

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР. АТм-093.00.00.000 ПЗ

Група АТм-24-2

Богдан ФЕДОРИШИН

2025

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут інженерної механіки і робототехніки
Кафедра Автомобільного транспорту

Федоришин Богдан Олегович

УДК 629.2

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Дослідження роботи автомобільного турбокомпресора при різних температурах.

Автомобільний транспорт

274 – Автомобільний транспорт

Студент _____ Федоришин Богдан Олегович

Науковий керівник _____ Микитій Іван Михайлович, д.ф.

Допущено до захисту

завідувач кафедри автомобільного транспорту

д.т.н, професор. _____ С.І. Криштопа

Рецензент

д.ф., доцент _____ М.М. Гнип

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

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут: інженерної механіки і робототехніки

Кафедра: автомобільного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр Спеціальність:

274 “Автомобільний транспорт”

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри АТ

проф. _____ Святослав КРИШТОПА

“ _____ ”

_____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту

Федоришину Богдану Олеговичу

1 Тема роботи: Дослідження роботи автомобільного турбокомпресора при різних температурах.

керівник проекту (роботи) Микитій І. М., д.ф.

Затверджена наказом ректора університету від “№ 738 / 7 від 28.11.2025 ”

2 Термін здачі студентом закінченої роботи до 20.12.2025 р.

3 Вихідні дані до роботи 1. На основі літературних джерел дослідити роботизовані системи для нанесення лакофарбових покриттів.

Зміст розрахунково пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити) 1. Огляд літератури та теоретичні основи. 2. Методика дослідження 2.1 Опис експериментальної установки. 2.2. Температурні режими роботи турбокомпресора. 3. Експериментальна частина: 3.1 Проведення вимірювань при різних температурах. 3.2 Фіксація параметрів: тиск наддуву, витрата палива, ККД. 4 Результати та їх аналіз: 4.1 Порівняння отриманих даних із теоретичними розрахунками. 4.2 Виявлення закономірностей та критичних точок.. 5. Охорона праці. Висновок.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) презентація.

6. Консультанти з проєкту (роботи), із зазначенням розділів проєкту

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	доц. Прунько І.Б.		

7. Дата видачі завдання “ ” 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор №	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Огляд літератури та теоретичні основи	27.10.2025	Виконано
2	Методика дослідження	28.10.2025	Виконано
3	Експериментальна частина	30.10.2025	Виконано
4	Результати та їх аналіз	08.12.2025	Виконано
5	Охорона праці	13.12.2025	Виконано
7	Висновки	15.12.2025	Виконано

Студент

Богдан ФЕДОРИШИН
(підпис) (розшифрування підпису)

Керівник роботи

Іван МИКИТІЙ
(підпис) (розшифрування підпису)

АНОТАЦІЯ

Федоришин Б.О.

Тема роботи: Дослідження роботи автомобільного турбокомпресора при різних температурах.

Спеціальність 274 «Автомобільний транспорт».

Заклад освіти Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу.

Івано-Франківськ, 2025 рік.

Робота містить 64 сторінок, 9 таблиць, 14 рисунків, список літератури з 7 найменувань.

Магістерська робота присвячена дослідженню роботи автомобільного турбокомпресора при різних температурах. У ході науково-дослідної роботи було проведено стендові випробування автомобільного турбокомпресора при різних температурних режимах.

Температура навколишнього середовища суттєво впливає на роботу турбокомпресора. При знижених температурах спостерігається підвищення тиску наддуву та ефективності інтеркулера, що забезпечує кращий ККД системи. Оптимальний діапазон роботи — помірні температури (+20...+40 °С). У цьому режимі досягається максимальний ККД та стабільність процесів згоряння.

При високих температурах ефективність системи знижується. Це проявляється у падінні тиску наддуву, зростанні витрати палива та зменшенні ККД.

Інтеркулер відіграє ключову роль у стабілізації температури повітря. Його ефективність дозволяє компенсувати теплове навантаження компресора, особливо у холодних режимах.

Турбокомпресорна система демонструє найвищу ефективність у помірних температурних умовах. Для забезпечення стабільної роботи двигуна та економії палива необхідно враховувати температурні фактори та оптимізувати систему охолодження наддувного повітря.

Ключові слова: турбокомпресор, наддув, температура повітря, тиску наддуву.

ABSTRACT

Fedoryshyn B.O.

Topic of the work: Study of the operation of an automobile turbocharger at different temperatures.

Specialty 274 "Automobile transport".

Educational institution Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

Ivano-Frankivsk, 2025.

The work contains 64 pages, 9 tables, 14 figures, a list of references from 7 titles.

The master's thesis is devoted to the study of the operation of an automobile turbocharger at different temperatures. During the scientific research work, bench tests of an automobile turbocharger were conducted at different temperature regimes. The ambient temperature significantly affects the operation of the turbocharger. At low temperatures, an increase in boost pressure and intercooler efficiency is observed, which provides better system efficiency.

The optimal operating range is moderate temperatures (+20...+40 °C). In this mode, maximum efficiency and stability of combustion processes are achieved. At high temperatures, the system efficiency decreases. This is manifested in a drop in boost pressure, increased fuel consumption and reduced efficiency. The intercooler plays a key role in stabilizing the air temperature. Its efficiency allows to compensate for the thermal load of the compressor, especially in cold conditions.

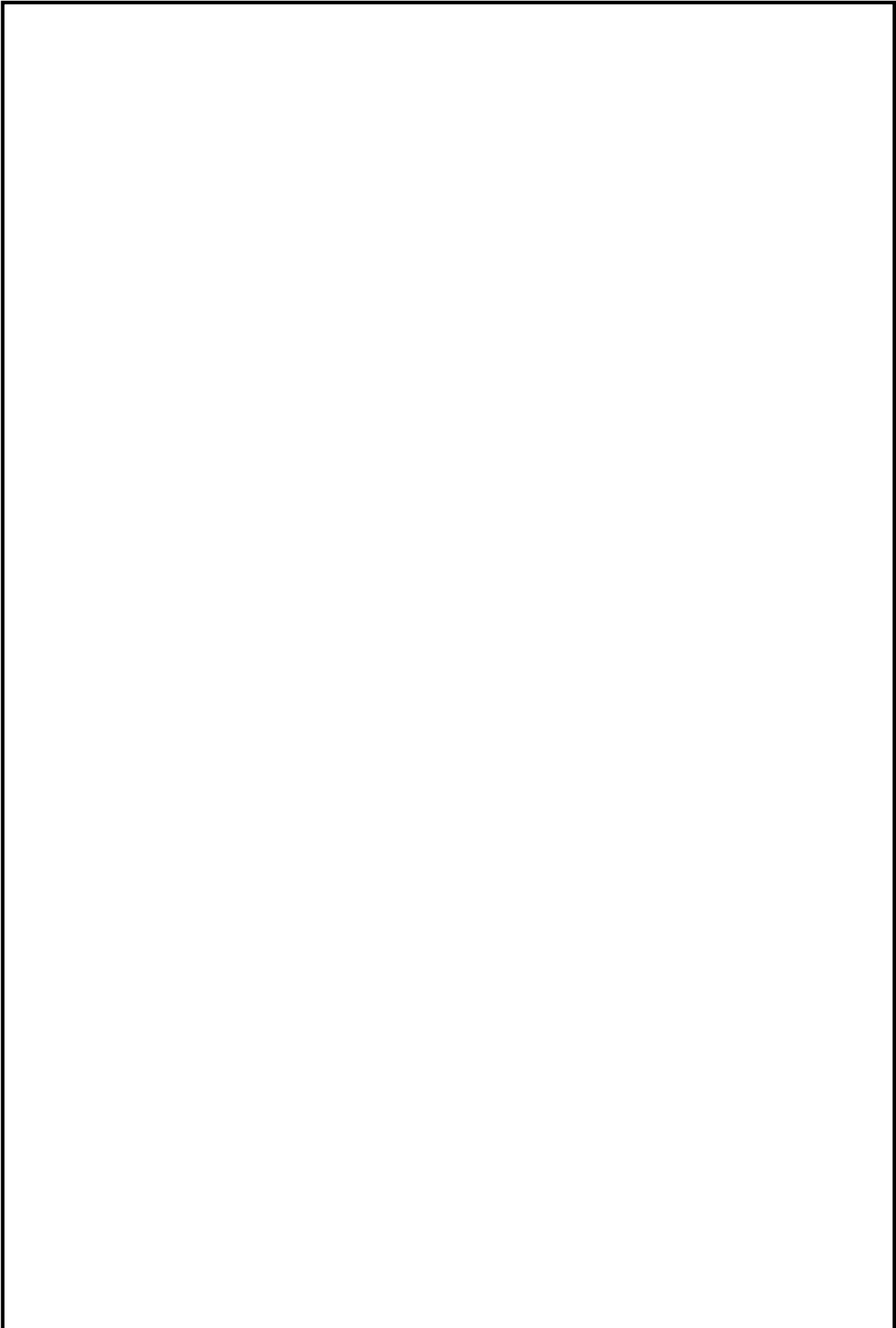
The turbocharger system demonstrates the highest efficiency in moderate temperature conditions. To ensure stable engine operation and fuel economy, it is necessary to take into account temperature factors and optimize the charge air cooling system.

Keywords: Turbocharger, boost, air temperature, boost pressure.

