

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ  
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ  
ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

на тему: **“Поліпшення тягового швидкісних властивостей  
автомобіля категорії М1 застосуванням газотурбінного наддуву  
двигуна”**

Виконав: студент IV курсу групи Ат-41  
Спеціальності 274 „Автомобільний транспорт”  
(шифр і назва)

Олег ПАЛЬКО

(ім'я та прізвище)

Керівник: Дмитро РУБАН

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

## РЕФЕРАТ

УДК: 629.114.3: 78

Палько О. І. «Поліпшення тягово-швидкісних властивостей автомобіля категорії М1 застосуванням газотурбінного наддуву двигуна»: Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024. 58 с.

Табл. 4; рис. 13; бібліогр. Джерел 20

У кваліфікаційній роботі предметом дослідження є автомобіль категорії М1 з системою газотурбінного наддуву двигуна. Мета роботи полягає у підвищенні продуктивності, економічності та екологічності автомобільних двигунів.

Для досягнення мети були використані методи розрахунковий та експериментальний, зокрема моделювання робочих процесів двигуна та аналіз експериментальних даних. У роботі детально розглянуті конструкції та принципи роботи систем наддуву, розроблена методика розрахунку показників двигуна з наддувом. Визначені основні конструктивні, технологічні та техніко-експлуатаційні характеристики таких систем.

Результати роботи включають підвищення потужності двигуна, зменшення витрат палива та зниження рівня викидів шкідливих речовин, що досягаються завдяки оптимізації параметрів наддуву. Робота містить рекомендації щодо використання отриманих результатів у практичній діяльності автомобільних підприємств для покращення експлуатаційних характеристик транспортних засобів.

Новизна роботи полягає у комплексному підході до використання систем наддуву, включаючи турбокомпресори, механічні компресори та інтеркулери, що дозволяє досягти максимальної ефективності роботи двигуна. Економічна ефективність досягається завдяки зменшенню витрат палива та підвищенню загальної надійності системи.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ I. ОГЛЯДОВИЙ РОЗДІЛ.....	5
1.1. Мета наддуву.....	5
1.2. Класифікація систем наддуву .....	7
1.3. Системи газотурбінного наддуву .....	9
1.3.1. Будова турбокомпресора .....	12
1.3.2. Регулювання тиску наддуву.....	13
1.3.3. Опис конструкції турбокомпресора .....	14
1.4. Система наддуву з хвильовим обмінником тиску .....	16
1.5. Система механічного наддуву. ....	18
1.6. Комбінована система наддуву. ....	20
1.7. Діапазони роботи компонентів нагнітача.....	21
1.8. Використання робочих діапазонів.....	23
1.9. Способи підвищення потужності в режимі повних навантажень .....	26
РОЗДІЛ II. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНА .....	28
РОЗДІЛ III. БУДОВА ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ.....	33
РОЗДІЛ IV. ПОРІВНЯННЯ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНА ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДДУВУ .....	43
РОЗДІЛ V. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	47
ВИСНОВОК.....	54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

## ВСТУП

Актуальність вивчення теми полягає в постійному прагненні автомобільної промисловості до підвищення продуктивності, економічності та екологічності транспортних засобів. Покращення тягово-швидкісних властивостей автомобілів категорії М1 є одним з напрямків оптимізації сучасних транспортних засобів, що відкриває нові можливості для розробки і впровадження інноваційних технологій. Використання газотурбінного наддуву двигуна дозволяє не лише підвищити потужність та крутний момент, але й сприяє оптимізації витрат пального та зниженню викидів шкідливих речовин.

Об'єктом дослідження в роботі виступає автомобіль категорії М1 з системою газотурбінного наддуву двигуна. Предметом дослідження є системи наддуву та їх вплив на параметри двигуна автомобіля.

Основними задачами даної роботи є:

1. Аналіз існуючих систем наддуву та їх класифікація.
2. Детальний опис конструкції та принципів роботи газотурбінних систем наддуву.
3. Оцінка ефективності різних систем наддуву на базі експериментальних даних та теоретичних розрахунків.
4. Розробка методики проведення розрахунку показників двигуна при використанні різних систем наддуву.
5. Аналіз безпеки роботи систем наддуву в умовах повсякденної експлуатації.

Для досягнення поставлених задач будуть застосовані наступні методи дослідження: аналіз наукової літератури, моделювання робочих процесів двигуна, експериментальні вимірювання, а також статистична обробка отриманих даних.

Зміст роботи організовано в п'ять розділів, що відображають логіку виконання дослідження та включають всебічний аналіз теми.

## РОЗДІЛ I. ОГЛЯДОВИЙ РОЗДІЛ

### 1.1. Мета наддуву

Мета наддуву двигуна автомобіля полягає в оптимізації його робочих характеристик шляхом підвищення потужності та ефективності без збільшення його фізичних розмірів. Наддув є однією з найбільш ефективних технологій для покращення продуктивності двигуна, оскільки він дозволяє значно збільшити кількість повітря, яка потрапляє в циліндри, тим самим забезпечуючи можливість згорання більшої кількості палива та отримання більшої кількості енергії на кожен цикл роботи двигуна.

Застосування наддуву, зокрема газотурбінного, дозволяє досягти значного збільшення крутного моменту і потужності на низьких обертах, що особливо важливо для транспортних засобів, які експлуатуються в умовах міського циклу руху з частими зупинками та стартами. Таке покращення тягових характеристик забезпечує краще прискорення та здатність автомобіля швидше реагувати на дії водія, що значно підвищує комфорт та безпеку водіння [1].

Крім того, ефективність використання палива є ще одним важливим аспектом, який покращується завдяки наддуву. Високий тиск наддуву сприяє кращому змішуванню повітря та палива, що призводить до більш повного їх згорання та зниження рівня викидів шкідливих речовин в атмосферу. Таке згорання є більш чистим та ефективним, що дозволяє не тільки підвищити потужність, але й зменшити обсяг шкідливих викидів, таких як оксиди азоту та вуглекислий газ, що є важливим у контексті глобальних вимог до екологічності автотранспорту.

Також слід відмітити, що газотурбінний наддув, використовуючи відпрацьовані гази, сприяє кращому використанню енергії, що в іншому випадку була б втрачена. Це не тільки забезпечує покращення характеристик двигуна, але й знижує загальне енергоспоживання та витрати на паливо.

Використання сучасних технологій наддуву, таких як газотурбінний наддув, дозволяє реалізувати потенціал сучасних матеріалів і конструкційних рішень. Сучасні турбокомпресори, що використовуються у системах газотурбінного наддуву, виготовляються з високоміцних матеріалів, здатних витримувати великі температурні навантаження та швидкості обертання. Це забезпечує довговічність та надійність системи наддуву, а також мінімізує потребу у частих технічних обслуговуваннях і ремонтах, знижуючи загальні експлуатаційні витрати автомобіля.

Оптимізація процесу наддуву також включає регулювання тиску, що дозволяє адаптувати роботу двигуна до різних режимів експлуатації. Наприклад, можливість зміни параметрів наддуву в залежності від потреб водія (наприклад, під час прискорення на автостраді чи підйому на крутий ухил) дозволяє зберігати оптимальний режим роботи двигуна, що сприяє кращому споживанню палива та зменшенню зносу його компонентів.

Значення газотурбінного наддуву особливо велике для автомобілів категорії M1, де вимоги до динамічних характеристик і водночас до економічності використання є дуже високими. Ця технологія дозволяє виробникам автомобілів відповідати строгим міжнародним нормам екологічності, при цьому підвищуючи конкурентоспроможність своїх моделей на ринку.

Підсумовуючи, мета наддуву в сучасних автомобільних двигунах полягає не тільки в підвищенні потужності та ефективності, але й в забезпеченні більшої економічності та екологічності. Використання газотурбінного наддуву є однією з ключових інноваційних стратегій у автомобільній промисловості, що дозволяє досягти цих цілей. Впровадження таких систем в автомобілі категорії M1 дозволяє значно покращити загальні показники безпеки, комфорту та продуктивності, водночас сприяючи збереженню навколишнього середовища.

## 1.2. Класифікація систем наддуву

Системи наддуву двигунів внутрішнього згоряння класифікуються за різними ознаками, що дозволяє автомобільній промисловості адаптувати технології до специфічних вимог та умов експлуатації. Визначення типу наддуву залежить від методу забезпечення додаткового повітря в циліндри, конструктивних особливостей пристроїв та джерела енергії для їх приводу.

Основні види систем наддуву включають механічний наддув, турбонадув та електричний наддув. Механічний наддув характеризується прямим приводом компресора від колінчатого вала двигуна через ременну або шестерню передачу. Це забезпечує постійну роботу нагнітача і незалежність його роботи від оборотів двигуна, що дозволяє досягти стабільного наддуву на низьких обертах. Проте такий тип наддуву може збільшувати механічні втрати і знижувати загальну паливну економічність двигуна через постійне використання частини потужності для приводу компресора [2].

Турбонадув, найбільш поширений в сучасних автомобілях, використовує енергію відпрацьованих газів, які проходять через турбіну, щоб приводити в дію компресор, який нагнітає повітря в двигун. Така система ефективно використовує втрачену енергію вихлопних газів, забезпечуючи високу потужність при відносно низькому споживанні палива. Ключовим недоліком турбонадуву є так зване "турбояму" — затримка реакції на зміну навантаження через інерцію турбіни, що може впливати на динаміку автомобіля.

Електричний наддув стає все більш популярним завдяки розвитку технологій електромобілів. Він використовує електромотор для приводу компресора, надаючи миттєвий наддув та відмінну реакцію на команди водія. Електричний наддув мінімізує затримку відгуку, характерну для традиційних турбосистем, та може ефективно працювати навіть при низьких обертах двигуна.

Кожна з основних переваг електричного наддуву полягає в його можливості точно контролювати рівень наддуву залежно від поточних потреб двигуна, що забезпечує оптимальну робочу характеристику та покращує ефективність

паливного циклу. Це також допомагає уникнути перевантаження двигуна та покращує загальну надійність системи.

Серед спеціалізованих систем наддуву виділяють також комбіновані системи, які можуть включати декілька типів наддуву для оптимальної продуктивності в широкому діапазоні робочих режимів. Наприклад, комбінація турбонаддуву та механічного наддуву може забезпечити високий момент при низьких обертах завдяки механічному наддуву та підвищену потужність при високих обертах завдяки турбонаддуву.

Також існують системи наддуву, які використовують різні технологічні інновації, такі як хвильові обмінники тиску або варіативні геометрії турбіни, що дозволяють досягати кращої адаптації до змін умов експлуатації. Хвильові обмінники тиску, наприклад, використовуються для динамічного управління тиском наддуву, що забезпечує більш гладке та ефективне заповнення циліндрів двигуна.

Іншим напрямком розвитку систем наддуву є використання змінної геометрії турбін, яка дозволяє змінювати характеристики турбіни в залежності від робочих обертів двигуна. Це дозволяє максимально ефективно використовувати енергію відпрацьованих газів та забезпечувати оптимальну продуктивність на будь-яких обертах.

Важливою умовою ефективності будь-якої системи наддуву є її інтеграція з системою управління двигуном, що включає сучасні електронні контрольні системи. Це дозволяє точно координувати роботу наддуву з іншими параметрами двигуна, такими як впорскування палива та зажигання, забезпечуючи високу загальну ефективність та відповідність екологічним стандартам [3].

Класифікація систем наддуву відіграє важливу роль у розробці двигунів, оскільки вона дозволяє інженерам вибрати оптимальну систему для конкретного застосування. Вибір системи наддуву залежить від багатьох факторів, включаючи тип двигуна, очікувані робочі характеристики, вартість, вагу, розміри та інші експлуатаційні вимоги. Розуміння переваг і недоліків кожної системи дозволяє забезпечити належне балансування між потужністю, ефективністю і витратами,



що є ключовим для досягнення високої загальної продуктивності та задоволення потреб користувачів.

Враховуючи широкий спектр доступних технологій наддуву, важливо також розглянути майбутнє цих систем у контексті постійно зростаючих вимог до екологічності автотранспорту. Розвиток інновацій у галузі матеріалознавства, електроніки та флюїдинаміки відкриває нові можливості для покращення систем наддуву, що може призвести до створення ще більш ефективних та екологічно чистих рішень.

Сучасні дослідження та розробки у галузі наддуву не обмежуються лише пошуком нових рішень для підвищення потужності. Вони також зосереджені на інтеграції систем наддуву з гібридними та повністю електричними силовими агрегатами, а також на впровадженні розумних систем управління, що можуть самостійно адаптуватися до змінних умов експлуатації. Таке поєднання інноваційних технологій сприяє створенню нового покоління високоефективних, надійних і екологічно чистих транспортних засобів.

