

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРНОЇ МЕХАНІКИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## Пояснювальна записка до дипломної роботи

магістра  
Спеціальності «Інженерія»

Галузь знань: 13 Механічна інженерія  
(Шифр - числа і літери - разом)

Напрямок підготовки (спеціальність): 132 «Матеріалознавство,  
Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

(Шифр - числа, літери та підкреслення (спеціальність))

на тему: **«Оцінка ефективності використання стиснутого газу в якості палива для двигунів внутрішнього згорання»**

Шифр: MPTAM 22. 21209.000 ПЗ

Виконав: студент 2-го курсу,  
група МТВАм-21-1

  
Підпис

Я. В. Козак  
Ініціал, прізвище

Керівник: к.т.н., доц. каф. ТАМ

  
Підпис

С. Ф. Посонський  
Ініціал, прізвище

До запису допускати:  
Зав. кафедри ТАМ к.т.н., проф.

  
Підпис

15 12 2022 р.

Факультет інженерної механіки

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітній рівень магістр

Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

Спеціалізація «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ



Дішка О.В.

19 жовтня 2022 року

## ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Козаку Ярославу Віталійовичу

Провидав. мех. по Бєльков

1. Тема роботи: **Оцінка ефективності використання стиснутого газу в якості палива для двигунів внутрішнього згоряння**

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

Провидав. мех. по Бєльков, науковий ступінь, місце роботи

Затверджено наказом університету від 1.07.2022 р. № 83 (Д. 28)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 7.12.2022 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Матеріали переддипломної практики.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Огляд двигунів та автомобілів на стиснутому природному газі

2 Структура методики досліджень

3 Експериментальне дослідження

5. Перелік графічного матеріалу (презентацій):

*Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань, відповідно до мети роботи.*

Консультативні розділи проекту (роботи)



| Розділ | Примітки, питання та повна консультація | Підпис, дата   |                  |
|--------|---|----------------|------------------|
|        |   | завдання видав | завдання прийняв |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |
|        |   |                |                  |

Дата видачі завдання 19 жовтня 2022 р.

ЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів дипломного проекту (роботи)   | Срдж виконання етапів проекту (роботи) | Примітка |
|---|--|--|----------|
| 1 | Огляд двигунів та автомобілів на стиснутому природному газі.   | 30.10.22                               | вик      |
| 2 | Структура методики досліджень.   | 15.11.22                               | вик      |
| 3 | Експериментальне дослідження.  | 23.11.22                               | вик      |
| 4 | Дослідження на основі одноциліндрового двигуна з іскровим запалюванням.<br>Дослідження потужності двигуна на основі 1,7 літрового турбованого двигуна. | 4.12.22                                | вик      |
| 5 | Оформлення пояснювальної записки   | 6.12.22                                | вик      |
| 6 | Допуск до захисту  | 7.12.22                                | вик      |
| 7 | Захист магістерської роботи  | 16.12.22                               |          |

Студент

Підпис

Козак Я.В.  
Викладач, керівник

Керівник роботи

Посоцький С. Ф.  
Викладач, керівник

## РЕФЕРАТ

*Структура та обсяг пояснювальної записки.* Дипломна робота на тему «Оцінка ефективності використання стиснутого газу в якості палива для двигунів внутрішнього згоряння» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 17 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 2 додатків розміщених на 14 сторінках. Роботу викладено на 90 сторінках, з них 81 сторінок основного тексту, на яких розміщено 23 рисунки і 7 таблиць.

Транспортний сектор з більш ніж одним мільярдом експлуатованих легкових автомобілів є основним споживачем нафти у всьому світі, збільшившись з 45,5% у 1973 році до 59% у 2021 році в основному у вигляді бензину та дизельного палива. Добре відомо, що запаси нафти виснажуються з загрозливою швидкістю. Крім того, спалювання цих традиційних видів палива транспортним сектором у значній ступеня сприяє забрудненню атмосфери, що загрожує планеті.

CNG вважається одним із найкращих рішень для заміщення викопного палива через властиву йому чистоту природи горіння. Сьогодні його визнано в усьому світі екологічно чистим паливом.

Видобуток природного газу в Україні становив у 2021 році 20 млрд кубометрів, споживання — 28 млрд.

Внутрішнє виробництво традиційних автомобільних палив (бензинів, дизельного палива, пропан-бутану) в Україні практично відсутнє, — на імпорт припадає близько 80%.

В Україні на даний момент газ є найдоступнішим видом палива для автомобілів.

Метою роботи є аналіз потужності двигунів на стисненому природному газі.

Об'єкт дослідження: двигун на стисненому природному газі.

Практична значимість роботи полягає в наступному:

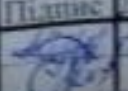


- було виконано аналіз вихідної потужності двигуна на стисненому природному газі. На основі цього аналізу зроблено висновок про те, що монопаливний силовий агрегат на стисненому природному газі задовольняє потреби людини в плані викидів в атмосферу шкідливих речовин при згорянні палива, проте його потужність сильно втрачається і через це він не може бути широко використаний в автомобільній промисловості. Небагато людей оберуть економічність на шкоду потужності двигуна.

- вирішено завдання, поставлені на початку, а також зроблено висновки щодо застосування монопаливних силових агрегатів у повсякденному житті.

*Ключові слова:* ДВИГУН, СТИСНУТИЙ ГАЗ, ПАЛИВО, CNG

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП  | 6  |
| РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ДВИГУНІВ ТА АВТОМОБІЛІВ НА СТИСНУТОМУ ПРИРОДНОМУ ГАЗІ | 9  |
| 1.1 Природний газ як паливо  | 9  |
| 1.2 Автомобілі на стисненому природному газі                         | 10 |
| 1.2.1 Світовий ринок автомобілів на природному газі                  | 10 |
| 1.2.2 Огляд автомобілів на стисненому природному газі                | 10 |
| 1.2.2.1 Двигуни, що працюють лише на стисненому природному газі      | 11 |
| 1.2.2.2 Бі-паливні двигуни   | 11 |
| 1.2.2.3 Двопаливні дизельні двигуни                                  | 12 |
| 1.2.2.4 Виробництво силових агрегатів                                | 14 |
| 1.3 Технічні аспекти двигуна на стисненому природному газі           | 18 |
| 1.3.1 Паливно-повітряна суміш  | 19 |
| 1.3.2 Переваги обслуговування двигуна на стиснутому природному газі  | 19 |
| 1.3.3 Питома витрата палива  | 20 |
| 1.4 Недоліки у роботі двигуна  | 21 |
| 1.4.1 Низька швидкість займання                                      | 21 |
| 1.4.2 Низька вихідна потужність                                      | 22 |
| 1.5 Екологічність  | 24 |
| 1.6 Економічність ДВЗ на природному газі                             | 27 |
| 1.7 Безпека застосування автомобілів на стиснутому природному газі   | 29 |
| 1.8 Перешкоди адаптації транспортних засобів під природний газ       | 30 |
| Висновки по розділу  | 32 |

МРТАМ 22.21209.000 ПЗ

| №   | Арк | № Докум.   | Підпис  | Дата | Літера         | Аркуш | Аркушів |
|---|-----|------------|---|------|----------------|-------|---------|
| виконав   |     | Козак      |  |      |                | 4     | 37      |
| перевір.  |     | Посонський |  |      |                |       |         |
| контр.  |     | Бабак      |  |      |                |       |         |
| звер.   |     | Данил      |   |      |                |       |         |
| Оцінка ефективності використання стиснутого газу в якості палива для двигунів внутрішнього згорання |     |            |   |      | ХНУ МТВАм-21-1 |       |         |

|   |    |
|---|----|
| РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ   | 34 |
| 2.1 Обладнання та схема випробувань   | 34 |
| 2.2 Використання водневмісних газів у двигунах внутрішнього згоряння            | 39 |
| 2.3 Застосування газу Брауна  | 47 |
| Висновки по розділу   | 49 |
| РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ  | 50 |
| 3.1 Дослідження на основі одноциліндрового двигуна з іскровим запалюванням      | 50 |
| 3.1.1 Послідовність дослідження   | 52 |
| 3.1.2 Результати дослідження  | 54 |
| 3.1.3 Висновок з урахуванням поставленого експерименту                          | 61 |
| 3.2. Дослідження потужності двигуна на основі 1,7 літрового турбованого двигуна | 62 |
| 3.2.1 Загальна інформація про двопаливний турбований двигун                     | 63 |
| 3.2.2 Експериментальна установка  | 67 |
| 3.2.3 Процедура тестування  | 71 |
| 3.2.3.1 Тести продуктивності бензину та стиснутого природного газу              | 71 |
| 3.2.3.2 Тестування суміші стиснутого природного газу та бензину                 | 77 |
| 3.2.3.3 Висновок на основі проведеного експерименту                             | 82 |
| Висновки по розділу   | 84 |
| ВИСНОВКИ  | 86 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ  | 88 |
| ДОДАТКИ   | 90 |

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 5    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## ВСТУП

Сьогодні у світі споживається загалом 12 730 мільйонів тонн енергії, з яких 7205 мільйон тонн нафти та природного газу.

Транспортний сектор з більш ніж одним мільярдом експлуатованих легкових автомобілів є основним споживачем нафти у всьому світі, збільшившись з 45,5% у 1973 році до 59% у 2021 році в основному у вигляді бензину та дизельного палива. Добре відомо, що запаси нафти виснажуються з загрозливою швидкістю. Крім того, спалювання цих традиційних видів палива транспортним сектором у значній ступеня сприяє забрудненню атмосфери, що загрожує планеті.

Функції сучасних двигунів внутрішнього згоряння мають бути переглянуті для зменшення забруднення. Енергетична криза та серйозне забруднення довкілля у всьому світі призвели до того, що розробка низькоемісійних та високоефективних паливних транспортних засобів стала головною метою досліджень автомобільних заводів. У транспортний сектор були введені різні альтернативні види палива, такі як пропан, біодизель, водень, елементи палива. З цих доступних альтернативних видів палива стиснутий природний газ (CNG) є тим продуктом, що задовольняє максимальні потреби країн у всьому світі, які бажають перейти на альтернативні види палива. CNG вважається одним із найкращих рішень для заміщення викопного палива через властиву йому чистоту природи горіння. Сьогодні його визнано в усьому світі екологічно чистим паливом.

Нижче наведено основні особливості, які сприяли підвищенню інтересу до використання природного газу як транспортного палива:

1. Широка доступність;
2. Екологічно чистий продукт;
3. Низькі експлуатаційні витрати.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 6    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Практично в кожній країні світу є видобуток газу, отже, стиснутий природний газ є широкодоступним видом палива на землі. Видобуток природного газу в Україні становив у 2021 році 20 млрд кубометрів, споживання — 28 млрд.

Останніми роками автомобільні газонаповнювальні компресорні станції (АГНКС) працювали на 10% від номінальної продуктивності, потенціал використання цього виду палива становить приблизно 1 млрд кубометрів. Частку імпорту умовно можна вважати пропорційною до природного газу (30%).

Внутрішнє виробництво традиційних автомобільних палив (бензинів, дизельного палива, пропан-бутану) в Україні практично відсутнє, — на імпорт припадає близько 80%. Натомість природний газ стає стратегічним паливом внутрішнього видобутку, і нарощування завантаження АГНКС можливе.

За підрахунками українських вчених, близько 90% забруднень навколишнього середовища припадає на автомобільний сектор, перехід цього сектора на природний газ призведе до зменшення викиду шкідливих речовин у атмосферу, тому газобалонні автомобілі є перспективним напрямом розробки для всіх автовиробників у світі. Викиди CO газобалонної вантажівки в 10 разів нижче, ніж аналогічної з дизельним двигуном. Також вчені розрахували, що при згоранні 1000л палива, атмосферу викидається 200-300 кілограмів оксиду вуглецю, 20-40 кілограмів вуглеводню та приблизно 20-45 кг NOx. При використанні CNG автомобілів ця статистика знижується в 2-3 рази по оксиду вуглецю, в 2 рази за оксидами азоту, приблизно в 3 рази за вуглеводнями, а сажа, яка присутня при згорянні дизельного палива і зовсім відсутня.

З цього випливає, що газ набагато екологічніший за бензин і дизельне паливо. В Україні на даний момент газ є найдоступнішим видом палива для автомобілів.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

У цій роботі будуть розглянуті всі мінуси двигунів на стисненому природному газі та способи їх вирішення.

Метою роботи є аналіз потужності двигунів на стисненому природному газі.

Для досягнення мети роботи вирішувалися такі завдання:

- вивчення стану конкретних питань, пов'язаних із темою роботи;
- пошук та аналіз інформації, пов'язаної з втратою потужності двигуна при застосуванні стисненого газу.

Об'єкт дослідження: двигун на стисненому природному газі.

Предмет дослідження: нестача потужності двигуна на стисненому природному газі в порівнянні з класичними ДВЗ.

Наукова новизна роботи:

- встановлено різницю між експлуатацією класичного двигуна внутрішнього згоряння та двигуна на стисненому природному газі.

Практична значимість роботи:

- за результатами роботи розглянуто варіанти вирішення проблеми низької вихідної потужності на двигунах CNG.

Результати роботи дозволяють оцінити, на скільки це рішення є актуальним на сьогоднішній день, і чи дозволяє вирішити проблему, поставлену в цій роботі належним чином.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

# РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ДВИГУНІВ ТА АВТОМОБІЛІВ НА СТИСНУТОМУ ПРИРОДНОМУ ГАЗІ

## 1.1 Природний газ як паливо

Природний газ, що використовується в транспортних засобах на природному газі, є тим самим природним газом, який використовується в побутовому секторі для приготування їжі та обігріву. CNG виробляється шляхом стиснення звичайного природного газу (який в основному складається з метану -CH<sub>4</sub>) до менш ніж 1% обсягу, займаного ним при стандартному атмосферному тиску. Він зберігається та розподіляється у жорсткому контейнері під тиском 200-248 бар (2900-3600 фунтів на квадратний дюйм), зазвичай у циліндричних формах металевого циліндра.

CNG стає одним з найважливіших енергетичних ресурсів і в даний час становить 23% світового первинного споживання [1]. За даними видання “Cedigaz”, доведені запаси природного газу у світі на 1 січня 2021 року становлять 7080,3 трлн куб. м, що відповідає більш ніж 60-річному запасу за поточних рівнів річного споживання 118,20 трлн. куб. м., також можна відзначити, що природний газ переважить вугілля до 2030 року та покриє 25% загального попиту на енергію у 2035 році [2]. Прогноз майбутніх потреб в енергії на показує, що природний газ є найбільш швидко зростаючим первинним джерелом енергії в майбутньому, і його споживання, за прогнозами, подвоїться з 2020 по 2040 роки [3].

Прогнозується, що зростаючий видобуток природного газу із важковидобуваних сланцевих пластів дозволить утримувати ціни на природний газ для споживачів на рівні цін 2018-2019 років до 2038 року [4].

Це призвело до зростання інтересу до використання природного газу в якості транспортного палива. Поточне річне споживання природного газу як

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

транспортне паливо становить 1,205 трлн куб. м, що становить лише 1,01% загального світового попиту природного газу.

## 1.2 Автомобілі на стисненому природному газі

### 1.2.1 Світовий ринок автомобілів на природному газі

У всьому світі кількість транспортних засобів, що працюють на природному газі, росте так швидко, що статистичні дані відстають і немає надійних джерел інформації. Однак, згідно з останніми достовірними джерелами, світовим лідером CNG автомобілів (на даний момент) є Іран з 4,07 млн. Слідом за Іраном стоїть Китай, з 3,99 млн. працюючих. Дані показують, що за останні десять років у всьому світі чисельність CNG автомобілів швидко збільшувалася у річному обчисленні на 24%, причому найбільший внесок вносили країни Азіатсько-Тихоокеанського регіону та Латинської Америки. За прогнозами, ця тенденція збережеться із середньорічним темпом зростання 3,7% до 2030 року. Сьогодні існує понад 18 мільйонів транспортних засобів, що працюють на природному газі, розподілених по більш ніж 86 країнах світу з основними концентраціями в Ірані, Китаї, Пакистані, Аргентині, Індії, Бразилії, Італії та Колумбії. Більшість (93%) транспортних засобів з CNG це легкові та комерційні автомобілі. Крім того, у всьому світі налічується понад 26 677 заправних станцій зі стиснутим природним газом.

### 1.2.2 Огляд автомобілів на стисненому природному газі

З точки зору подачі палива, існують три типи двигунів для автомобілів на стисненому природному газі:

1. Двигуни, що працюють тільки на стисненому природному газі;

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

2. Бі-паливні двигуни;
3. Двопаливні дизельні двигуни.

#### 1.2.2.1 Двигуни, що працюють лише на стисненому природному газі

Автомобілі, що працюють виключно на стисненому природному газі, мають двигуни, які працюють лише на природному газі. Ступінь стиснення цих двигунів оптимізована для використання переваги високого октанового числа природного газу та розроблена зі збереженням властивостей згорання природного газу, тому транспортний засіб виробляє значно менше викидів забруднюючих речовин.

#### 1.2.2.2 Бі-паливні двигуни

Бі-паливний автомобіль може працювати як на природному газі, так і на бензині. Тип двигуна, який вони використовують – звичайний бензиновий двигун внутрішнього згорання. Водій може вибрати, яке паливо спалювати, просто клацнувши перемикачем на панелі приладів.

Будь-який існуючий бензиновий автомобіль може бути перетворений на двопаливний. Більшість експлуатованих в даний час транспортних засобів на CNG дооснащені бензиновим двигуном [4]. У Пакистані, 2-му за величиною споживачем CNG, майже весь парк автомобілів, що працюють на стиснутому природному газі, відноситься до категорії двопаливних транспортних засобів. Властивості згорання природного газу істотно відрізняються від звичайного палива-дизеля та бензину [5].

Порівняно з дизельним та бензиновим ДВЗ, газ має більше тривалий час затримки займання через низьку швидкість поширення полум'я. Таким чином, при використанні одного і того ж бензинового двигуна для

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 11   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

двохпаливної системи, тривалість горіння стає відносно тривалішою, і для цього потрібно більш завчасне запалювання. Отже, для роботи звичайного бензинового двигуна на природному газі необхідна модернізація. Двопаливні двигуни, як правило, оптимізовані для природного газу, причому час запалення досить відсунуто, щоб пристосувати повільнішу швидкість горіння метану. На Рисунку 1.1 зображено схему звичайного модернізованого двопаливного транспортного засобу на газі.

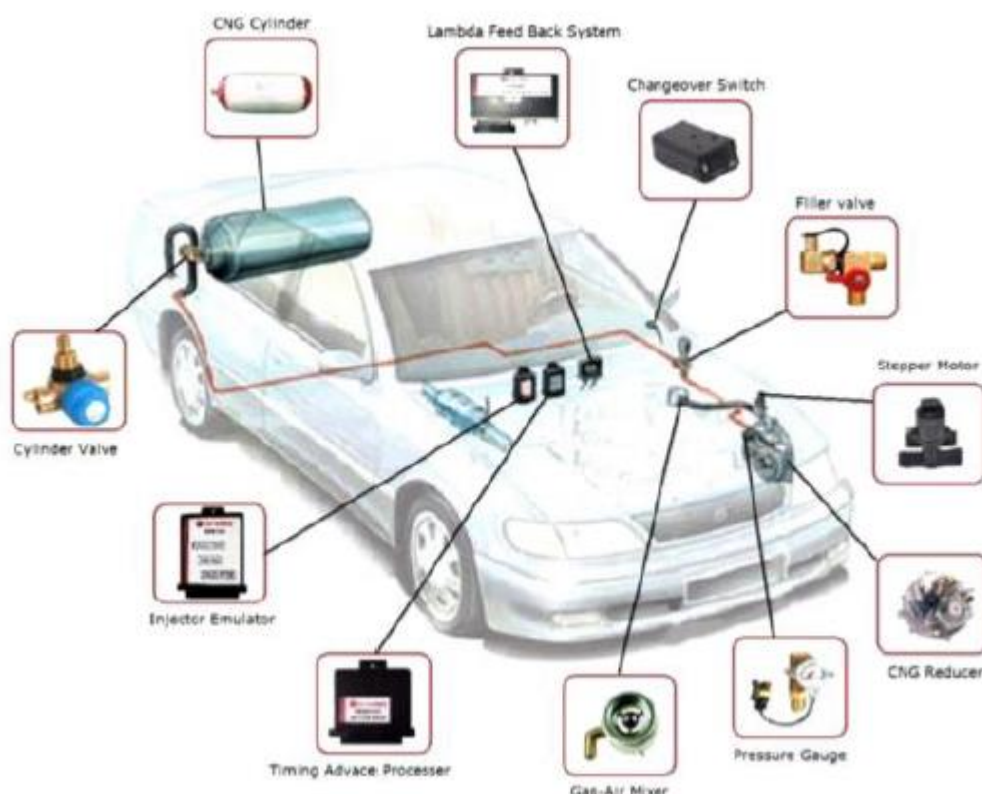


Рисунок 1.1 – Схема модернізованого бензинового автомобіля на газу

### 1.2.2.3 Двопаливні дизельні двигуни

Двопаливні транспортні засоби засновані на технології двигуна СІ. Вони працюють або тільки на дизельному паливі, або використовують суміш природного газу та дизельного палива, причому суміш природного газу та

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 12   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

повітря запалюється дизельним “пілотом”. В режимі холостого ходу ці двигуни, як правило, працюють тільки на дизельному паливі.