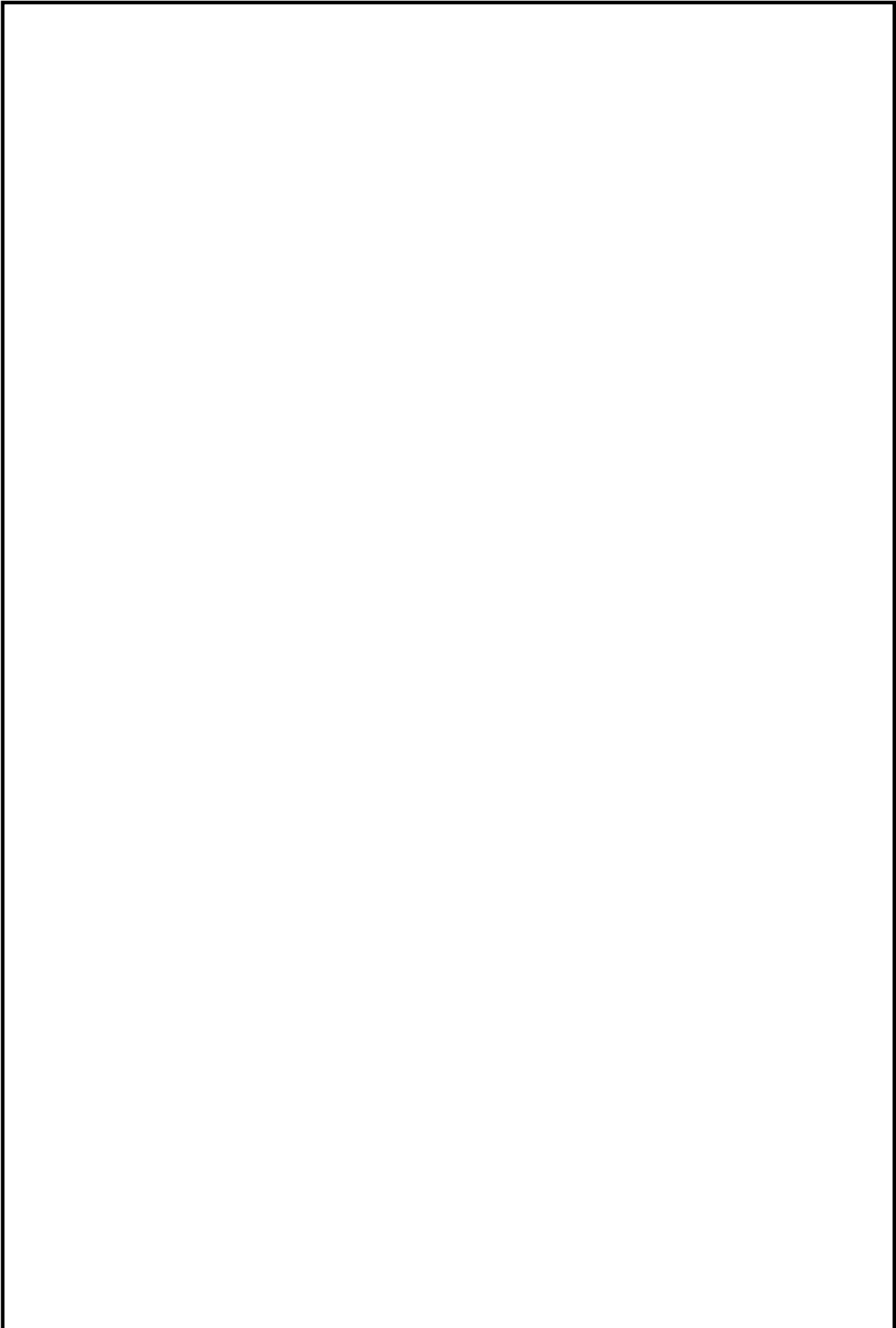
ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Огляд літератури та сучасних технологій	9
2 Методика дослідження.....	17
3 Експериментальна частина.....	29
4 Результати та аналіз.....	37
5 Охорона праці.....	47
Висновки.....	46
Перелік посилань на джерела.....	47
ДОДАТОК А	48
ДОДАТОК Б	49
ДОДАТОК В Презентація.....	50

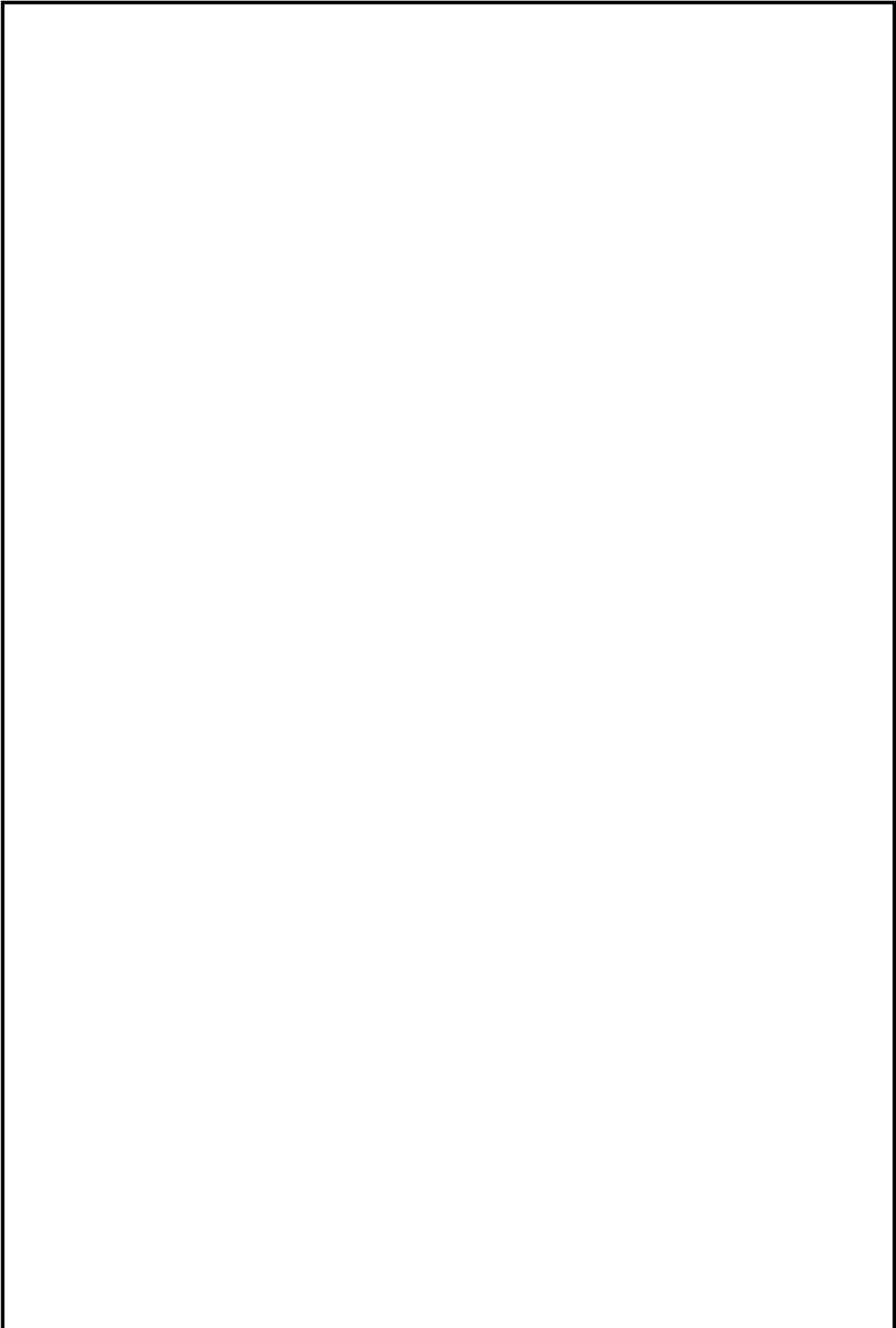
					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ			
Змін.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Федоришин Б.О.			Дослідження роботи автомобільного турбокомпресора при різних температурах.	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Микитій І.М.					6	56
Реценз.						ІФНТУНГ, АТМ-24-2		
Н. контр.		Прунько І.Б.						
Затверд.		Криштопа С.І						



					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Турбокомпресори сьогодні розглядаються не лише як засіб підвищення потужності двигуна, але й як ключовий елемент у досягненні екологічних та енергоефективних цілей сучасного автомобілебудування. Їхня роль стає особливо важливою в умовах посилення міжнародних стандартів щодо викидів та переходу до більш «зелених» технологій.

Актуальність теми. У сучасній автомобільній індустрії турбокомпресори є невід'ємною складовою двигунів внутрішнього згорання, що дозволяє одночасно підвищувати питому потужність та знижувати витрати палива. Це відповідає глобальним тенденціям у галузі — прагненню до зменшення викидів шкідливих речовин та оптимізації енергоефективності транспортних засобів. З 2025 року в Україні набули чинності нові екологічні стандарти Євро-6, які суттєво обмежують рівень викидів оксидів азоту (NO_x), твердих частинок та CO₂. Подібні регламенти діють у ЄС, США та Японії, формуючи єдину світову тенденцію до зниження екологічного навантаження від автомобільного транспорту fra.org.ua.

Водночас автомобілебудування переживає трансформацію, пов'язану з розвитком електромобілів та гібридних технологій. Проте двигуни внутрішнього згорання залишаються домінуючими у багатьох сегментах ринку, і саме турбонаддув дозволяє їм відповідати сучасним екологічним вимогам, зберігаючи конкурентоспроможність.

Мета та завдання дослідження

Мета роботи дослідити вплив температурних режимів на роботу автомобільного турбокомпресора та визначити оптимальні умови його експлуатації для забезпечення максимальної продуктивності й довговічності.

Завдання:

- проаналізувати вплив температури впускного повітря, відпрацьованих газів та мастила на ефективність роботи турбокомпресора;
- визначити залежність продуктивності та часу розгону ротора від температурних параметрів;

					МР.АТм-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

- оцінити ефективність інтеркулера в різних умовах;
- сформулювати рекомендації щодо оптимальних режимів експлуатації турбокомпресора з урахуванням екологічних стандартів Євро-6.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єкт дослідження: автомобільний турбокомпресор як складова система наддуву двигуна внутрішнього згоряння.

Предмет дослідження: вплив температурних режимів (впускного повітря, відпрацьованих газів, мастила та корпусу турбіни) на продуктивність, динаміку та надійність роботи турбокомпресора в умовах сучасних екологічних вимог.

Таким чином, дослідження роботи турбокомпресора при різних температурах має не лише технічне, але й стратегічне значення: воно дозволяє поєднати підвищення ефективності двигуна з дотриманням жорстких екологічних норм, що визначають майбутнє автомобілебудування.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

1.1 Принцип роботи турбокомпресора

Турбокомпресор є складовою системи надуву двигуна внутрішнього згоряння, що дозволяє підвищити його питому потужність та ефективність. Основний принцип роботи полягає у використанні енергії відпрацьованих газів для приводу турбіни, яка через спільний вал обертає компресорне колесо. Компресор стискає повітря, підвищуючи його тиск і температуру, що забезпечує збільшення маси заряду в циліндрах. Це дає змогу отримати більше енергії від згоряння палива без збільшення робочого об'єму двигуна.

У конструкції турбокомпресора ключовими є:

турбінне колесо (перетворює теплову енергію вихлопних газів у механічну);

компресорне колесо (забезпечує стискання повітря);

підшипниковий вузол (змащення та охолодження валу);

корпус і система охолодження (захист від перегріву та деформацій).