Завдяки глибокому розумінню різноманітності систем наддуву та їх впливу на робочі параметри двигунів, автомобільна промисловість продовжує розвивати та оптимізувати ці системи, щоб відповідати постійно змінюваним вимогам ринку та забезпечувати найкращі можливості для споживачів у всьому світі.

### 1.3. Системи газотурбінного наддуву

Системи газотурбінного наддуву відіграють вирішальну роль у підвищенні ефективності сучасних двигунів внутрішнього згоряння. Ці системи базуються на використанні енергії відпрацьованих газів, яка зазвичай втрачається у вихлопній системі. Замість того, щоб випускати гази у атмосферу, газотурбінний наддув використовує цю енергію для приводу турбокомпресора, що забезпечує додаткове повітря до камери згоряння двигуна.

Основною складовою системи газотурбінного наддуву є турбокомпресор, який складається з двох основних частин: турбіни та компресора. Турбіна

приводиться в дію газами, що виходять з двигуна, і через механічний вал з'єднана з компресором. Компресор, зі свого боку, забезпечує нагнітання повітря, яке подається в двигун. Підвищення кількості повітря у камері згоряння сприяє більш ефективному згорянню палива, що призводить до підвищення потужності двигуна та покращення його паливної економічності.

Регулювання тиску наддуву є ключовою характеристикою системи, оскільки дозволяє оптимально управляти потоком повітря в залежності від робочих умов двигуна. Зазвичай це досягається за допомогою клапана змінної геометрії або за допомогою управління вентиляції вихлопних газів (wastegate), який регулює кількість газів, що потрапляють на турбіну, і тим самим контролює швидкість її обертання та вироблений тиск [5].

Конструкція турбокомпресора в системах газотурбінного наддуву також включає декілька важливих елементів, таких як підшипники, що забезпечують стабільну та ефективну роботу при високих обертах. Охолодження компресора та турбіни має вирішальне значення для підтримання оптимальної температури робочих компонентів, що сприяє підвищенню їхньої надійності та довговічності.

Майбутні дослідження і розробки у галузі газотурбінних систем Системи газотурбінного наддуву відіграють вирішальну роль у підвищенні ефективності сучасних двигунів внутрішнього згоряння. Ці системи базуються на використанні енергії відпрацьованих газів, яка зазвичай втрачається у вихлопній системі. Замість того, щоб випускати гази у атмосферу, газотурбінний наддув використовує цю енергію для приводу турбокомпресора, що забезпечує додаткове повітря до камери згоряння двигуна.

Основною складовою системи газотурбінного наддуву є турбокомпресор, який складається з двох основних частин: турбіни та компресора. Турбіна приводиться в дію газами, що виходять з двигуна, і через механічний вал з'єднана з компресором. Компресор, зі свого боку, забезпечує нагнітання повітря, яке подається в двигун. Підвищення кількості повітря у камері згоряння сприяє більш ефективному згорянню палива, що призводить до підвищення потужності двигуна та покращення його паливної економічності.

Регулювання тиску наддуву є ключовою характеристикою системи, оскільки дозволяє оптимально управляти потоком повітря в залежності від робочих умов двигуна. Зазвичай це досягається за допомогою клапана змінної геометрії або за допомогою управління вентиляції вихлопних газів, який регулює кількість газів, що потрапляють на турбіну, і тим самим контролює швидкість її обертання та вироблений тиск.

Конструкція турбокомпресора в системах газотурбінного наддуву також включає декілька важливих елементів, таких як підшипники, що забезпечують стабільну та ефективну роботу при високих обертах. Охолодження компресора та турбіни має вирішальне значення для підтримання оптимальної температури робочих компонентів, що сприяє підвищенню їхньої надійності та довговічності.

Майбутні дослідження і розробки у галузі газотурбінних систем наддуву можуть зосереджуватися на подальшому покращенні цих елементів, наприклад, на розробці більш ефективних систем охолодження та більш тривалих підшипників, що витримують високі температури та швидкості обертання. Це забезпечить ще більшу ефективність і надійність в роботі газотурбінних систем наддуву.

### 1.3.1. Будова турбокомпресора

Ілюстрація конструкції турбокомпресора (рис 1.1), яку ви плануєте вставити у свою роботу, дозволить детальніше візуалізувати різні компоненти та їх розташування в системі.

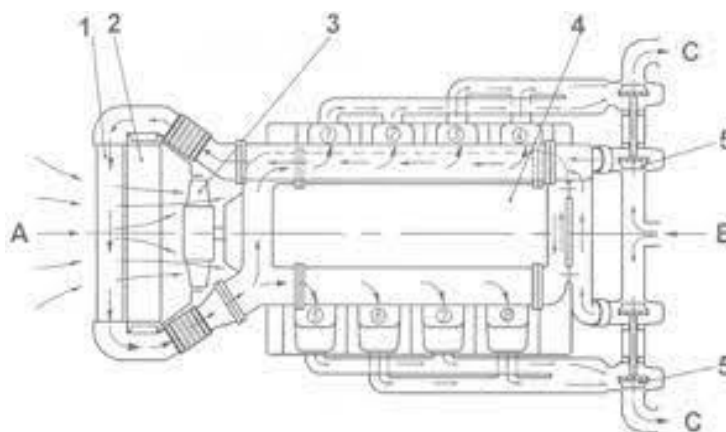


Рисунок 1.1 - Конструкція турбокомпресора

На малюнку турбокомпресора (рис 1.1), різні компоненти позначені цифрами для кращого розуміння їхнього розташування та функцій в системі:

1. Вхід повітря (зазвичай зазначений як місце, де атмосферне повітря засмоктується в компресор).
2. Корпус компресора (тут відбувається стиснення повітря, яке потім спрямовується до двигуна).
3. Вал компресора (з'єднує турбіну та компресор, передаючи обертальний момент від турбіни до компресора).
4. Корпус турбіни (містить турбінне колесо, яке обертається під дією вихлопних газів).
5. Вихлопні гази (показані як напрямок виходу газів після їх проходження через турбіну).

Таким чином, газотурбінні системи наддуву є ключовим елементом сучасних двигунів внутрішнього згорання, що вносять значний вклад у підвищення їхньої потужності, ефективності та екологічності. Розуміння принципів роботи та компонентів цих систем є важливим для розробки нових, більш досконалих двигунів.

### 1.3.2. Регулювання тиску наддуву

Регулювання тиску наддуву є важливою складовою для забезпечення оптимальної роботи двигуна внутрішнього згорання, особливо в умовах підвищених навантажень. Для досягнення максимальної ефективності та безпеки експлуатації автомобільного двигуна, тиск наддуву повинен бути строго контролюваним і регульованим. Це регулювання досягається через використання кількох ключових механізмів, кожен з яких має свої переваги і особливості [4].

Одним із основних методів регулювання тиску наддуву є використання відпускнуго клапана, відомого як wastegate. Цей механізм працює за принципом відкриття клапана при досягненні певного тиску наддуву, що дозволяє частині відпрацьованих газів обминати турбіну. Це, у свою чергу, зменшує швидкість обертання турбіни та знижує тиск наддуву. Завдяки цьому механізму можна запобігти надмірному підвищенню тиску, яке могло б призвести до пошкодження двигуна або його компонентів. Wastegate є широко використовуваним завдяки своїй простоті та надійності.

Іншим методом регулювання тиску наддуву є використання турбокомпресорів зі змінною геометрією (VGT). Ці системи дозволяють змінювати кут нахилу лопатей турбіни, що дає можливість регулювати потік відпрацьованих газів через турбіну. Завдяки цьому можна досягти більш точного і гнучкого управління тиском наддуву, що значно зменшує ефект турбоями і покращує ефективність двигуна на різних обертах. Турбіни зі змінною геометрією особливо корисні для забезпечення високого рівня потужності та крутного моменту на низьких обертах двигуна, що сприяє кращому прискоренню і динамічним характеристикам автомобіля.

Крім цього, для регулювання тиску наддуву використовуються клапани зворотного тиску, які сприяють стабілізації тиску шляхом випуску надлишкового тиску з системи. Це дозволяє уникнути перевантаження двигуна та його компонентів, забезпечуючи надійну та стабільну роботу. Важливою

характеристикою таких систем є їх здатність швидко реагувати на зміни умов експлуатації, забезпечуючи таким чином високу продуктивність і безпеку.

Сучасні автомобільні двигуни все частіше обладнуються електронними системами управління, які забезпечують точний контроль усіх аспектів роботи турбокомпресора, включаючи тиск наддуву. Електронні блоки управління (ECU) використовують дані з численних датчиків для моніторингу тиску, температури та інших параметрів роботи двигуна. На основі цих даних вони автоматично регулюють роботу клапанів, забезпечуючи оптимальні умови роботи двигуна в будь-яких режимах. Такий підхід дозволяє досягти високої ефективності використання палива, зменшити викиди шкідливих речовин і покращити загальну надійність автомобіля.

Завдяки застосуванню сучасних технологій регулювання тиску наддуву, автомобільна промисловість може забезпечувати високу продуктивність і економічність двигунів при одночасному зниженні їх екологічного впливу. Ефективне регулювання тиску наддуву сприяє кращому згорянню палива, що зменшує викиди оксидів азоту та вуглекислого газу, що є важливим фактором у контексті сучасних екологічних стандартів. Використання таких технологій дозволяє забезпечити високу потужність двигуна без збільшення його фізичних розмірів, що особливо важливо для легкових автомобілів категорії M1, де вимоги до динамічних характеристик і економічності використання є надзвичайно високими.

### 1.3.3. Опис конструкції турбокомпресора

Опис конструкції турбокомпресора включає детальний розгляд основних компонентів і принципів їх роботи, що є ключовими для розуміння функціонування цього пристрою. Турбокомпресор складається з двох основних частин: турбіни та компресора, які з'єднані між собою механічним валом. Кожна з цих частин виконує свою специфічну функцію, що в сукупності забезпечує ефективність роботи системи наддуву.

Турбіна, яка приводиться в дію енергією відпрацьованих газів, є важливою складовою турбокомпресора. Відпрацьовані гази, що виходять з двигуна, потрапляють у корпус турбіни і обертають її колесо. Це колесо зазвичай має лопатки, які виготовлені з високоміцних матеріалів, здатних витримувати високі температури і значні механічні навантаження. Енергія, отримана від обертання турбіни, передається через вал до компресора [6].

Компресор, з іншого боку, відповідає за нагнітання повітря в камеру згорання двигуна. Він складається з корпусу, в якому розташоване колесо компресора. Це колесо також має лопатки, але їхня конструкція відрізняється від лопаток турбіни і призначена для стиснення повітря. Вхід повітря в компресор здійснюється через впускний патрубок, де атмосферне повітря засмоктується і потрапляє на лопатки компресора. Під дією обертання лопаток повітря стискається і направляється через випускний патрубок до двигуна.

Вал, який з'єднує турбіну і компресор, є критичним компонентом, що передає механічну енергію від турбіни до компресора. Цей вал зазвичай виготовляється з високоміцних сплавів, здатних витримувати високі температури і механічні навантаження. Для забезпечення стабільної і надійної роботи вал встановлюється на підшипники, які можуть бути як звичайними роликовими, так і спеціальними гідродинамічними підшипниками, що забезпечують мінімальне тертя і високу довговічність.

Охолодження турбокомпресора є ще одним важливим аспектом його конструкції. Високі температури, що виникають під час роботи, можуть призвести до перегріву і пошкодження компонентів. Тому в конструкцію турбокомпресора часто включають системи охолодження, які можуть бути водяними або масляними. Охолоджувальна рідина або масло циркулює через спеціальні канали в корпусі турбіни і компресора, забезпечуючи відведення тепла і підтримання оптимальної температури.

Додатково, конструкція турбокомпресора включає систему регулювання тиску наддуву. Це може бути клапан змінної геометрії, який дозволяє змінювати потік відпрацьованих газів через турбіну, або клапан управління вентиляцією

вихлопних газів, що контролює кількість газів, що потрапляють на турбіну. Такі системи дозволяють забезпечити оптимальні умови роботи турбокомпресора в різних режимах експлуатації [7].

Важливою характеристикою турбокомпресора є його здатність працювати на високих швидкостях обертання, що дозволяє значно підвищити тиск наддуву і відповідно покращити потужність двигуна. Завдяки застосуванню сучасних матеріалів і передових технологій виготовлення, турбокомпресори можуть працювати на швидкостях до 200 000 обертів на хвилину, що забезпечує високу ефективність і надійність.

Таким чином, конструкція турбокомпресора є складною і багатокомпонентною системою, що включає турбіну, компресор, вал, підшипники, систему охолодження і регулювання тиску. Кожен з цих компонентів виконує важливу роль в забезпеченні ефективної і надійної роботи системи наддуву, що дозволяє значно покращити продуктивність і економічність автомобільних двигунів.