У міру того, як автомобіль починає підбирати навантаження, природний газ замінює дизельне паливо на 60-90%. Однак, як і в випадку бі-паливного транспортного засобу, пряме перетворення неможливо через дуже низьке цетанове число природного газу внаслідок його дуже високої температури самозаймання, що вимагає або перетворення в іскровому запаленні, або прийняття двопаливної системи. Через високу температуру займання природного газу, він потребує дуже високого стиснення для самозаймання, тобто близько 38:1.

Внаслідок цього газ повинен спалахувати за допомогою іншого палива (дизельного) – пілотного упорскування. Дизельне паливо вводиться безпосередньо в камеру згорання, а газ упорскується в повітрозбірник шляхом карбюрації. Потім газоподібне паливо стискається в такті стиснення двигуна. Далі дизельне паливо впорскується ближче до кінця такту стиснення. При короткій затримці запалювання спочатку відбувається згорання дизельного палива, що призводить до займання природного газу та провокування поширення полум'я. Важливим фактором для роботи на двопаливному паливі є коефіцієнт заміщення, який визначається як частка енергоємності палива, що поставляється природним газом. Швидкість заміни залежить від навантаження двигуна.

Максимальна швидкість заміни до 90% може бути отримана за допомогою існуючих в даний час двопаливних двигунів. Швидкість заміщення впливає як на продуктивність двигуна, так і на викиди.

Видання “Egúsqiiza” виявило, що питома витрата палива на гальмування збільшується зі збільшенням відсотка заміщення [6]. Вони також зазначили, що при більш високих навантаженнях та зі збільшенням коефіцієнта заміщення концентрація вуглеводнів має тенденцію до збільшення, тоді як концентрація CO спочатку збільшується до рівня

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 13   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

заміщення 70%, а потім знижується. NOx були єдиними фактором викидів, який демонстрував тенденцію до зниження відповідним збільшенням коефіцієнта заміщення.

Бі-паливний автомобіль забезпечує на 30-40% вищий ККД двигуна, що згодом знижує витрати палива на 25% [6]. В обох випадках існує додаткова вартість у порівнянні зі звичайними дизельними та бензиновими транспортними засобами, і ця додаткова вартість має бути відшкодована за рахунок економії експлуатаційних витрат з допомогою вартості палива [7].

#### 1.2.2.4 Виробництво силових агрегатів

Технологія розробки CNG-двигунів та їхньої конверсії добре зарекомендувала себе, і відповідне конверсійне обладнання легко доступне. У всьому світі різні виробники пропонують двигуни на стисненому природному газі або як спеціалізовані (моно-паливні) двигуни Otto-циклу, або як дизельні двигуни dual fuel. У США компанія Cummins Westport Inc. є провідним постачальником високопродуктивних двигунів CNG для автомобільного ринку. Вона проектує та продає двигуни об'ємом від 6 до 12 л (195-400 к.с.) для комерційних транспортних застосувань, таких як вантажівки та автобуси.

Наприклад, такий двигун як Каммінс Westport ISX12 G (298 кВт) – це силовий агрегат на стисненому природному газі, придатний для різних типів важких транспортних засобів, включаючи вантажівки для збирання відходів та транзитні автобуси. ISX12 G-це стехіометричний двигун CNG, який використовує перевірену стехіометричну технологію рециркуляції вихлопних газів з охолодженням (SEGR), турбонаддув та подальшу обробку через TWC для досягнення стандартів викидів EPA USA 2014 року.

Компанія IVECO є європейським лідером у виробництві та продажу двигунів та транспортних засобів з технологією CNG. З 1994 року компанія

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | MPTAM 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 14   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

IVECO пропонує широкий асортимент автомобілів, є одним із провідних дослідників, виробників автомобілів та силових агрегатів на природному газі в Європі, причому тисячі автомобілів експлуатуються як державними, так і приватними органами влади. В даний час компанія IVECO пропонує три основні типи двигунів: IVECO Sofim 3 л (100 кВт), зображений на малюнку 2; IVECO Tector 6 л. показаний на Рисунку 1.3; та IVECO Cursor 8 л., потужністю 200 кВт (Рис.4). Усі двигуни IVECO на природному газі використовують спеціальний двигун CNG SI, працюючий на стехіометричному згорянні coupled з TWC.

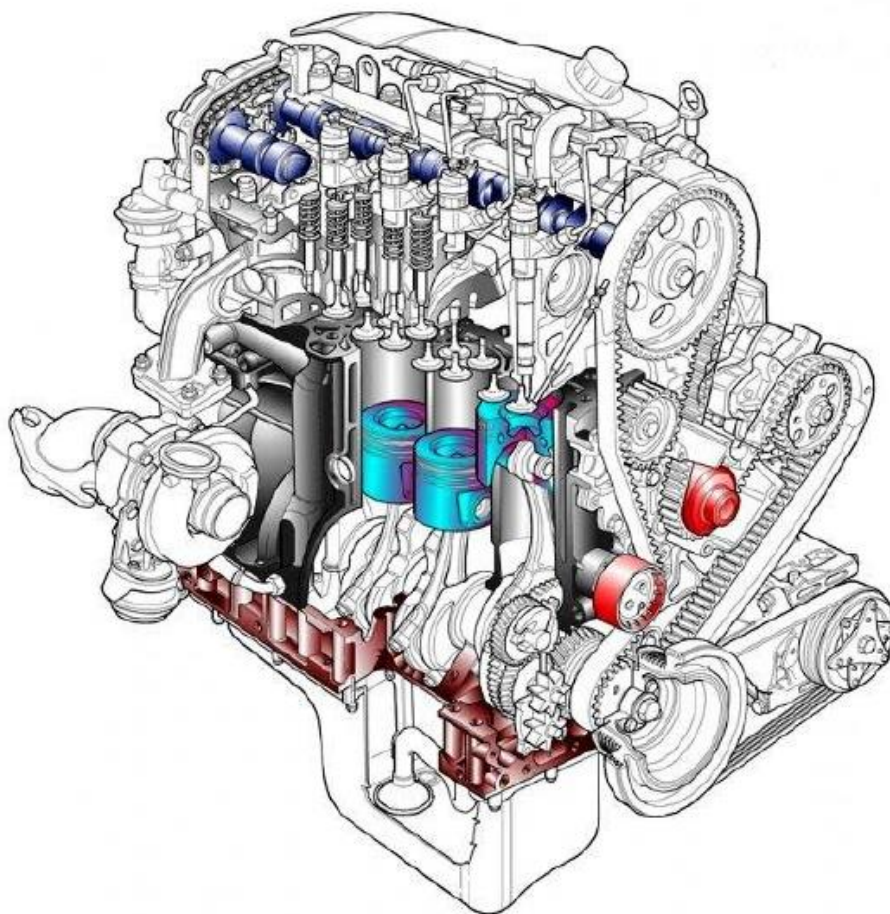


Рисунок 1.2 – Схема ДВЗ Sofim 3 л. (100 кВт), виробництва ф. IVECO.

|      |      |          |        |      |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|--------|------|--|--|--|--|------|
|      |      |          |        |      |  |  |  |  | Арк. |
|      |      |          |        |      |  |  |  |  | 15   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |  |  |  |  |      |



Рисунок 1.3 – ДВЗ Tector 6 л. , виробництва ф. IVECO.



Рисунок 1.4 – ДВЗ Cursor 8 л. (200 кВт), виробництва ф. IVECO.

Автомобільна компанія Volvo – третій за величиною виробник автобусів на стисненому природному газі в Європі. Вони пропонують як двопаливний, так і монопаливний двигун CNG з 1992 року. Газовий двигун Volvo FM Metan-Diesel D13C (Рис.1.5) - це 13-літровий (460 к. с.)

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 16   |



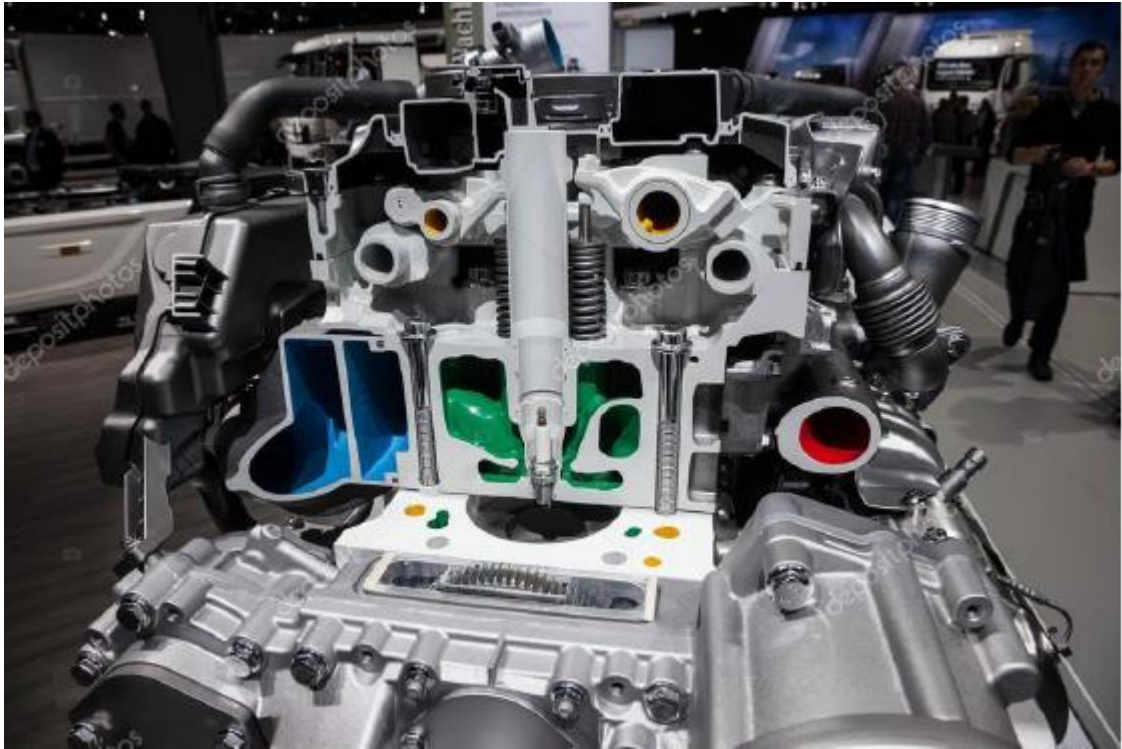


Рисунок 1.6 – Розріз двигуна M-936G, виробництва ф. Mercedes-Benz

### 1.3 Технічні аспекти двигуна на стисненому природному газі

Теплова ефективність двигунів залежить від різних параметрів, але, мабуть, найважливішим є ступінь стиснення двигуна. Чим вища ступінь стиснення, тим вищою буде теоретична, і навіть фактична ефективність. Октанове число природного газу коливається від 120 до 130, що означає, що двигун може працювати за ступенем стиснення до 16:1. Високе октанове число дозволяє спеціалізованому CNG-двигуну використовувати вищу ступінь стиснення підвищення теплового ККД двигуна приблизно 10% вище, ніж в бензинового двигуна [7]. Тому деякі CNG-двигуни можуть мати ККД до 35%, на відміну від 25% для бензинового двигуна. До речі, модернізовані бензинові двигуни не матимуть переваги високого октанового числа, оскільки ступінь стиснення буде встановлена на рівні, необхідному для бензину. Перевага високої ефективності, наведена вище, може бути досягнута в спеціалізованих двигунах CNG.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

### 1.3.1 Паливно-повітряна суміш

Молярна маса бензину (114,23 г/моль) значно вища, ніж у газу (16 г/моль). Будучи легковажним паливом, природний газ може виробляти набагато одноріднішу паливно-повітряну суміш [8]. З іншого боку, рідкому паливу потрібен час для повного розпилення та випаровування з утворенням однорідної ТВС. Стиснутий газ, будучи газоподібним паливом за нормальних атмосферних умов, має невід'ємну перевагу високого ступеня змішування та дифузії з газоподібним повітрям, що істотно для гарного горіння [7].

### 1.3.2 Переваги обслуговування двигуна на стиснутому природному газі

Автомобілі на стисненому природному газі мають нижчі витрати на технічне обслуговування порівняно із звичайними автомобілями. Чандлер К, Еберт Е. з Національної Лабораторії Відновлюваних Джерел провели 12-місячний порівняльний аналіз між CNG та дизельними транзитними автобусами, що експлуатуються вашингтонським управлінням з транзиту метрополітену. Вони виявили, що витрати на технічне обслуговування автобусів, що працюють на стиснутому газі, були на 12% нижчими, ніж у автобусів, що працюють на дизельному паливі. CNG не забруднює і не розбавляє моторне масло, що згодом збільшує термін служби мастильного матеріалу. Газ надходить у двигун в газоподібному вигляді, на відміну від бензину, який надходить у двигун у вигляді бризок або туману і змиває мастило з області поршневих кілець, що згодом посилює знос двигуна. Таким чином, стиснений природний газ скорочує витрати на технічне обслуговування та продовжує термін служби двигуна. Але в порівнянні з дизельними та бензиновими двигунами, CNG-двигуни вимагають низького вмісту, сульфатованої золи шлакового масла. Сульфатована зола є

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 19   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

характеристикою моторних масел на природному газі, що дає уявлення про здатність олії нейтралізувати кислоти в процесі згоряння. Через свою газоподібну природу природний газ є сухим і не забезпечує абсолютно ніякої мастильної цінності, що призводить до утворення золених сульфатованих відкладень на випускних клапанах, що містять сульфати металів, включаючи барій, кальцій, магній, цинк, калій, натрій і олово. Велика кількість цього залишку може призвести до зниження теплопередачі, детонації, горіння клапана та прилипання або розриву кільця.

Відсутність концентрації свинцю в стисненому газі сприяє запобіганню свинцевому обростанню свічок запалювання, тим самим продовжуючи термін служби поршневих кілець та свічок запалювання [7]. Інтервал між налаштуваннями автомобілів на природному газі збільшився до 30 000 км. Аналогічно, інтервал між замінами масла для автомобілів на природному газі може бути збільшений з 5000 до 10 000 додаткових км залежно від того, як використовується автомобіль.

### 1.3.3 Питома витрата палива

Питома витрата палива є дуже важливою характеристикою порівняння продуктивності двигунів внутрішнього згоряння, що працюють на різних видах палива. Різні дослідження підтвердили, що питома витрата палива двигунів, що працюють на CNG, була на 12-20% нижче, ніж у бензинових у всьому діапазоні швидкостей [8-9]. Це можна пояснити такими двома факторами:

Вища теплотворна здатність газу (47,5 МДж/кг) порівняно з бензином (43,5 МДж/кг);

Повільне спалювання газу порівняно з бензином.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 20   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Завдяки низькій питомій витраті палива та вищій теплотворній здатності, двигуни на природному газі показують на 5-12% вищу теплову ефективність на відміну від бензинових двигунів.

#### 1.4 Недоліки у роботі двигуна

Продуктивність двигуна, що працює на стисненому природному газі, сильно залежала від конструкції та типу двигуна. Однак головна проблема, з якою стикаються сьогодні всі дослідники та виробники, - це втрата потужності у двигуні. Декількома ознаками CNG-палива, що впливають на потужність двигуна, є низька швидкість поширення полум'я, втрата об'ємного ККД та відсутність випаровування палива.

##### 1.4.1 Низька швидкість займання

Декілька експериментальних досліджень показали, що швидкість поширення полум'я природного газу нижча на відміну від звичайних видів палива, таких як бензин та дизельне паливо. Ця нижча швидкість поширення полум'я сприяє збільшенню загальної тривалості горіння в порівнянні з бензином / дизелем і дозволяє випускати більшу кількість природного газу, що не згорів, через вихлопну трубу [8-9]. Оскільки метан ( $\text{CH}_4$ ) є основним компонентом у природному газі та серед вуглеводнів, метан має найнижчу швидкість полум'я [10]. Це призводить до збільшення втрат енергії за рахунок теплопередачі, що згодом знижує вихідну потужність двигуна з 5 до 10% [7].

Одним з ефективних методів вирішення проблеми повільної швидкості поширення полум'я природного газу є змішування його з паливом, що має високу швидкість горіння, наприклад воднем. Водень вважається найкращою

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

добавкою до природного газу через його високу швидкість розповсюдження полум'я (265-325 см/с) [8].

#### 1.4.2 Низька вихідна потужність

Завдяки двом перерахованим вище факторам, а саме швидкості полум'я та об'ємній ефективності, звичайний CNG-двигун дає меншу потужність, ніж бензиновий. Декілька експериментальних досліджень показали, що бензинові транспортні засоби, переобладнані на природний газ, при роботі втрачають від 15% до 20% загальної потужності. Було проведено багато експериментальних робіт щодо аналізу експлуатаційних характеристик двигунів, що працюють на природному газі.

Вчені досліджували працездатність 1468 см<sup>3</sup> 12-клапанного, чотирьох циліндрового двигуна, що має ступінь стиснення 9,2. Випробуваний двигун був перетворений бензиновий двигун на стисненому природному газі, оснащений двопаливною системою. Було встановлено, що в середньому CNG дає на 16% менше потужності ніж бензин [9]. Згідно з висновками, викиди вихлопних газів та гальмівна сила CNG були дуже низькими порівняно з бензиновим паливом. Дослідження показало, що потужність двигуна, що працює на газі, нижча, ніж у бензинового двигуна. Також дослідники проводили експериментальні роботи на одноциліндровому 4-тактному двопаливному двигуні для вимірювання продуктивності випробуваного двигуна. Вони зазначили, що об'ємний ККД та гальмівна сила двигуна, що працює на стиснутому газі, були нижчими, ніж у бензинового двигуна. Ще одним експериментом був вплив зміни випередження запалення на продуктивність типового двопаливного 4-циліндрового ДВЗ карбюраторного об'ємом 1600 см<sup>3</sup>. Згідно з його результатами, максимальна потужність

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 22   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

двигуна, що виробляється при роботі на природному газі, була на 5-10% нижчою, ніж при роботі на бензині [9].

Ще одним етапом експериментів стало вивчення експлуатаційних характеристик та викидів вихлопних газів двопаливного двигуна Mazda B2000i SI як на природному газі, так і на бензиновому паливі у широкому діапазоні режимів роботи двигуна. Дослідження показало, що гальмівна потужність та об'ємний ККД двигуна, що працює на газу, на 11-14% нижче, ніж у бензинового двигуна [10]. Дослідження також показало, що використання стиснутого газу веде до підвищення теплової ефективності на 18% порівняно з бензином.

Фірузган оцінив два покоління газових паливних систем, включаючи змішувальний тип та послідовний тип системи у двопаливному двигуні (бензин/CNG). Він виміряв різні параметри, включаючи продуктивність, викиди та витрати палива бипаливного двигуна. Він повідомив, що послідовна система заправки газом краща, ніж змішувальний тип. Втрати потужності в мікшерному типі на 1,78% вищі, ніж в іншого [11].