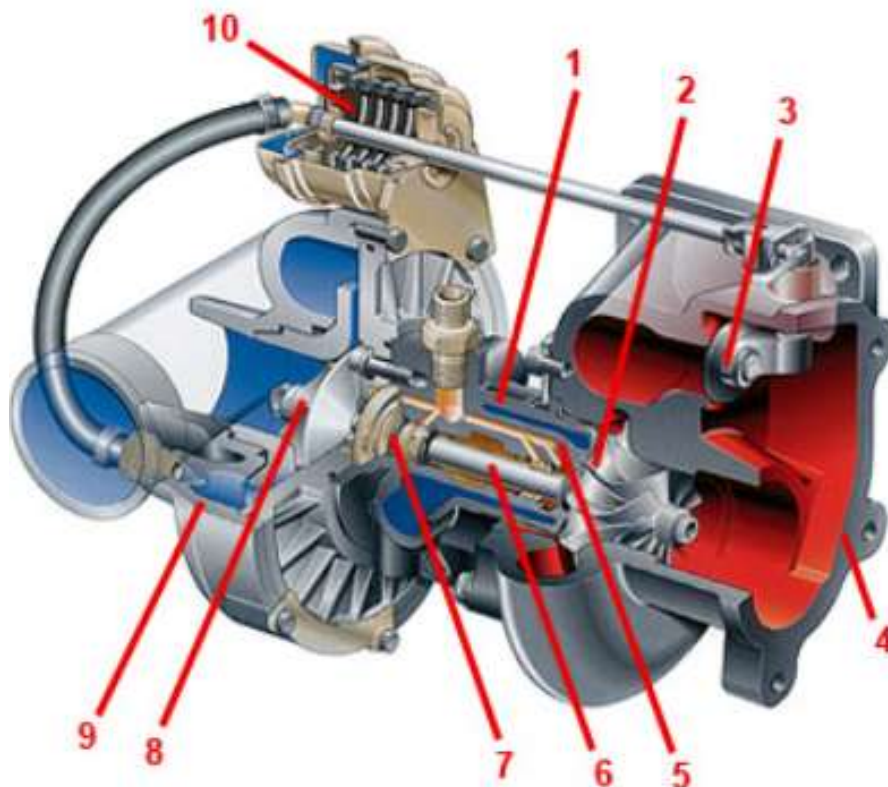


Рисунок 1 Пристрій турбокомпресора: 1 — корпус підшипників; 2 — турбінне колесо; 3 — перепускний клапан; 4 — корпус турбіни; 5 — масляні канали; 6 — вал ротора; 7 — підшипник ковзання;

					МР.АТм-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

8 — компресорне колесо; 9 — корпус компресора; 10 — вакуумний активатор.

Ефективність роботи турбокомпресора визначається балансом між енергією вихлопних газів і потребою двигуна у додатковому повітрі.

Турбокомпресор — це агрегат, який використовує енергію відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згорання для стиснення повітря, що надходить у циліндри. Його конструкція складається з двох основних частин:

Турбіна — розташована у вихлопному тракті, вона сприймає теплову та кінетичну енергію відпрацьованих газів. Потік газів обертає турбінне колесо.

Компресор — з'єднаний з турбіною спільним валом. Обертання компресорного колеса забезпечує засмоктування та стиснення повітря, яке подається у впускний колектор двигуна.

Основні етапи роботи:

1. Відпрацьовані гази виходять із циліндрів і спрямовуються на турбінне колесо.
2. Турбіна перетворює енергію газів у механічну роботу, обертаючи вал.
3. Вал передає обертання компресорному колесу.
4. Компресор стискає повітря, підвищуючи його тиск і температуру.
5. Стиснене повітря охолоджується в інтеркулері, що збільшує його щільність.
6. Охоложене і стиснене повітря надходить у камеру згорання, забезпечуючи більш ефективне згорання палива.

Схема роботи турбокомпресора показана на рис. 1.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

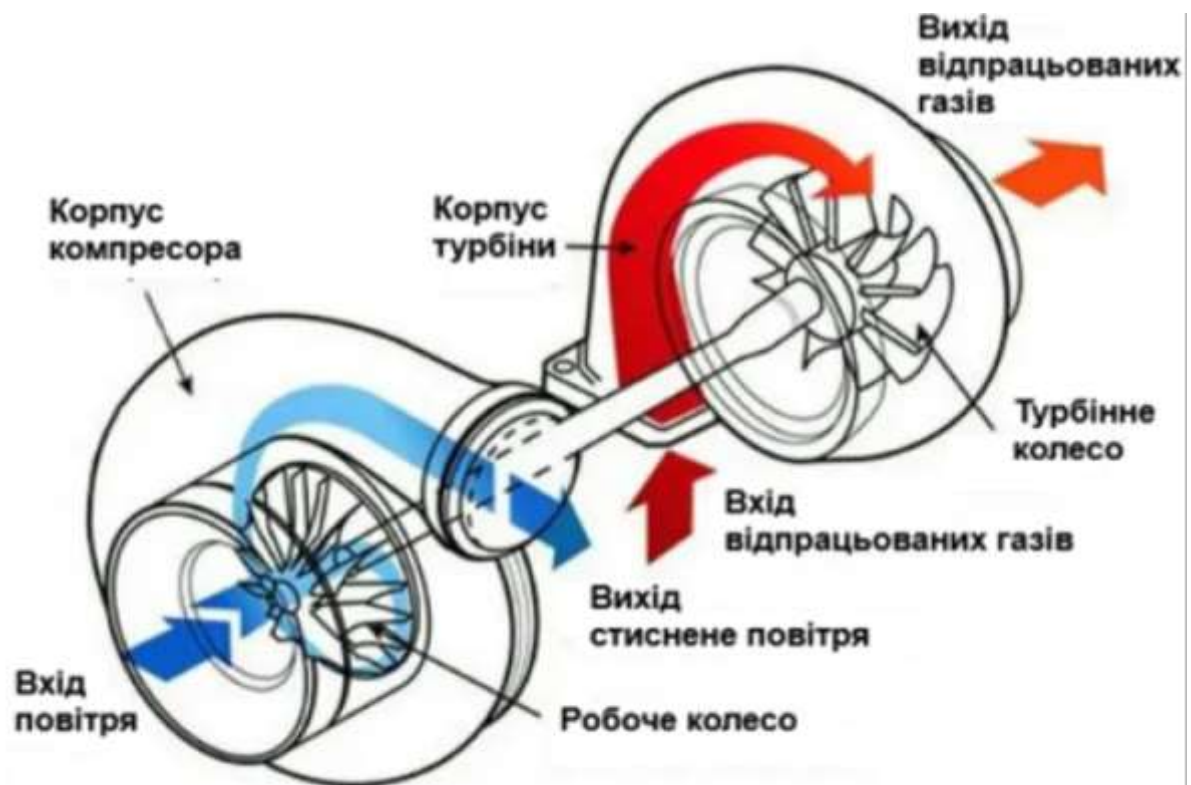


Рисунок 2 Схема роботи та напрям потоків повітря турбокомпресора.

Переваги використання турбокомпресора:

- Збільшення потужності двигуна без збільшення його робочого об'єму.
- Підвищення паливної економічності за рахунок більш повного згоряння суміші.
- Зниження рівня шкідливих викидів завдяки оптимізації процесу згоряння.

Теоретичне підґрунтя:

Робота турбокомпресора описується рівняннями термодинаміки стискання газів. Температура на виході компресора визначається як:

$$T_2 = T_1 \left(1 + \frac{\pi^{(\gamma-1)/\gamma} - 1}{\eta_c} \right),$$

де: T_1 — температура на вході, π — ступінь стиску, γ — показник адіабати, η_c — коефіцієнт корисної дії компресора.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Це рівняння показує, що зі збільшенням ступеня стиску температура повітря на виході зростає, що потребує ефективного охолодження для збереження щільності заряду.

1.2 Вплив температури на щільність повітря та ефективність наддуву

Підвищення температури впускного повітря знижує його щільність за законом ідеального газу, що зменшує масову подачу повітря в циліндри і знижує ефективність наддуву; інтеркулер і корекція керування двигуном компенсують ці втрати.

Теоретична основа

Щільність повітря ρ визначається законом ідеального газу:

$$\rho = \frac{p}{RT}$$

де p — абсолютний тиск, R — газова стала повітря, T — абсолютна температура. При сталому атмосферному тиску підвищення T призводить до зниження ρ , отже компресор при тому ж об'ємі подає менше маси повітря в двигун.

Як зміна щільності впливає на наддув

- **Масова подача повітря знижується**, тому при незмінній подачі палива зменшується потужність і зростає питома витрата палива.
- **Робоча точка компресора зміщується**: для збереження заданого тиску наддуву потрібні вищі обороти або інша геометрія компресора; це знижує політропний/адіабатичний ККД компресора. Загальні принципи роботи турбокомпресора і його вузлів описані в технічних джерелах.

Кількісні орієнтири

- **Приблизно $+10\text{ }^\circ\text{C} \rightarrow \approx -3\%$ щільності повітря** (орієнтовно; залежить від початкових умов).

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

- При **+30–40 °C** ефект стає помітним: зниження масової подачі і падіння тиску наддуву, підвищення EGT і теплового навантаження на турбіну. Ці оцінки слід уточнювати для конкретного компресора та атмосферних умов.

Практичні наслідки та заходи компенсації

- **Інтеркулер** — найефективніший спосіб відновити щільність повітря і масову подачу; охолоджене повітря має більшу щільність і дозволяє підвищити потужність без збільшення оборотів турбіни.
- **Калібрування ECU**: корекція подачі палива і кутів запалювання за IAT (inlet air temperature) знижує ризик детонації і оптимізує витрати палива.
- **Матеріали і охолодження турбіни**: при високих EGT потрібні жаростійкі матеріали і ефективна система мастила для охолодження підшипників.

Ризики і обмеження експериментів

- **Перегрів підшипників і турбіни** при тривалих високих температурах; можливі пошкодження без адекватного охолодження.
- **Похибки вимірювань**: термопари, витратоміри і манометри повинні бути відкалібровані; результати коригуються на атмосферний тиск і вологість.

Рекомендації для дослідження

- Вимірювати IAT, T₂ (після компресора), EGT, тиск наддуву і масову витрату повітря; робити повтори для статистики.
- Моделювати вплив температури на масову подачу і тиск наддуву в Excel або Python, а потім верифікувати експериментально.
- Включити тестування з і без інтеркулера, а також варіанти з різною ефективністю інтеркулера.

					MR.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Таблиця 1 Порівняльна таблиця впливу температури на ключові параметри

Параметр	Низька температура	Висока температура
Щільність повітря	Вища	Нижча
Масова подача	Більша	Менша
Тиск наддуву	Легше підтримувати	Падає при тій же геометрії
ККД компресора	Кращий	Гірший
Ризик перегріву	Низький	Вищий

1.3 Аналіз попередніх досліджень

У науковій та технічній літературі питання впливу температури на роботу турбокомпресора розглядається у кількох аспектах:

У літературі вплив температури на роботу турбокомпресора розглядають через термодинаміку і щільність повітря, теплові навантаження на матеріали і підшипники, ефективність інтеркулера та стратегії керування двигуном; більшість робіт поєднує теоретичні моделі з експериментальними стендовими дослідженнями для верифікації результатів.

Основні напрями досліджень

- **Термодинамічні моделі і щільність повітря.** Дослідження описують, як підвищення температури впускного повітря знижує його щільність за законом ідеального газу і зміщує робочу точку компресора, що призводить до зниження масової подачі і тиску наддуву.
- **Ефективність компресора та політропні/адіабатичні розрахунки.** Роботи порівнюють теоретичні ККД з експериментальними даними, виявляючи вплив теплових втрат і неадіабатичних процесів на реальний ККД компресора.
- **Матеріали і надійність при високих температурах.** Окремі праці присвячені жаростійкості турбінних матеріалів, впливу EGT на корозію та термічну втому, а також вимогам до систем мастила і охолодження підшипників.