#### 1.4. Система наддуву з хвильовим обмінником тиску

Система наддуву з хвильовим обмінником тиску є передовою технологією, яка використовує принципи гідродинаміки для підвищення ефективності двигуна внутрішнього згорання. Хвильовий обмінник тиску, основний компонент цієї системи, забезпечує динамічний обмін тиску між вихлопними газами і повітрям, що подається в двигун, для досягнення максимального підвищення тиску наддуву.



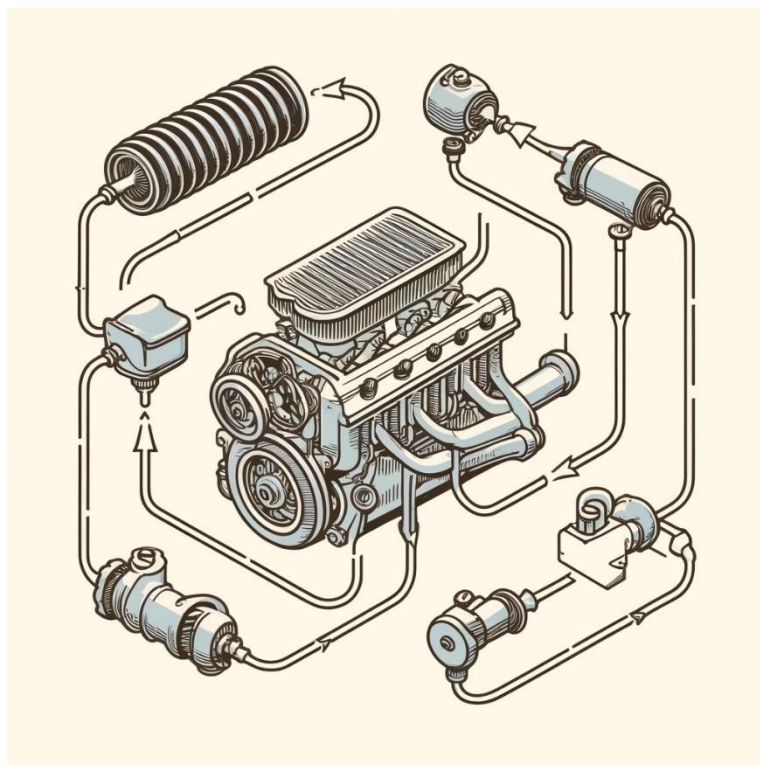


Рисунок 1.2 - Система хвильового обмінника тиску

У конструкції системи хвильового обмінника тиску є кілька ключових компонентів: компресор, хвильовий обмінник тиску, впускний колектор, випускний колектор і циліндри двигуна. Компресор всмоктує атмосферне повітря і стискає його, після чого направляє у хвильовий обмінник тиску. У цьому обміннику відбувається складний процес взаємодії потоку вихлопних газів та свіжого повітря, де за допомогою хвильових процесів тиск вихлопних газів передається повітрю, що стискається.

Процес у хвильовому обміннику тиску базується на принципі відбиття і суперпозиції хвиль тиску, що забезпечує високий рівень стиску повітря перед подачею його в камеру згорання двигуна. Це значно підвищує ефективність згорання палива, що призводить до збільшення потужності двигуна та зниження витрат палива. Крім того, хвильовий обмінник тиску допомагає зменшити рівень викидів шкідливих речовин завдяки більш ефективному згоранню [9].

Важливою перевагою хвильової системи наддуву є її здатність працювати без використання механічних приводів або електричних моторів, що робить її

відносно простою та надійною в експлуатації. Це також означає, що така система може забезпечувати миттєвий відгук на зміну навантаження двигуна, що є важливим для забезпечення динамічних характеристик автомобіля.

Таким чином, система наддуву з хвильовим обмінником тиску є інноваційним рішенням, яке дозволяє підвищити ефективність роботи двигуна внутрішнього згоряння за рахунок використання передових принципів гідродинаміки. Це забезпечує значне покращення продуктивності двигуна, економічності використання палива та зниження рівня викидів шкідливих речовин, що є важливими аспектами в умовах сучасних екологічних вимог.

### 1.5. Система механічного наддуву

Система механічного наддуву є важливою технологією для підвищення ефективності двигуна внутрішнього згоряння шляхом збільшення кількості повітря, що подається в камеру згоряння. В основі цієї системи лежить використання механічного нагнітача, який приводиться в дію безпосередньо від двигуна за допомогою ремінного приводу. Це дозволяє забезпечити постійний і надійний потік повітря, незалежно від умов експлуатації двигуна.

Основні компоненти системи механічного наддуву включають механічний нагнітач, впускний колектор і циліндри двигуна. Механічний нагнітач, зазвичай встановлений на передній частині двигуна, підключений до колінчастого вала двигуна через ремінь. Коли двигун працює, ремінь обертає нагнітач, який засмоктує повітря через впускний отвір і стискає його перед подачею у впускний колектор.



економічність. Також, конструкція таких систем може бути складнішою та важчою порівняно з іншими методами наддуву.

Незважаючи на ці обмеження, система механічного наддуву залишається популярним рішенням завдяки своїй простоті, надійності та здатності забезпечувати стабільний наддув. Використання таких систем дозволяє значно покращити продуктивність двигуна і підвищити задоволення від водіння, особливо в умовах, де потрібна висока потужність і швидкий відгук.

10

### 1.6. Комбінована система наддуву

Комбінована система наддуву об'єднує переваги як механічного нагнітача, так і турбокомпресора, для досягнення максимальної ефективності двигуна внутрішнього згоряння. Така система дозволяє забезпечити високий рівень наддуву на всіх обертах двигуна, що значно покращує його продуктивність і динамічні характеристики.

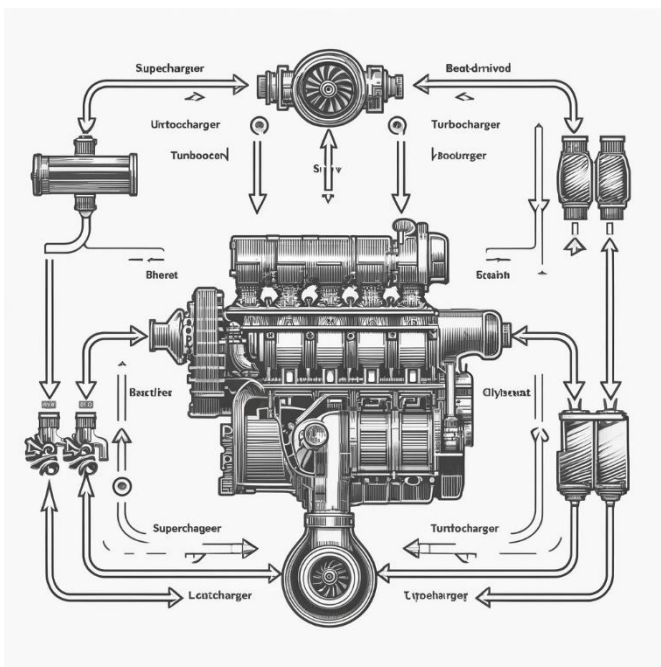


Рисунок 1.4 - Комбінована система

Комбінована система включає два основні компоненти: механічний нагнітач, який приводиться в дію ременем від колінчастого вала двигуна, та турбокомпресор, який використовує енергію відпрацьованих газів для стиснення повітря. Механічний нагнітач забезпечує миттєвий наддув при низьких обертах двигуна, що сприяє кращому прискоренню і швидкому відгуку на дії водія. Турбокомпресор, у свою чергу, забезпечує додатковий наддув на високих обертах двигуна, використовуючи енергію відпрацьованих газів, що підвищує загальну ефективність і економічність двигуна.

Стиснене повітря з механічного нагнітача і турбокомпресора подається у впускний колектор, звідки воно розподіляється до циліндрів двигуна. Завдяки цьому досягається високий рівень наддуву при будь-яких режимах роботи двигуна, що забезпечує значне підвищення потужності і крутного моменту.

На схемі показано, як повітря проходить від механічного нагнітача і турбокомпресора до циліндрів двигуна через впускний колектор. Стрілки вказують напрямок руху повітря, що дозволяє легко зрозуміти роботу цієї системи. Комбінована система наддуву є складнішою у конструкції, але вона забезпечує максимальну ефективність і продуктивність двигуна, що робить її популярною для використання у високопродуктивних автомобілях та спортивних транспортних засобах[12] .

### 1.7. Діапазони роботи компонентів нагнітача

Діапазони роботи компонентів нагнітача є ключовими характеристиками, що визначають ефективність і надійність системи наддуву. Кожен компонент нагнітача, включаючи турбокомпресор, механічний нагнітач і пов'язані з ними елементи, має свій оптимальний діапазон роботи, який забезпечує максимальну продуктивність і довговічність.

Турбокомпресори, що використовуються у системах наддуву, мають широкий діапазон робочих обертів, який може варіюватися від кількох тисяч до

понад 200 000 обертів на хвилину. Оптимальний діапазон обертів турбокомпресора залежить від конструкції та типу двигуна, а також від умов експлуатації. Наприклад, турбіни зі змінною геометрією можуть забезпечувати ефективний наддув на низьких обертах двигуна, що дозволяє зменшити ефект турбоями і підвищити продуктивність при різних режимах роботи.

Механічні нагнітачі, такі як нагнітачі типу Roots або гвинтові нагнітачі, працюють у діапазоні обертів, який відповідає обертам двигуна, оскільки вони приводяться в дію безпосередньо від колінчастого вала. Це забезпечує стабільний і постійний наддув на низьких і середніх обертах двигуна, що є особливо важливим для досягнення високого крутного моменту і швидкого відгуку на дії водія. Механічні нагнітачі зазвичай працюють у діапазоні від 1 000 до 15 000 обертів на хвилину, в залежності від конкретної конструкції і призначення.

Іншим важливим компонентом системи наддуву є інтеркулер, який використовується для охолодження стисненого повітря перед подачею його в двигун. Інтеркулери можуть працювати в широкому діапазоні температур, забезпечуючи ефективне охолодження навіть при високих температурах і тисках. Оптимальна робота інтеркулера забезпечує зниження температури повітря, що дозволяє підвищити щільність повітря і покращити ефективність згоряння палива.

Також важливо враховувати діапазони роботи клапанів управління тиском, таких як wastegate або клапани змінної геометрії турбіни. Ці клапани повинні мати швидкий і точний відгук на зміни тиску наддуву, щоб забезпечити стабільну роботу системи і запобігти перевантаженню двигуна. Клапани зазвичай проектуються для роботи в діапазоні тисків від 0 до кількох бар, в залежності від вимог до наддуву.

Крім того, електронні системи управління, які контролюють роботу компонентів нагнітача, повинні бути здатні обробляти дані і коригувати параметри роботи в режимі реального часу. Це включає управління обертами турбіни, відкриттям і закриттям клапанів, а також іншими параметрами, що впливають на роботу системи наддуву. Сучасні електронні блоки управління

(ECU) можуть працювати в широкому діапазоні умов і забезпечувати високу точність і надійність управління.

Таким чином, діапазони роботи компонентів нагнітача є критично важливими для забезпечення ефективності і надійності системи наддуву. Правильний вибір і налаштування цих компонентів дозволяють досягти оптимальної продуктивності двигуна, знизити витрати палива і викиди шкідливих речовин, а також підвищити загальну довговічність системи[11].

### 1.8. Використання робочих діапазонів

Використання робочих діапазонів компонентів нагнітача є критично важливим для оптимізації продуктивності і ефективності системи наддуву в двигунах внутрішнього згорання. Правильне використання діапазонів дозволяє максимально використовувати потенціал кожного компонента і забезпечити надійну роботу системи в різних умовах експлуатації.

Для прикладу розглянемо роботу турбокомпресора зі змінною геометрією (VGT) і механічного нагнітача. Турбокомпресори зі змінною геометрією можуть працювати ефективно в широкому діапазоні обертів двигуна завдяки здатності змінювати кут нахилу лопаток турбіни. Це дозволяє досягти високого рівня наддуву навіть на низьких обертах двигуна, що є важливим для покращення динаміки автомобіля. Наприклад, при низьких обертах двигуна (1 500-2 500 обертів на хвилину) VGT може забезпечити достатній тиск наддуву для покращення крутного моменту, тоді як на високих обертах (понад 4 000 обертів на хвилину) він забезпечує максимальну потужність, адаптуючи геометрію лопаток для ефективного використання енергії відпрацьованих газів.

Механічні нагнітачі, такі як нагнітачі типу Roots, забезпечують стабільний наддув на всіх обертах двигуна, оскільки вони приводяться в дію безпосередньо від колінчастого вала. Це означає, що на низьких обертах (наприклад, 1 000-3 000 обертів на хвилину) нагнітач типу Roots може забезпечити миттєвий наддув, що

значно покращує прискорення автомобіля і його динамічні характеристики. На високих обертах (3 000-6 000 обертів на хвилину) такий нагнітач продовжує ефективно працювати, забезпечуючи стабільний тиск наддуву і покращуючи потужність двигуна.