Для підвищення ефективності роботи двигуна на стиснутому газі в якості варіанта перетворення CNG на більш перспективне транспортне паливо розглядаються альтернативні способи впорскування палива, такі як пряме впорскування і портове впорскування газу в камеру згорання. Безпосереднє упорскування може збільшити абсолютну величину нагрівання заряду циліндра і покращити інтенсивність турбулентності для кращого перемішування перед запаленням. Підвищується ККД згорання, що призводить до покращення потужності та крутного моменту, зниження насосних та теплових втрат. Однак розробка двигуна з безпосереднім упорскуванням є дорогим та технічно складним завданням. Це пов'язано з необхідністю попередньої адаптації головки блоку циліндрів з безпосереднім упорскуванням палива, а також із залученням детального калібрування системи керування двигуном [9].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## 1.5 Екологічність

Використання природного газу як транспортного палива пов'язане з низкою потенційних вигод для навколишнього середовища, зокрема з викидами в атмосферу та шумом. За принципом "добре на колесах" CNG є одним з найчистіших альтернативних автомобільних палив, що спалюються, доступних сьогодні на ринку. Викиди від правильно функціонуючих транспортних засобів на основі стисненого природного газу зазвичай вважаються нижчими, ніж викиди від транспортних засобів, що працюють на бензині. Низка міжнародних досліджень свідчить, що CNG може скоротити викиди. У Делі (індійська столиця та друге за щільністю населення місто у світі) весь громадський автомобільний транспорт було переведено на газомоторне паливо у 2002 році після вироку Верховного суду Індії. Сьогодні Делі має в своєму розпорядженні найбільшу у світі систему громадського транспорту, що працює на газоподібному паливі. Вчені провели дослідження у Бразилії [10]. Будучи одним з піонерів у розробці модернізованих транспортних засобів на основі CNG, вони дійшли висновку, що порівняно з бензиновими транспортними засобами використання конверсійних комплектів третього покоління у переобладнаних транспортних засобах призведе до скорочення викидів CO на 53%, викидів неметанових вуглеводнів на 66% та викидів CO<sub>2</sub> на 20%.

Зростання занепокоєння в транспортному секторі викликає вплив викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) на глобальну зміну клімату. Викиди CO<sub>2</sub> при спалюванні палива значною мірою залежать від співвідношення водню та вуглецю. Чим вище відношення водню до вуглецю (H/C) палива, тим меншою буде кількість CO та CO<sub>2</sub>. Газ має найвище відношення водню до вуглецю (майже 4:1) (бензин (2,3:1) або дизельне паливо (1,95:1)). Це спричинило більш низьку емісію CO<sub>2</sub> для CNG, ніж для бензину або

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 24   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

дизельного палива. Виходячи з хімічної рівноваги горіння газів, викиди CO<sub>2</sub> від двигуна на природному газі можуть бути знижені більш ніж на 20%, на відміну від бензинового двигуна, що працює в тому ж режимі. Рівень CO<sub>2</sub> у транспортному засобі на стиснутому природному газі також може бути нижчим, ніж у порівнянному дизельному транспортному засобі при тому ж співвідношенні, зберігаючи при цьому майже ту ж теплову ефективність у дуже бідних умовах. Як правило, ґрунтуючись на паливній ефективності, випробуваній Chive Fuels, Великобританія; CNG заощаджує 2,65 кг викидів CO<sub>2</sub> на кожний галон дизельного палива. Якщо виходити з принципу "добре на колесах", то транспортні засоби на природному газі виробляють на 29% менше парникових газів, ніж порівнянні бензинові транспортні засоби, і на 22% менше, ніж дизельні транспортні засоби. CARB (California Air Resources Board) провела ретельний аналіз цього питання. Він визначає, що спалювання стиснутого газу дає близько 68г еквівалентних викидів CO<sub>2</sub> на тепловиділення (це включає всі викиди метану), а спалювання звичайного дизельного палива та бензину дає близько 95 г еквівалентних викидів CO на МДж.

Ще одним великим компонентом викидів ДВЗ є окис вуглецю-CO, який утворюється при неповному згорянні. Крім найвищого відношення водню до вуглецю, двигуни на природному газі мають дві додаткові важливі характеристики:

1. Низьку теплотворну здатність порівняно з бензином
2. Низьку швидкість поширення полум'я в порівнянні з іншими видами палива.

Ці два фактори знижують максимальну температуру всередині камери згорання і, отже, зменшують дисоціацію CO<sub>2</sub> до CO. Були проведені різні дослідження, які підтверджують, що емісія CO у двигуні на стиснутому природному газі була значно нижчою, ніж у бензиновому та дизельному транспортному засобі за різних режимів навантаження.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Вихлопні гази транспортних засобів також складаються з оксидів азоту - NO<sub>x</sub>, які є побічними продуктами всіх процесів спалювання палива на основі вуглецю, і на долю глобального транспортного сектора припадає близько половини загального обсягу викидів NO<sub>x</sub>. Існує безліч несприятливих наслідків для здоров'я, пов'язаних з викидом NO<sub>x</sub>, таких як збільшення загальної смертності, серцево-судинної смертності та дитячої смертності. Вчені теоретично довели, що утворення NO<sub>x</sub> безпосередньо залежить від двох факторів: концентрації реагентів та температури. Концентрація викидів NO<sub>x</sub> тісно пов'язана із співвідношенням повітря-паливо та температурою горіння. Бідна повітряно-паливна суміш і висока температура горіння є сприятливими умовами для утворення NO. При спалюванні бідної суміші використовується багато надлишкового повітря, зазвичай вдвічі більше, ніж потрібно для повного згорання палива, в той час як з іншого боку, двигуни з багатою сумішшю працюють при майже стехіометричному співвідношенні повітря/паливо, яке достатньо для спалювання всього палива. Це надлишкове повітря ефективно охолоджує пікові температури горіння в циліндрі, що знижує виробництво NO<sub>x</sub>. Оскільки газ горить при нижчій адіабатичній температурі полум'я, ніж бензин або дизельне паливо, це призводить до низьких викидів NO<sub>x</sub>. Дослідження показали, що зниження вмісту NO<sub>x</sub> на 50-80% можливе під час експлуатації великовантажних транспортних засобів на природному газі замість дизельного палива.

Однією з основних шкідливих викидів вихлопних газів, вироблених двигунами внутрішнього згорання, є тверді частки (ТЧ). ТЧ, особливо з урахуванням серйозних наслідків для здоров'я, пов'язаних із дрібнодисперсними частинками, стає серйозною екологічною проблемою у міських районах. CNG є потенційно вигідним паливом, оскільки викиди ТЧ значно знижуються при використанні природного газу, оскільки природний газ не містить ароматичних та поліароматичних сполук та містить менше

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

розчинених сполук сірки, ніж нафтове паливо. Таким чином, внесок автомобілів на стислому природному газі в утворення смогу може бути меншим, ніж у порівнянних бензинових та дизельних транспортних засобів. Результати різних досліджень, засновані на реальних даних, підтверджують потенційне зниження викидів твердих частинок CNG-паливі.

Ще однією потенційною перевагою автомобілів CNG є зниження неметанових вуглеводневих викидів. Стиснутий газ в основному складається з метану, і оскільки метан не має молекулярних зв'язків вуглець-вуглець, спалювання призводить до значно нижчої ймовірності викиду бензолу, що, у свою чергу, означає зниження утворення канцерогенних речовин і сажі, також природний газ містить менше ароматичних речовин і має більш високе співвідношення водень/вуглець, причому обидві ці речовини відповідальні за зменшення кількості летких органічних сполук [9].

Хоча поліпшення якості навколишнього повітря, безумовно, є однією з головних цілей для влади, що сприяє збільшенню кількості автомобілів на природному газі, деякі результати досліджень викидів були незадовільними або навіть гіршими, ніж у автомобілів на бензиновому паливі, через неправильне переобладнання, технічне обслуговування тощо.

## 1.6 Економічність ДВЗ на природному газі

Однією з головних переваг газу є те, що він забезпечує джерело доступної енергії. Оскільки світ продовжує працювати на дорогих видах палива, таких як дизельне паливо та бензин, низька вартість газу дає іскру надії. Хоча екологічні аспекти та контроль викидів були головною метою застосування природного газу на автомобільному транспорті, особливо у великих містах. Проте в останні дні з різким зростанням цін на нафту все більш значуща економічна перевага використання газу стала головною метою для багатьох нових користувачів. У більшості країн газ набагато

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 27   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

дешевший на еквівалентний галон, ніж бензин і дизельне паливо, навіть з урахуванням витрат, пов'язаних з компресією, і тому навіть з урахуванням його нижчої теплової ефективності для дизельного палива існують значні економічні переваги використання стиснутого природного газу в ролі транспортного палива. Щоб зробити його придатним до використання, природний газ вимагає дуже незначної переробки від виробничого поля до транспортного засобу. З іншого боку, дизельне паливо та бензин мають бути відокремлені від сирової нафти та проходити через складний процес переробки. Крім того, він менш схильний до коливань цін і його ресурси більш рівномірно розподілені по землі в порівнянні з нафтою. Цінова перевага природного газу перед дизельним паливом та бензином часто розглядалася як найважливіший параметр для залучення споживача до переведення свого транспортного засобу зі звичайного палива на метан або пропан.

Міністерство енергетики США підрахувало, що природний газ дешевший за бензин на третину. Згідно зі звітами, опублікованими агентством енергетичної інформації США, CNG в середньому коштує на 42% дешевше від дизельного палива в енергетичному еквіваленті і прогнозується, що до 2035 року цей показник досягне 50%. Аналогічно Republic Services, друга за величиною компанія з управління відходами в США, досягла 50% зниження вартості палива за рахунок розгортання природного газу на декількох флотах. Нещодавно Міністерство енергетики США провело опитування про альтернативне транспортне паливо і з'ясувало, що на відміну від звичайного бензину паливні парки можуть заощадити близько 50% вартості палива за допомогою застосування газу [9].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 28   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## 1.7 Безпека застосування автомобілів на стиснутому природному газі

Безпека застосування автомобілів на стиснутому газі є дуже важливим аспектом. Для багатьох стає несподіванкою, що природний газ є одним із найбезпечніших видів палива для транспортування. Природний газ у багатьох відношеннях безпечніший за бензин. Автомобілі на природному газі — безпечна альтернатива з перевіреним послужним списком. Проведене в 1992 році АГА обстеження понад 8000 транспортних засобів показало, що при проїзді понад 278 мільйонів миль рівень травматизму NGV на одну пройдену милю транспортного засобу був на 34% нижчим, ніж для бензинових транспортних засобів. Про жертви не повідомлялося, хоча ці транспортні засоби брали участь у понад 1800 зіткненнях.

Фізичні властивості газу дають деякі переваги щодо безпеки в порівнянні з дизельним паливом і бензином. Вони полягають у наступному:

1. На відміну від бензину, газ має вузький діапазон займистості, від 4,3% до 15,2% за обсягом у повітрі, це означає, що при концентраціях у повітрі нижче 4,3% і вище 15,2% природний газ не горітиме навіть у присутності іскри.

2. Газ має високу температуру самозаймання 540°C порівняно з 258°C бензину та 316°C дизеля. Температура самозаймання - це найнижча температура, при якій паливо займається тільки за рахунок тепла, без зовнішньої іскри або полум'я. Висока температура займання та вузький діапазон займистості природного газу зменшують ймовірність випадкового займання та згоряння палива.

3. Природний газ легший за повітря, тому у разі випадкового витoku дуже низька щільність газу при атмосферному тиску - 0,68 кг/м<sup>3</sup> в порівнянні з повітрям - 1,202 кг/м<sup>3</sup>-означає, що CNG швидко підніматиметься і розсіюватиметься в повітрі, а не утворюватиме калюжі на землі, як у випадку

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

дизельного палива і бензину, що знижує ймовірність пожежі у разі прориву цистерни.

4. Балони для газу сконструйовані та виготовлені із спеціальних матеріалів, щоб протистояти високим тискам, з коефіцієнтом запасу міцності, який зазвичай перевищує два, отже, безпечніше, ніж звичайні бензинові баки. Вищезазначені фізичні властивості не гарантують того, що транспортний засіб на стиснутому природному газі безпечніший за дизельний. Наприклад, у Пакистані, 2-му за величиною споживачеві природного газу, за останні кілька років спостерігалось кілька аварій, пов'язаних із транспортними засобами на основі природного газу. Але це головним чином через низьку якість матеріалу системи, наприклад, циліндра, конструкції та установки, системи технічного обслуговування тощо, помилки водія та відсутність суворих державних правил безпеки транспортних засобів CNG у Пакистані. Споживачу, який використовує автомобільний засіб на стиснутому природному газі, має бути надана достатня інформація про безпеку щодо питань безпеки, пов'язаних з CNG, таких як витік газу, методи профілактики та контролю, а також аварійне реагування у разі зіткнення транспортного засобу та пожежі [10].

#### 1.8 Перешкоди адаптації транспортних засобів під природний газ

В даний час автомобілі з природним газом міцно закріпилися на світових транспортних ринках, але, як і раніше, існує багато перешкод для їх широкого використання. Деякі проблеми, пов'язані з транспортними засобами на стиснутому природному газі, продемонстровані нижче:

1. Одним із найважливіших питань, що стосуються транспортних засобів, що працюють на природному газі, є дальність руху, яка визначається як здатність долати певну відстань після кожної заправки. За обсягом 1 м<sup>3</sup> газу приблизно відповідає 1,0 л бензину або 1,1 л дизельного палива. Через

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 30   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

це нижча щільність енергії природного газу в порівнянні з бензином або дизельним паливом займає в 3-4 рази більше місця для зберігання, ніж бензин або дизельне паливо, що відповідно зменшує дальність ходу автомобіля. Дальність руху є головною перешкодою у розвитку та зростанні природного газу як транспортного палива.

2. Інша проблема з автомобілями на стиснутому газі, це втрата вантажного простору. Балони для газу великі і займають багато місця для зберігання і, як правило, мають бути розміщені у багажнику автомобіля. Завдяки цьому значно зменшується вантажний простір майже на 50% порівняно із звичайним автомобілем. Але цей недолік був виправлений спеціальним транспортним засобом, що працює на зрідженому природному газі, у якого балони знаходяться не в багажнику, а під усім транспортним засобом, так що багажне відділення не зменшується.

3. Ще одна особливість експлуатації автомобіля на стиснутому природному газі – це великий час заправки щодо дизельного або бензинового транспортного засобу, і іноді користувачеві доводиться годинами чекати у довгих чергах, щоб заправити свій автомобіль через недостатню кількість заправних станцій у районах. Заправка вважається найменш безпечним моментом його використання. Недостатня кількість заправних станцій є перешкодою для охоплення споживачів. Результати досліджень показали, що для сталого використання природного газу у вигляді транспортного палива необхідно задовольнити дві умови. По-перше, для того, щоб станції були прибутковими, на кожній заправній станції має бути не менше 1000 автомобілів з природним газом. По-друге, щоб мінімізувати час заправки та полегшити роботу автомобілістів, мінімальний діапазон заправок має становити не менше 10-20% від числа бензинових/дизельних станцій.

4. Для транспортних засобів великої вантажопідйомності, що працюють у сільській місцевості, перехід на CNG пов'язаний з низкою проблем, включаючи відсутність заправної інфраструктури, більш високі

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 31   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

капітальні витрати на автомобілі та обмежену пропозицію двигунів. Поки не буде створено конкурентоспроможну інфраструктуру для заправки стисненим газом, це альтернативне паливо буде проблематичним для далеких перевезень з нерегулярними маршрутами [11].

#### Висновки по розділу

Більшість автовиробників у всьому світі переходять на альтернативні джерела палива для автомобілів. Це пов'язано з тим, що людство почало замислюватися про глобальне забруднення планети, тому уряди багатьох країн посилюють вимоги щодо емісії вихлопних газів автомобілів.

На даний момент існує лише три концепції автомобілів на стисненому природному газі - це двигуни, що працюють тільки на CNG; бі-паливні двигуни та двопаливні дизельні двигуни.

Виробництво силових агрегатів, що працюють на стисненому природному газі, почалося ще далекого 1994 року. Європейським лідером з виробництва та продажу двигунів та автомобілів на CNG є компанія IVECO.

Головною перевагою для виробників CNG двигунів є їхня екологічність. Викиди вуглекислого газу та вуглеводнів знижуються, за рахунок застосування у двигуні газу, тому дані силові агрегати можуть пройти атестацію за новими жорсткими вимогами щодо викидів. Наприклад, норми євро-6, змінюються мало не щороку, у кожній редакції вимоги щодо викидів стають дедалі жорсткішими. Ще одна перевага цих двигунів – це їхня економічність. Для споживача цей показник є дуже важливим при виборі автомобіля. Багато людей готові пожертвувати потужністю автомобіля задля економічності.

Однак у цих двигунів є один істотний недолік - це низька вихідна потужність. При застосуванні в двигуні стиснутого газу, його об'ємний ККД

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 32   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

зменшується, внаслідок чого втрачається потужність двигунів. Цей недолік не є ключовим моментом для покупки автомобіля на CNG, тому люди часто купують такі машини, наприклад транспортні компанії, т.к. вони економічні.

Багато споживачів автомобілів CNG скептично ставляться до такого поняття як безпека. Вони вважають, що газ не безпечніший за бензин, проте це не так. На відміну від бензину, газ має низький діапазон займистості, тому в багатьох випадках газ не горітиме навіть у присутності іскри. Друга перевага газу проти бензину (дизеля) – це висока температура самозаймання. Також природний газ легший за повітря, тому у разі витоку він просто розсіється і не залишатиметься калюж на землі, як це роблять бензин і дизель, що знижує рівень ймовірності пожежі.

Одним із найбільш значних перешкод для адаптації автомобілів під природний газ є заправні станції. Вони не такі популярні, як класичні заправки та є недоступними у багатьох віддалених регіонах. Ще однією перешкодою є вантажопідйомність автомобіля на стислому газі. При застосуванні технології CNG простір і вантажопідйомність зменшуються, внаслідок чого люди відмовляються від газу.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 33   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Важливим етапом при створенні газового двигуна є його експериментальне дослідження. На цьому етапі перевіряється адекватність математичних моделей, що застосовуються для розрахункового дослідження різних процесів двигуна, а також основні розрахункові результати, отримані з їх допомогою.

### 2.1 Обладнання та схема випробувань

Експериментальне дослідження ДВЗ, як правило, виконується з використанням спеціального стенду.

Конвертуванню на газове паливо підлягають переважно два типи двигунів: бензинові малолітражні, що використовуються на легкових автомобілях, і дизелі середньої потужності, що використовуються на вантажних автомобілях та автобусах. Тому дослідження доцільно проводити на стендах: з урахуванням малолітражного газового двигуна і з урахуванням газового двигуна середньої потужності.

При цьому на малолітражному двигуні доцільним є обладнання для подачі в циліндри двигуна сумішшю палива, а на двигуні середньої потужності - агрегат наддуву.

Малолітражний газовий двигун 4ГЧ7,5/7,35 створений на базі ГРП «АвтоЗАЗ-Мотор», що серійно випускається, ЗАТ «ЗАЗ» і встановлюваного на автомобілі моделі «Sens» двигуна MeM3-307, що працює на бензині АІ-95. У серійному виконанні двигун має такі характеристики: діаметр циліндра – 75 мм; хід поршня - 73,5 мм; ступінь стиску 9,8; ефективна потужність - 51,5 кВт при частоті обертання 5200 мін-1. Мікропроцесорна система управління двигуном - "Мікас 10.3".

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Для вибору та обґрунтування параметрів робочого процесу на експериментальний стенд із двигуном 4ГЧ7,5/7,35 встановлено повний комплекс апаратури, що забезпечує такі умови:

- можливість роботи на бензині, стислому природному газі, водні, а також їх сумішах у будь-яких пропорціях;
- можливість керування складом робочої суміші при роботі на будь-якому паливі;
- можливість примусового управління величиною кута випередження запалення;
- вимірювання моменту опору на валу двигуна у всьому діапазоні зміни частоти обертання колінчастого валу ( $n = 800-5600$  хв-1);
- реєстрація тиску у циліндрі двигуна (індикаторна діаграма) з наступним визначенням індикаторних показників;
- реєстрація витрати повітря та палива;
- підтримка стабільного температурного режиму двигуна.

Крім того, автоматизована система дослідження забезпечує збирання експериментальних даних для їх оперативної обробки та створення необхідних баз даних.

Для можливості плавної зміни моменту опору на валу двигуна під час проведення випробувань стенд обладнаний електричним пристроєм навантаження МПБ-100.

Для передачі потужності від двигуна до балансирної машини використовується механічна коробка передач ВАЗ 2103, яка дозволяє працювати в широкому діапазоні частот обертання колінчастого валу двигуна, а також передачі карданної. Стенд обладнаний додатковим повітряним вентилятором 15 та додатковим теплообмінником 7, за допомогою яких можна моделювати температурний режим максимально наближений до реальних умов експлуатації. З тією ж метою на стенді встановлено глушник шуму та резонатор від штатної системи випуску

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 35   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |



для вимірювання температури мастила; 25-прилад для вимірювання температури ОГ; 26-прилад для вимірювання тиску мастила в системі змащування; 27-прилад для вимірювання частоти обертання колінчастого валу; 28-прилад вимірювання частоти обертання ротора балансірної машини; 29-замок запалювання; 30-панель приладів автомобіля; 31-перемикач виду палива; 32-рукоятка для управління дросельною заслінкою; 33-пристрій для зміни опору впускної системи; 34-пристрій для керування навантаженням на ДВЗ; 35-прилад для вимірювання опору випускної системи; 36-глушник шуму; 37-резонатор; 38-витратомір повітря; 39-ваговий пристрій для вимірювання навантаження; 40-газоаналізатор; 41-гольчастий вентиль; 42-ротаметр; 43-редуктор; 44-балон з воднем.

