

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		66

стимулюючий, так і стримуючий характер. Стримуючим (дестимулюючим) механізмом є система платежів за забруднення навколишнього природного середовища. Підприємства залізничного транспорту, як стаціонарні (депо), так і розглядаючи рухомі джерела в певній агрегації, зобов'язані вносити плату за викиди в атмосферу, скиди в водні об'єкти та розміщення відходів. Розмір цих платежів залежить від обсягів і класу небезпеки забруднювачів. Таким чином, екологічний збиток інтерналізується, тобто перетворюється на прямі витрати підприємства. Це створює прямий фінансовий стимул для інвестування у природоохоронні технології, оскільки скорочення викидів веде до зменшення цих витрат.

4.6 Висновки до розділу

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що експлуатація тепло-возних дизельних двигунів пов'язана із значними ризиками для здоров'я персоналу та стану навколишнього середовища. Забезпечення безпечних умов праці вимагає комплексного застосування технічних засобів колективного захисту, суворої організації трудових процесів та обов'язкового використання засобів індивідуального захисту. З екологічної точки зору найбільш істотним є вплив відпрацьованих газів, для зменшення якого необхідне вдосконалення процесу згоряння, зокрема шляхом оптимізації температури наддувного повітря, та впровадження систем каталітичної нейтралізації. Ефективна політика в галузі охорони праці та захисту довкілля є не лише виконанням законодавчих вимог, а й важливою складовою сталого розвитку, сприяючи збереженню здоров'я людей та природних ресурсів для майбутніх поколінь. Реалізація таких заходів, незважаючи на необхідність початкових інвестицій, є обов'язковим кроком для досягнення сучасних стандартів безпеки та екології на залізничному транспорті.

					КРМ.142.6221м.25.13.04.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		67

ВИСНОВКИ ДО РОБОТИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи на тему «Дослідження впливу температури наддувного повітря на паливну економічність і потужність тепловозного двигуна» було проведено комплексне теоретичне, моделювальне та економічне дослідження, що дозволяє сформулювати наступні основні результати та висновки:

1. Детально проаналізовано застосування сучасного двигуна Caterpillar 3516 на тепловозах ТЕ33А. Встановлено, що цей двигун повністю відповідає суворим вимогам до тепловозних силових установок щодо масово-габаритних показників, паливної економічності (питома витрата на рівні 200...205 г/(кВт·год)), екологічності (відповідність Tier 2) та надійності в різноманітних експлуатаційних умовах. Одночасно виявлено, що до 50 % експлуатаційного часу двигун працює на холостому ходу, що підкреслює важливість забезпечення ефективності на всіх режимах.

2. Теоретично обґрунтовано критичний вплив температури наддувного повітря (t_s) на ключові показники двигуна. Зниження t_s призводить до збільшення щільності повітряного заряду, що покращує наповнення циліндрів, забезпечує більш повне згоряння палива та знижує середню температуру циклу. Це створює передумови для підвищення потужності, економічності та зниження токсичності відпрацьованих газів.

3. За допомогою програмного комплексу Blitz-PRO було проведено серію розрахунків термодинамічного циклу двигуна Caterpillar 3516 при зміні ефективності охолоджувача наддувного повітря (ОНП) від 0,4 до 1,0, що відповідає зниженню температури наддувного повітря на вході в циліндри від 135 °С до 44 °С. Результати моделювання наочно підтвердили теоретичні залежності та дозволили отримати кількісні оцінки:

- паливна економічність суттєво покращується: питома ефективна витрата палива зменшується з 0,2131 до 0,2056 кг/(кВт·год), тобто на 3,5 %.

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
						68
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		

- для підтримки постійної потужності (2944 кВт) необхідний ступінь підвищення тиску в компресорі (P_k) знижується з 3,07 до 2,77, що свідчить про більш ефективне використання енергії турбокомпресора.

- теплове навантаження на системи охолодження, змащення та випуску газів значно зменшується, що сприяє підвищенню надійності та ресурсу двигуна.

- екологічний показник покращується: вміст оксидів азоту (NO_x) у відпрацьованих газах знижується на 15...20 % завдяки зменшенню пікових температур у камері згоряння.

4. Економічна оцінка впровадження заходу з інтенсифікації охолодження наддувного повітря (зниження t_s до 44 °C) показала високу ефективність. При річному наробітку 7500 годин річна економія на паливі становить близько 10,1 млн грн. Незважаючи на збільшення капітальних витрат на модернізацію системи охолодження (орієнтовно 8 млн грн) та деяке зниження міжремонтних ресурсів, термін окупності додаткових інвестицій складає лише 0,79 року (менше 10 місяців). Це свідчить про високу економічну доцільність та привабливість проєкту.

5. У роботі розглянуто комплексні питання охорони праці та захисту навколишнього середовища при експлуатації тепловозних двигунів. Запропоноване технічне рішення щодо зниження температури наддувного повітря є не лише енергоощадним, але й екологічним інструментом, що сприяє зменшенню викидів NO_x . Для повноцінного забезпечення безпеки персоналу та мінімізації екологічного впливу необхідно впроваджувати комплекс організаційно-технічних заходів, системи доочистки газів та суворого дотримання законодавчих норм.