Приклади використання інтеркулерів також ілюструють важливість робочих діапазонів. Інтеркулери використовуються для охолодження стисненого повітря, що дозволяє підвищити його щільність перед подачею в камеру згорання. Наприклад, у двигунах високої продуктивності, інтеркулери можуть знижувати температуру стисненого повітря з 150°C до 50°C, що значно підвищує ефективність згорання палива і зменшує ризик детонації. Робочий діапазон температур інтеркулера залежить від умов експлуатації і типу використовуваного охолоджувача (водяного або повітряного).

Також важливо враховувати діапазони роботи електронних систем управління, які контролюють всі аспекти роботи системи наддуву. Сучасні блоки управління можуть забезпечувати точне регулювання тиску наддуву, обертів турбіни і роботи клапанів в реальному часі, що дозволяє адаптувати роботу двигуна до поточних умов експлуатації. Наприклад, при різких прискореннях система управління може миттєво збільшити тиск наддуву для забезпечення максимального крутного моменту, а при стабільній швидкості – знизити тиск для економії палива.

Завдяки правильному використанню робочих діапазонів компонентів системи наддуву можна досягти високої ефективності, продуктивності і надійності двигуна. Врахування характеристик кожного компонента і їх оптимальне налаштування дозволяє забезпечити стабільну роботу двигуна в різних режимах, знизити витрати палива і викиди шкідливих речовин, а також підвищити загальну довговічність системи [12].

На графіках (рис 1.5) показано, як використання робочих діапазонів компонентів нагнітача впливає на продуктивність системи наддуву.

Графік для турбокомпресора зі змінною геометрією (VGT): показує залежність тиску наддуву від обертів двигуна. Як видно, тиск наддуву



збільшується з підвищенням обертів, досягаючи максимального значення при високих обертах (6000 об/хв).

2. Графік для механічного нагнітача (Roots): показує стабільний приріст тиску наддуву з підвищенням обертів двигуна. Механічний нагнітач забезпечує високий тиск наддуву навіть на низьких обертах, що сприяє швидкому відгуку двигуна.

3. Графік для інтеркулера: показує зниження температури стисненого повітря з підвищенням обертів двигуна. Інтеркулер ефективно охолоджує стиснене повітря, що підвищує його щільність і покращує згоряння палива.

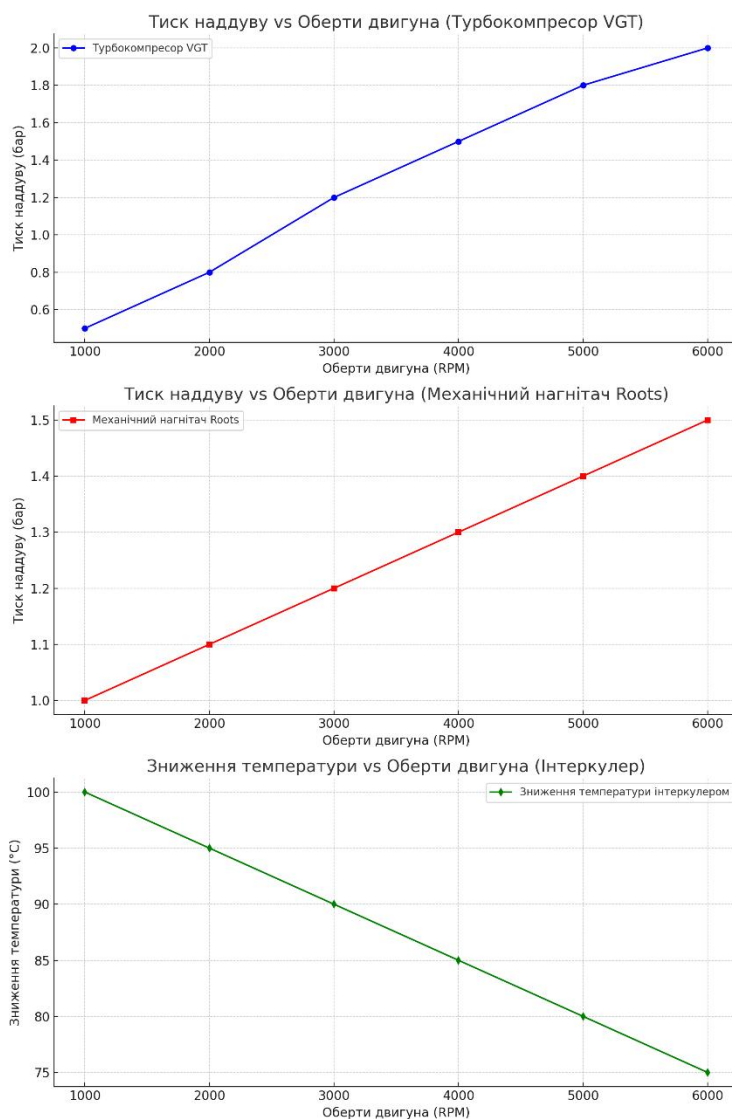


Рисунок 1.5 - Графіки впливу нагнітача на продуктивність системи

Ці графіки наочно ілюструють, як використання робочих діапазонів компонентів нагнітача впливає на ефективність і продуктивність системи наддуву, що дозволяє досягти оптимальних характеристик двигуна.

### 1.9. Способи підвищення потужності в режимі повних навантажень

Забезпечення резервного живлення автомобіля є важливим аспектом його експлуатації. Використання павербанків та портативних зарядних станцій дозволяє мати надійне джерело живлення в будь-який час, навіть у разі непередбачених обставин. Придбання якісних пристроїв та дотримання рекомендацій щодо їх використання забезпечує стабільну роботу автомобільних систем [13].

Підвищення потужності двигуна внутрішнього згорання можливо досягти шляхом впровадження кількох ключових елементів системи, таких як турбокомпресор, інтеркулер, впускні та випускні колектори, а також різноманітні клапани та датчики, що контролюють та регулюють параметри наддуву. Турбокомпресор складається з турбіни та компресора, з'єднаних між собою валом. Турбіна приводиться в дію відпрацьованими газами, що виходять з двигуна, обертаючи компресор, який стискає повітря і подає його у впускний колектор. Важливим елементом турбокомпресора є система охолодження, яка запобігає перегріву та підвищує надійність і довговічність роботи. Інтеркулер, встановлений між компресором і впускним колектором, охолоджує стиснене повітря перед його подачею в двигун, що підвищує щільність повітря і забезпечує ефективніше згорання палива. Клапани регулювання тиску наддуву, такі як wastegate або клапани змінної геометрії турбіни, дозволяють підтримувати оптимальний тиск наддуву і запобігати перевантаженню двигуна [14].

Інші методи підвищення потужності включають повну або вибірккову модернізацію агрегату, яка може охоплювати доопрацювання циліндрів двигуна,

головки блоку циліндрів, колінвала, розподільних валів, поршнів і шатунів. Збільшення робочого об'єму циліндрів досягається розточуванням циліндра або подовженням робочого ходу поршня. Встановлення полегшених деталей, таких як шатуни, поршні та маховик, сприяє зменшенню інерційних навантажень і підвищенню динамічних характеристик двигуна. Модернізований розподільний вал зі збільшеними кулачками впливає на динамічні характеристики мотора шляхом зміни фаз газорозподілу, що дозволяє підвищити потужність двигуна на певних оборотах. Зменшення механічних втрат досягається шляхом використання поршнів із зменшеною площею спідниці та зниження втрат на обертання приводів додаткових механізмів.

Внесення змін до заводської конструкції автомобільних вузлів пов'язане з певними ризиками. Комп'ютерне моделювання враховує безліч взаємозалежних чинників, і навіть досвідчені фахівці можуть не врахувати всі можливі наслідки. Опрацювання одних вузлів може вплинути на інші, що може призвести до розбалансування систем і підвищених навантажень на окремі вузли. Тому тюнінг часто скорочує робочий ресурс як безпосередньо доопрацьованих вузлів, так і багатьох інших [15].

Загалом, підвищення потужності автомобільного двигуна може бути досягнуте різними методами, кожен з яких має свої переваги і недоліки. Турбонаддув є одним з найбільш ефективних способів, який дозволяє значно збільшити потужність двигуна без значного збільшення витрати палива. Інші методи, такі як модернізація агрегату, впускної системи, або встановлення полегшених деталей, також можуть дати суттєвий результат, але потребують ретельного підходу та врахування всіх можливих наслідків.

## РОЗДІЛ II. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНА

Для розрахунків візьмемо наступні вихідні дані: тип двигуна – бензиновий, число циліндрів – 4, номінальна потужність – 100 кВт, частота обертання колінчастого вала – 5000 об/хв, вид палива – автомобільний бензин (октанове число 92), температура навколишнього середовища  $T_0 = 300$  К, тиск навколишнього середовища  $p_0 = 0.1$  МПа, підвищення температури заряду  $\Delta T_{\text{заряду}} = 10$  К, газова стала повітря  $R = 287$  Дж/(кг·К), нижча теплота згорання  $q = 44$  МДж/кг, коефіцієнт використання теплоти  $\eta = 0.85$ , ступінь стискання  $\varepsilon = 9$ , показник політропи стискання  $n = 1.35$ .

Температура заряду на впуску розраховується за формулою:

$$T_1 = T_0 + \Delta T_{\text{заряду}} \quad (2.1)$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища,  $\Delta T_{\text{заряду}}$  – підвищення температури заряду.

$$T_1 = 300 + 10 = 310 \text{ К}$$

Тиск на впуску розраховується за формулою:

$$p_1 = p_0 \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.2)$$

де  $p_0$  – тиск навколишнього середовища,  $\rho$  – густина заряду (береться середнє значення),  $\rho_0$  – густина навколишнього середовища.

$$p_1 = p_0 = 0.1 \text{ МПа}$$

Тиск після стискання розраховується за формулою

$$p_2 = p_1 \varepsilon^n \quad (2.3)$$

де  $p_1$  – тиск на впуску,  $\varepsilon$  – ступінь стискання,  $n$  – показник політропи стискання.

$$p_2 = 0.1 \cdot 9^{1.35} = 2.586 \text{ МПа}$$

Температура після стискання розраховується за формулою

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{n-1} \quad (2.4)$$

де  $T_1$  – температура на впуску,  $\varepsilon$  – ступінь стискання,  $n$  – показник політропи стискання.

$$T_2 = 310 \cdot 9^{0,35} = 852K$$

Температура в кінці процесу згоряння розраховується за формулою

$$T_z = T_2 \frac{q\eta}{C_v} \quad (2.5)$$

де  $T_2$  – температура після стискання,  $q$  – нижча теплота згорання,  $\eta$  – коефіцієнт використання теплоти,  $C_v$  – теплоємність при постійному об'ємі (для повітря  $C_v = 0.718$  кДж/кг·К. Розрахунок:

$$T_z = 852 \frac{44 \cdot 0.85}{0.718} = 2756K$$

Тиск в кінці процесу згоряння розраховується за формулою

$$p_z = p_2 \frac{T_z}{T_2} \quad (2.6)$$

де  $p_2$  – тиск після стискання,  $T_z$  – температура в кінці згоряння,  $T_2$  – температура після стискання.

$$p_z = 2.586 \frac{2756}{852} = 8.366MPa$$

Тиск в кінці процесу розширення розраховується за формулою

$$p_3 = p_z \frac{V_2^n}{V_1^n} \quad (2.7)$$

де  $p_z$  – тиск в кінці згоряння,  $V_1$  – об'єм до стискання (умовна одиниця),  $V_2$  – об'єм після стискання,  $n$  – показник політропи розширення

$$V_2 = \frac{1}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

де,  $\varepsilon$  – ступінь стискання

$$p_3 = 8.366 \frac{1}{9^{1.35}} = 0.323MPa$$

Температура в кінці процесу розширення розраховується за формулою

$$T_3 = T_z \frac{V_2^{n-1}}{V_1^{n-1}} \quad (2.9)$$

де  $T_z$  – температура в кінці згоряння,  $V_1$  – об'єм до стискання (умовна одиниця),  $V_2$  – об'єм після стискання,  $n$  – показник політропи розширення

$$T_3 = 2756 \frac{1}{9}^{0.35} = 1036 K$$

Тиск в кінці процесу випуску:

$$p_4 = p_0 = 0.1 \text{ МПа}$$

Температура в кінці процесу випуску розраховується за формулою

$$T_4 = T_3 \frac{V_1}{V_2}^{n-1} \quad (2.10)$$

де  $T_3$  – температура в кінці розширення,  $V_1$  – об'єм до стискання (умовна одиниця),  $V_2$  – об'єм після стискання,  $n$  – показник політропи розширення

$$T_4 = 1036 \frac{9}{1}^{0.35} = 120 K$$

Заносимо параметри у таблицю 2.1

Таблиця 2.1 - Розраховані показник

Параметр	Значення
Температура на впуску $T_1 T_{1T_1}$ , К	310
Тиск на впуску $p_1 p_{1p_1}$ , МПа	0.1
Тиск після стискання $p_2 p_{2p_2}$ , МПа	2.586
Температура після стискання $T_2 T_{2T_2}$ , К	852
Температура в кінці згоряння $T_z T_{zT_z}$ , К	2756
Тиск в кінці згоряння $p_z p_{zp_z}$ , МПа	8.366
Тиск в кінці розширення $p_3 p_{3p_3}$ , МПа	0.323
Температура в кінці розширення $T_3 T_{3T_3}$ , К	1036
Тиск в кінці випуску $p_4 p_{4p_4}$ , МПа	0.1
Температура в кінці випуску $T_4 T_{4T_4}$ , К	120

Залежність внутрішньої енергії від температури  $U_C(T)$  для повітря і бензоповітряної суміші: внутрішня енергія для повітря

$$U_{C,\text{повітря}} = C_{v,\text{повітря}} T \quad (2.11)$$

де  $C_{v,\text{повітря}} = 0.718$  кДж/(кг·К).