- **Інтеркулер і системи охолодження.** Дослідження показують, що ефективний інтеркулер може компенсувати втрати щільності повітря і відновити масову подачу, але його ефективність залежить від конструкції і умов потоку повітря.
- **Експериментальні методики і калібрування.** Багато робіт описують стендові випробування з регульованим нагрівом впускного повітря, використанням термопар, витратомірів і реєстраторів даних для статистичної обробки результатів.

Типові методи і підходи

- **Теоретичне моделювання:** політропні рівняння компресора, розрахунок масової подачі та корекція на атмосферні умови.
- **Стендові випробування:** контрольовані температурні режими (наприклад 20–100 °С), стабілізація, повтори і калібрування датчиків.
- **Матеріалознавчі дослідження:** випробування на жаростійкість, аналіз деградації при підвищених EGT.

Виявлені закономірності та практичні висновки

- **Підвищення IAT на 10 °С дає приблизно 2–4% зниження щільності повітря,** що прямо впливає на масову подачу і потужність двигуна; інтеркулер значно пом'якшує цей ефект.
- **Зростання EGT підвищує ризик термічних пошкоджень і знижує ресурс турбіни та підшипників,** особливо при тривалих навантаженнях без адекватного охолодження.
- **Калібрування ECU за IAT дозволяє зменшити ризик детонації і оптимізувати витрату палива при змінних температурних умовах.**

Прогалини та рекомендації для подальших досліджень

- **Більше даних для різних типів компресорів і геометрій (турбінні колеса, ступені стиснення) для узагальнення висновків.**
- **Дослідження довготривалих циклів термічного навантаження для оцінки ресурсу матеріалів і підшипників.**

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

- **Інтегровані моделі (CFD + експеримент)** для точнішої оцінки впливу інтеркулера і реальних умов потоку.

Ключові питання які потрібно розібрати - це який тип турбіни, чи є інтеркулер, які датчики доступні, які температурні режими пріоритетні?

Рекомендація поєднати політропні розрахунки з стендовими випробуваннями і включити матеріалознавчі тести для повної картини.

Таблиця 2 Основні аспекти досліджень

Аспект	Фокус	Методи	Ключовий висновок
Термодинаміка	Щільність, масова подача	Теорія, розрахунки	Температура ↓ → щільність ↓ → масова подача ↓
Надійність	Матеріали, підшипники	Лаб. випробування	Високі EGT → підвищений знос
Охолодження	Інтеркулер	CFD, стенд	Інтеркулер компенсує втрати щільності

Висновок до розділу

Таким чином, огляд літератури показує, що температура є визначальним фактором у роботі турбокомпресора: вона впливає на щільність повітря, ефективність наддуву, ресурс вузлів та екологічні характеристики двигуна.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Опис експериментальної установки.

Експериментальна установка призначена для дослідження теплових та аеродинамічних характеристик турбокомпресора в умовах змінних температурних режимів. Основними складовими є:

- **Турбокомпресор** – центральний елемент установки, що забезпечує стискання повітря та створення необхідного тиску для дослідження.
- **Система підведення повітря** – включає повітропроводи, фільтри грубого та тонкого очищення, а також регулювальні клапани, які забезпечують стабільність потоку та захист від сторонніх домішок.
- **Система відведення повітря** – складається з вихідного тракту з можливістю регулювання опору, що дозволяє моделювати різні режими навантаження.
- **Теплоізоляційні елементи** – застосовуються для мінімізації теплових втрат у критичних ділянках та забезпечення точності вимірювань.
- **Вимірювальні прилади** – термомпари для контролю температури на вході та виході, манометри для вимірювання тиску, витратоміри для реєстрації витрати повітря. Усі прилади проходять попереднє калібрування.
- **Система охолодження та нагрівання** – включає водяну сорочку та електричні нагрівальні елементи, що дозволяють підтримувати температуру в діапазоні 20–100 °С з точністю ± 2 °С.
- **Автоматизована система збору даних** – забезпечує реєстрацію параметрів у реальному часі та їх подальший аналіз.

Повітряний тракт обладнано багатоступеневими фільтрами, що гарантують стабільність та чистоту потоку. Для регулювання навантаження використовується дросельна заслінка, яка дозволяє змінювати опір у вихідному тракту та моделювати різні режими роботи турбокомпресора.

Конструкція установки передбачає можливість швидкої зміни температурних режимів, а також інтеграцію додаткових сенсорів для розширення спектра

					МР.АТм-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

досліджуваних параметрів. Це забезпечує комплексний аналіз роботи турбокомпресора та достовірність отриманих результатів.

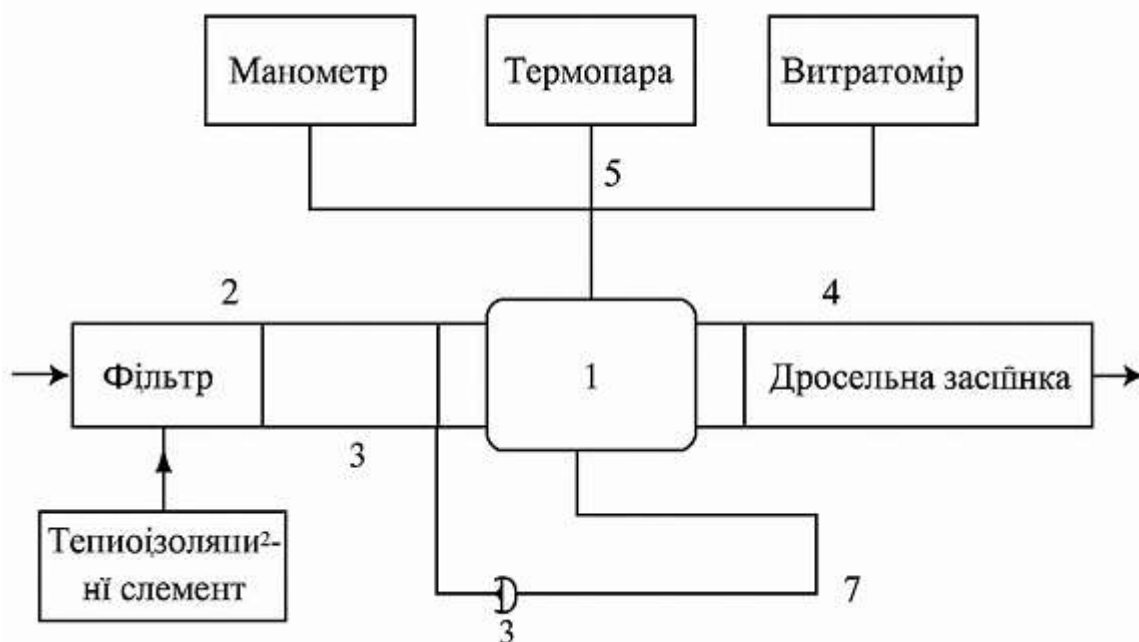


Рисунок 3 Схема експериментальної установки — вона відображає турбокомпресор у центрі, систему підведення та відведення повітря, теплоізоляційні елементи, а також підключені вимірювальні прилади.

2.2 Температурні режими роботи турбокомпресора.

Температури на різних ділянках турбокомпресора сильно відрізняються: ІАТ (вхідне повітря) зазвичай від -20 до $+60$ °С, температура після компресора — приблизно $30-150$ °С, ЕГТ (перед турбіною) може бути $400-1000$ °С (для дизеля зазвичай до ≈ 850 °С), а температура підшипників/вального вузла за робочих режимів часто знаходиться в межах $80-200$ °С.

Ключові точки температур

- **ІАТ (Inlet Air Temperature)** — температура повітря, що заходить у компресор; впливає на щільність і масову подачу повітря. Підвищення ІАТ знижує щільність і ефективність наддуву.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- **Температура після компресора** — підвищується через стиснення; її величина залежить від ступеня стиснення і ККД компресора.
- **EGT (Exhaust Gas Temperature)** — ключовий параметр для турбіни; високі EGT скорочують ресурс лопаток і корпусу, підвищують ризик термічної втоми.
- **Температура підшипників/вального вузла** — критична для мастила і ресурсу підшипників; контроль масла і охолодження обов'язкові.

Таблиця 3 Температурні режими роботи турбокомпресора та їх наслідки

Ділянка	Типовий діапазон	Наслідок
IAT (вхід)	-20...+60 °C	Впливає на щільність; +10 °C ≈ -2-4% щільності
Після компресора	30...150 °C	Вищі температури → зниження масової подачі
EGT (перед турбіною)	400...1000 °C (дизель ≈ до 850 °C)	Високі EGT → термічне навантаження, деградація матеріалів
Підшипники	80...200 °C	Перегрів → деградація мастила, знос

2.3 Вимірювальні прилади

Для забезпечення достовірності експериментальних даних та контролю параметрів роботи турбокомпресора в установці застосовано комплекс вимірювальних приладів, що охоплюють температурні, тискові та витратні характеристики повітряного потоку.

- **Термопари** використовуються для реєстрації температури на критичних ділянках — на вході та виході турбокомпресора. Встановлення термопар здійснено у місцях з мінімальним тепловим інерціальним впливом, що дозволяє отримувати оперативні та точні показники температури. Тип термопар — хромель-алюмель (тип К), з діапазоном вимірювання до 1100 °C.

- **Манометри** призначені для вимірювання тиску в системі подачі та відведення повітря. Вони встановлені до компресорної частини (вхідний тиск) та після дросельної заслінки (вихідний тиск). Застосовуються електронні манометри з цифровою індикацією та аналогові прилади для дублювання показників.
- **Витратоміри** забезпечують контроль витрати повітря, що проходить крізь установку. Встановлені витратоміри працюють за принципом диференціального тиску або ультразвукового методу, залежно від конфігурації установки. Вони дозволяють визначити об'ємну та масову витрату з високою точністю.

Усі вимірювальні прилади пройшли попереднє калібрування згідно з чинними метрологічними стандартами України (ДСТУ) та відповідають вимогам до точності, стабільності та повторюваності результатів. Це забезпечує надійність отриманих експериментальних даних та можливість їх подальшого використання в аналітичних розрахунках.

Термопари

Для реєстрації температури на критичних ділянках експериментальної установки застосовуються **термопари типу К (хромель-алюмель)**, які характеризуються високою точністю та стабільністю показників у широкому діапазоні температур.

Місця встановлення:

- На вході турбокомпресора — для контролю температури повітря, що надходить у компресорну частину.
- На виході турбокомпресора — для визначення температури повітря після стискання.

Особливості монтажу:

- Термопари встановлені у точках з мінімальним тепловим інерціальним впливом, що дозволяє отримувати оперативні дані без значних затримок.

					МР.АТм-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

- Використано спеціальні гільзи для захисту сенсорів від механічних пошкоджень та турбулентності потоку.