На експериментальному стенді з малолітражним газовим двигуном 4ГЧ7,5/7,35 встановлено систему подачі добавки до основного палива.

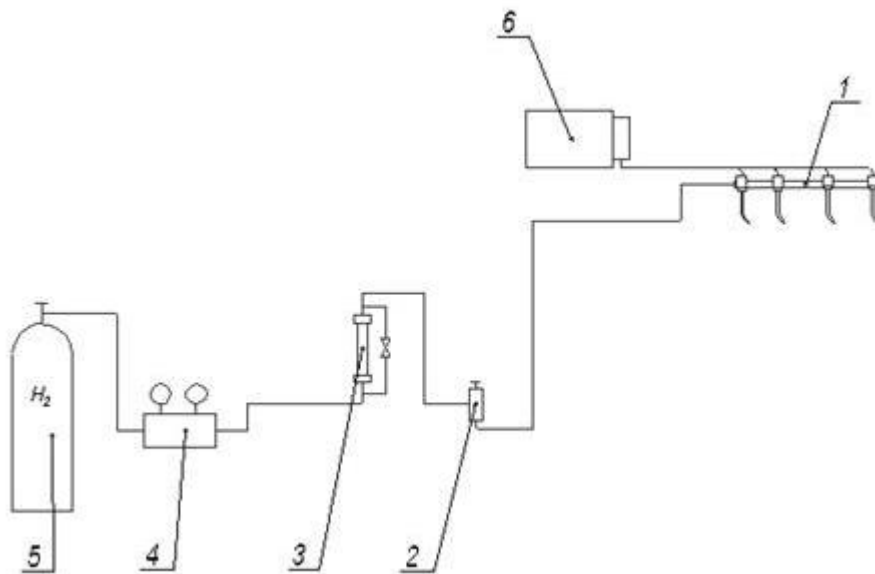


Рисунок 2.2 – Система подачі добавок до палива: 1-рампа з форсунками; 2-гольчастий вентиль; 3-ротаметр; 4-редуктор низького тиску; 5-балон із воднем; 6-електронний блок керування

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 37   |

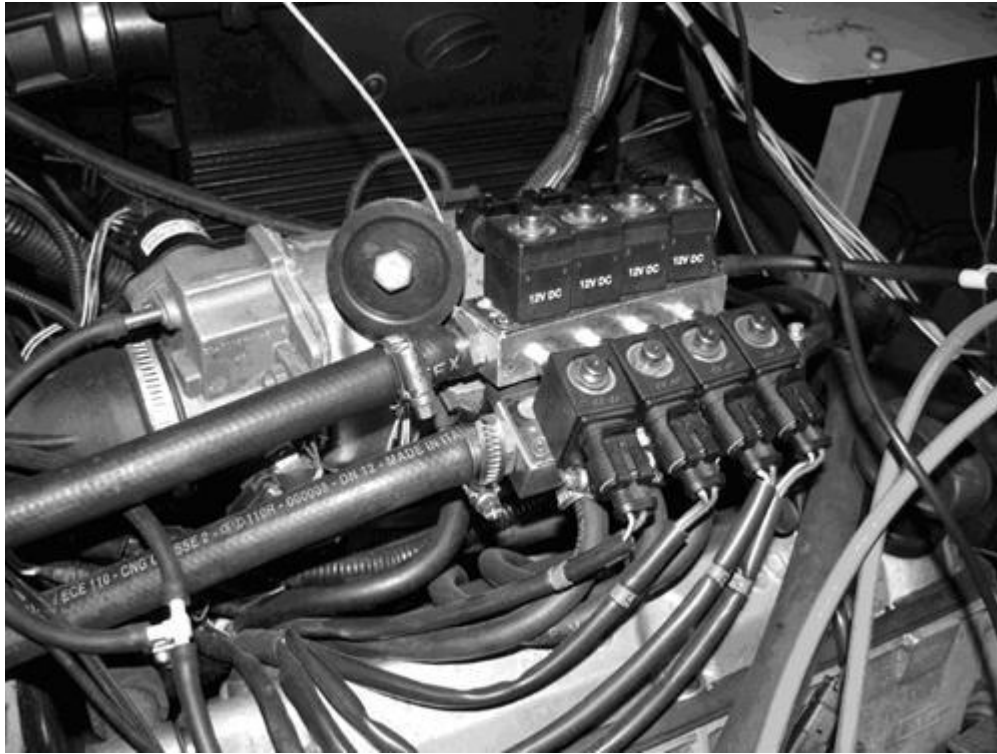


Рисунок 2.3 – Система живлення двигуна 4ГЧ7,5/7,35 паливом

Експериментальний стенд, призначений для дослідження газового двигуна із іскровим запаленням середньої потужності, створено на базі газового двигуна 6ГЧН13/14. Цей двигун, у свою чергу, отримано шляхом конвертування дизеля ЯМЗ-236 у двигун із іскровим запаленням.

Стенд оснащений системою запалювання високої енергії, системою газотурбінного наддуву, системою живлення стисненим природним газом розподіленого типу та блоком реєстрації даних.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 38   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |



внутрішнього згоряння - двигун Ленуара (1860), перші зразки турбін працювали на світильному газі, що представляє собою основному суміш водню та оксиду вуглецю з домішками деяких інших газів. Ще раніше в 1841 р. в Англії було отримано патент на двигун, працюючий на водні та кисні [11, 13, 14].

Подальший розвиток двигунобудування показало, що вигіднішим з точки зору економічних та технологічних вимог, включаючи конструкторські рішення як щодо двигуна, так і вимоги до інфраструктури обслуговування транспорту, є застосування рідкого палива, що отримується в основному з нафти.

Проте вже у 20-ті роки 20 століття вчені та інженери-дослідники, зокрема Н.Р. Рікардо, А.Ф. Бурстал провели перший цикл досліджень з застосування в поршневих двигунах в ролі палива як чистого водню, так і його сумішей з вуглеводневими паливами (бензином та дизельним паливом). Загальними цілями даних робіт було отримання експериментальних оцінок ефективності двигунів під час роботи на даних видах палива, вивчення особливостей робочого процесу та в цілому працездатності поршневих двигунів, тобто фактично зводилися до пошуків нових, у сучасній термінології альтернативних вуглеводневим, палив. При цьому враховувалися високі моторні властивості водню, зокрема, найбільше з відомих палив енергоємність на кілограм маси, що відповідає найвищим термодинамічним показникам робочого циклу; найвищий коефіцієнт дифузії, що забезпечує високий рівень рівномірності паливного заряду; гомогенність паливної суміші з повітрям; широкі межі горіння та низька енергія займання; висока швидкість поширення полум'я та мала відстань гасіння полум'я, що визначає термодинамічну ефективність використання теплоти наближенням реального циклу до теоретичного та повноту згоряння палива.

Можна відзначити, що інтерес до застосування водню як палива ДВЗ протягом 20 століття періодично посилювався та актуалізувався, що

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 40   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

пов'язано як з науковими, так і з практичними аспектами: можливістю підвищення показників ДВЗ, кризовими явищами у світі, жорсткістю норм на токсичність, очікуванням появи нових дешевих технологій отримання водню, можливостями ефективного його використання при малих добавках у вуглеводневе паливо, що забезпечить поступовий перехід до наростаючого споживання водню у міру вдосконалення технологій його здобуття, можливістю розвитку інфраструктури споживання зі зниження запасів природних вуглеводнів [9, 10].

Зокрема, у 30-ті роки за результатами проведених раніше робіт у Німеччині та Англії були створені автобуси, що працюють на водні або з його добавками в паливну суміш, які експлуатувалися в екологічно чистих зонах (заповідники). Відомо і про застосування двигунів, що працюють на водні, на дирижаблях [11].

Під час Другої світової війни роботи у цьому напрямі були припинено, однак перший вітчизняний досвід використання водню у вигляді палива для автомобілів було отримано. 1941 Інженер Б.І. Щелищ розробив пристрої, що дозволили застосовувати в автомобільних двигунах водень, що використовується в аеростатах повітряного загородження, що знизило потребу у привізному бензині.

Наступний етап широких досліджень із застосування водню в ДВЗ можна віднести до 60-х початку 70 років. 20 століття. Зокрема, було проведено широкі дослідження в США в рамках космічної програми NASA, школою І.Л. Варшавського в Інституті проблем машинобудування АН УРСР та Харківському автомобільно-дорожньому інституті.

Можна відзначити, що цей період збігся з першою енергетичною кризою 70 рр., що призвело до більшої інтенсифікації робіт у цьому напрямі. Зокрема, генеральним конструктором авіаційних двигунів Н.Д Кузнецовим було створено авіаційний двигун, що працює на водні та минулий етап дослідницьких випробувань на літаку ТУ-154. Роботами з використання

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 41   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

водню в ДВЗ займалися цілий ряд дослідників: Ю.М. Аннушкін, А.І. Міщенко, В.І. Хмиров, Г.Ф. Смаль, Є.В. Шатров, Г.В. Талда, А. Раменський та ін. Результати цих досліджень широко публікуються у 80-х роках.

Третій етап широкої уваги наукової громадськості до питань використання водню як палива для транспортних двигунів можна віднести до другої половини 90-х років. 20 століття, що пов'язано з двома причинами: перша це вичерпність природних вуглеводнів (за різних оцінок їх запасів вистачить на 50 – 100 років) і наступна проблема енергобезпеки держав та друга – очікування на отримання дешевих технологій отримання водню (ціна 1 кг. водню в даний час поки що 2 і більше разів вище за бензин).

Зокрема, останні 10-15 років інтерес до застосування водню на транспортних ДВЗ виявляють усі провідні світові автомобільні фірми-розробники: FORD, VW, OPEL, GM, TOYOTA та ін., що особливо посилюється, судячи з публікацій, наприкінці 90-х на початку 2000 р., у тому числі, у зв'язку з можливим широким використанням в ролі енергоустановок електрохімічних генераторів.

Слід зазначити, що початок 21 століття ознаменувався прийняттям у 2001-2003 рр. у промислово розвинених країнах перших великих державних програм НДДКР у галузі водневої енергетики. Наприклад, на реалізацію програм «Freedom CAR» та «Freedom Fuel», висунутих Президентом США, з федерального бюджету планувалося виділити 1,7 млрд. доларів на п'ять років на створення водневого автомобільного транспорту на паливних елементах, водневих автономних систем енергозабезпечення та інфраструктури паливозабезпечення. У країнах ЄС також передбачається бюджетне фінансування НДДКР у розмірі понад 200 млн. € на рік. У Японії проект "WE-NET" розрахований до 2025 р. при фінансуванні 4 млрд. \$. Крім держави у фінансуванні виконання зазначених програм, беруть участь приватні компанії, причому їх внесок у 2÷3 рази перевищує асигнування з державних бюджетів [11].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 42   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Таким чином, починаючи з 2000 р., практично всі великі закордонні автомобільні та енергетичні компанії активно проводять НДДКР у напрямі створення транспортної енергетики, орієнтованої на застосування водню, розраховані на період до 2030 р. та націлені, у тому числі, на зменшення залежності від імпорту традиційних вуглеводневих енергоресурсів, що відповідає інтересам енергобезпеки окремих держав.

Разом з тим, можна відзначити, що до теперішнього часу єдиного загальноприйнятої думки щодо водневої енергетики в цілому та застосування водню в автомобільних ДВЗ, зокрема, не вироблено.

Існують як прихильники даного напрямку розвитку енергетичного машинобудування, і противники. Показником цього є, наприклад, аналітична робота [10], в якій автори активно опонують поглядам на перспективність цього напрямку. Основним аргументом при цьому є факт практичної рівності ККД всього технологічного ланцюжка від одержання до застосування водню з урахуванням усіх енергетичних витрат.

Наприклад, при розгляді ефекту застосування водню в двигунах автомобілів необхідно враховувати екологічні ефекти та витрати енергії, що мають місце при його виробництві як зовнішніми технологіями, і бортовими (автономними) генераторами. Аналогічні погляди висловлюють низка інших учених: академік В.І. Суботін [11], американські експерти в галузі енергетики D. Keith та A. Farrell [13].

Детальний розгляд та аналіз відомої літератури, що характеризує сучасний стан знань про ефективність застосування водню, показує деяку неповноту, неточність, інколи ж та суперечливість даних.

Найбільш повно результати досліджень із застосування водню в як добавок у вітчизняній літературі представлені в монографії А.І. Міщенко, у якій наведено як результати досліджень показників теоретичного циклу, результати численних експериментальних досліджень, так і досягнуті практичні результати щодо покращення показників автомобілів при

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 43   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

застосуванні водню, у тому числі у процесі дослідної експлуатації ряду автомобілів.

У відомій зарубіжній літературі найбільш повний виклад усіх аспектів застосування водню в ролі палива для поршневих ДВЗ наведено в аналітичній оглядовій роботі [12], з великої бібліографії якої, що включає 281 роботу, більша частина з яких виконана в 90 - 2000-і рр., видно великий інтерес до наукових та практичних питань використання водню. Можна зазначити, що з питань, що стосуються теми справжньої роботи, у цитованій роботі обговорюється певна спірність висновків, пов'язаних з оцінкою детонаційної стійкості водню та наступна з цього умовність запровадження метанового числа, як показники детонаційної стійкості газових палив. Крім того, можна відзначити також, що розглядаючи горіння водню, автори не відображають результатів фундаментального дослідження, виконаного ще 40 рр. минулого століття О.Б. Налбандяном та В.В. Воєводським.

Розглядаючи питання застосування водню, слід зазначити та напрямок, що з використанням синтез-газів, тобто газів до складу яких входить водень, оксид вуглецю CO, невеликі кількості метану та ін. домішок, які також відносять до альтернативних палив [11]. Синтез-гази отримують різними способами з вуглеводнів (метану, бензину і т.д.), спиртів (метиловий, етиловий) [2]. Цей вид палив відомий досить давно, проте останні роки йому приділяється велика увага, оскільки є важлива можливість отримання їх у автономних (бортових) генераторах, що вирішує проблему створення інфраструктури обслуговування.

У роботі [4] наведено порівняння показників роботи іскрового ДВЗ при використанні в якості палива бензину, природного газу та синтетичного газу, що складається переважно з CO (52%) та H<sub>2</sub> (44%). Було показано, що при роботі на синтетичному газі відбувається зниження потужності ДВЗ, приблизно, на 20 і 30% порівняно з використанням природного газу та бензину, відповідно. При цьому емісія CO та CH при роботі на синтетичному

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 44   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

газі були незначні (на порядок менше, ніж на природному газі та бензині), проте концентрація NOx у відпрацьованих газах істотно зростає.

Розгляд напрямів досліджень, пов'язаних із аналізом перспектив застосування альтернативних палив для автомобільних двигунів, дозволяє відзначити, що у світі вирішення цього питання схиляється на користь застосування водню та водневонасичених газів [12-14]. Таким чином, інтерес до різних аспектів застосування водню та водневмісних газів в даний час зберігає свою актуальність, як через недостатнє наукове знання, так і неоднозначність практики його застосування. Це впливає, зокрема, з аналізу політичних рішень урядів низки країн, що відображають інтерес до питань національної енергобезпеки, планованих напрямів розвитку енергетики, зокрема, їх наукового обґрунтування, а також на підставі розгляду виконаних протягом останніх років робіт.

Виконаний аналіз сучасного стану та шляхів вдосконалення показників поршневих ДВЗ застосуванням водню показує, що, незважаючи на велику кількість відомих дослідних та дослідно-конструкторських робіт, в даний час відсутній загальноприйнятий підхід до вирішення цього питання, наукове узагальнення у вигляді формальних рекомендацій та розрахункових методів оцінки показників ДВЗ при застосуванні водню та його добавок у вуглеводневе паливо. Відомі дослідження мають експериментальний характер і відображають, як правило, конкретні рішення для досліджуваного типу двигуна, не розкриваючи загальних закономірностей, зокрема, горіння вуглеводневих палив у присутності водню [12]. Так, наприклад, у класичному підручнику містяться деякі загальні відомості, а наведені емпіричні розрахункові залежності не достатні для практичного застосування, оскільки не містять конкретних величин витрати бензину та водню у фізичній розмірності, що визначає режим роботи ДВЗ.

Загалом огляд відомої літератури та аналіз напрямів та перспектив розвитку двигунів транспортних засобів дозволяє зробити наступні висновки:

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 45   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

поршневі ДВЗ в найближчі 30-50 років не мають альтернативи і, отже, всебічне дослідження шляхів їх удосконалення залишається актуальним завданням;

в останні 20-30 років відбулися дуже значні зміни в галузі конструктивної досконалості ДВЗ, зокрема, електронізації його систем. При цьому всі відомі дані щодо застосування водню отримані при використанні механічних систем, характерних для рівня техніки 60-70 рр. минулого століття. Тому доцільним є уточнення результатів досліджень та оцінки можливостей ефектів впливу водню на основі сучасних комплектацій двигунів, насамперед системою електронного управління та розподіленого упорскування палива;

відсутнє необхідне для закінченого наукового дослідження узагальнення результатів досліджень у вигляді доступних у практиці конструкторських розробок математичних моделей і, як наслідок – інженерна методика розрахунків показників ДВЗ при додаванні водню в бензоповітряну суміш при зміні його частки в суміші до 100%, застосовна на етапі попереднього конструкторського аналізу оцінки ефектів впливу водню на показники ДВЗ;

не вивчені з належним ступенем наукової глибини опрацювання питання згоряння БВВС у циліндрі ДВЗ, зокрема, при роботі двигуна на режимах часткових навантажень, які відповідають міському циклу руху автомобіля;

потребують подальшого вивчення питання хімічної активації горіння воднем, особливо при його добавках у малих кількостях (промотування горіння), а також умов та ефектів його застосування в ДВЗ;

основні нормативні та програмні документи (Перелік критичних напрямів України, Основні напрями розвитку науки та техніки України, Стратегія розвитку автомобільної промисловості, а також рішення урядів низки провідних країн) вказують на необхідність та доцільність подальшого

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

теоретичного та експериментального вивчення процесів організації та спалювання вуглеводневих палив, насичених воднем, з різним співвідношенням горючих компонентів, необхідних для досягнення практично значних показників;

з часу проведення досліджень застосування водню у складі автомобіля з'явилися нові ефективніші технології отримання водню, використання яких як автономні системи сукупності з удосконаленням конструкції ДВЗ та їх систем може бути досить ефективним для практичної реалізації;

Проведений огляд літературних даних дозволив зробити висновок про доцільності постановки та виконання досліджень як процесів горіння сумішей вуглеводнів з воднем та узагальнення їх результатів у вигляді інженерної розрахункової методики, так і різних варіантів практичного застосування водню в ДВЗ з урахуванням сучасних та перспективних технологій його отримання та зберігання. Вирішення цих питань у науковому плані дозволить підготувати та використати при необхідності в майбутньому апробовані та підготовлені до застосування рішення та підходи та загалом оцінити проблему спроможності водневої енергетики в застосуванні до автомобільного транспорту.

### 2.3 Застосування газу Брауна

«Газ Брауна, що часто позначається як ННО або гримучий газ (англ. Browns Gas, ННО gas, fire damp, detonating gas, oxyhydrogen gas) – це газ, що складається з 2 частин газоподібного водню та однієї частини кисню» [11].

Молекулярний водень є надкаталізатором для різних видів палива на основі вуглеводнів. Зареєстровано підвищення потужності, пробігу та чистіше горіння (зменшення шкідливих викидів) при введенні газ Брауна у впускний колектор [10, 12].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 47   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Детальні дослідження на тему проводив Юл Браун, який побудував демонстраційний автомобіль і отримав на свою розробку патент США з підтвердженням експерименту. Цей пристрій складається з електролізера, циркулярного резервуару, оптимізатора, системи керування. Спосіб виділення газу ґрунтується на явищі електролізу води. Встановлений циркулярний резервуар призначається для відділення газу від води, він потрібний також для постачання газогенератора електролітом. Слід зазначити дослідження НАСА у 2012 році. Метою досліджень було визначення впливу на економічність та екологічність двигуна добавок газу Брауна (гідрогена), води та спирту до бензину шляхом упорскування їх у впускний колектор.