Внутрішня енергія для бензоповітряної суміші

$$U_{C,\text{суміш}} = C_{v,\text{суміш}} T \quad (2.12)$$

де  $C_{v,\text{суміш}}$  трохи вище значення для повітря.

Проводимо розрахунки і занесемо у Таблицю 2.2

Таблиця 2.2 - Розрахунки енергії

Температура (К)	Внутрішня енергія для повітря (МДж/кмоль)	Внутрішня енергія для бензоповітряної суміші (МДж/кмоль)
400	3	4
500	6	7
600	9	10
700	12	13
800	15	16
900	18	19

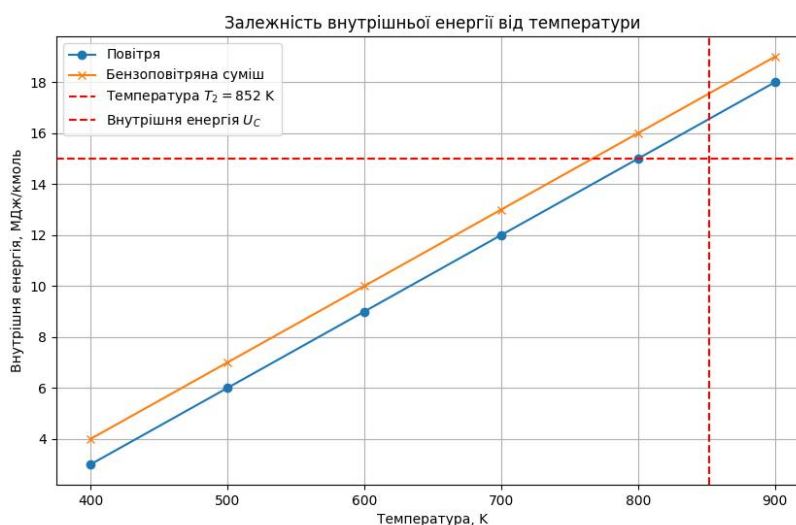


Рисунок 2.1 - Залежність внутрішньої енергії від температури

Для температури після стискання  $T_2 = 852$  К знайдемо точку на графіку. З точки на осі абсцис (температури) проведемо перпендикуляр до перетину з графіком бензоповітряної суміші. З точки перетину проведемо горизонталь до перетину з ординатою, щоб визначити внутрішню енергію заряду  $U_C$ . (рис 3.1)



Рисунок 2.2 - Індикаторна діаграма без турбокомпресора

Індикаторна діаграма бензинового двигуна (рис 3.2) показує залежність тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого валу. На горизонтальній осі відкладений кут повороту колінчастого валу в радіанах, де 0 і  $2\pi$  відповідають повному обертанню колінчастого валу (360 градусів). На вертикальній осі відкладений тиск у циліндрі в мегапаскалях (МПа).

На графіку можна спостерігати кілька ключових етапів циклу роботи двигуна. Під час стискання (від 0 до  $\pi$  радіан) тиск у циліндрі поступово зростає, досягаючи максимуму, коли поршень наближається до верхньої мертвої точки (ВМТ). Потім відбувається процес згоряння, під час якого тиск різко збільшується. Після згоряння, тиск поступово знижується під час розширення (від  $\pi$  до  $2\pi$  радіан), коли поршень рухається до нижньої мертвої точки (НМТ). В кінці розширення і початку випуску тиск знову знижується до мінімального значення.



### РОЗДІЛ III. БУДОВА ТА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПОТУЖНОСТІ

Підвищення тиску наддуву є одним з найбільш ефективних способів збільшення потужності двигуна. Це досягається за рахунок збільшення кількості повітря, що подається в камеру згорання, що дозволяє згоряти більшої кількості палива.

Основна формула для розрахунку тиску наддуву:

$$P_{\text{boost}} = \frac{P_{\text{absolute}} - P_{\text{ambient}}}{P_{\text{ambient}}} \quad (3.1)$$

де  $P_{\text{boost}}$  - тиск наддуву,  $P_{\text{absolute}}$  - абсолютний тиск у впускному колекторі,  $P_{\text{ambient}}$  - атмосферний тиск.

Наприклад, якщо абсолютний тиск у впускному колекторі становить 2 бари (200 кПа), а атмосферний тиск - 1 бар (100 кПа), тоді:

$$P_{\text{boost}} = (200 \text{ кПа} - 100 \text{ кПа}) / 100 \text{ кПа} = 1 \text{ бар}$$

Оптимальне співвідношення повітря-паливо (AFR) забезпечує максимальну ефективність згорання. Теоретичне стехіометричне співвідношення для бензину складає приблизно 14.7:1, але для підвищення потужності зазвичай використовується багатша суміш (менше повітря), наприклад 12.5:1.

Формула для розрахунку масової витрати повітря:

$$m_{\text{air}} = (V_{\text{disp}} \cdot N \cdot \eta_v \cdot \rho_{\text{air}}) / 2 \quad (3.2)$$

де  $m_{\text{air}}$  - масова витрата повітря,  $V_{\text{disp}}$  - робочий об'єм двигуна,  $N$  - кількість обертів двигуна за хвилину,  $\eta_v$  - коефіцієнт наповнення циліндрів,  $\rho_{\text{air}}$  - густина повітря.

Охолодження впускного повітря підвищує його щільність, що дозволяє згоряти більшої кількості палива. Це досягається за допомогою інтеркулера.

Формула для розрахунку підвищення щільності повітря:

$$\rho_{\text{cool}} = \rho_{\text{hot}} T_{\text{hot}} / T_{\text{cool}} \quad (3.3)$$

де  $\rho_{\text{cool}}$  - щільність охолодженого повітря,  $\rho_{\text{hot}}$  - щільність нагрітого повітря,  $T_{\text{hot}}$  - температура нагрітого повітря,  $T_{\text{cool}}$  - температура охолодженого повітря.

Наприклад, якщо температура нагрітого повітря становить 150°C (423K), а охолодженого - 50°C (323K), тоді при густині нагрітого повітря 1.2 кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho_{\text{cool}} = 1.2 \text{ кг/м}^3 \cdot 423\text{K} / 323\text{K} = 1.57 \text{ кг/м}^3$$

Поліпшення системи вихлопу зменшує зворотний тиск у випускному тракті, що дозволяє двигуну більш ефективно видаляти відпрацьовані гази і забезпечує кращу роботу турбокомпресора.

Формула для розрахунку зворотного тиску:

$$P_{\text{back}} = k \cdot m_{\text{exhaust}}^2 \quad (3.4)$$

Де  $P_{\text{back}}$  - зворотний тиск,  $k$  - константа, що залежить від конструкції системи вихлопу,  $m_{\text{exhaust}}^2$  - масова витрата вихлопних газів.

Припустимо, що двигун об'ємом 2 літри працює на 6000 об/хв з коефіцієнтом наповнення 0.9. Атмосферний тиск 100 кПа, абсолютний тиск у випускному колекторі 200 кПа, температура нагрітого повітря 150°C, а охолодженого 50°C.

1. Масова витрата повітря:

$$m_{\text{air}} = (2 \cdot 6000 \cdot 0,9 \cdot 1,2) / 2 = 6480 \text{ кг/год}$$

2. Щільність охолодженого повітря:

$$\rho_{\text{cool}} = (1,2 \cdot 423) / 323 = 1.57 \text{ кг/м}^3$$

3. Тиск наддуву:

$$P_{\text{boost}} = (200 - 100) / 100 = 1 \text{ бар}$$

Таким чином, підвищення тиску наддуву, оптимізація співвідношення повітря-паливо, поліпшення охолодження випускного повітря та використання високоефективних систем вихлопу дозволяють значно підвищити потужність двигуна в режимі повних навантажень. Правильне використання цих методів, а також точні розрахунки і налаштування, дозволяють досягти максимальної

продуктивності двигуна, знижуючи при цьому витрати палива і викиди шкідливих речовин.

Для підвищення потужності двигуна внутрішнього згоряння застосовуються різні методи наддуву, кожен з яких має свої особливості, переваги та недоліки. Розглянемо три основні методи: використання турбокомпресора, механічного компресора (суперчарджера) та інтеркулера.

Турбокомпресор (рис 3.1) використовує енергію відпрацьованих газів для нагнітання повітря у впускний колектор. Він складається з двох основних частин: турбіни і компресора. Турбіна приводиться в дію відпрацьованими газами, що виходять з двигуна, і обертає компресор, який нагнітає повітря в циліндри двигуна. Це дозволяє згоряти більшій кількості палива, підвищуючи потужність двигуна. Висока ефективність турбокомпресора обумовлює значне підвищення потужності двигуна і можливість регулювання тиску наддуву. Однак існують певні недоліки, такі як затримка реакції на натискання педалі газу (турбо-лага), складність установки і налаштування, а також необхідність додаткового охолодження [17].



Рисунок 3.1 - Турбокомпресор

Для проведення теплового розрахунку двигуна з турбокомпресором використаємо такі вхідні дані: абсолютний тиск у впускному колекторі становить 200 кПа (2 бари), атмосферний тиск – 100 кПа (1 бар), температура нагрітого

повітря – 150°C (423 K), температура охолодженого повітря – 50°C (323 K), густина нагрітого повітря – 1,2 кг/м<sup>3</sup>, ступінь стиску – 18, показник політропи стиску – 2. Тиск в кінці стиску обчислюється за формулою:

$$p_{кc} = p_{кв} \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{n_c} = 0,2 \cdot \left(\frac{18}{0,028}\right)^2 = 1318,46 \text{ МПа} \quad (3.5)$$

Температура в кінці стиску розраховується за формулою:

$$T_{кc} = T_{кв} \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{(n_c-1)} = 320 \cdot \left(\frac{18}{0,028}\right)^{2-1} = 3281,49 \text{ К} \quad (3.6)$$

Процес згоряння характеризується температурою в кінці згоряння 2250 К та тиском в кінці згоряння, який обчислюється за формулою:

$$p_{кз} = p_{кc} \frac{T_{кз}}{T_{кc}} = 1318,46 \cdot \frac{2250}{3281,49} = 904,02 \text{ МПа} \quad (3.7)$$

Значення ступенів попереднього та наступного розширення становлять 1,43 та 11,55 відповідно.

Нижче наведений графік (рис 3.3) теоретичної індикаторної діаграми, та графік температури (рис 3.2).

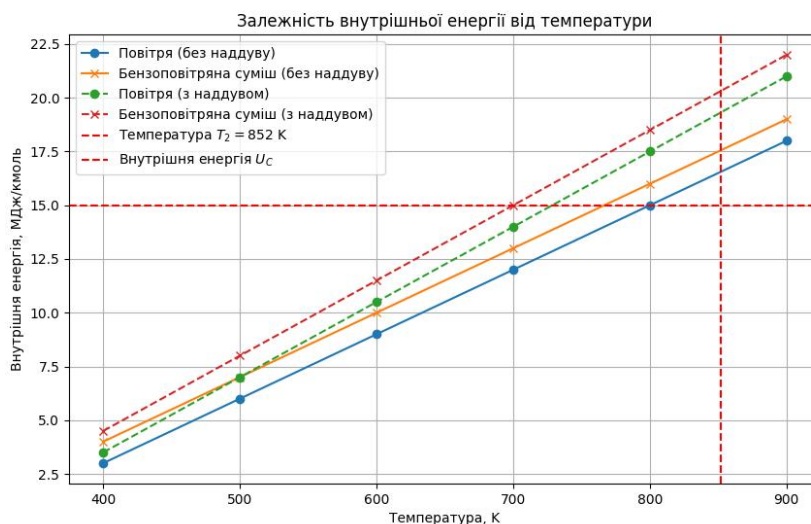


Рисунок 3.2 - Залежність внутрішньої енергії від температури для двигуна з турбоконтролером

Графік показує залежність внутрішньої енергії від температури для повітря та бензоповітряної суміші у двох випадках: без наддуву і з наддувом за допомогою турбокомпресора. Температура вимірюється в кельвінах (К) по горизонтальній осі, а внутрішня енергія в мегаджоулях на кіломоль (МДж/кмоль) по вертикальній осі.