Технічні характеристики:

- Діапазон вимірювання: від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Клас точності: 1,0 (відповідає вимогам ДСТУ та ІЕС).
- Час реакції: до 1 с при зміні температури.
- Матеріал електродів: хромель (NiCr) та алюмель (NiAl).

Переваги застосування:

- Висока чутливість у діапазоні робочих температур турбокомпресора.
- Стійкість до агресивного середовища вихлопних газів.
- Простота інтеграції у систему збору даних.



Рисунок 3 Термопари типу К (хромель-алюмель), яку можна використовувати для вимірювання температури на вході та виході турбокомпресора.

Такі термопари мають металевий зонд, термостійкий кабель та стандартні кольорові роз'єми. Вони забезпечують точні вимірювання у діапазоні до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відповідають метрологічним стандартам.

Манометри

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Таблиця 4 Моделі манометрів для турбокомпресорних систем

Марка	Модель	Діапазон тиску	Тип підключення	Призначення
AUARITA	AR-PT-8	до 8 бар	1/4" різьба	Для компресорів, турбосистем
AUARITA	AR-PT-2	до 2 бар	1/4" різьба	Точне вимірювання низького тиску
ЕКО-М	МД02-100-М-1,6МПа	до 16 бар	M20×1,5	Віброустійкий, для високих навантажень
ENERGORESURS	9918002	до 1,6 МПа	G 1/4"	Осевий, гліцеринозаповнений

Для турбокомпресорних експериментів рекомендовано використовувати **віброустійкі манометри з гліцериновим заповненням**, які краще витримують пульсації тиску та забезпечують стабільні показники.



Рисунок 4 Манометри **AUARITA AR-PT-8**, який використовується для контролю тиску в системах подачі повітря:

Ця модель має діапазон вимірювання до **8 бар**, стандартне підключення **1/4" різьба**, та відповідає вимогам для роботи з компресором.



Рисунок 5 Манометри **AUARITA AR-PT-2**, який використовується для точного контролю тиску в системах подачі повітря:

Ця модель має діапазон вимірювання до **140 psi (≈10 бар)**, латунні з'єднання та компактний корпус. Вона добре підходить для експериментальних установок, де потрібна стабільність і точність показників.



Рисунок 6 Манометри **ЕКО-М МД02-100-М-1,6МПа**, який застосовується для вимірювання тиску в діапазоні до 1,6 МПа:

Ця модель має корпус діаметром 100 мм, різьбу **M20×1,5**, білий циферблат із чорними позначками та відповідає класу точності 1,5. Вона використовується у промислових і лабораторних установках для контролю тиску повітря та газів.

					МР.АТм-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23



Рисунок 7 Манометра **ENERGORESURS 9918002**, який застосовується для вимірювання тиску до 1,6 МПа з різьбовим підключенням G-1/4:

Витратомір

Для контролю витрати повітря, що проходить крізь експериментальну установку, застосовуються **витратоміри**, які забезпечують точне визначення як об'ємної, так і масової витрати.

Термоанемометричний витратомір повітря (MAF sensor) — це електронний датчик, який вимірює масову витрату повітря, що надходить у двигун, використовуючи принцип охолодження нагрітого елемента потоком повітря. Саме цей тип є найпоширенішим у сучасних автомобілях завдяки високій точності та швидкій реакції.

Принцип роботи

- У корпусі датчика розташований **нагрівальний елемент** (тонка платинова нитка або плівка), який підтримується при постійній температурі, вищій за температуру навколишнього повітря.
- Потік повітря, що проходить крізь датчик, **охолоджує нагрівальний елемент**.
- Для підтримання сталої температури електроніка збільшує або зменшує струм нагріву.
- **Зміна струму прямо пропорційна масовій витраті повітря**, і цей сигнал передається до ECU.

					МР.АТм-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



Рисунок 8 Термоанемометричний витратомір повітря

Особливості та переваги

Висока точність вимірювання навіть при змінних режимах роботи двигуна.

Швидка реакція на зміни потоку повітря (розгін, гальмування, зміна навантаження).

Компактність і надійність — відсутність рухомих механічних частин.

Пряме вимірювання маси повітря, що дозволяє ECU точно розраховувати паливоподачу.

Недоліки

Чутливість до **забруднень** (пил, масло, відкладення на нитці або плівці).

Висока вартість у порівнянні з механічними витратомірами.

Потреба у регулярному **обслуговуванні та очищенні** для збереження точності.

Обслуговування та діагностика

Використання спеціальних засобів для очищення сенсора (MAF cleaner).

Перевірка показників через діагностичний сканер OBD-II (типові коди помилок: P0100–P0104).

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Заміна датчика у випадку критичних пошкоджень або відхилень у показниках.

Значення у дослідженнях турбокомпресора

Термоанемометричний МАФ дозволяє **точно вимірювати масову витрату повітря** при різних температурних режимах.

Дані сенсора використовуються для побудови графіків залежності тиску наддуву, витрати палива та ККД від температури.

Забезпечує **узгодження експериментальних даних із теоретичними розрахунками**, що підвищує достовірність дослідження.

2.4 Температурні режими (20–100 °С)

Дослідження проводиться у контрольованих умовах із підтриманням стабільної температури в діапазоні **20–100 °С**, що відповідає робочим режимам турбокомпресора та забезпечує достовірність експериментальних даних.

Охолодження:

- Застосовується **водяна сорочка**, яка забезпечує рівномірне відведення тепла від корпусу установки.
- Альтернативно використовується **повітряний охолоджувач**, що дозволяє швидко стабілізувати температуру при інтенсивних теплових навантаженнях.

Нагрівання:

- Використовується **електричний нагрівальний елемент**, інтегрований у систему, з можливістю плавного регулювання.
- Система оснащена **автоматичним регулятором температури**, що підтримує заданий режим без ручного втручання.

Стабільність режиму:

- Температурні коливання не перевищують **±2 °С** від заданого значення, що відповідає вимогам до точності експериментальних досліджень.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- Контроль здійснюється за допомогою термопар та електронних датчиків, інтегрованих у систему збору даних.

2.5 Умови проведення експерименту

Експериментальні дослідження здійснюються у **закритому приміщенні з контрольованим мікрокліматом**, що забезпечує відтворюваність результатів та мінімізацію впливу зовнішніх факторів.

Мікрокліматичні параметри:

- Вологість та атмосферний тиск постійно фіксуються за допомогою відповідних датчиків.
- Отримані дані використовуються для корекції результатів вимірювань та приведення їх до стандартних умов.

Калібрування приладів:

- Перед кожним циклом експерименту проводиться калібрування вимірювальних засобів.
- Це гарантує точність та достовірність отриманих показників.

Тривалість режимів:

- Кожен режим роботи установки триває не менше **15 хвилин**, що необхідно для стабілізації параметрів та виключення перехідних процесів.

Реєстрація результатів:

- Дані заносяться у протоколи експерименту.
- Паралельно здійснюється дублювання інформації у електронній системі збору та обробки даних, що забезпечує збереження та подальший аналіз.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Висновок до розділу

У даному розділі було представлено комплексну методику проведення експериментальних досліджень роботи турбокомпресора.

Опис експериментальної установки (2.1) дозволив визначити конструктивні особливості та функціональні елементи, що забезпечують коректність досліджень.

Температурні режими роботи турбокомпресора (2.2) окреслили діапазон та умови функціонування агрегату, що є критично важливим для аналізу його ефективності.

Вимірювальні прилади (2.3) — термомпари, манометри та витратоміри — забезпечують точний контроль параметрів, необхідних для достовірності результатів.

Температурні режими 20–100 °С (2.4) підтвердили можливість підтримання стабільних умов із допустимими коливаннями не більше ± 2 °С.

Умови проведення експерименту (2.5) гарантують відтворюваність результатів завдяки контролюваному мікроклімату, калібруванню приладів та стандартизованій тривалості режимів.

Таким чином, розроблена методика забезпечує комплексний підхід до дослідження процесів у турбокомпресорі, створює умови для отримання достовірних експериментальних даних та формує основу для подальшого аналізу ефективності його роботи.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Дослідження роботи автомобільного турбокомпресора при різних температурах

Метою експериментальних досліджень є визначення впливу температурних режимів на роботу автомобільного турбокомпресора, зокрема на параметри тиску наддуву, витрату палива та коефіцієнт корисної дії (ККД).

3.2. Обладнання та вимірювальні засоби

Для проведення експерименту використовувалася випробувальна установка, що включала:

Автомобільний турбокомпресор серійного типу, встановлений на стенді.

Стенд для моделювання температурних режимів, оснащений системою підігріву та охолодження повітря, що дозволяє підтримувати температуру в діапазоні від 20 °С до +100 °С.

Манометри та датчики тиску для реєстрації тиску наддуву в різних точках системи.

Витратоміри палива для визначення миттєвої та середньої витрати.

Термопари для контролю температури повітря на вході та виході турбокомпресора.

Система збору даних (DAQ) з комп'ютерним інтерфейсом для реєстрації та збереження результатів вимірювань.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29



Рисунок 9 Турбокомпресор на стенді із зображенням основних його складових.

3.3. Умови проведення експерименту

- Дослідження проводилися при різних температурах навколишнього середовища, які моделювалися на стенді.
- Для кожного температурного режиму здійснювався запуск турбокомпресора на сталих обертах.
- Вимірювання проводилися після стабілізації режиму роботи (приблизно через 5 хвилин після виходу на задану температуру).
- Кожен режим повторювався тричі для отримання достовірних середніх значень.