Результати дослідження доводять, що температура наддувного повітря є ключовим параметром, що визначає енергоефективність, потужність та екологічність тепловозного двигуна. Оптимізація роботи системи охолодження наддувного повітря шляхом підвищення ефективності ОНП є технічно обґрунтованим та економічно вигідним заходом. Її впровадження на теп-

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		69

ловозах з двигунами типу Caterpillar 3516 дозволить досягти суттєвої економії палива, знизити експлуатаційні витрати, підвищити надійність силової установки та забезпечити відповідність сучасним екологічним вимогам без необхідності дорогих та складних конструктивних змін. Отримані результати рекомендовано для використання при технічному обслуговуванні, модернізації та експлуатації тепловозного парку на залізничному транспорті України.

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		70

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Сергієнко М. І. Локомотивне господарство Українських залізниць: сьогодні і завтра / М. І. Сергієнко // Залізничний транспорт України. – К. 2005. – № 1 (46). – С. 53 – 54.
2. Caterpillar Engine. Operation and Maintenance Manual. 2007. – 101 p.
3. Caterpillar Inc. (2008). Operation and Maintenance Manual: 3500B Series II and 3500C Marine Propulsion Engines (Публікація SEBU7844-11).
4. Суднові двигуни внутрішнього згоряння : Підручник / В. С. Наливайко, Б. Г. Тимошевський, С. Г. Ткаченко. – Миколаїв : видавець Торубара В. В., 2015. – 332 с.
5. Дьяченко В.Г. Двигуни внутрішнього згоряння. Теорія : Підручник / В.Г. Дьяченко; За ред. А. П. Марченка. – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – 488 с.
6. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників. Т. 4. Основи САПР ДВЗ / За ред. проф. А.П. Марченка, засл. діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова – Харків: Видавн. центр НТУ "ХПІ", 2004. – 428 с.
7. Minchev, D. S. Blitz-PRO: Online simulation software for internal combustion engine operating cycle synthesis. – User's manual, version 1.0. – 2018. – 95 p.
8. Moshentsev, Y., Gogorenko, O., Dvirna, O. (2022). Rational liquid cooling systems of internal combustion engines. Advances in Science and Technology Research Journal, 16(1), 158-169. doi:10.12913/22998624/144345
9. Woodyard, D. F. Pounder's marine diesel engines and gas turbines - 8th edn. / Elsevier Ltd., 2004. – 914 p.
10. Klaus Mollenhauer, Helmut Tschoeke. Handbook of Diesel Engines / Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. – 634 p.
11. Kirkpatrick A. T. Internal combustion engines: Applied thermosciences (4th ed.). Wiley, 2020. – 656 p.
12. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Т.5. Екологізація ДВЗ. – Підручник для студентів ВНЗ, що навчаються за напрямом "Інженерна механіка" / За редакцією проф. А.П. Марченка, засл. діяча

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		71

науки України проф. А. Ф. Шеховцова – Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2004. – 466 с.

13. Кузнецов В. В. Економічна оцінка проектних рішень в судновій енергетиці / В. В. Кузнецов. – Миколаїв: НУК, 2005. – 70 с.

14. Винокурова Л. Е. Основи охорони праці: Підручник для проф.-техн. навч. закладів / Л. Е. Винокурова, М. В. Васильчук, М. В. Гаман. – К. : Вікторія, 2001. – 192 с.

15. Агій Я. Ю. Охорона праці у галузі: навч. пос. / Я. Ю. Агій, І. М. Лях. – Ужгород: ПП «АУТДОР - ШАРК», 2015. – 200 с.

16. Інструкція з технічного обслуговування електровозів і тепловозів в експлуатації / Розробник ПКТБ ЦТ – К.: "Поліграфсервіс". 2003 – 160 с.

17. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII (із наступними змінами та доповненнями).

18. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264-XII (із наступними змінами та доповненнями).

19. Закон України «Про поводження з відходами» від 05.03.1998 № 187/98-ВР (із наступними змінами та доповненнями).

20. Закон України «Про засади державної політики у сфері охорони праці» від 21.11.2002 № 229-IV.

21. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» від 24.02.1994 № 4004-XII.

22. Правила технічної експлуатації залізниць України, затверджені наказом Міністерства інфраструктури України.

23. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпеки факторів виробничого середовища, тяжкості та напруженості трудового процесу» (ДСанПіН 3.3.6.096-2002).

24. Державні будівельні норми (ДБН) з питань природоохоронного проектування, водопостачання та каналізації, протипожежного забезпечення.

25. Державні стандарти України (ДСТУ), що регламентують вимоги до викидів забруднюючих речовин, методів контролю, безпеки обладнання та

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		72

засобів захисту (наприклад, ДСТУ EN 1093-1:2006, ДСТУ ISO 9612:2007 тощо).

26. Накази Міністерства охорони здоров'я України щодо гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони, гранично допустимих рівнів (ГДР) шуму, вібрації, інфрачервоного випромінювання.

27. Директива Європейського Парламенту та Ради 97/68/ЄС (із наступними змінами, зокрема директивами 2002/88/ЄС, 2004/26/ЄС, 2010/26/ЄС, 2012/46/ЄС) щодо зближення законів держав-членів щодо заходів проти забруднення повітря викидами від двигунів внутрішнього згоряння, призначених для неавтошляхових мобільних машин (визначає стандарти викидів Stage I-V).

28. Міжнародний стандарт ISO 14001:2015 «Системи екологічного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування».

29. Міжнародний стандарт ISO 45001:2018 «Системи управління охороною праці та безпекою. Вимоги та настанови щодо застосування» (або його попередник OHSAS 18001:2007).

					КРМ.142.6221м.25.13.ПЗ.	Лист
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата		73