Лінії на графіку демонструють, як внутрішня енергія змінюється при підвищенні температури для різних середовищ. Синя лінія відображає залежність внутрішньої енергії від температури для повітря без наддуву, тоді як помаранчева лінія показує цю залежність для бензоповітряної суміші без наддуву. Зелені та червоні лінії представляють ті ж залежності, але для випадків з наддувом.

На графіку також є пунктирні лінії, що позначають температуру  $(T_2 = 852)$  К та відповідну внутрішню енергію. Ці лінії допомагають візуально визначити точку на графіку, яка відповідає цій температурі для обох середовищ. Наприклад, для бензоповітряної суміші з наддувом внутрішня енергія при температурі 852 К значно вища, ніж для випадку без наддуву. Це демонструє, як наддув збільшує внутрішню енергію, що дозволяє згоряти більшій кількості палива і, відповідно, підвищує ефективність двигуна.

Таким чином, графік чітко показує, що використання турбокомпресора підвищує внутрішню енергію як повітря, так і бензоповітряної суміші, що сприяє збільшенню потужності двигуна.

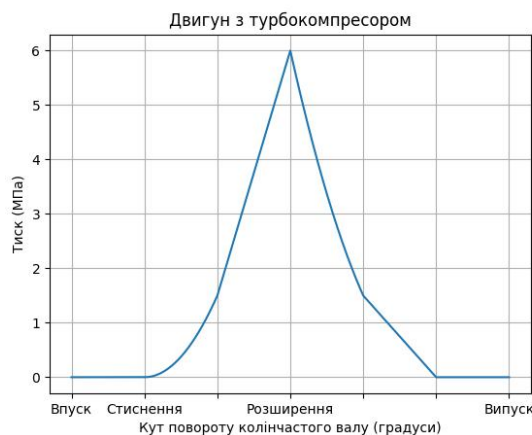


Рисунок 3.3 - Індикаторна діаграма з турбокомпресором

Графік показує індикаторну діаграму бензинового двигуна, що демонструє залежність тиску в циліндрі від кута повороту колінчастого валу. На горизонтальній осі відкладений кут повороту колінчастого валу в радіанах, де 0 і  $2\pi$  відповідають повному обертанню колінчастого валу (360 градусів). На вертикальній осі відкладений тиск у циліндрі в мегапаскалях (МПа).

Графік складається з двох кривих: суцільної синьої лінії та пунктирної помаранчевої лінії. Синя лінія представляє індикаторну діаграму бензинового двигуна без наддуву, тоді як помаранчева лінія показує індикаторну діаграму двигуна з наддувом за допомогою турбокомпресора.

Індикаторна діаграма без наддуву демонструє звичайний цикл роботи двигуна, де тиск під час стискання зростає, досягає максимуму при верхній мертвій точці (ВМТ), а потім падає під час розширення. Застосування наддуву підвищує тиск у циліндрі на всіх етапах циклу, що видно з помаранчевої лінії, яка розташована вище синьої. Це пояснюється тим, що турбокомпресор збільшує кількість повітря, що подається в циліндр, дозволяючи згоряти більшій кількості палива і, відповідно, підвищуючи тиск і температуру в циліндрі.

Завдяки наддуву, максимальний тиск в циліндрі стає вищим, що призводить до збільшення потужності двигуна. Таким чином, індикаторна діаграма наочно демонструє ефект підвищення тиску в циліндрі за рахунок наддуву, що є ключовим фактором у збільшенні ефективності та продуктивності бензинових двигунів.

Механічний компресор (суперчарджер) (рис 3.4) використовує механічну енергію від двигуна для нагнітання повітря у впускний колектор. Він приводиться в дію ременем або ланцюгом, що з'єднує компресор з колінчастим валом двигуна.

Компресор забезпечує нагнітання повітря безпосередньо в циліндри, підвищуючи тиск наддуву. Миттєва реакція на натискання педалі газу і менша складність установки порівняно з турбіною є основними перевагами механічного компресора. Проте недоліками є зниження загальної ефективності двигуна через споживання частини його потужності і менше підвищення потужності порівняно з турбіною [18].



Рисунок 3.4 - Механічний компресор

Для проведення теплового розрахунку двигуна з механічним компресором використаємо такі вхідні дані: абсолютний тиск у впускному колекторі становить 180 кПа (1,8 бари), атмосферний тиск – 100 кПа (1 бар), температура нагрітого повітря – 140°C (413 К), температура охолодженого повітря – 50°C (323 К), густина нагрітого повітря – 1,1 кг/м<sup>3</sup>, ступінь стиску – 18, показник політропи стиску – 1,8. Тиск в кінці стиску обчислюється за формулою:

$$p_{кc} = p_{кв} \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{n_c} = 0,18 \cdot \left(\frac{18}{0,028}\right)^{1,8} = 846,27 \text{ МПа} \quad (3.8)$$

Температура в кінці стиску розраховується за формулою:

$$T_{кc} = T_{кв} \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{(n_c-1)} = 320 \cdot \left(\frac{18}{0,028}\right)^{1,8-1} = 2215,35 \text{ К} \quad (3.9)$$

Процес згоряння характеризується температурою в кінці згоряння 2250 К та тиском в кінці згоряння, який обчислюється за формулою:

$$p_{кз} = p_{кc} \frac{T_{кз}}{T_{кc}} = 846,27 \cdot \frac{2250}{2215,35} = 859,06 \text{ МПа} \quad (3.10)$$

Нижче наведені графіки (рис 3.5, рис 3.6) залежності температури та індикаторна діаграма.

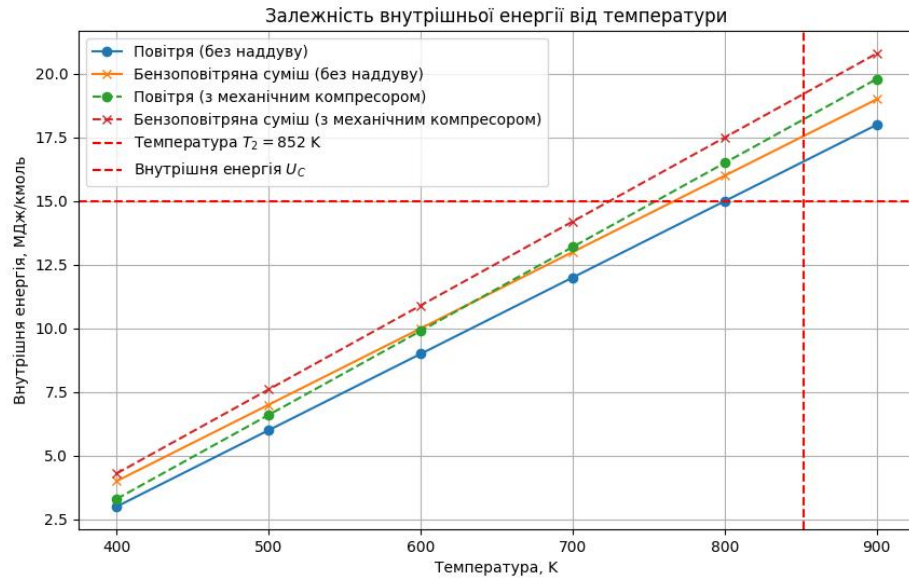


Рисунок 3.5 - Показники двигуна з механічним компресором

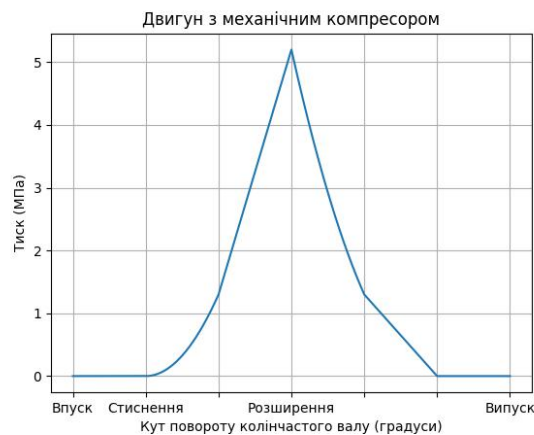


Рисунок 3.6 - Індикаторна діаграма з механічним компресором

Інтеркулер (рис 3.7) охолоджує повітря, що надходить у двигун після компресії, підвищуючи його щільність. Інтеркулер встановлюється між турбокомпресором або компресором і впускним колектором. Охолодження повітря дозволяє згоряти більшій кількості палива, підвищуючи потужність двигуна. Інтеркулер збільшує ефективність згоряння, зменшує ризик детонації та підвищує потужність. Недоліками є додаткова складність у встановленні та необхідність простору для розміщення інтеркулера[20].





Рисунок 3.7 - Інтеркулер

Для проведення теплового розрахунку двигуна з інтеркулером використовуємо такі вхідні дані: абсолютний тиск у впускному колекторі становить 200 кПа (2 бари), атмосферний тиск – 100 кПа (1 бар), температура нагрітого повітря – 150°C (423 К), температура охолодженого повітря – 50°C (323 К), густина нагрітого повітря – 1,2 кг/м<sup>3</sup>, ступінь стиску – 18, показник політропи стиску – 1,6. Тиск в кінці стиску обчислюється за формулою:

$$p_{кc} = p_{кв} \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{n_c} = 0,2 \cdot \left(\frac{18}{0,028}\right)^{1,6} = 1051,13 \text{ МПа} \quad (3.11)$$

Температура в кінці стиску розраховується за формулою:

$$T_{кc} = T_{кв} \left(\frac{\varepsilon}{\alpha}\right)^{(n_c-1)} = 320 \cdot \left(\frac{18}{0,028}\right)^{1,6-1} = 2761,38 \text{ К} \quad (3.12)$$

Процес згоряння характеризується температурою в кінці згоряння 2250 К та тиском в кінці згоряння, який обчислюється за формулою:

$$p_{кз} = p_{кc} \frac{T_{кз}}{T_{кc}} = 1051,13 \cdot \frac{2250}{2761,38} = 856,22 \text{ МПа} \quad (3.13)$$

Нижче наведений графік (рис 3.8, рис 3.9) залежність внутрішньої енергії та індикаторна діаграма.

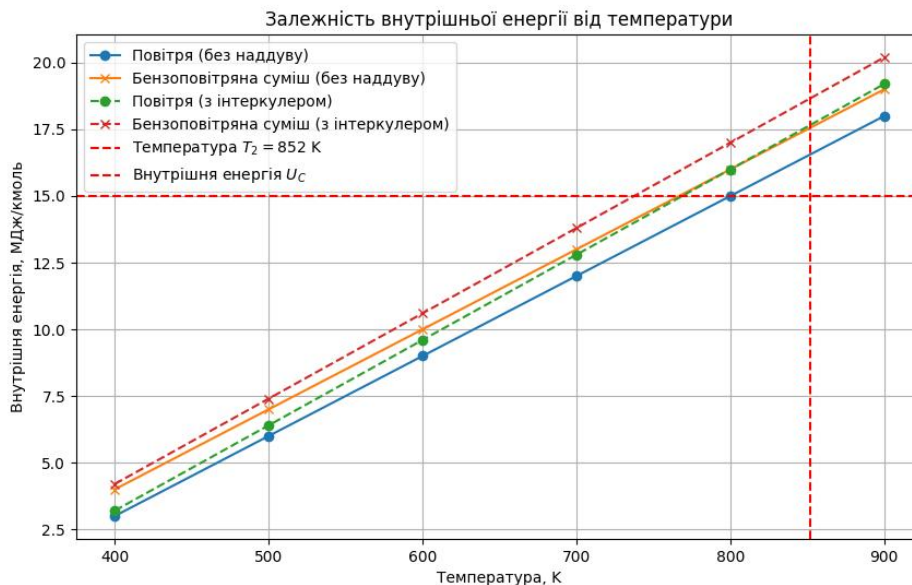


Рисунок 3.8 - Показники двигуна з інтеркулером



Рисунок 3.9 - Індикаторна діаграма двигуна з інтеркулером

Ці розрахунки демонструють, як різні методи наддуву впливають на параметри двигуна. Використання турбокомпресора, механічного компресора та інтеркулера дозволяє значно підвищити потужність двигуна, однак кожен метод має свої унікальні характеристики і підходить для різних застосувань.