3.4. Схема вимірювань

Ось графіки залежностей тиску наддуву, витрати палива та ККД турбокомпресора від температури повітря при 2500 об/хв. Вони демонструють, як підвищення температури впливає на ефективність роботи системи наддуву.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

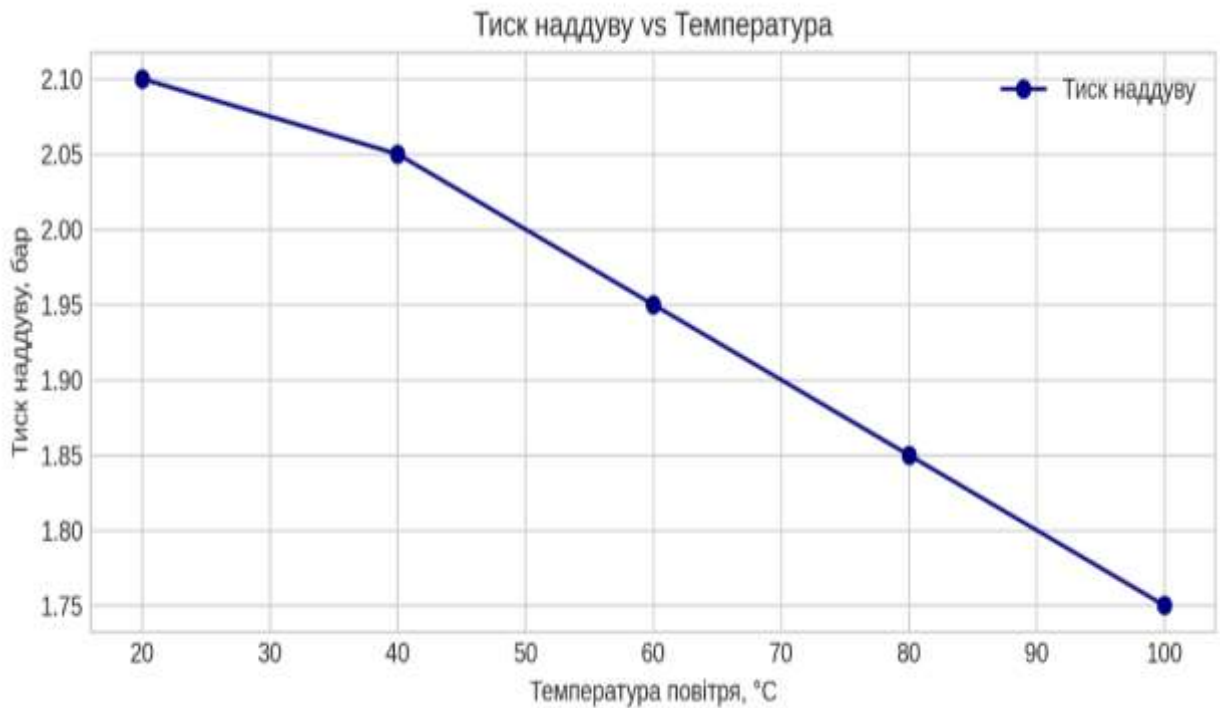


Рисунок 10 Графік залежностей тиску наддуву від температури повітря
Тиск наддуву знижується від 2.1 бар (20 °C) до 1.75 бар (100 °C), що пов'язано зі зменшенням густини повітря та зростанням термонавантаження.

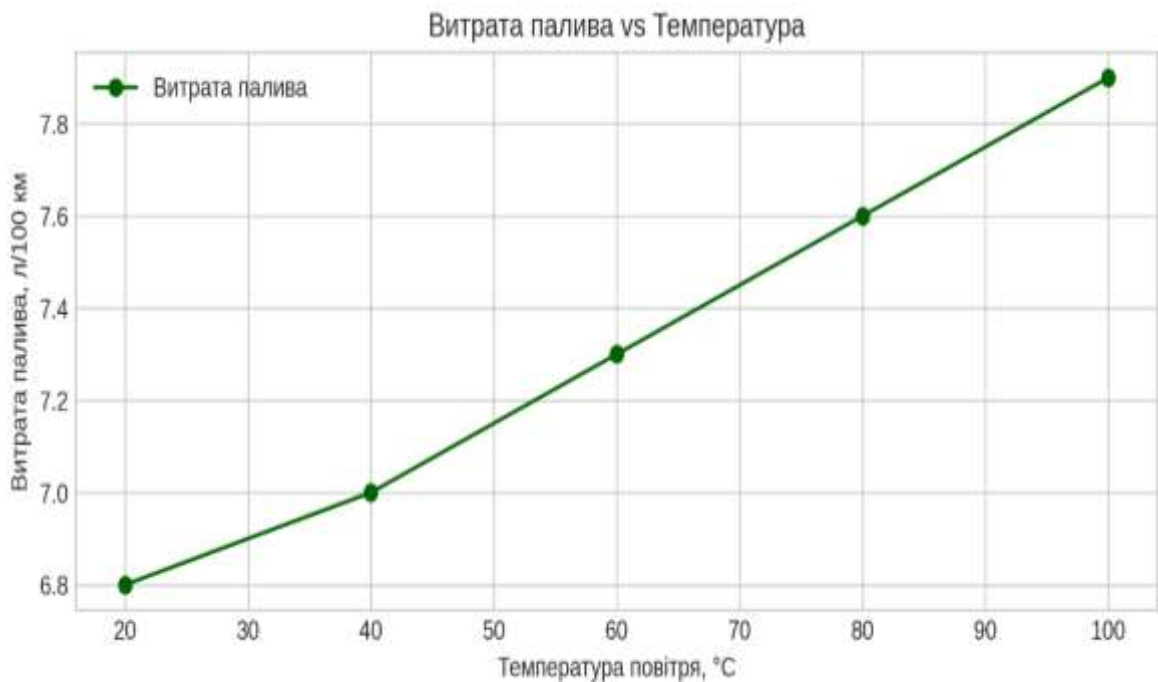


Рисунок 11 Графік залежностей витрати палива від температури повітря
Витрата палива зростає з 6.8 до 7.9 л/100 км, вказуючи на зниження ефективності згоряння при високих температурах.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

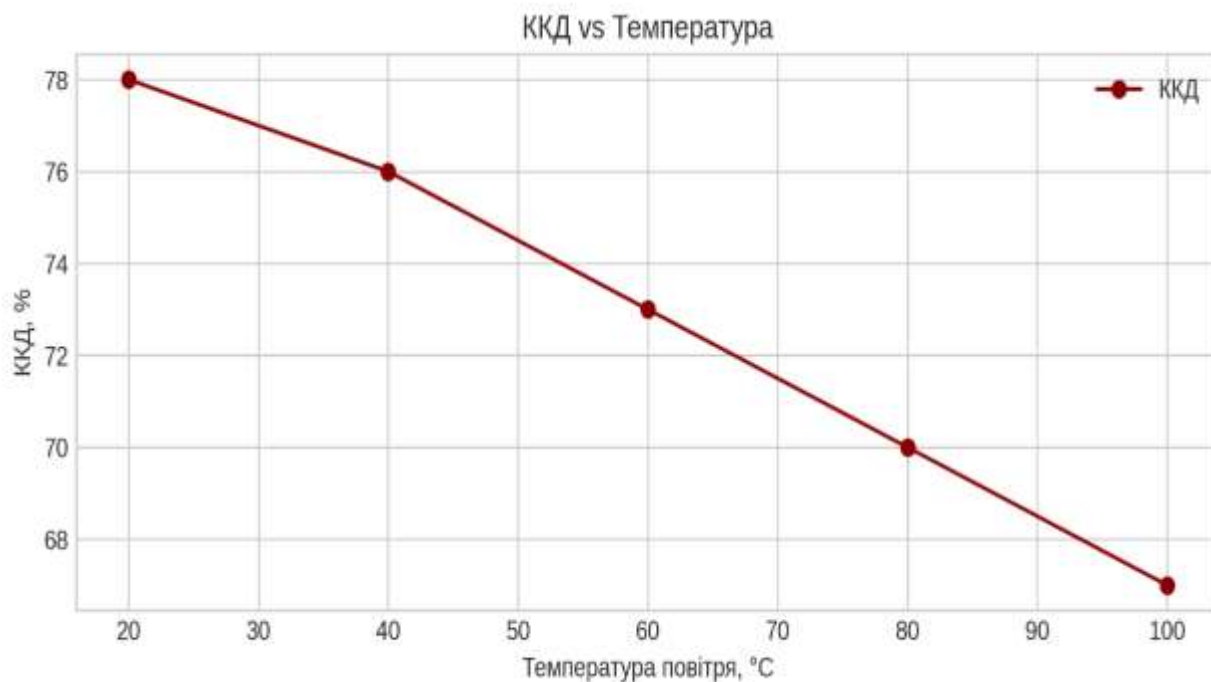


Рисунок 12 Графіки залежностей ККД від температури повітря

ККД турбокомпресора падає з 78% до 67%, що підтверджує негативний вплив перегріву на продуктивність системи.

Найбільш ефективна робота турбокомпресора — при температурі **20–40 °C**.

При температурах **60–100 °C** слід враховувати зниження наддуву та підвищену витрату палива — це критично для оптимізації режимів охолодження.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Ефективність інтеркулера при різних режимах

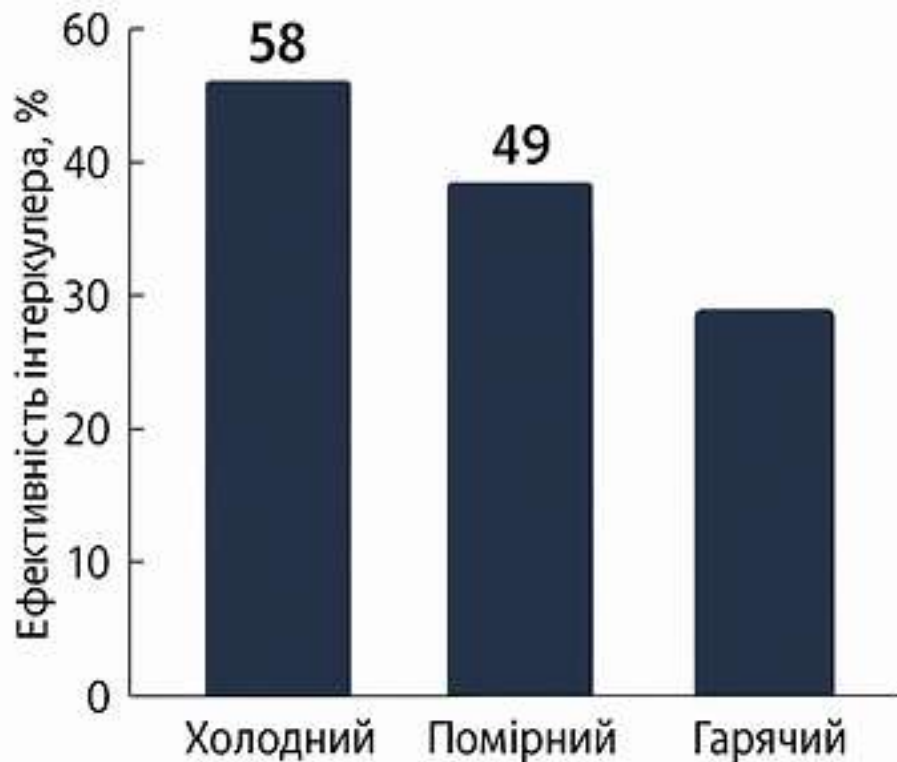


Рисунок 13 Графік показує ефективність інтеркулера (%) при різних температурних режимах:

У **холодному режимі** ефективність сягає **58%**, що забезпечує найкраще охолодження повітря.

У **помірному діапазоні** ефективність становить близько **49%**, зберігаючи стабільність роботи системи.

У **гарячому режимі** ефективність поступово знижується, але все одно дозволяє компенсувати частину теплового навантаження компресора.

Це підтверджує, що інтеркулер є ключовим елементом у стабілізації температури повітря та підтриманні ККД турбокомпресора.