За результатами досліджень було зроблено висновки: добавка газу Брауна значно впливає на робочий процес двигуна, при цьому спостерігається підвищення економічності. Дослідження також показали збільшення швидкості згоряння паливоповітряної суміші [10].

Відомо, що у двигунах внутрішнього згоряння на окремих режимах роботи відбувається неефективно, до таких режимів належать режим холостого ходу двигуна та режими глибокого дроселювання. Як показує практика, саме ці режими роботи визначають токсичність та економічність двигуна, тому що на їхню частку припадає до 60% всього часу експлуатації двигуна. З цієї точки зору, найбільш цікавим надається використання добавок газу тільки на часткових режимах роботи двигуна внутрішнього згоряння [8, 10, 12].

Тема газу Брауна вже відома в досить широкому колі, але водночас час належить ще багато вивчити - наприклад, доцільність його застосування у двигунах внутрішнього згоряння як добавки до палива. Так, у журналі Popular Mechanics була опублікована стаття про дослідження впливу добавок гримучого газу в паливо дизельного двигуна, що виявили можливість

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 48   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

зниження витрати палива при додаванні гримучого газу після проведення відповідної модернізації двигуна [12].

Результати попередніх досліджень показали, що застосування гримучого газу, навіть у невеликих кількостях як добавка до основного палива, помітно розширює межі стабільного горіння паливоповітряної суміші. Збільшення коефіцієнта надлишку повітря дозволяє помітно підвищити економічність ДВЗ, а також покращити його екологічні характеристики.

#### Висновки по розділу

Правильно обрана методологія досліджень використання стисненого газу в двигунах внутрішнього згорання дозволяє адекватно дослідити всі аспекти використання стисненого газу, виявити основні недоліки, вади, та дослідити умови їх усунення і запропонувати оновні напрями вдосконалення та покращення використання стисненого газу в якості палива.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 49   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі будуть розглянуті два дослідження, які показують вплив природного газу на потужність двигуна з іскровим запаленням, а також буде зроблено висновок на основі цих досліджень.

### 3.1 Дослідження на основі одноциліндрового двигуна з іскровим запалюванням

Бензин є одним із джерел енергії для двигуна внутрішнього згорання. Однак споживання цього джерела енергії збільшилося із збільшенням чисельності населення у світі. Крім того, двигун внутрішнього згорання також є одним із факторів, що спричинили забруднення навколишнього середовища.

Продукти згорання від ДВЗ дуже шкідливі, і тому з ними намагаються боротися. Основними шкідливими викидами рідкого палива є викиди CO та NOx [1]. Тому автомобільні експерти запровадили альтернативне паливо, і це альтернативне паливо тепер впроваджується у двигун внутрішнього згорання. Альтернативні види палива, які в даний час впроваджуються, є природним газом, біодизель, водневий газ і т. д. Причиною введення цих альтернативних видів палива є зменшення глобального потепління, викликаного викидами, і подолання проблем зі виснаженням нафтових запасів.

Основна увага в цьому дослідженні прикута до природного газу. Природний газ також одержують з копалин палива, яке схоже на рідке або дизельне паливо. Однак природний газ можна розглядати як відновлювану енергію через рециркуляцію метанового газу [2]. Але потужність, яка

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 50   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

отримується з природного газу, не така висока, як у рідкого палива. Докладніше властивості газу можна побачити з Таблиці 3.1 [3].

Таблиця 3.1 – Властивості природного газу

| Склад          | Об'єм (%) |
|----------------|-----------|
| Метан          | 95,3      |
| Етан           | 2,16      |
| Пропан         | 0,19      |
| Н-бутан        | 0,02      |
| Ізо-бутан      | 0,02      |
| Н-пентан       | 0         |
| Ізо-пентан     | 0         |
| Гексани плюс   | 0         |
| Азот           | 1,86      |
| Двооксид водню | 0,44      |
| Кисень         | 0         |
| Водень         | 0         |

З таблиці 3.1 випливає, що основною речовиною газу є метан. Як згадувалося раніше, метан можна розглядати як відновлюване паливо та застосовувати у двигуні внутрішнього згорання. Реалізація природного газу в двигуні внутрішнього згорання дає зменшення за показниками викидів шкідливих речовин в атмосферу, але основна проблема полягає в тому, що він дає нижчу потужність порівняно з бензином та дизельним паливом [4, 5]. Ця робота була спрямована на дослідження продуктивності природного газу в одноциліндровому двигуні, і вона показала, що на продуктивність CNG двигуна в порівнянні з класичним ДВЗ впливають різні властивості, показані нижче в Таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Властивості натурального газу і рідкого палива

| Властивість                    | Рідке паливо | Газ   |
|--------------------------------|--------------|-------|
| Густина(кг/см <sup>3</sup> )   | 750          | 0,725 |
| Теплотворна здатність (МДж/кг) | 44           | 45    |
| Октанове число                 | 95           | 120   |
| Температура займання           | 280          | 650   |

### 3.1.1 Послідовність дослідження

Дослідження було присвячено аналізу потужності двигуна при додаванні до нього метану. Двигун, що випробовується, був обладнаний комплектом обладнання, яке ставиться при доведенні автомобіля для експлуатації на стисненому природному газі. Система була випробувана з використанням гідравлічного динамометра, який працює на двох джерелах палива. Як паливо використовується газ та рідке паливо. Дані цих двох різних видів палива були зіставлені та проаналізовані. На Рисунку 3.1 наведено принципову схему динамометра з двигуном та комплектом для переобладнання автомобіля.

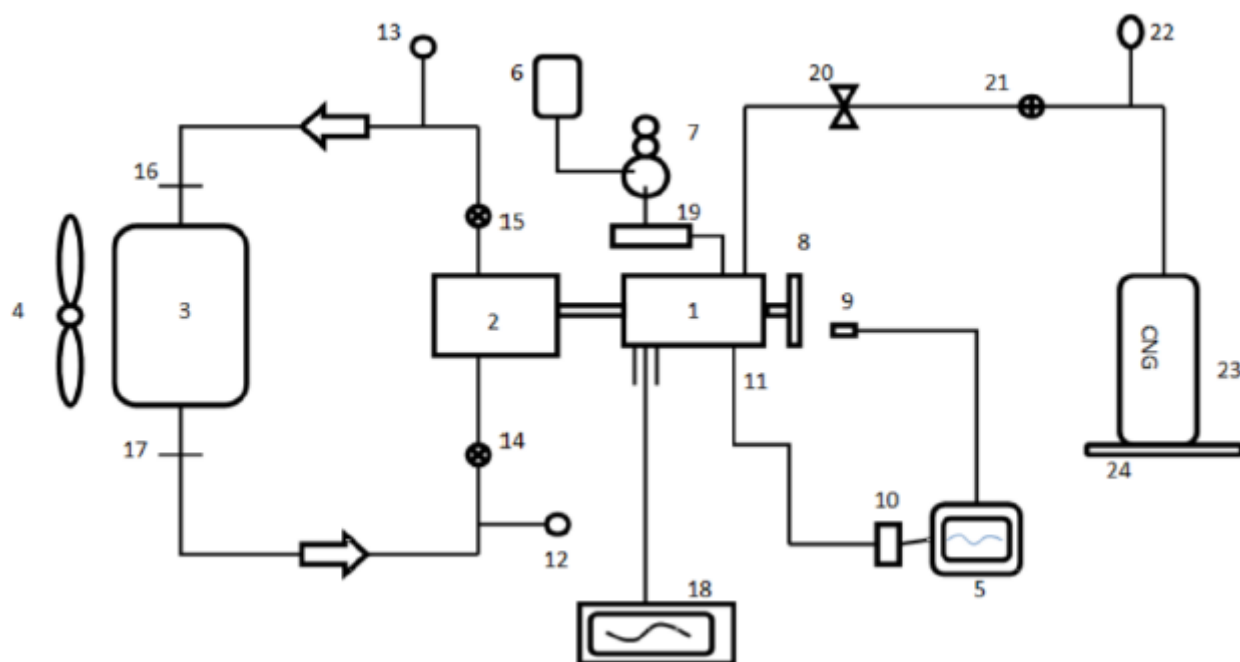


Рисунок 3.1 – Схема експериментальної установки: 1 – двигун; 2 – гідравлічний насос; 3 – гідравлічний бак; 4 – вентилятор охолодження; 5 – монітор для аналізу процесу горіння; 6 – паливний бак; 7 – паливний резервуар; 8 – колінчастий вал; 9 – декодер для колінчастого валу; 10 –

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 52   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |



|                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| Діаметр поршня         | 67 мм               |
| Хід поршня             | 52 мм               |
| Такт                   | 4 такта             |
| Довжина шатуна         | 91 мм               |
| Робочий об'єм циліндра | 183 см <sup>3</sup> |
| Потужність             | 2,6 КВт/3600 об/хв  |

### 3.1.2 Результати дослідження

З проведених експериментів було проаналізовано дані при подачі газу в одноциліндровий двигун. Потім дані порівнювалися з даними рідкого палива (бензину). Результати експерименту були зосереджені на потужності, тиску в циліндрі та об'ємній ефективності (ККД). Експеримент проводився шляхом докладання тиску від гідравлічного насоса до двигуна, що перевіряється. У таблиці 3.4 показано тиск, показаний манометром гідравлічного насоса.

Таблиця 3.4 – Експериментальні дані

| Обороти двигуна,<br>об/хв | Тиск рідкого палива,<br>бар | Тиск стиснутого<br>природного газу, бар |
|---------------------------|-----------------------------|---|
| 2000                      | 6                           | 2                                       |
| 2500                      | 9                           | 4                                       |
| 3000                      | 8                           | 5                                       |
| 3600                      | 10                          | 6                                       |
| 4000                      | 12                          | 8                                       |

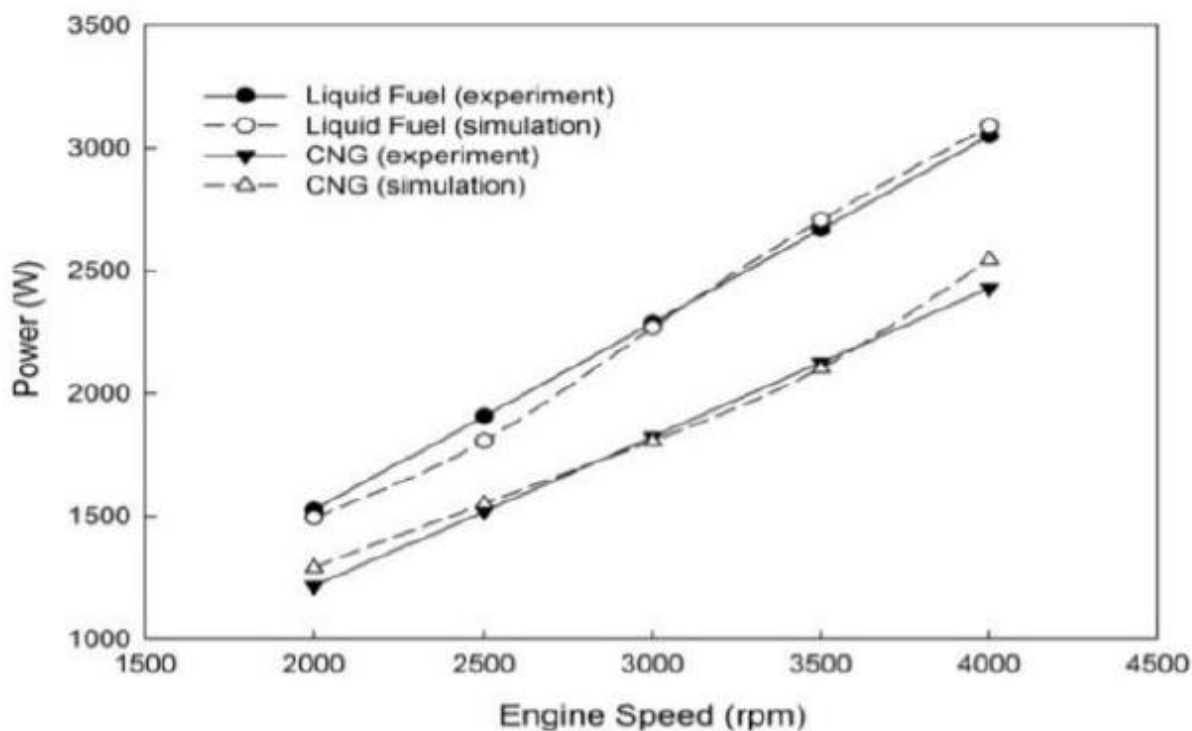


Рисунок 3.2 – Продуктивність двигуна на різних видах палива

З результатів, показаних на Рисунку 3.2, продуктивність рідкого палива вища, ніж у газу. У низьких обертах двигуна близько 2000, рідке паливо показує більш високу вихідну потужність порівняно з CNG. Таку ж поведінку потужності ми спостерігаємо на піку потужності, це приблизно 4000 обертів на хвилину. Виходячи з експериментальних даних, показаних у таблиці 3.4, можна сказати, що максимальна потужність для нашого двигуна становить 2,6 кВт при 3600 об/хв. Тому, як показано на Рисунку 3.2, в цьому експерименті рідке паливо, що використовується в якості джерела енергії при 3600 об/хв, дає вихідну потужність близько 2,7 кВт.

Коли в ролі джерела енергії використовувався газ, вихідна потужність двигуна при 3600 об/хв становила лише 2,2 кВт, що показує падіння потужності силового агрегату приблизно на 18,5%. Імітаційну модель також було зроблено, щоб підтвердити результат для скептиків, які відкидали падіння потужності. На Рисунку 3.2 показано штрихову лінію, якою

позначено результат моделювання. Моделювання було виконано з урахуванням зміни параметрів двигуна.

Результат моделювання показує такі самі результати на низькій потужності. Найменша потужність для CNG обумовлена кількома факторами. Одним із основних факторів є об'ємний ККД. Об'ємний ККД CNG нижче, ніж у рідкого палива [2]. ККД двигуна показаний Рисунок 3.3.

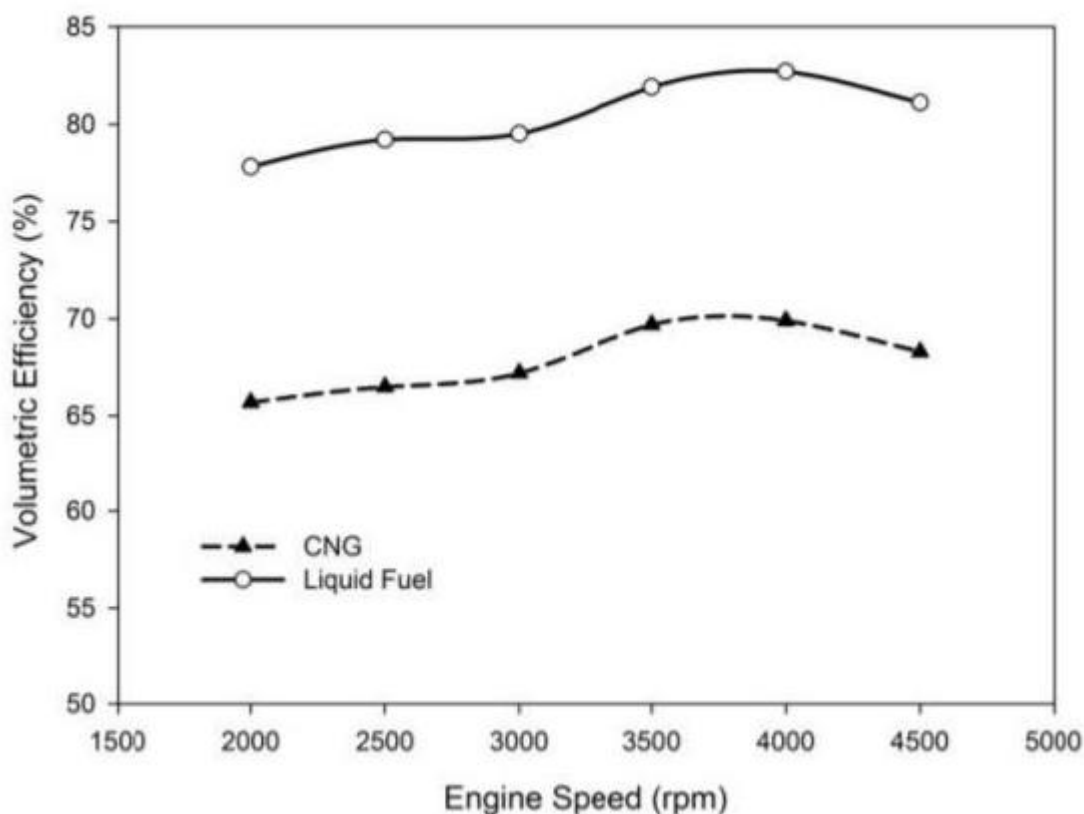


Рисунок 3.3 – Об'ємний ККД

Згідно з Рисунок 3.3, об'ємний ККД для цього тестового двигуна високий, коли в якості джерела енергії використовувалося рідке паливо. Однак, коли газ був пущений до двигуна, це призвело до зменшення ККД у порівнянні з рідким паливом. Нижчий ККД обумовлений фізичними властивостями газів. Під час упорскування CNG, який складається з метану в якості основної частки, він не має ефекту охолодження. Цей результат обумовлений тим, що CNG знаходиться у газовій фазі і є паром при температурі навколишнього середовища.

Отже, без охолодження газу ККД стає нижчим порівняно з бензиновим паливом. На Рисунку 3.3 також показано, що максимальний об'ємний ККД для кожного виду палива досягається на 3600 об/хв. Це вказує на те, що максимальна потужність також досягається при 3600 об/хв. З цього експерименту випливає, що максимальний ККД буде отриманий за максимальної вихідної потужності двигуна.

Крім об'ємного ККД, тиск усередині циліндра також дає різний результат для рідкого палива та метану. Тиск усередині циліндра спостерігається на всіх щаблях двигуна, але основна увага приділяється стадії запалювання. Згідно з попередніми дослідженнями, коли двигун використовував газ як джерело енергії, на стадії запалення тиск усередині циліндра нижче, ніж у рідкого палива.

На Рисунку 3.4 показано вплив CNG на тиск усередині циліндра двигуна. На основі порівняння графіків на Рисунках 3.3 і 3.4 було показано, що тиск усередині циліндра з CNG-паливом нижче, ніж рідкого палива при різних оборотах двигуна. Ця різниця тисків показує ту ж поведінку з вихідною потужністю двигуна, що тестується, де тиск всередині циліндра з газом зазвичай нижче, ніж у рідкого палива.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 57   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

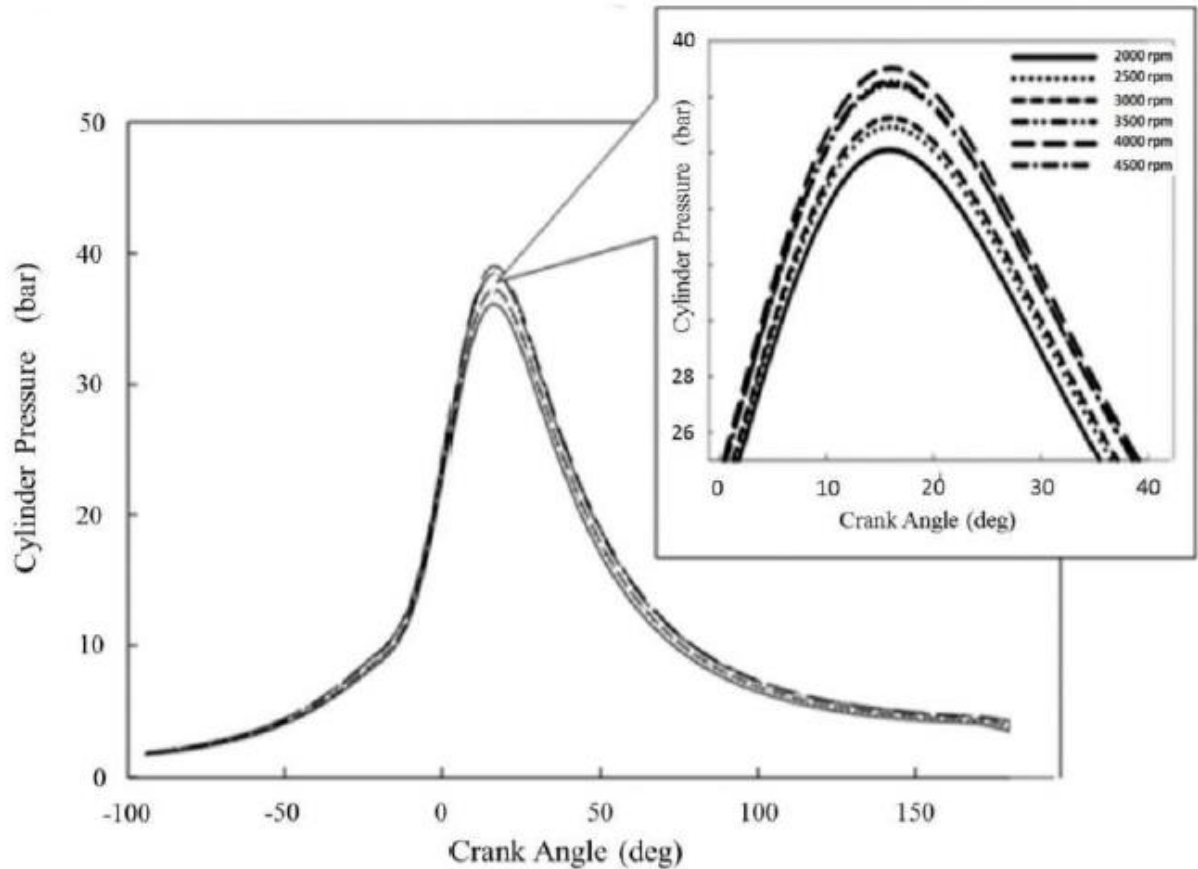


Рисунок 3.4 – Вплив рідкого палива на тиск у циліндрі двигуна

Тиск усередині циліндра для рідкого палива показано на Рисунку 3.4, а для природного газу на Рисунку 3.5. Результати показують, що тиск усередині циліндра збільшувався зі збільшенням частоти обертання двигуна. Різний внутрішній тиск, створюваний на стадії займання між цими типами палива, обумовлений різною щільністю та об'ємним ККД. З таблиці 3.2 видно, що щільність рідкого палива вища, ніж в CNG. Щільність вказує кількість чи масу фракції палива усередині камери згорання.