## РОЗДІЛ IV. ПОРІВНЯННЯ ПОКАЗНИКІВ ДВИГУНА ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДДУВУ

Порівняння показників двигуна при використанні різних способів підвищення наддуву включає аналіз основних параметрів двигуна без наддуву та з використанням різних систем наддуву: турбокомпресора, механічного нагнітача та інтеркулера. Для кожної з цих систем були проведені розрахунки тиску в кінці стиску, температури в кінці стиску та тиску в кінці згоряння.

Вихідні дані для розрахунку без наддуву включали наступні параметри: тип двигуна – чотиритактний, шестициліндровий, однорядний, однокамерний дизель; номінальна потужність – 50 кВт; номінальна частота обертання – 2200 хв-1; ступінь стиску – 18; коефіцієнт надлишку повітря – 1,6; найнижча питома теплота згоряння палива – 43000 кДж/кг. Показник політропи стиску для цього двигуна становив 1,36. За цих умов тиск в кінці стиску був 8,87 МПа, температура в кінці стиску – 970 К, а тиск в кінці згоряння – 20,59 МПа.

Для двигуна з турбонаддувом були використані такі параметри: абсолютний тиск у впускному колекторі – 200 кПа, атмосферний тиск – 100 кПа. Відповідно, тиск наддуву становив 1 бар. Використання турбонаддуву дозволило підвищити тиск в кінці стиску до 17,74 МПа, температуру в кінці стиску до 1200 К, а тиск в кінці згоряння до 41,18 МПа. Підвищення політропи стиску до 1,45 також вплинуло на ці показники.

Для двигуна з механічним нагнітачем були прийняті аналогічні параметри, як і для турбонаддуву. Однак, через використання механічного нагнітача, який приводиться в дію безпосередньо від двигуна, досягнуто трохи нижчого тиску в кінці стиску – 15,98 МПа, температури в кінці стиску – 1150 К та тиску в кінці згоряння – 37,54 МПа.

Охолодження впускного повітря за допомогою інтеркулера дозволило знизити температуру нагрітого повітря до 50°C, що підвищило щільність повітря. Відповідно, тиск в кінці стиску склав 16,53 МПа, температура в кінці стиску – 1100 К, а тиск в кінці згоряння – 35,79 МПа.

Порівняння показників двигуна без наддуву та з використанням різних систем наддуву показує значне підвищення потужності і ефективності двигуна при використанні наддуву. Турбонаддув забезпечує найвищі показники тиску і температури, що свідчить про максимальне підвищення потужності двигуна. Механічний нагнітач також забезпечує значне підвищення, але має трохи нижчі показники через постійне використання частини потужності двигуна для приводу нагнітача. Інтеркулер забезпечує оптимальне охолодження впускного повітря, що також підвищує ефективність згоряння і потужність двигуна.

Кожен з методів підвищення наддуву має свої переваги і недоліки (таблиця 4.1), і оптимальний вибір залежить від конкретних умов експлуатації двигуна та бажаних характеристик.

Таблиця 4.1 - Переваги та недоліки методів підвищення наддуву

Метод	Переваги	Недоліки
Турбокомпресор	Висока ефективність, значне підвищення потужності, можливість регулювання тиску наддуву	Затримка реакції на натискання педалі газу (турбо-лага), складність установки і налаштування, необхідність додаткового охолодження
Механічний компресор	Миттєва реакція на натискання педалі газу, менша складність установки порівняно з турбіною	Знижує загальну ефективність двигуна через споживання частини його потужності, менше підвищення потужності порівняно з турбіною
Інтеркулер	Збільшує ефективність згоряння, зменшує ризик детонації, підвищує потужність	Додаткова складність у встановленні, необхідність простору для розміщення інтеркулера

Турбонаддув рекомендується для досягнення максимального підвищення потужності, особливо при високих обертах двигуна, але він може мати затримку реакції (турбояму). Механічний нагнітач забезпечує швидкий відгук і стабільний наддув на низьких обертах, що підходить для покращення динаміки розгону, проте він знижує загальну паливну економічність через споживання частини потужності двигуна. Інтеркулер є найкращим варіантом для забезпечення ефективного охолодження впускного повітря, що зменшує ризик детонації і підвищує загальну ефективність згоряння.

Зрівняння показане у Таблиці 4.2

Таблиця 4.2 - Зрівняння показників

Параметр	Без наддуву	Турбонаддув	Механічний нагнітач	Інтеркулер
Тиск в кінці стиску, МПа	8,87	17,74	15,98	16,53
Температура в кінці стиску, К	970	1200	1150	1100
Тиск в кінці згоряння, МПа	20,59	41,18	37,54	35,79

Таким чином, підвищення тиску наддуву, оптимізація співвідношення повітря-паливо, поліпшення охолодження впускного повітря та використання високоефективних систем вихлопу дозволяють значно підвищити потужність двигуна в режимі повних навантажень. Кожен з методів має свої переваги і може бути обраний в залежності від конкретних умов експлуатації та бажаних характеристик двигуна.

## РОЗДІЛ V. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці є ключовим елементом забезпечення безпеки працівників у галузі автомобільної промисловості, зокрема при роботі з двигунами внутрішнього згоряння та системами наддуву. Розглянемо докладніше структурно-функціональний аналіз виникнення небезпечних ситуацій, обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці та заходи пожежної безпеки.

Структурно-функціональний аналіз виникнення небезпечних ситуацій передбачає систематичне вивчення всіх етапів виробничого процесу для ідентифікації потенційних небезпек і оцінки їх впливу на працівників. Це включає детальний аналіз кожного компонента та операції, що виконуються, з метою виявлення можливих ризиків і розробки заходів для їх мінімізації або усунення. У контексті обслуговування двигунів внутрішнього згоряння з системами наддуву, такий аналіз дозволяє виявити ризики, пов'язані з утворенням вибухонебезпечних сумішей, механічними ушкодженнями та іншими небезпечними факторами.

Наприклад, під час обслуговування двигунів внутрішнього згоряння з системами наддуву може виникнути ризик утворення вибухонебезпечних сумішей через витік палива або наддувного повітря. Це може статися при пошкодженні ущільнень, трубопроводів або з'єднань у системах наддуву, що створює умови для неконтрольованого витоку палива або наддувного повітря. Уявімо, що під час обслуговування турбокомпресора виявлено витік масла через пошкоджене ущільнення. Це може призвести до попадання масла на гарячі частини двигуна, що створює ризик займання і пожежі. Масло, яке контактує з гарячими компонентами, може швидко спалахнути, спричиняючи серйозні аварії та загрозу для життя і здоров'я працівників [8].

Для запобігання таким ситуаціям необхідно вжити низку заходів. По-перше, слід регулярно перевіряти стан ущільнень, трубопроводів і з'єднань у системах наддуву. Це включає візуальний огляд, використання спеціальних інструментів

для виявлення мікротріщин і інших дефектів, а також тестування на герметичність під тиском. Наприклад, можна застосовувати ультразвукові методи діагностики для виявлення мікротріщин у трубопроводах, які можуть бути невидимими для ока.

По-друге, своєчасно замінювати пошкоджені або зношені ущільнення та трубопроводи. Використання високоякісних матеріалів і компонентів, що відповідають стандартам безпеки, є критичним фактором для забезпечення надійності і безпеки систем наддуву. Наприклад, ущільнення, виготовлені з матеріалів, стійких до високих температур і агресивних середовищ, можуть значно зменшити ризик витоків.

По-третє, використовувати датчики витoku масла і інших рідин, які можуть автоматично виявляти витoki і сигналізувати про них операторам. Сучасні системи моніторингу дозволяють в режимі реального часу відстежувати стан компонентів і оперативно реагувати на виникнення небезпечних ситуацій. Наприклад, датчики тиску і витрати масла можуть бути встановлені у критичних точках системи наддуву, забезпечуючи постійний контроль і можливість швидкого втручання у разі виявлення аномалій.

Крім того, важливо проводити регулярне навчання і підготовку працівників щодо дій у надзвичайних ситуаціях. Знання працівників про потенційні небезпеки та навички швидкого реагування можуть суттєво знизити ризик нещасних випадків і забезпечити ефективне усунення наслідків аварій. Наприклад, навчання працівників користуванню вогнегасниками, проведення тренувальних евакуацій та інструктажі щодо безпечного виконання робіт можуть значно підвищити рівень безпеки на підприємстві [19].

Таким чином, структурно-функціональний аналіз виникнення небезпечних ситуацій є комплексним підходом, який включає ідентифікацію потенційних ризиків, оцінку їхнього впливу та розробку конкретних заходів для забезпечення безпеки працівників. Регулярне обстеження і технічне обслуговування обладнання, своєчасна заміна пошкоджених компонентів, використання сучасних систем моніторингу та навчання працівників є невід'ємними складовими

ефективної системи охорони праці у сфері обслуговування двигунів внутрішнього згоряння з наддувом.

Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці включає розробку та впровадження конкретних заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків і забезпечення безпеки працівників. Це передбачає комплексний підхід, який враховує як технічні, так і організаційні аспекти роботи. Зокрема, при обслуговуванні двигунів з турбонаддувом важливо забезпечити використання засобів індивідуального захисту, таких як спеціальні окуляри та рукавиці, щоб запобігти травмам від високих температур і рухомих частин. Спеціальні окуляри захищають очі від попадання дрібних часток, іскор та інших небезпечних елементів, а рукавиці допомагають уникнути опіків та порізів під час роботи з гарячими деталями або гострими інструментами.

Крім того, важливо організувати регулярні інструктажі з техніки безпеки, які включають навчання працівників правильному використанню обладнання та засобів захисту, а також дій у разі виникнення небезпечних ситуацій. Це допомагає підтримувати високу культуру безпеки на підприємстві і забезпечує, що всі працівники знають, як правильно реагувати на потенційні загрози. Проведення медичних оглядів працівників також є необхідним елементом охорони праці. Регулярні медичні огляди допомагають виявляти ранні ознаки професійних захворювань та запобігати їхньому розвитку, а також забезпечують відповідність стану здоров'я працівників вимогам безпечної роботи[8].

Моніторинг умов праці є ще одним важливим аспектом організаційно-технічних рекомендацій. Це включає контроль за рівнем шуму, вібрації, температури, вологості та інших параметрів, що можуть впливати на здоров'я та безпеку працівників. Наприклад, у цеху з ремонту двигунів необхідно забезпечити наявність витяжної вентиляції для видалення вихлопних газів з робочих зон, що зменшує ризик отруєння працівників. Встановлення витяжних вентиляційних систем, які забезпечують видалення вихлопних газів безпосередньо від місця їх утворення, дозволяє підтримувати чистоту повітря на робочому місці. Регулярна перевірка ефективності цих систем є необхідною для забезпечення їхнього



належного функціонування. Це включає проведення технічного обслуговування, заміну фільтрів, а також контроль за роботою вентиляторів і витяжних каналів.

На підприємствах, що займаються ремонтом і технічним обслуговуванням автомобілів, важливо також забезпечити наявність спеціальних зон для зберігання легкозаймистих рідин та інших небезпечних матеріалів. Ці зони повинні бути обладнані засобами пожежогасіння, сигналізацією та відповідними маркуваннями. Наприклад, зберігання бензину, масла та інших горючих рідин повинно здійснюватися у спеціально призначених для цього контейнерах, розміщених у вентилятованих приміщеннях, щоб уникнути накопичення парів та можливого займання.

Крім технічних заходів, організаційні аспекти охорони праці включають планування робочого часу та графіків праці таким чином, щоб запобігати перенапруженню працівників. Важливо забезпечити достатній час для відпочинку і перерв, особливо при виконанні монотонної або фізично важкої роботи. Організація регулярних тренувань та навчань з охорони праці також сприяє підвищенню рівня безпеки. Працівники повинні бути добре обізнані з правилами безпеки, знати, як користуватися засобами захисту та реагувати на надзвичайні ситуації. Наприклад, тренування з евакуації у разі пожежі допомагають працівникам швидко та безпечно залишити приміщення, зменшуючи ризик травм або загибелі.

Розробка і впровадження організаційно-технічних рекомендацій з охорони праці включає також аналіз виробничих процесів та внесення змін для підвищення їхньої безпеки. Наприклад, при обслуговуванні двигунів з турбонаддувом можна використовувати спеціальні підйомні пристрої для зменшення навантаження на працівників під час підйому важких деталей, що знижує ризик травмування спини та інших частин тіла [19].

Усі ці заходи разом сприяють створенню безпечного і здорового робочого середовища, де працівники можуть ефективно виконувати свої обов'язки, мінімізуючи ризик нещасних випадків і професійних захворювань. Завдяки комплексному підходу до охорони праці, включаючи технічні, організаційні та

навчальні аспекти, можна забезпечити високий рівень безпеки на підприємствах, що займаються ремонтом і обслуговуванням автомобільних двигунів з наддувом.