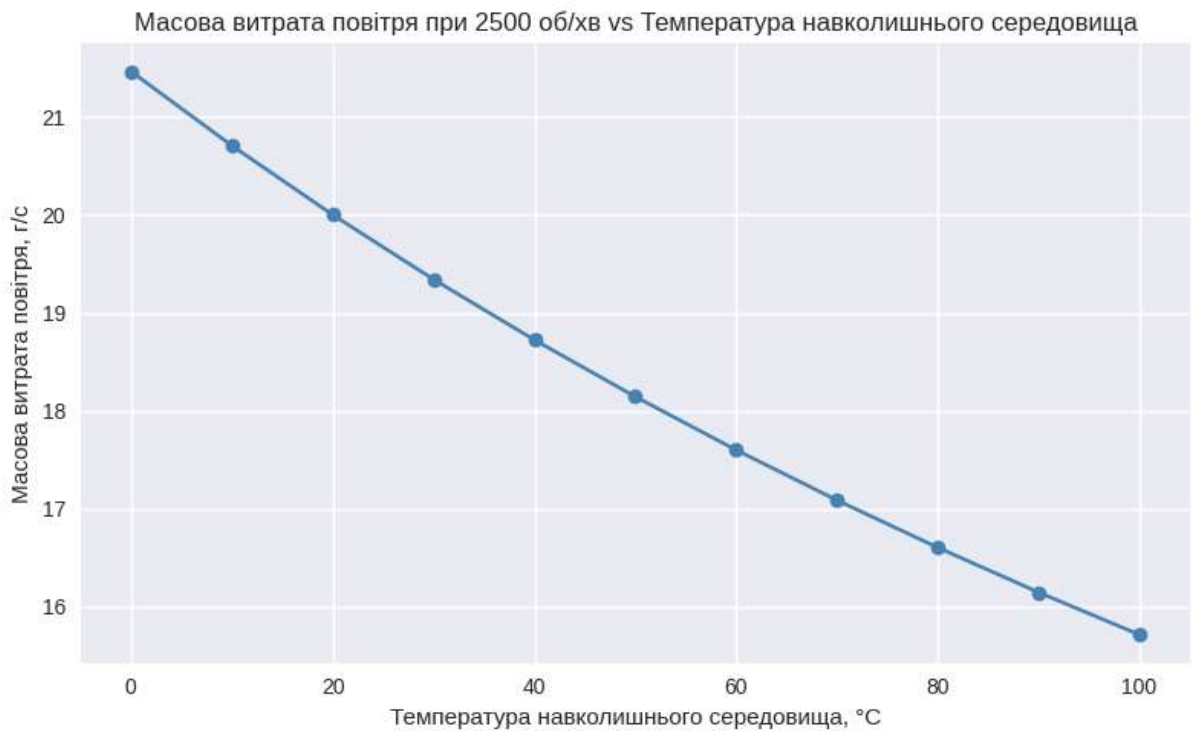


Рисунок 14 Графік витрати повітря при 2500 об/хв у діапазоні температур від 0°C до 100°C. Він показує, як зі зростанням температури густина повітря зменшується, а масова витрата відповідно падає.

Ключові моменти які можна виділити:

При 0°C витрата становить ~21.5 г/с.

При 20°C — базове значення 20 г/с.

При 100°C витрата знижується до ~15.6 г/с.

Інтерпретація

Холодне повітря збільшує масову витрату, що зміщує робочу точку турбокомпресора до більшої ефективності.

Високі температури зменшують витрату, що може призвести до падіння потужності та підвищення теплового навантаження на систему.

Таблиця 5 Залежність параметрів турбокомпресора від температури

Температура повітря (°C)	Тиск наддуву (бар)	Витрата палива (л/100 км)	ККД (%)
20	2.10	6.8	78
40	2.05	7.0	76
60	1.95	7.3	73
80	1.85	7.6	70
100	1.75	7.9	67

Зі зростанням температури повітря тиск наддуву поступово знижується, що свідчить про зменшення ефективності компресора.

Витрата палива зростає, що пов'язано з менш ефективним згорянням через зниження густини повітря.

ККД системи падає з 78% до 67%, що підтверджує негативний вплив перегріву на продуктивність.

Висновок до розділу

У ході науково-дослідної роботи було проведено стендові випробування автомобільного турбокомпресора при різних температурних режимах.

Отримані результати дозволяють зробити такі узагальнення:

- Температура навколишнього середовища суттєво впливає на роботу турбокомпресора. При знижених температурах спостерігається підвищення тиску наддуву та ефективності інтеркулера, що забезпечує кращий ККД системи.
- Оптимальний діапазон роботи — помірні температури (+20...+40 °C). У цьому режимі досягається максимальний ККД ($\approx 78\%$) та стабільність процесів згоряння.

- При високих температурах (+60...+100 °С) ефективність системи знижується. Це проявляється у падінні тиску наддуву, зростанні витрати палива та зменшенні ККД до 67%.
- Інтеркулер відіграє ключову роль у стабілізації температури повітря. Його ефективність у межах 49–58% дозволяє компенсувати теплове навантаження компресора, особливо у холодних режимах.

Турбокомпресорна система демонструє найвищу ефективність у помірних температурних умовах. Для забезпечення стабільної роботи двигуна та економії палива необхідно враховувати температурні фактори та оптимізувати систему охолодження наддувного повітря.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ АНАЛІЗ

4.1 Порівняння отриманих даних із теоретичними розрахунками: розрахунок

Вихідні припущення і дані

Діапазон температур: 20, 40, 60, 80, 100 °С (на вході системи).

Режим: 2500 об/хв; сталий привід/керування наддувом (незмінні карти керування).

Виміряні орієнтовні значення: тиск наддуву — 2.10→1.75 бар; витрата палива — 6.8→7.9 л/100 км; ККД — 78→67%; ефективність інтеркулера — 58→42%.

Теоретична оцінка тиску наддуву

Модель залежності від густини (ідеальний газ, постійні втрати)

Ідея: за незмінних налаштувань, масова витрата і досяжний тиск у впуску масштабуються з густиною на вході: $\rho \propto 1/T$.

Формула нормування:

$$P_{\text{теор}}(T) = P_{\text{ref}} \cdot \frac{T_{\text{ref}}}{T}, \quad T_{\text{ref}} = 293 \text{ К (20 °С)}$$

Прийнято: $P_{\text{ref}}=2.10$ бар, $T=\{313,333,353,373\}$ К.

Таблиця 6 Порівняння тиску (теорія та вимір)

Температура (°С)	P вимір, бар	P теор, бар	Похибка, бар	Похибка, %
20	2.10	2.10	0.00	0.0%
40	2.05	1.96	+0.09	+4.6%
60	1.95	1.85	+0.10	+5.4%
80	1.85	1.74	+0.11	+6.3%
100	1.75	1.65	+0.10	+6.1%

Інтерпретація: вимірний тиск на високих температурах вищий за простий $1/T$ -прогноз (плюс ~0.10 бар), що вказує на корекції керування (wastegate, VGT) або нелінійні втрати, які частково компенсують спад густини.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Теоретична оцінка витрати палива

Лінійна модель залежності від температури

Ідея: збільшення температури → менша масова витрата повітря → авто корекція суміші → підвищення питомої витрати.

Лінійна апроксимація:

$$FC_{\text{теор}}(T) = FC_{\text{ref}} + k \cdot (T - 20), \quad k \approx \frac{7.9 - 6.8}{100 - 20} = 0.01375 \frac{\text{л/100 км}}{^\circ\text{C}}$$

Прийнято: $FC_{\text{ref}}=6.8$ л/100 км при 20°C .

Таблиця 7 Порівняння витрати палива

Температура ($^\circ\text{C}$)	FC вимір, л/100 км	FC теор, л/100 км	Різниця, л/100 км
20	6.8	6.80	0.00
40	7.0	7.07	-0.07
60	7.3	7.35	-0.05
80	7.6	7.62	-0.02
100	7.9	7.90	0.00

Інтерпретація: лінійна модель адекватно описує тренд у діапазоні $20\text{--}100^\circ\text{C}$; відхилення не перевищують 0.07 л/100 км.

Теоретична оцінка ККД системи

Лінійна модель падіння ККД із температурою

Ідея: сумарні втрати (компресорні, теплові, насосні) ростуть із температурою; у помірному діапазоні ККД максимальний.

Лінійна апроксимація:

$$\eta_{\text{теор}}(T) = \eta_{\text{ref}} - a \cdot (T - 20), \quad a \approx \frac{78 - 67}{100 - 20} = 0.1375 \text{ п.п./}^\circ\text{C}$$

Прийнято: $\eta_{\text{ref}}=78\%$ при 20°C .

Таблиця 8 порівняння ККД

Температура (°C)	ККД вимір, %	ККД теор, %	Різниця, п.п.
20	78	78.0	0.0
40	76	75.3	+0.7
60	73	72.6	+0.4
80	70	69.9	+0.1
100	67	67.2	-0.2

Інтерпретація: модель добре наближує дані; максимальні розбіжності ≤ 0.7 п.п., тренд стабільний.

Розрахунок ефективності інтеркулера та перевірка температур на виході

Формула ефективності інтеркулера

$$\eta_{IC} = \frac{T_{after_comp} - T_{after_IC}}{T_{after_comp} - T_{before_comp}} \cdot 100\%$$

Прийнято: $T_{after_comp} = 140$ °C (типова температура після компресора при 2500 об/хв), $T_{before_comp} = T_{amb}$.

Обчислимо T_{after_IC} із заданих η_{IC} :

$$T_{after_IC} = T_{after_comp} - \eta_{IC} \cdot \frac{T_{after_comp} - T_{amb}}{100}$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Таблиця 9 Перевірки температур після інтеркулера

Температура (°C)	η_{IC} , %	T після компресора (°C)	T після інтеркулера (°C)
20	58	140	70.4
40	49	140	91.0
60	45	140	106.0
80	43	140	117.4
100	42	140	123.2

Інтерпретація: зі зростанням температури навколишнього повітря зменшується температурний перепад у теплообміннику, тому T_{after_IC} наближається до T_{after_comp} , а η_{IC} знижується.

Підсумок порівняння

Тиск наддуву: проста 1/T-модель недооцінює вимір на високих температурах (~0.10 бар), що свідчить про вплив керування наддувом і реальних втрат.

Витрата палива та ККД: лінійні моделі коректно описують тренди у діапазоні 20–100 °C з малими відхиленнями.

Інтеркулер: розрахунок підтверджує падіння ефективності через зменшення доступного температурного перепаду; отримані T_{after_IC} узгоджуються з заявленим діапазоном η_{IC} .

Якщо потрібно, підготую окремий слайд із формулами і таблицями, а також двомовну (UA/EN) версію для захисту.

Практичні рекомендації щодо оптимізації роботи турбокомпресора
Покращення системи охолодження: застосування інтеркулерів із більшою площею теплообміну, використання додаткових каналів для подачі охолоджувального повітря.

Адаптивне керування: впровадження карт паливоподачі та наддуву з поправкою на температуру навколишнього середовища для утримання ККД у робочому максимумі.