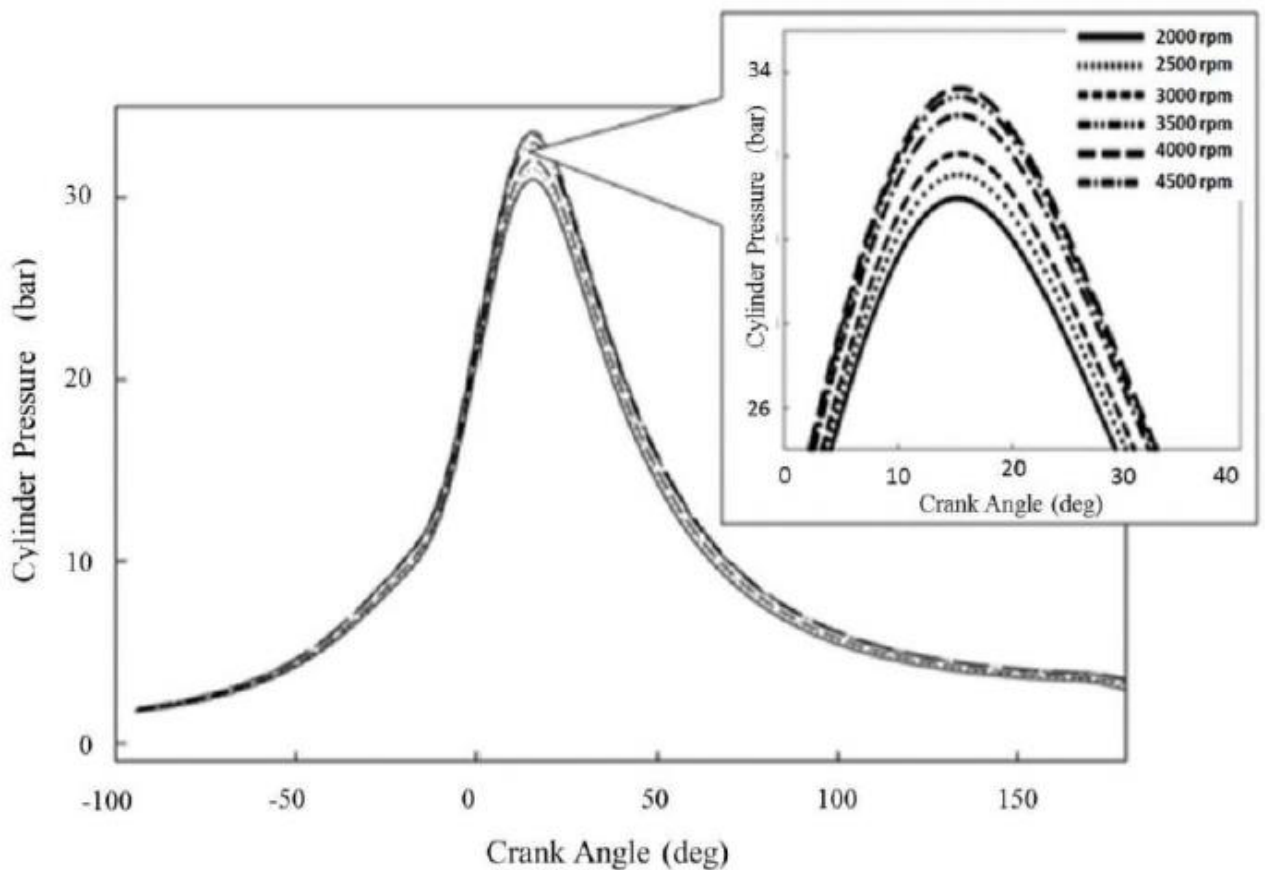


Рисунок 3.5 – Вплив стиснутого газу на тиск у циліндрі двигуна

Вища щільність вироблятиме велику кількість згорілого палива, а також створить більш високу температуру на стадії займання. Ця умова пояснює, чому швидкість теплопередачі рідкого палива вища, ніж у газу. Вплив CNG на швидкість теплопередачі для випробуваного двигуна показано на Рисунку 3.7. На підставі результатів, показаних на Рисунках 3.6 і 3.7 обидва види палива (рідке паливо і CNG) показали, що швидкість теплопередачі збільшилася слідом за швидкістю двигуна. Графіки показують, що використання рідкого палива спричиняє високу температуру двигуна (у камері згоряння або циліндрі).

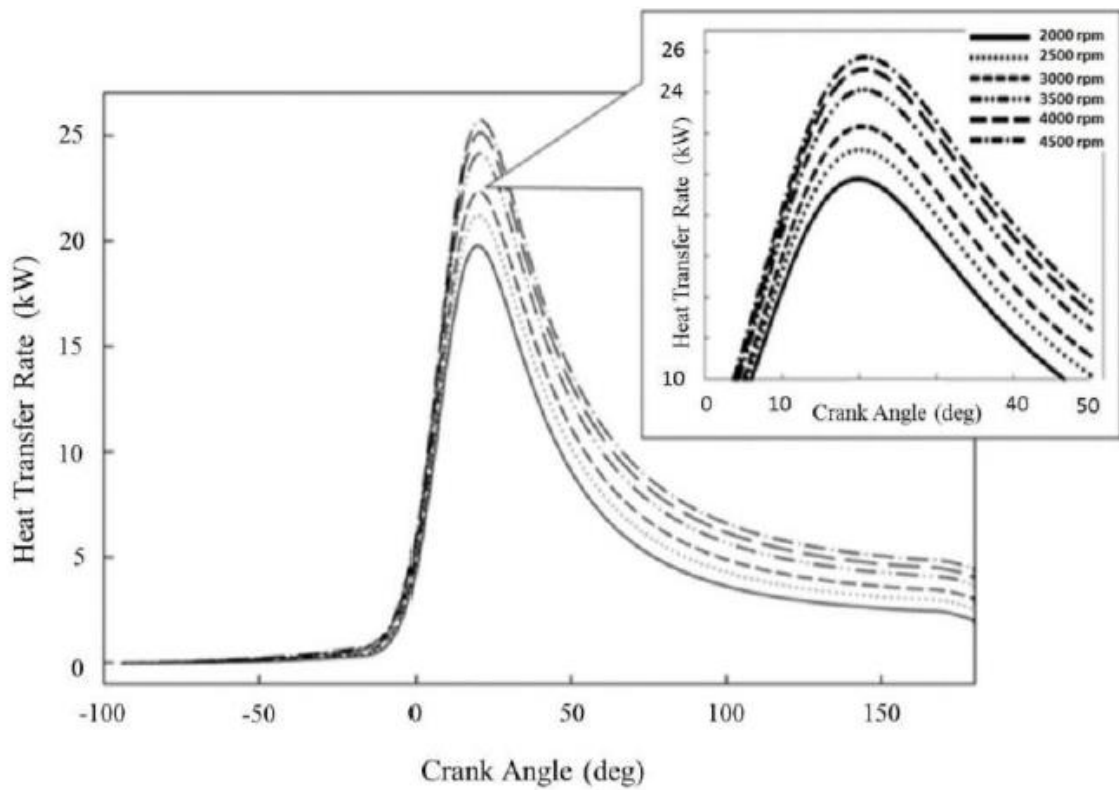


Рисунок 3.6 – Вплив рідкого палива на швидкість теплопередачі за різних кутів повороту колінчастого валу

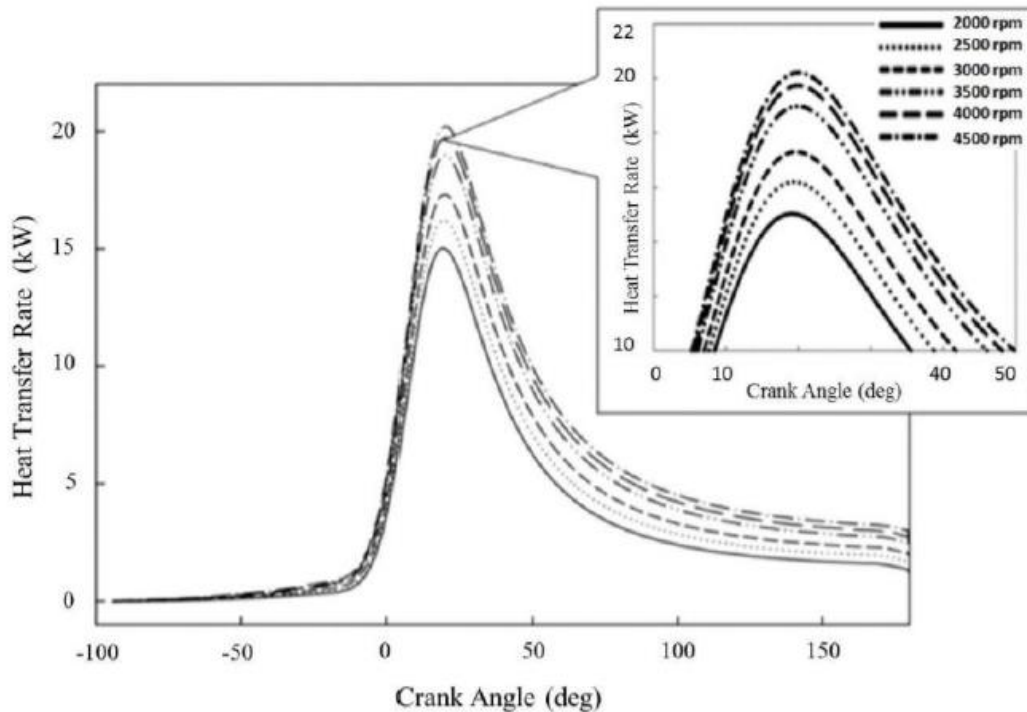


Рисунок 3.7 – Вплив стиснутого газу на швидкість теплопередачі при різних кутах повороту колінчастого валу

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Коли в ролі палива використовується газ, швидкість теплопередачі знижується приблизно на 5 кВт порівняно з рідким паливом. З Рисуноків 3.6 і 3.7 випливає, що найвища швидкість теплопередачі для рідкого палива становить 27 кВт при частоті обертання двигуна 4500 об/хв. В інших випадках швидкість передачі тепла при тій же частоті обертання двигуна становить лише 20 кВт для CNG.

### 3.1.3 Висновок з урахуванням поставленого експерименту

У цьому дослідженні було обрано одноциліндровий двигун з іскровим запалюванням для вивчення впливу CNG на двигун з іскровим запалюванням. Гідравлічний динамометр був використаний для вивчення продуктивності газу та рідкого палива. Використання датчика відноситься до випробування для вилучення даних на етапі запалювання рідкого палива і газу. Тепло, що генерується обома типами палива, також було досліджено для того, щоб визначити, яке паливо викличе більш високу теплопередачу двигуна. З цього дослідження випливає, що тиск усередині циліндра при використанні метану на 20% менше, ніж у бензину. CNG паливо також дає на 23% менше швидкості теплопередачі порівняно з бензином. Результати пояснили, чому газ виробляє на 18,5% менше енергії, порівняно з рідким паливом (бензином). Тому необхідно використовувати деякі вдосконалення, щоб використовувати метан як паливо.

Виходячи з експерименту, наведеного в цьому дослідженні, стиснений природний газ (CNG) дає низькі характеристики порівняно з рідким паливом. Потужність стисненого газу в порівнянні з рідким паливом знижується приблизно до 18,5%. Основна причина відсутності потужності при використанні газу полягає в об'ємному ККД. Об'ємний ККД газу нижчий, ніж у рідкого палива, через його фізичні властивості. Коли порівнюється результат експерименту тиску всередині циліндра видно, що газ має нижчий

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 61   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

тиск, ніж рідке паливо на стадії займання. Тиск усередині циліндра для рідкого палива при максимальній частоті обертання двигуна (4500 об/хв) становить близько 40 бар, а для стиснутого природного газу при тій же частоті обертання двигуна тиск усередині циліндра становить лише 32 бар. Нижчий тиск, одержуваний при згорянні газу, обумовлений низькою щільністю самої речовини в порівнянні з рідким паливом. Щільність також призводить до низького тепловиділення, що генерується газом. Низьке тепловиділення ґрунтується на температурі під час згорання. Швидкість теплопередачі до стінки при використанні газу також нижча, ніж рідке паливо. В експерименті швидкість теплопередачі газової речовини при 4500 об/хв становить 20 кВт. Однак швидкість теплопередачі на рідкому паливі вища (26 кВт) за тієї ж частоти обертання двигуна. Отже, ККД газу нижчий, ніж у рідкого палива, але з точки зору тепла, що генерується, CNG дає більший термін служби двигуна через низьку швидкість теплопередачі до стінок. Для збільшення потужності двигуна на стиснутому природному газі розробляється можливість використання попередньої камери згорання та системи прямого впорскування для збільшення вироблення енергії розробляється можливість використання попередньої камери згорання та системи прямого впорскування для збільшення вироблення енергії.

### 3.2. Дослідження потужності двигуна на основі 1,7 літрового турбованого двигуна

У цій роботі досліджується потенціал комбінованого упорскування стисненого природного газу та бензину на основі 1,7-літрового турбованого двигуна з турбонаддувом та найкраща робоча характеристика двигуна для кращої ефективності перетворення каталітичних нейтралізаторів. Стиснутий природний газ (CNG) в ролі альтернативного палива використовується в двигунах з іскровим запалюванням для покращення витрати палива та

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 62   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

зменшення вихлопних газів. Поліпшення дали більше переваг у викидах, але це знизило продуктивність двигуна. Метан має більш високе октанове число та опір детонації, ніж бензин, і, отже, двигуни, призначені для роботи на природному газі, можуть мати вищі ступені стиснення і, отже, вищі показники ефективності. Двопаливний двигун з турбонаддувом - це нова концепція, яка пропонує взяти переваги від двигуна, що працює на метані і позбутися його недоліків. Дане дослідження відкриває дуже цікаві перспективи для задоволення майбутніх норм викидів з використанням тільки трикомпонентного каталізатора, оскільки стехіометрична умова згоряння підтримується у всьому робочому діапазоні двигуна.

### 3.2.1 Загальна інформація про двопаливний турбований двигун

Стиснутий природний газ (CNG) є альтернативним паливом, яке можна використовувати як заміну бензину, дизельного палива або пропану. Це альтернативне паливо має багато переваг у боротьбі із забрудненням навколишнього середовища та повітря [1]. Він вважається екологічно чистою альтернативою цим видам палива і набагато безпечнішим у разі витоку палива. Природний газ легший за повітря, тому при витоку або розливі швидко розсіюється [2]. Використання повного потенціалу природного газу як альтернативного палива є засобом зниження викидів вихлопних газів. Це робиться шляхом стиснення природного газу (в основному метану) [3]. Було встановлено, що двигуни, що працюють на CNG, з точним контролем співвідношення A/F та спеціальними каталізаторами для вихлопних газів, виконали каліфорнійські норми вихлопу SULEV1 [4]. Переваги метану як палива вже були визначені низкою досліджень; Стиснутий природний газ як цікава альтернатива рідкому викопному паливу знижує викиди CO<sub>2</sub> та забезпечує чистоту джерел енергії для транспорту [5, 6].

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 63   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Недоліком використання природного газу двигунах є його нижча швидкість полум'я, що призводить до підвищення температури внутрішніх компонентів двигуна. Крім того, низький об'ємний ККД і щільність енергії газу знижує вихідний крутний момент двигуна в безнаддувних двигунах [4].

Двопаливні двигуни з іскровим запаленням, що вже є на ринку, оснащені незалежними системами впорскування газу і рідкого палива. Вони можуть працювати з газом або рідким паливом, але не повністю використовують потенціал кожного палива. Про цю нову стратегію упорскування було відомо ще на початку 2000-х років, вона складається з упорскування газоподібного палива, що має високе октанове число, та рідкого палива, бензину з високою питомою енергією, щоб отримати велику кількість переваг обох видів палива.

Двигун з турбонаддувом виробляє більшу потужність, ніж безнаддувний двигун. Це може значно покращити ставлення потужності до ваги двигуна. Турбіна витягує витрачену кінетичну та теплову енергію з високотемпературного потоку вихлопних газів та виробляє енергію для приводу компресора за рахунок невеликого збільшення втрат при перекачуванні. Крім того, використання стиснутого природного газу в двигуні з турбонаддувом з іскровим запалюванням має й інші переваги, такі як високий опір детонації та висока питома вихідна потужність. З іншого боку, порівняно з бензиновим двигуном, для безнаддувних двигунів, що працюють на метані, об'ємний ККД зменшується приблизно на 4–10% через його нижчу питому енергію, що знижує вихідний крутний момент двигуна. Крім того, ймовірність утворення відкладень на поверхні впускних клапанів вища, оскільки ефект очищення бензину відсутній.

Нижча швидкість полум'я також призводить до підвищення температури внутрішніх компонентів двигуна.

Вчені з товариства SAE досліджували комбіноване упорскування бензину і газу в двигун з іскровим запалюванням без наддуву з

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 64   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

упорскуванням палива у колектор впускний. Вони вивчили тенденцію до детонації змішаного палива та дійшли висновку, що вона нижча, ніж для бензину, і час запалення менший. Удосконалені параметри запалення та стехіометричне співвідношення повітря та палива призводять до підвищення теплової ефективності приблизно на 10–27% порівняно з бензиновим двигуном.

Також у багатьох роботах були зроблені дослідження на основі ефекту комбінованого впорскування бензину та метану у турбований двигун з іскровим запалюванням та впорскуванням бензину та метану у впускний колектор. Вони збільшили рівень стиснення базового двигуна з 9,5 до 11,5. Було зроблено висновок про те, що через більш високу термічну та об'ємну ефективність по відношенню до бензину та метану, крутний момент двигуна збільшився при комбінованому впорскуванні. Далі було досліджено ефект змішаного впорскування бензину і CNG в двигуні з іскровим запалюванням і турбонаддувом, з безпосереднім впорскуванням бензину всередину циліндра і отвором для впорскування метану у впускний колектор. Ця методика зміцнила сідла клапанів для запобігання ерозії при високих теплових навантаженнях. Дослідники дійшли висновку, що при комбінованому впорскуванні бензину і газу крутячий момент на виході двигуна вищий, ніж у звичайному бензиновому двигуні.