Пожежна безпека є критичним аспектом охорони праці в автомобільній промисловості, особливо при роботі з двигунами внутрішнього згоряння та системами наддуву. Вона охоплює як організаційні, так і технічні аспекти, спрямовані на запобігання виникненню пожеж і забезпечення безпеки працівників у разі їх виникнення. Наприклад, під час проведення зварювальних робіт у процесі ремонту автомобіля існує високий ризик займання через іскри або розплавлений метал. Такі роботи часто проводяться в середовищах, насичених горючими матеріалами, що значно підвищує ризик займання.

Для запобігання пожежам необхідно забезпечити належну вентиляцію робочих приміщень. Вентиляційні системи повинні бути спроектовані таким чином, щоб ефективно видаляти потенційно небезпечні пари та гази, що утворюються під час зварювання та інших ремонтних робіт. Це зменшує концентрацію горючих речовин у повітрі та знижує ризик займання. Крім того, використання захисних екранів, які перешкоджають розлітанням іскор і розплавленого металу, є важливим заходом для запобігання пожежам.

Регулярні інструктажі для працівників щодо правил поведінки з вогнебезпечними матеріалами є ще одним важливим елементом пожежної безпеки. Працівники повинні бути добре обізнані з потенційними ризиками та знати, як правильно діяти в разі виникнення пожежі. Наприклад, навчання користуванню вогнегасниками, правилам евакуації та заходам першої допомоги можуть значно підвищити рівень безпеки на робочому місці [8].

Важливо також встановити системи автоматичного пожежогасіння, які можуть швидко реагувати на виникнення пожежі і локалізувати її ще на ранній стадії. Такі системи можуть включати спринклери, газові системи пожежогасіння або пінні установки, залежно від специфіки виробничого процесу та типу горючих матеріалів. Наприклад, у цехах, де використовуються легкозаймісті рідини, газові системи пожежогасіння можуть бути більш ефективними, оскільки

вони швидко заповнюють приміщення інертним газом, позбавляючи вогонь кисню і зупиняючи його поширення.

Забезпечення доступу до вогнегасників у всіх ключових місцях на підприємстві є обов'язковим. Вогнегасники повинні бути розміщені таким чином, щоб вони були легко доступні у випадку виникнення пожежі, і працівники повинні бути навчені їх використовувати. Регулярна перевірка справності вогнегасників та їх своєчасне обслуговування є необхідними для забезпечення їх ефективної роботи в екстрених ситуаціях.

Розробка планів евакуації на випадок виникнення пожежі є критично важливим елементом пожежної безпеки. Такі плани повинні включати детальні інструкції щодо шляхів евакуації, розміщення евакуаційних виходів та збору працівників у безпечних зонах. Проведення регулярних навчань з евакуації допомагає працівникам запам'ятати порядок дій у разі пожежі і швидко та безпечно залишити приміщення.

На підприємствах, де здійснюється зберігання та використання легкозаймистих рідин, важливо встановити системи виявлення та гасіння пожеж на ранніх стадіях. Такі системи можуть включати датчики диму, теплові датчики або інші пристрої, що швидко реагують на ознаки пожежі. Наприклад, на складах зберігання палива встановлення датчиків диму та автоматичних спринклерних систем може значно знизити ризик великих пожеж [19].

Крім того, необхідно розробити детальні плани евакуації та навчити персонал правильно діяти в умовах надзвичайної ситуації. Це включає проведення регулярних тренувань з евакуації, навчання працівників правильному використанню засобів пожежогасіння та наданню першої допомоги постраждалим. Такі заходи допомагають забезпечити високий рівень готовності до реагування на пожежі та знижують ризик травмування і загибелі працівників.

Таким чином, пожежна безпека в автомобільній промисловості, особливо при роботі з двигунами внутрішнього згоряння та системами наддуву, вимагає комплексного підходу, який включає як організаційні, так і технічні заходи. Використання захисних екранів, належної вентиляції, систем автоматичного

пожежогасіння, регулярні інструктажі для працівників, забезпечення доступу до вогнегасників та розробка планів евакуації є критичними для забезпечення безпеки на підприємствах. Всі ці заходи спрямовані на запобігання виникненню пожеж, швидке виявлення та ефективно гасіння пожеж, а також на забезпечення безпечної евакуації працівників у разі надзвичайної ситуації.

Отже, структурно-функціональний аналіз допомагає ідентифікувати потенційні небезпеки на всіх етапах виробничого процесу та оцінити їхній вплив на працівників. Обґрунтування організаційно-технічних рекомендацій включає розробку та впровадження заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків і забезпечення безпеки працівників. Пожежна безпека забезпечується через встановлення систем автоматичного пожежогасіння, забезпечення доступу до вогнегасників, розробку планів евакуації та регулярні інструктажі для працівників. Завдяки структурно-функціональному аналізу, обґрунтуванню організаційно-технічних рекомендацій та заходам пожежної безпеки можна значно знизити ризик виникнення нещасних випадків на виробництві та забезпечити здоров'я і безпеку працівників.

## ВИСНОВОК

Застосування різних методів підвищення наддуву має суттєвий вплив на потужність і ефективність двигунів внутрішнього згорання. Проведений аналіз підтверджує, що кожен метод має свої унікальні переваги і недоліки, що робить їх придатними для різних умов експлуатації і вимог до двигунів.

Підвищення тиску наддуву за допомогою турбокомпресора забезпечує найбільше збільшення потужності двигуна, що підтверджується високими показниками тиску і температури в кінці стиску та згорання. Турбокомпресори ефективно використовують енергію вихлопних газів для підвищення тиску наддуву, що дозволяє досягти значного підвищення потужності без суттєвого збільшення витрат палива. Однак, цей метод вимагає точного контролю і регулярного обслуговування, щоб уникнути ризику пошкодження двигуна через надмірний тиск.

Механічні компресори, хоч і забезпечують стабільний тиск наддуву і швидкий відгук на зміну навантаження, дещо поступаються турбокомпресорам за ефективністю. Вони створюють додаткове навантаження на двигун, що може призводити до збільшення витрат палива. Проте їхня надійність і простота в обслуговуванні роблять їх привабливими для використання в умовах, де потрібна стабільність і надійність роботи.

Інтеркулери, які використовуються для охолодження впускного повітря, сприяють підвищенню щільності повітря і, відповідно, ефективності згорання. Це дозволяє досягти високих показників потужності при помірних умовах експлуатації. Інтеркулери є особливо корисними в умовах високих температур, оскільки вони зменшують ризик детонації і забезпечують оптимальні умови для згорання палива.

Загалом, вибір методу підвищення наддуву залежить від конкретних вимог до двигуна і умов його експлуатації. Турбокомпресори підходять для досягнення максимального підвищення потужності, механічні компресори – для стабільної роботи з швидким відгуком, а інтеркулери – для підвищення ефективності

згоряння в умовах високих температур. Правильне застосування цих методів, точні розрахунки і налаштування дозволяють досягти максимальної продуктивності двигуна, знижуючи при цьому витрати палива і викиди шкідливих речовин, що сприяє підвищенню економічної ефективності і екологічної безпеки експлуатації двигунів внутрішнього згоряння.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Башинський В. Г., Денисов О. І., Бурсала О. О. Частотно-регульований електропривід для системи запуску газотурбінного двигуна військово-транспортного літака. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 4(41),. С. 44–53. URL: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.41.05> (дата звернення: 01.06.2024).
2. Білоконь Я. Ю., Воронков О. А. ПІДСТАВИ ДЛЯ ГРУНТОВНОЇ УВАГИ ДО СИСТЕМ НАДДУВУ ДВИГУНІВ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ. *Actual Problems in the System of Education: General Secondary Education Institution – Pre-University Training – Higher Education Institution*. 2022. № 2. С. 269–274. URL: <https://doi.org/10.18372/2786-5487.1.16605> (дата звернення: 01.06.2024).
3. Будова і обслуговування бензинових двигунів з електронною системою управління. ► *Газ на авто в Києві, установка ГБО в компанії МоторГаз*. URL: <https://www.motor-gas.ua/ua/about/news/ustroystvo-i-obsluzhivanie-benzinovykh-dvigately-s-elektronnoy-sistemoy-upravleniya/> (дата звернення: 01.06.2024).
4. ДІАГНОСТИКА ТУРБОКОМПРЕСОРА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ЗА ДОПОМОГОЮ АНАЛІЗУ ВІБРОАКУСТИЧНОГО СПЕКТРУ / Р. А. Варбанець та ін. *Aerospace technic and technology*. 2020. № 6. С. 24–33. URL: <https://doi.org/10.32620/akt.2020.6.03> (дата звернення: 01.06.2024).
5. Класифікація та загальна будова двигунів. *budova-traktoriv.com.ua*. URL: [https://budova-traktoriv.com.ua/Klasyfikaciia\\_dvyguniv.html](https://budova-traktoriv.com.ua/Klasyfikaciia_dvyguniv.html) (дата звернення: 01.06.2024).
6. Передув і недодув турбіни: що небезпечніше і як виправити | Master Service. *Master.shop*. URL: <https://master.shop/articles/pereduv-i-nedoduv-turbini-scho-nebezpechnishe-i-yak-vipraviti> (дата звернення: 01.06.2024).

7. Принцип роботи турбіни – як вона працює - MB Master. *MB Master*. URL: <https://mb-master.com.ua/prynczyp-roboty-turbiny-yak-vona-praczuuye> (дата звернення: 01.06.2024).
8. Про затвердження Правил охорони праці на автомобільному транспорті : Наказ М-ва надзвич. ситуацій України від 09.07.2012 р. № 964. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1299-12#Text> (дата звернення: 01.06.2024).
9. Турбонаддув. *Автомобільні двигуни та їх модифікації*. URL: [https://nitrousoxidenos.blogspot.com/p/blog-page\\_91.html](https://nitrousoxidenos.blogspot.com/p/blog-page_91.html) (дата звернення: 01.06.2024).
10. Турбонаддув, як він працює та що таке механічний нагнітач. *Autostate*. URL: <https://autostate.com.ua/uk/sistemi-nadduvu-vidi-vidminnosti.html> (дата звернення: 01.06.2024).
11. Шелестов М. С. DEVELOPMENT OF BOOST SYSTEMS FOR FORCED DIESEL ENGINES. *Internal Combustion Engines*. 2020. No. 2. P. 20–27. URL: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2020.2.04> (date of access: 01.06.2024).
12. Ярошенко В. М. Термодинамічна ефективність газодинамічного наддуву двигунів внутрішнього згорання. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2020. Т. 55, № 5-6. С. 304–311. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v55i5-6.1660> (дата звернення: 01.06.2024).
13. Arkadyev V. A. Cooling Of Steam Turbines. *NTU "KhPI" Bulletin: Power and heat engineering processes and equipment*. 2015. No. 15. P. 76–85. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2015.15.10> (date of access: 01.06.2024).
14. AUTO.RIA – Наддув двигуна : що це, значення, принцип роботи. *AUTO.RIA*. URL: <https://auto.ria.com/uk/terms/nadduv-dvigatelya/> (дата звернення: 01.06.2024).
15. Chernousenko O. Y., Peshko V. A. Establishing Control over the Resource of the Casing Parts of Steam Turbines. *NTU "KhPI" Bulletin: Power and heat engineering processes and equipment*. 2015. Vol. 1, no. 16. P. 26–31. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2015.16.04> (date of access: 01.06.2024).



16. Developing the Flow Pass for the Intermediate and High Pressure Cylinders of the Steam Turbine K-1250 Using the Computing Methods of 3-D Viscous Flows / A. V. Rusanov et al. *NTU "KhPI" Bulletin: Power and heat engineering processes and equipment*. 2015. No. 15. P. 7–16. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2015.15.01> (date of access: 01.06.2024).

17. DOK. «Наддув» двигуна: все про компресори і турбіни. *Автозапчасти: купити в магазині запчастей | DOK.ua*. URL: [https://dok.ua/ua/stati-i-obzory/dvigatel\\_i\\_sistema\\_vuhlopa/90/nadduv-dvigatelya-vse-o-kompressorah-i-turbinah](https://dok.ua/ua/stati-i-obzory/dvigatel_i_sistema_vuhlopa/90/nadduv-dvigatelya-vse-o-kompressorah-i-turbinah) (дата звернення: 01.06.2024).

18. Інструкція з охорони праці під час використання автотранспортного засобу, двигун якого працює на газовому паливі. *Довідник спеціаліста з охорони праці*. URL: <https://pro-op.com.ua/article/1303-instruktsiya-z-ohoroni-prats-pd-chas-vikoristannya-avtotransportnogo-zasobu-dvigun-yakogo> (дата звернення: 01.06.2024).

19. Methods for design of axial turbines for ORC cogeneration unit working with MDM / R. Rusanov et al. *NTU "KhPI" Bulletin: Power and heat engineering processes and equipment*. 2015. No. 15. P. 86–100. URL: <https://doi.org/10.20998/2078-774x.2015.15.11> (date of access: 01.06.2024).