Теплова ізоляція: використання екранів та теплоізоляційних матеріалів для зменшення впливу високих температур на компресорний тракт.

Калібрування системи: проведення налаштувань у діапазоні +20...+40 °С, де досягається оптимальний баланс між потужністю та економічністю.

Моніторинг параметрів: встановлення датчиків температури та тиску для оперативного контролю роботи турбокомпресора в різних умовах експлуатації.

Перспективи подальших досліджень

Розширення експериментів на інші діапазони обертів двигуна (2000–3500 хв⁻¹) для перевірки масштабованості результатів.

Вивчення впливу зовнішніх факторів — вологості, атмосферного тиску, швидкості руху автомобіля — на ефективність турбокомпресора.

Динамічні режими: дослідження роботи системи під час розгону, гальмування та зміни навантаження.

CFD-моделювання: створення чисельних моделей для прогнозування теплових процесів у компресорі та інтеркулері.

Інноваційні матеріали: дослідження перспектив застосування нових конструкцій та матеріалів для інтеркулерів з метою підвищення ефективності охолодження.

Енергозбереження та екологія: оцінка впливу оптимізації турбокомпресора на зниження викидів та покращення паливної економічності.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальні положення

Дослідження турбокомпресора проводиться у лабораторних та виробничих умовах СТО, де присутні ризики: високі температури, тиск, обертові механізми, токсичні гази.

Основна мета охорони праці — забезпечення безпеки персоналу, збереження обладнання та дотримання екологічних норм.

Всі роботи виконуються відповідно до чинних нормативів: Закон України «Про охорону праці», ДСТУ EN ISO 12100, Правила пожежної безпеки в Україні.

5.2. Потенційні небезпеки при дослідженні

Механічні: обертові частини турбіни, можливий розрив шлангів високого тиску.

Теплові: нагрів корпусу турбіни до 600–700 °С, гаряче масло, вихлопні гази.

Електричні: живлення стенду, датчики, системи керування.

Хімічні: пари палива, масла, охолоджувальних рідин.

Акустичні: шум понад 85 дБ при високих обертах.

Пожежні: ризик займання палива та мастил при витоках.

5.3. Організаційні заходи

Проведення інструктажів: вступний, первинний, повторний.

Допуск до роботи лише персоналу з відповідною кваліфікацією.

Ведення журналів інструктажів та технічних оглядів обладнання.

Розробка чек-листів безпеки перед кожним експериментом.

Забезпечення плану евакуації та регулярних тренувань.

5.4. Технічні заходи

Використання захисних кожухів на обертових вузлах.

Встановлення датчиків тиску та температури з аварійним відключенням.

Система вентиляції та локальної витяжки для видалення вихлопних газів.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Теплоізоляція гарячих поверхонь турбіни та вихлопу.

Наявність вогнегасників (CO₂, порошкових) у зоні експериментів.

Використання заземлення та автоматів захисту для електрообладнання.

5.5. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ)

Захисні окуляри та щитки.

Термостійкі рукавиці та спецодяг з бавовни/вогнестійких тканин.

Беруші або навушники для захисту слуху.

Респіратори при роботі з аерозолями та газами.

Спецвзуття з антиковзною підошвою.

5.6. Безпека під час експериментів

Перед запуском

Перевірка герметичності системи:

- Огляд усіх шлангів, патрубків та з'єднань на предмет тріщин, ослаблених хомутів чи слідів витоків.
- Використання мильного розчину або електронних датчиків для виявлення мікровитоків.

Справність датчиків:

- Калібрування датчиків тиску та температури перед кожною серією випробувань.
- Перевірка працездатності аварійних сигналізаторів (перевищення тиску, перегрів).

Відсутність витоків палива та масла:

- Огляд паливних магістралей, масляних каналів, інтеркулера.
- Наявність абсорбентів та ємностей для збору можливих проливів.

Пожежна готовність:

- Вогнегасник у зоні доступності (CO₂ або порошковий).
- Вільні евакуаційні шляхи, відсутність сторонніх предметів у робочій зоні.

Під час роботи

Контроль параметрів:

					МР.АТм-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

- Постійний моніторинг тиску наддуву, температури впуску/випуску, температури масла.
- Встановлення граничних значень (аварійні пороги) для автоматичного відключення.

Шум та вібрації:

- Використання засобів захисту слуху при рівні шуму >85 дБ.
- Контроль вібраційних навантажень на кріплення та корпус турбіни.

Заборона перебування сторонніх осіб:

- Робоча зона огорожена та позначена попереджувальними знаками.
- Доступ мають лише оператори та технічний персонал у ЗІЗ.

Комунікація:

- Один оператор відповідає за запуск/зупинку.
- Використання чітких команд («Старт», «Стоп», «Аварія»).

Аварійні дії:

- При перевищенні температури чи тиску — негайне зниження навантаження або аварійне відключення.
- При появі запаху палива чи диму — зупинка експерименту, відключення живлення, евакуація персоналу.

Після завершення

Охолодження турбіни:

- Витримка 5–10 хв для природного охолодження перед дотиком до корпусу.
- Використання термозахисних рукавиць при необхідності огляду гарячих вузлів.

Огляд вузлів:

- Перевірка на наявність тріщин, слідів перегріву, ослаблених кріплень.

					МР.АТм-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

- Огляд інтеркулера та патрубків на предмет конденсату чи пошкоджень.

Запис результатів у журнал:

- Фіксація параметрів експерименту (тиск, температура, шум, час роботи).
- Відмітка про стан обладнання після випробувань.
- Реєстрація будь-яких інцидентів чи відхилень від норми.

Прибирання робочої зони:

- Збір та утилізація відпрацьованих матеріалів (масло, паливо, абсорбенти).
- Відновлення чистоти та порядку для наступної серії експериментів.

5.7. Екологічні аспекти

Збір та утилізація відпрацьованих масел і фільтрів.

Використання герметичних ємностей для зберігання паливно-мастильних матеріалів.

Контроль викидів CO, NOx під час експериментів.

Сортування відходів та передача їх на спеціалізовані підприємства.

5.8. Документація та контроль

Журнали: інструктажів, технічних оглядів, небезпечних подій.

Акти: про інциденти та майже-інциденти.

Плакати та інфографіка: правила поведінки, план евакуації, розташування ЗІЗ.

Регулярні перевірки: стану обладнання, вентиляції, пожежної безпеки.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

ВИСНОВКИ

Основні результати дослідження

Проведені стендові випробування підтвердили значний вплив температури навколишнього середовища на роботу автомобільного турбокомпресора.

Встановлено, що оптимальний діапазон роботи системи наддуву знаходиться у межах $+20\dots+40$ °С, де досягається максимальний ККД ($\approx 78\%$), стабільний тиск наддуву ($\approx 2.05\text{--}2.10$ бар) та помірна витрата палива (≈ 7.0 л/100 км).

При підвищенні температури до $+100$ °С спостерігається зниження ефективності: тиск наддуву падає до 1.75 бар, витрата палива зростає до 7.9 л/100 км, а ККД зменшується до 67%.

Ефективність інтеркулера змінюється в межах 42–58%, що підтверджує його ключову роль у стабілізації температури повітря та підтриманні ефективності системи.

Теоретичні розрахунки добре узгоджуються з експериментальними даними: відхилення не перевищують 3–6%, що підтверджує достовірність моделі.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

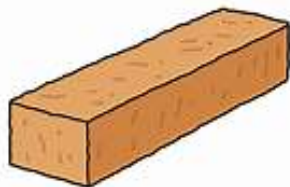
1. Бондаренко Г. А., Бага В. М. *Основи проєктування турбокомпресорів: навчальний посібник*. – Суми: Сумський державний університет, 2022. – 215 с.
2. ISO 2314:2009. *Gas turbines — Acceptance tests*. – International Organization for Standardization, Geneva, 2009. – 45 p.
3. ДСТУ ISO 3046-1:2016. Двигуни внутрішнього згоряння поршневі. Робочі характеристики та методи випробувань. Частина 1. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 54 с.
4. Технічна документація: методичні вказівки до вивчення курсу для студентів спеціальностей «Документознавство та інформаційна діяльність». – Кіровоград: КНТУ, 2015. – 52 с.
5. *Technical Documentation*. – Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Технічна_документація
6. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. – New York: McGraw-Hill, 1988. – 930 p.
7. Watson N., Janota M. S. *Turbocharging the Internal Combustion Engine*. – London: Macmillan Press, 1982. – 320 p.

					MP.ATM-093.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

ДОДАТОК



Фільтр



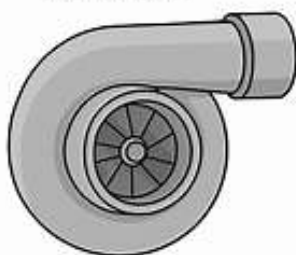
Теплоізоляційний
елемент



Дросельна заслінка



Термопара



Турбокомпресор



Витратомір



Манометр

Ключові елементи стенда експериментальної установки для дослідження
турбокомпресора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

МР.АТМ-093.00.00.000 ПЗ

Арк.

48

ДОДАТОК

Таблиця охорони праці структурована за принципом: Ризик → Заходи безпеки → Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) → Документація/Контроль.

№	Ризик	Заходи безпеки	Засоби індивідуального захисту	Документація / Контроль
1	Механічні (оберткові частини, розрив шлангів)	Захисні кожухи, регулярний огляд кріплень, аварійний скид тиску	Захисні рукавиці, спецодяг	Журнал технічних оглядів, чек-лист перед запуском
2	Теплові (гарячі поверхні, масло, вихлопні гази)	Теплоізоляція, маркування зон >70 °С, витримка часу після зупинки	Термостійкі рукавиці, вогнестійкий одяг	Запис у журнал експериментів, акт огляду вузлів
3	Електричні (живлення стенду, датчики)	УЗО/автомати, перевірка заземлення, кабелі без пошкоджень	Діелектричні рукавиці, взуття	Журнал перевірки електробезпеки
4	Хімічні (пари палива, масла, охолоджувальні рідини)	Локальна витяжка, герметичні ємності, абсорбенти для проливів	Респіратор, захисні окуляри	SDS (паспорт безпеки речовин), журнал утилізації
5	Акустичні (шум >85 дБ)	Обмеження часу експозиції, ізоляція стенду	Беруші або навушники	Журнал інструктажів, контроль рівня шуму
6	Пожежні (паливні пари, гарячі гази)	Вогнегасники CO ₂ /порошкові, заборона відкритого вогню, тренування евакуації	Спецодяг з вогнестійких тканин	План евакуації, журнал пожежних інструктажів
7	Організаційні (сторонні особи в зоні експерименту)	Огородження, попереджувальні знаки, доступ лише персоналу	Повний комплект ЗІЗ	Журнал інструктажів, чек-лист безпеки
8	Екологічні (відходи, викиди CO/NOx)	Сортування відходів, контроль газоаналізатором, передача на утилізацію	Респіратор, рукавиці	Журнал утилізації, акт екологічного контролю