Momeni Movahed [13] провів експериментальне дослідження на двигуні з турбонаддувом. Він вказав на деякі проблеми двигуна при роботі на бензині, такі як затримка запалювання для запобігання детонації і багата паливно-повітряна суміш для захисту компонентів, ці проблеми можуть бути вирішені за допомогою комбінованого впорскування бензину та стисненого природного газу. Результати експерименту показують, що комбіноване впорскування підвищує теплову ефективність порівняно з бензиновим режимом. З іншого боку, деякі проблеми двигуна, що працює на стиснутому природному газі, такі як високий тиск в циліндрі і втрата тепла в

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 65   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

охолоджувальній рідині двигуна, можуть бути вирішені при одночасному впорскуванні бензину і CNG.

Dashti та інші учасники експерименту [14] провели моделювання термодинамічного циклу звичайного чотиритактного двигуна з використанням бензину та метану для визначення характеристик двигуна та його викидів. Перший закон термодинаміки був застосований для визначення температури та тиску в циліндрах як функції кута повороту колінчастого валу. Результати цієї роботи оцінили з використанням відповідних експериментальних даних існуючого двигуна CI, що працює як на бензині, так і на метані. Результати показали, що потужність двигуна, що працює на метані, нижча, ніж у двигуна, що працює на бензині, приблизно на 11% у діапазоні швидкостей 1500-4000 об/хв через більш високу об'ємну ефективність. У середньому, коли двигун працює на зрідженому природному газі, ISFC знижується приблизно на 16% у цьому діапазоні швидкостей. Однак для цього діапазону обертів двигуна питомі викиди CO<sub>2</sub>, CO та концентрація УНС значно знижуються приблизно на 33%, 60% та 53% відповідно, а концентрація NO збільшується на 50%.

Вчені з Каліфорнії [15,16] проводили експерименти для бінарних сумішей метан/ізооктан та стислий природний газ/ізооктан. У цьому дослідженні метан (основний компонент CNG) був доданий у двох об'ємних фракціях 30% та 70% до ізооктану (типове бензинове паливо). Результати показали, що додавання метану до ізооктану збільшує швидкість нерозтягнутого поширення в збідненій суміші, але знижує швидкість нерозтягнутого поширення в багатій суміші.

Нещодавні дослідження доводять, що супутнє впорскування газу та рідкого палива в двигуни з іскровим запаленням може призвести до сильної взаємодії між двома видами палива. Тим не менш, у цих дослідженнях основна увага була приділена продуктивності, крутячому моменту і тепловій ефективності двигунів. У даному моделюванні досліджується можливість

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 66   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

одночасного впорскування метану і бензину чотирициліндровий двигун з турбонаддувом об'ємом 1,7 л. Основна увага в цьому дослідженні приділяється пошуку найкращої точки для продуктивності двигуна, а також зменшенню викидів та ефективності конверсії каталізатора.

Компроміс між характеристиками двигуна та забрудненням довкілля важливий, оскільки в автомобільній промисловості цикли розробки постійно скорочуються, а керівні принципи законодавства щодо граничних значень викидів забруднюючих речовин стають більш жорсткими. Законодавчо встановлені межі викидів можуть бути досягнуті лише шляхом оптимізації системи вихлопних газів.

### 3.2.2 Експериментальна установка

Двигун, використаний у цьому дослідженні, є чотирициліндровим двигуном з чотирма клапанами на циліндр з турбонаддувом об'ємом 1,7 л і безповоротним паливопроводом. На Рисунку 3.8 показано схему з'єднань різних компонентів, що використовуються в двигуні, та різних функцій управління.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 67   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |



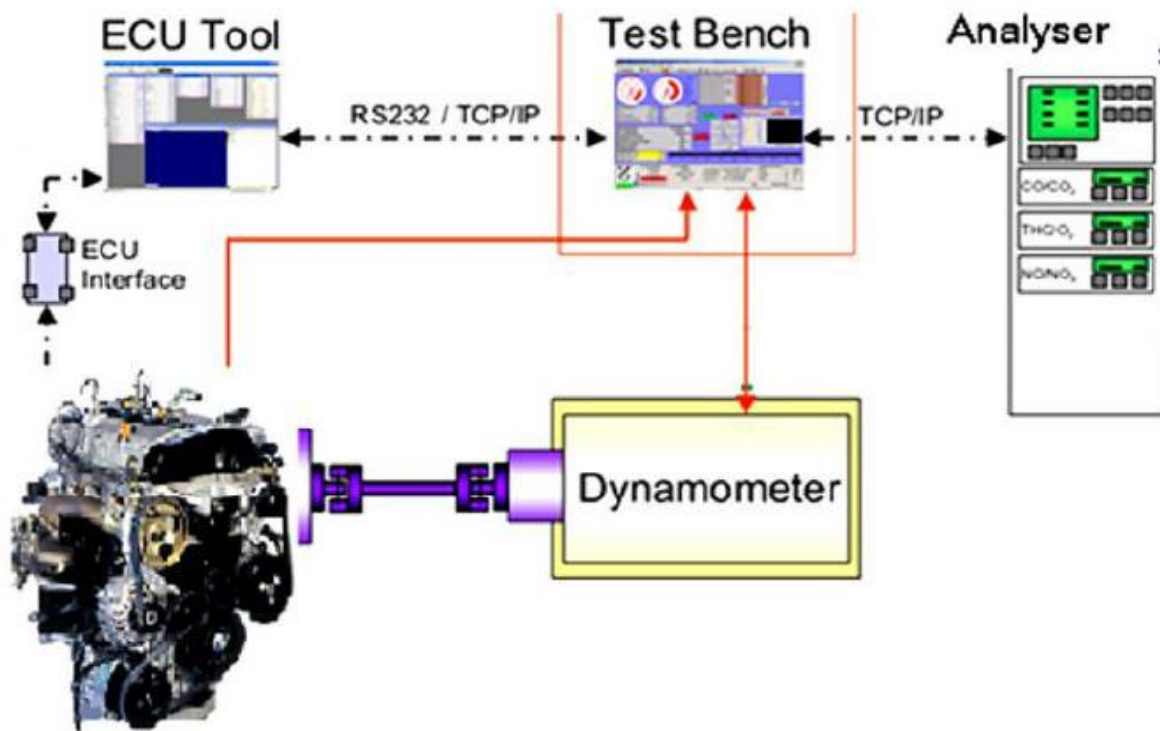


Рисунок 3.9 – Принципова схема двигуна та експериментальне налаштування пристроїв управління

Двигун з'єднаний з вихрострумовим динамометром AVL типу АРА 1F4-E-0509 з максимальною потужністю 120 кВт та максимальною швидкістю 8000 об/хв. Принципова схема двигуна та різних керуючих пристроїв випробувальної установки показана на Рисунку 1.2. Збір даних про двигун здійснюється за допомогою інструментів ЕБУ та моніторингу на випробувальному стенді. Програмне забезпечення INCA2 використовувалося для одночасного запису та аналізу вимірних даних від блоку управління та двигуна. Програма допомагає визначати вимірні дані двигуна, такі як лямбда, різні температури та значення напруги і т. д. Система контролю на випробувальному стенді має важливе значення для управління різними необхідними параметрами двигуна, такими як температура охолодження, тиск і температура масла, подача палива, впускне повітря та вихлопні гази, характеристики потоку.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 69   |

Двигун, по суті, управляється блоком керування (ECU) виробника оригінального обладнання (ОЕМ). ECU модулює співвідношення повітря/паливо біля стехіометричного коефіцієнта при певній частоті та амплітуді на основі зворотного зв'язку від датчика кисню у вихлопних газах (HEGO). Вхідне повітря змішується бензином і метаном з бажаним співвідношенням повітря/паливо та масовою часткою стиснутого природного газу. При згорянні суміші утворюються вихлопні гази з високим тиском та температурою, і надходять у турбіну. Швидкість обертання турбіни контролюється відвідним затвором, який дозволяє відводити вихлопний газ з турбіни.

У таблиці 3.6 наведено технічні характеристики динамометра та вимірювальних приладів тесту. Витрату КПГ вимірюють за допомогою масового витратоміра Emerson CMF010 типу Коріюліса. Тиск у циліндрах вимірюється і реєструється у всіх циліндрах за допомогою чотирьох датчиків тиску AVL GH12D. Важливі викиди вихлопних газів вимірюються за допомогою аналізаторів Horiba MEXA-7000.

Таблиця 3.6 – Специфікація динамометра та випробувальних приладів

| 1. Dynamometer                      |                  |             |                        |                     |                       |                                       |                    |
|-------------------------------------|------------------|-------------|------------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Dyno. type                          | Max torque (Nm)  |             | Max speed (rpm)        |                     | Max power (kW)        | Inertia (kg m <sup>2</sup> )          | Weight (kg)        |
| AVL APA IF4-E-0509                  | 509              |             | 8000                   |                     | 120                   | 0.35                                  | 600                |
| 2. Fuel temperature control         |                  |             |                        |                     |                       |                                       |                    |
| Model                               | Stability (°C)   |             | Fuel temp. outlet (°C) |                     | Fuel temp. inlet (°C) | Ambient temp. (°C)                    |                    |
| AVL 753C                            | Better than 0.02 |             | 10-80                  |                     | -8 to +70             | 5-50                                  |                    |
| 3. CNG consumption measuring device |                  |             |                        |                     |                       |                                       |                    |
| Model                               | Fuel type        | Transmitter | Nominal flow (kg/h)    | Maximum flow (kg/h) | Zero stability (kg/h) | Density accuracy (kg/m <sup>3</sup> ) | Temp. accuracy (C) |
| Emerson CMF010                      | Liquid           | 1700/2700   | 0-82                   | 108                 | 0.002                 | 2                                     | 1 + 0.5%           |
| Emerson CMF010                      | Gas              | 1700/2701   | 0-32                   | 65                  | 0.002                 | -                                     | 1 + 0.5%           |
| 4. AFR analyzer device              |                  |             |                        |                     |                       |                                       |                    |
| Model                               | Measuring        |             | Impedance (Ω)          |                     | Ambient temp. (°C)    | Humidity (%)                          | Gas temp. (°C)     |
| IPCO DHBS102                        | 0.7-1.4          |             | 0-174                  |                     | 5-45                  | less than 80                          | -7 to 900          |

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 70   |

### 3.2.3 Процедура тестування

#### 3.2.3.1 Тести продуктивності бензину та стиснутого природного газу

Щоб порівняти характеристики двигуна в режимах бензину і стиснутого газу, проводяться тести з повним навантаженням при різних оборотах двигуна. У першій частині цього дослідження результати випробувань досліджуються у режимах, призначених для бензину та метану. Результати показано на Рисунку 2.10. На цьому Рисунку показано середній ефективний тиск (BMEP) та питома витрата палива (BSFC) двигуна для бензину та природного газу при швидкості від 1000 до 5500 об/хв. Значення BSFC розраховуються за такою формулою:

$$BSFC \left( \frac{g}{kw \cdot h} \right) = 1000x \frac{m_{gasoline} + m_{CNG} \frac{LHV_{CNG}}{LHV_{Gasoline}}}{Engine\ power} \quad (2)$$

Нижча теплотворна здатність (LHV) всього палива, що вводиться в камеру згоряння (суміш бензину та газу), розраховувалася лінійно з вимірювань масової витрати кожного окремого палива. У Таблиці 2.7 наведено технічні характеристики стиснутого газу, виміряні відповідно до стандарту ASTM.

Таблиця 3.7 – Показники стиснутого газу

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 71   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Sample identification: *P*: 2500 psig, *T*: °C

| No.  | Component        | Test method | Result    |
|--|------------------|-------------|-----------|
| 1  | H <sub>2</sub> S | ASTM D 5504 | 1.6 ppm   |
| 2  | N <sub>2</sub>   | ASTM D 1945 | 3.9 mol%  |
| 3  | C <sub>1</sub>   | ASTM D 1945 | 89.6 mol% |
| 4  | CO <sub>2</sub>  | ASTM D 1945 | 1.0 mol%  |
| 5  | C <sub>2</sub>   | ASTM D 1945 | 3.6 mol%  |
| 6  | C <sub>3</sub>   | ASTM D 1945 | 1.12 mol% |
| 7  | IC <sub>4</sub>  | ASTM D 1945 | 0.24 mol% |
| 8  | NC <sub>4</sub>  | ASTM D 1945 | 0.31 mol% |
| 9  | IC <sub>5</sub>  | ASTM D 1945 | 0.10 mol% |
| 10   | NC <sub>5</sub>  | ASTM D 1945 | 0.07 mol% |
| 11   | C <sub>6</sub>   | ASTM D 1945 | 0.04 mol% |
| 12   | C <sub>7</sub>   | ASTM D 1945 | 0.02 mol% |
| Total  |                  |             | 100.0     |
|  |                  |             | Results   |
| Calculated average molecular weight (g/mol)  |                  |             | 17.99     |
| Calculate gas specific gravity, air = 1.000<br>(M. weight of air = 28.964 g/mol)           |                  |             | 0.621     |
| Calculate gas density in Kg/m <sup>3</sup><br>( <i>P</i> = 1013.25 mbar, <i>T</i> = 15 °C) |                  |             | 0.761     |
| Calculate net calorific value<br>( <i>P</i> = 1013.25 mbar, <i>T</i> = 15 °C)              |                  |             |           |
| MJ/m <sup>3</sup>  |                  |             | 34.53     |
| Btu/ft <sup>3</sup>  |                  |             | 922.7     |
| Calculate gross calorific value<br>( <i>P</i> = 1013.25 mbar, <i>T</i> = 15 °C)            |                  |             |           |
| MJ/m <sup>3</sup>  |                  |             | 38.27     |
| Btu/ft <sup>3</sup>  |                  |             | 1022.5    |

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | MPTAM 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 72   |

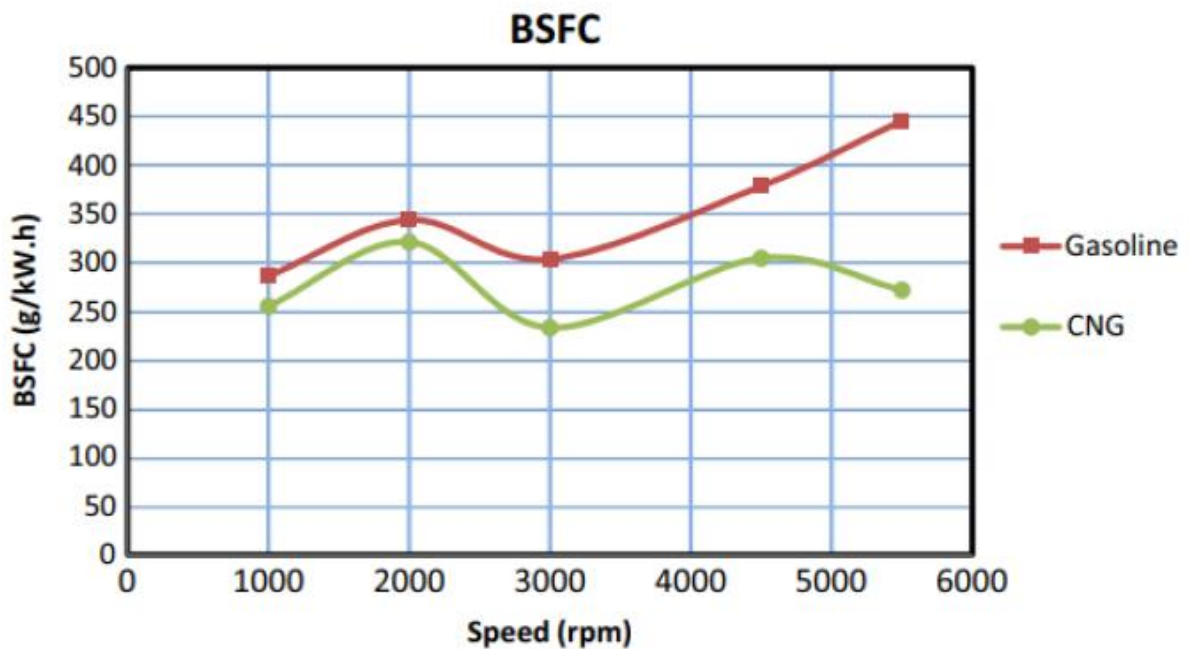
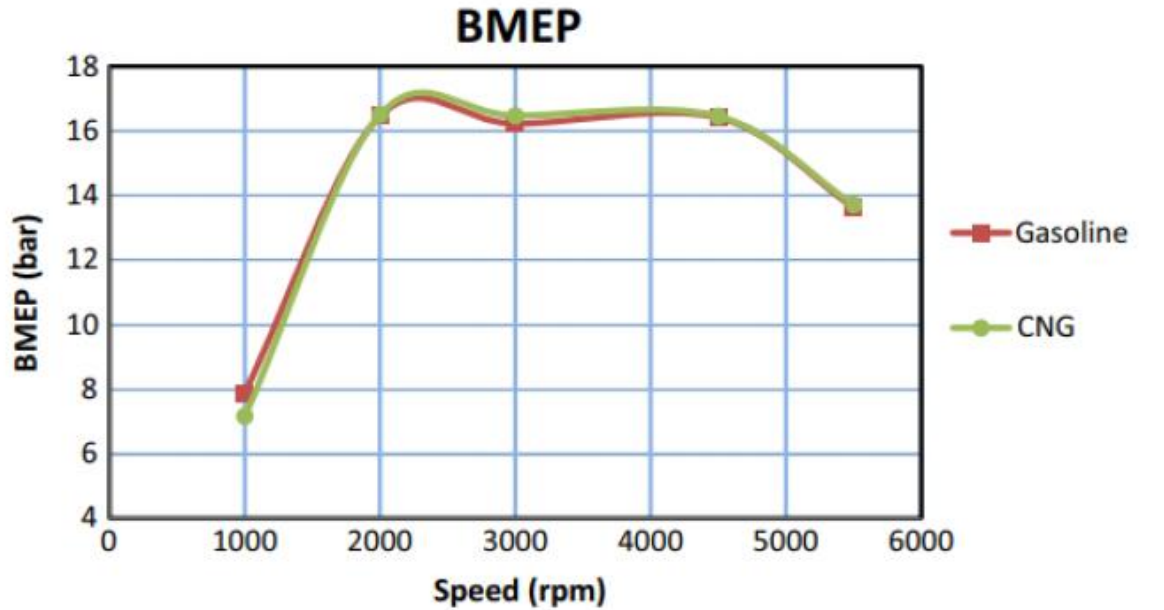


Рисунок 3.10 – Графіки характеристик середнього ефективного тиску (BMEP) та питомої витрати палива (BSFC) в залежності від оборотів двигуна

Зазвичай середній ефективний тиск у стиснутого газу на 4–14% менше, ніж у бензину на всіх оборотах двигуна. Це пов'язано з нижчою швидкістю займання газу порівняно з бензином. У результаті більшість негативної роботи виявляється у роботі CNG. Щоб вирішити цю проблему, для роботи

двигуна із природним газом можна використовувати випереджувальне запалювання, тому що в режимі використання газу опір детонації у CNG набагато вищий, ніж у бензину.

Крім того, витіснення повітря стиснутим природним газом у циліндрі знижує об'ємну ефективність і, як наслідок, призводить до втрати ефективного тиску. У разі використання метану потужність зменшуватиметься, але середній ефективний тиск, що є показником потужності двигуна, був однаковим на всіх швидкісних режимах, це показано на Рисунку 3.10.

У середньому природний газ виробляє на 10% менше зазначеної потужності і зазначеного крутячого моменту в порівнянні з бензином. Це відбувається головним чином через нижчу енергію заряду газового палива, що знижує об'ємну ефективність двигуна під час індукційного ходу. Більш значне зниження потужності при використанні газу було виявлено за більш високої частоти обертання двигуна через низьку швидкість полум'я CNG порівняно з бензином.

Скориговану поведінку питомої витрати палива BSFC при різних оборотах двигуна показано на Рисунку 3.10. В результаті витрата газу на 11-39% нижче, ніж бензину. Мінімальні значення BSFC для бензину та стиснутого природного газу становлять 300 та 235 г/кВт год при 3000 об/хв. Це може бути пояснено тим фактом, що теплотворна здатність CNG на 12% вища, ніж у бензину, і він виробляє співставну, але нижчу вказану вихідну потужність, тому двигун на метані споживає менше енергії на одиницю виробленої потужності в порівнянні з бензином при тій же роботі двигуна. На Рисунку також показано, що мінімальна питома витрата палива відбувається при середніх обертах двигуна. На низьких оборотах двигуна значення BSFC вище через вищу теплопередачу. При високих оборотах двигуна значення витрати палива вище через вищу тертя двигуна.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 74   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

При оборотах понад 4500 об/хв видно, що питома витрата палива стиснутого газу знизилась. Причина в тому, що коли двигун працює на стиснутому газі, суміш може бути більш збідненою через вищий опір детонації газу, в той час як для бензину паливо буде багатим, щоб захистити двигун від детонації та вищої температури вихлопних газів.

Викиди відпрацьованих газів HC, CO і NOx для обох видів палива представлено на Рисунку 3.11. Результати показують, що газ виробляє менше вуглеводнів, що не згоріли, у всьому діапазоні швидкостей порівняно з бензином. Викид вуглеводнів значно знижується на 25–72% при роботі двигуна на стиснутому природному газі завдяки повному згорянню газу порівняно з бензином. Крім того, експлуатація автомобілів на стиснутому природному газі показує значно нижчу емісію CO. Було виявлено, що CNG дає на 30-91% менше CO, що є результатом неповного згорання двигуна і генерується, коли двигун працює з багатою сумішшю або коли не досягається правильне змішування паливо-повітряної суміші (ППС). Очікується, що з високим відношенням водню до вуглецю та його більш простою хімічною структурою, CNG (переважно CH<sub>4</sub>) виробляє менше CO, ніж бензин. Викид NOx як для бензину, так і для газу показано на Рисунку 3.11. Результат показує, що стиснений газ дає вищі викиди NOx, особливо при більш високих оборотах двигуна, через більш високу температуру циліндра двигуна, що утворюється в результаті згорання палива, і нижчого вмісту повітряного палива. Це означає, що при роботі на природному газі ми маємо більш високу якість захисту від детонації, тому він може підтримувати температуру вихлопних газів нижче, тому не потрібно змінювати кут випередження запалення, щоб уникнути детонації. Внаслідок цього не потрібно збагачувати суміш і можна підтримувати стехіометрію.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 75   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

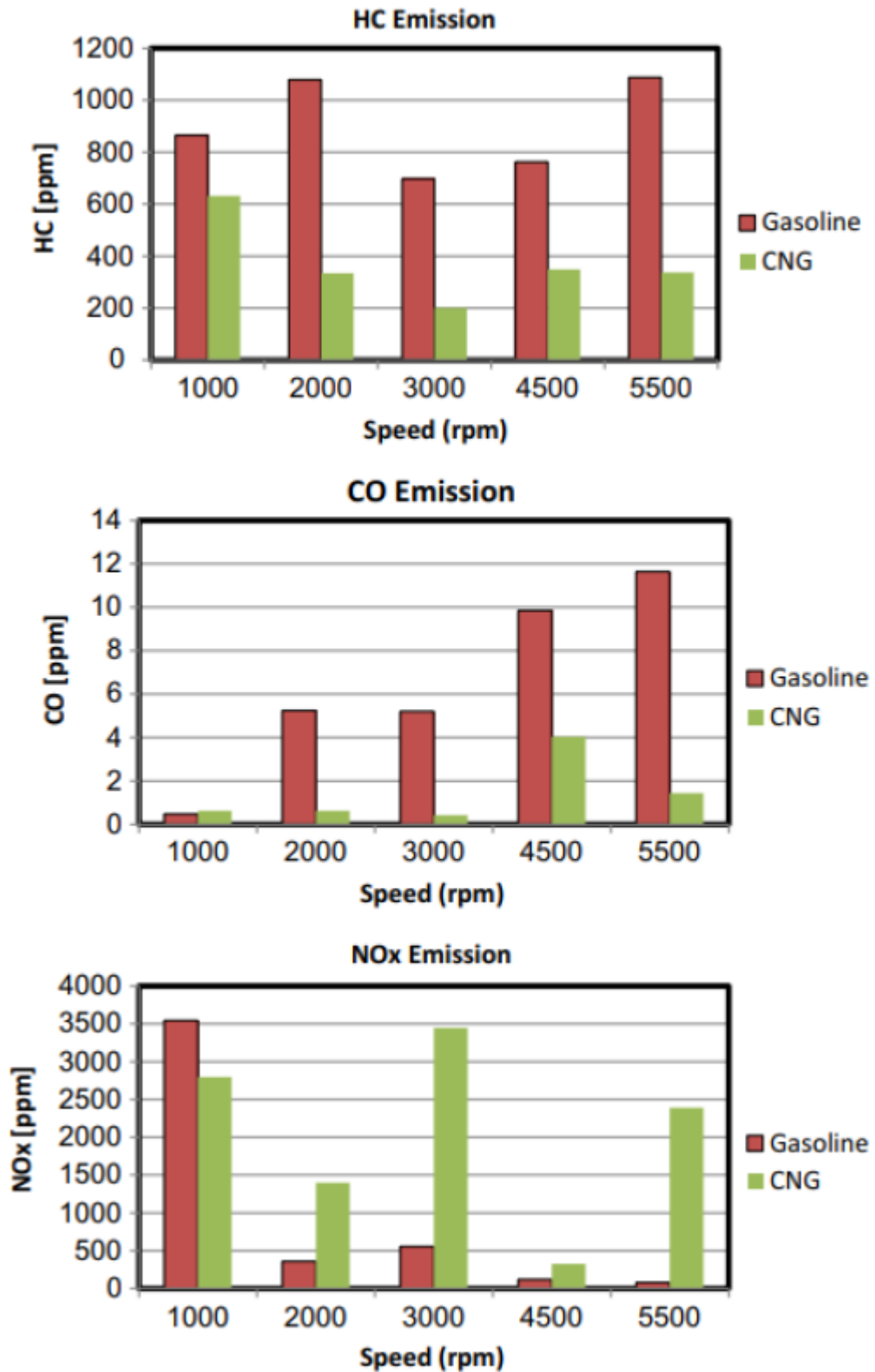


Рисунок 3.11 – Графіки викидів HC, CO та NOx залежно від оборотів двигуна

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

### 3.2.3.2 Тестування суміші стиснутого природного газу та бензину

У другій частині експериментального аналізу проводиться кілька випробувань з комбінованим упорскуванням бензину та CNG. Ці випробування проводяться на різних оборотах двигуна та в умовах повного навантаження з різними масовими частками природного газу. Даний експеримент зроблений при частоті обертання двигуна (3000 об/хв), при якій виробляється максимальний крутячий момент. Результати цього експерименту показано на Рисунках 3.12 та 3.13.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 77   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

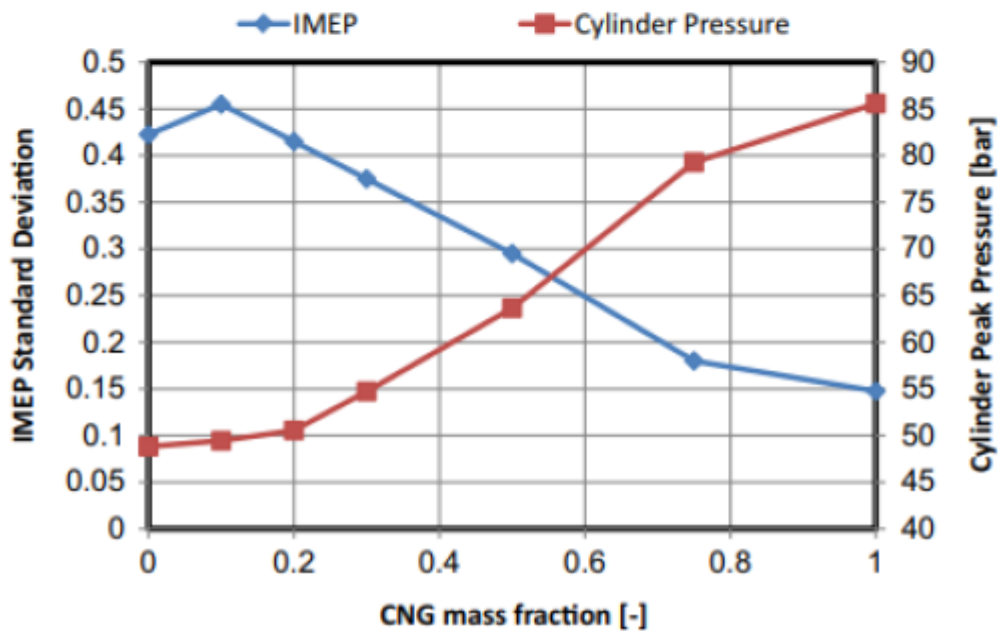
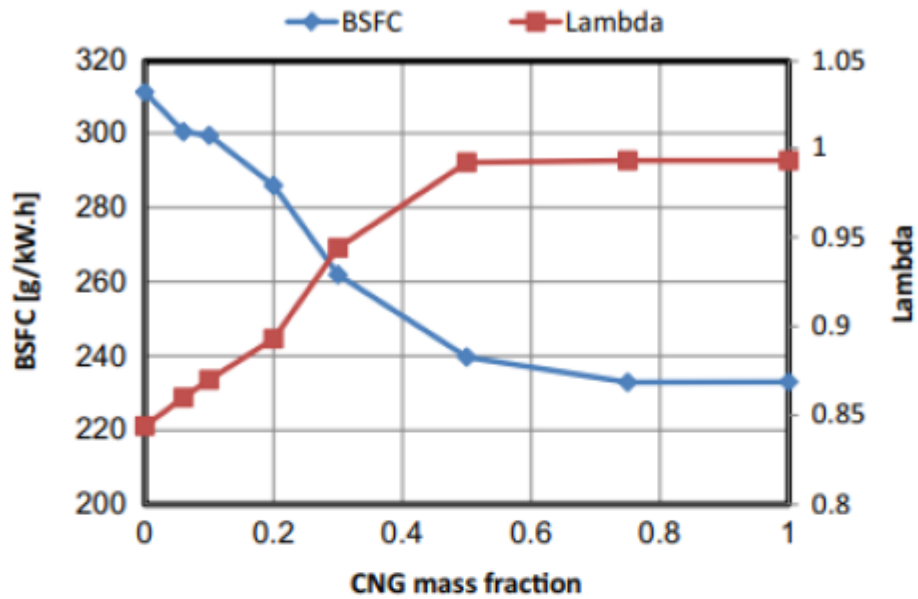


Рисунок 3.12 – Результати експерименту при комбінуванні бензину та газу

Через механічні обмеження двигуна максимально допустима потужність була обмежена. За 20% масової частки газу вже досягається ця величина потужності. Отже, при більш високих масових частках газу паливоповітряної суміші, це може призвести до економії витрати палива і зниження викидів. Криву питомої витрати палива та лямбди в залежності від

масової частки газу показано на Рисунку 3.12. Порівняння з Рисунком 3.10 показує, що питома витрата палива (BSFC) з масовою часткою газу 10% дорівнює режиму бензину. Причини цього - нижча різниця у часі запалення і рівна лямбда для цих двох точок, а також вища швидкість повітряного потоку. На Рисунку 3.12 можна бачити, що при збільшенні масової частки стиснутого природного газу стандартне відхилення середнього ефективного тиску (IMEP) зменшується через нижчу теплотворну здатність CNG. Крім того, лямбда-крива показує, що додавання природного газу використовується для приведення двигуна до стехіометричного робочого стану. Якби не газ, то інакше він працював би з використанням збагачення, якби використовувався тільки бензин. Це відбувається в міру додавання газу, який підвищує загальну якість палива, що запобігає детонації, і, отже, збагачення ППС не потрібне.

Процес згоряння двигуна не повторюється від циклу до циклу. Отриманий піковий тиск може змінюватися на 30% від циклу до циклу в двигуні, що нормально працює. Циклічні коливання у згорянні можуть бути приписані міжцикловим змінам будь-якого з параметрів, які, як відомо, впливають на згоряння. Масова частка залишкових газів, рівень турбулентності і неоднорідність ППС (краплі в суміші) є основними параметрами, що впливають на початкове зростання полум'я ядра, що в кінцевому підсумку призводить до зміни горіння в різних циклах. Збільшуючи кількість стисненого природного газу у змішаному паливі, можна збільшити кут випередження запалення. Отже, піковий тиск має тенденцію до збільшення, як показано на Рисунку 3.12.

Масова частка залишкового газу зменшується зі збільшенням тиску, і однорідність суміші покращується при більш високій концентрації стисненого газу суміші. Для досягнення постійної потужності, максимальний тиск у циліндрі має бути збільшений за рахунок збільшення іскри та збільшення заряду.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 79   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

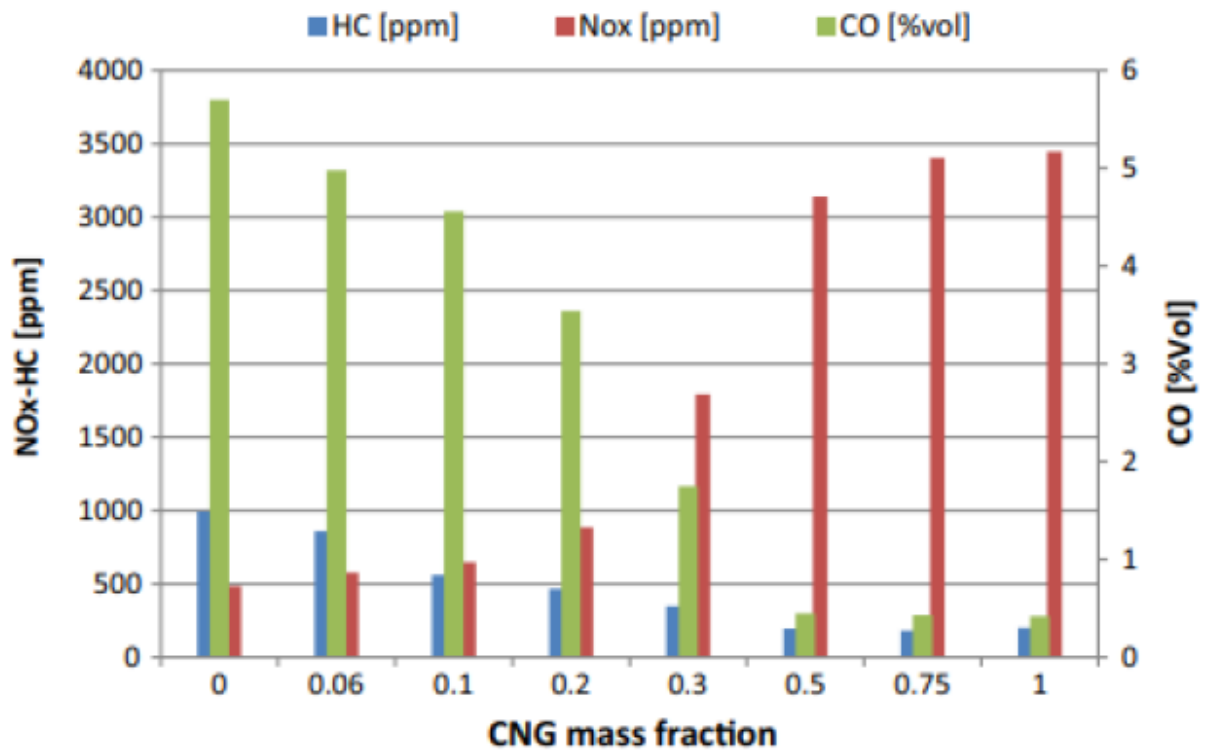


Рисунок 3.13 – Емісія двигуна за різних режимів роботи з комбінованим паливом

На Рисунку 3.13 показано результат вимірювання викидів під час роботи двигуна на комбінованому паливі. Результати показують, що зі збільшенням масової частки CNG викиди HC і CO зменшуються, а викиди NOx збільшуються. Причина в тому, що газ має різні склади і, як обговорювалося раніше, поводить не так, як бензин. Збільшення часу запалення та зближення зі стехіометричним коефіцієнтом паливно-повітряної суміші призводить до збільшення викидів NOx у вищій масовій частці газу в суміші. Отже, максимальна температура циліндра збільшуватиметься, і через великий вміст кисню у продуктах згоряння збільшується утворення NOx.

З результатів експерименту, представленого на Рисунку 3.13, видно, що зменшення кількості відпрацьованих газів досягається при масовій частці суміші з 20-30% вмістом стиснутого природного газу.

Викиди твердих частинок вуглеводнів (НС) і вуглекислого газу (СО) дуже високі для метану тільки через високе обмеження надходження палива через високе очищення. При додаванні бензину тривалість упорскування газу зменшується, що знижує обмеження надходження палива. Емісія була мінімальною при масовій частці стиснутого газу в 30%, тому що вся газова фракція могла потрапити в циліндри. Порівняно з Рисунком 3.11 при 3000 об/хв викиди НС і СО становлять приблизно половину від режиму тільки для бензину, а викиди NO<sub>x</sub> зросли втричі.

Насправді, ймовірно, що при комбінованому впорскуванні суміш метану, бензину і повітря має набагато кращу однорідність, ніж чистий бензин і повітря, отже, нижча ймовірність утворення вуглеводнів (НС), що не згоріли. Ці результати показують, що можна досягти відмінного компромісу між характеристиками, витратою палива та емісією вихлопних газів для масової частки стиснутого природного газу близько 30% ППС, дане рішення показано в таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 –Порівняльна таблиця між комбінованим упорскуванням (30% CNG) та роботою на одному паливі на 3000 об/хв при повному навантаженні

| Найменування                                 | Робота тільки на бензині | Робота тільки на стиснутому природному газі | Робота на комбінованому паливі (30% стисненого природного газу) |
|--|--------------------------|---|---|
| Середній ефективний тиск (ВМЕР), бар         | 16,2                     | 16,2  | 16,2  |
| Питомі витрати палива (BSFC), г/кВтгод       | 303,4(+16%)              | 233(-11%)                                   | 261,9   |
| СО, ppm (1·10 <sup>-6</sup> ) мільйонна доля | 5,2(+200%)               | 0,43(-75%)                                  | 1,75  |
| НС, ppm                                      | 697,4(+100%)             | 201,1(-42%)                                 | 349,8   |

|          |              |               |        |
|----------|--------------|---------------|--------|
| NOx, ppm | 556,56(-69%) | 3446,9(+192%) | 1792,9 |
|----------|--------------|---------------|--------|

Таблиця 3.8 показує, що у комбінованому режимі всі елементи мають найкращі показники, крім викидів NOx. Тим не менш, вигоди від подвійного згоряння палива при повному навантаженні можуть бути значними, оскільки в цьому випадку небезпека детонації вища, а бензинові двигуни працюють із багатими сумішами. При зменшенні навантаження на двигун детонація стає менш небезпечною та ймовірною, і паливоповітряна суміш може знову стати стехіометричною. Оскільки каталітичні нейтралізатори вихлопних газів більше використовують у двигунах, такі умови стехіометричного згоряння в двигуні можуть бути дуже корисними для продуктивності та ефективності таких каталізаторів.

### 3.2.3.3 Висновок на основі проведеного експерименту

Результати показують, що комбіноване упорскування бензину та стисненого природного газу набагато краще, ніж бензиновий режим з точки зору витрати палива та викидів HC та CO. Однак, як і очікувалося, викид NOx збільшиться. Згідно з отриманими результатами при середньому ефективному тиску 16,2 бар, при повному навантаженні 3000 об/хв з масовою часткою CNG 30%, питома витрата палива, CO та CP покращуються на 16, 200 та 100%, відповідно, порівняно зі стандартним режимом, при якому двигун працює лише на бензині.

Було виявлено, що паливна суміш з масовою часткою газу 30% є найкращим компромісом між характеристиками двигуна і викидами. Також спостерігалось значне зниження витрат палива. Випробування при повному навантаженні, проведені з турбонаддувним двигуном, посилили синергетичний ефект між двома видами палива в умовах повного навантаження.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         | 82   |

В даному експерименті було розглянуто кілька недавніх досліджень продуктивності двопаливних двигунів, і було зазначено, що в більшості випадків основна увага приділялася механічним і тепловим характеристикам, а в даному експерименті розглядалися викиди вихлопних газів, особливо в ролі вхідних даних для каталітичних нейтралізаторів.

Ефект від комбінації стиснутого газу з бензином був досліджений на інжекторному двигуні з турбонаддувом об'ємом 1,7 л. Він поєднує переваги кожного палива, забезпечуючи як високу об'ємну ефективність, так і сильний опір детонації. Таким чином, газ може виступати як підсилювач октанового числа для забезпечення оптимального часу запалення та замінювати збагачення бензиновим паливом, зберігаючи при цьому номінальну продуктивність двопаливного двигуна. Крім того, оскільки стехіометрія може підтримуватися при повному навантаженні в змішаному випадку, звичайний каталітичний триходовий нейтралізатор буде ефективно працювати у всьому робочому діапазоні двигуна щодо стехіометричного лямбда-вікна. Було зазначено, що питома витрата палива знизилася на 13% при 3000 об/хв у режимі повного навантаження порівняно з бензиновим режимом. Було зроблено висновок, що комбіноване упорскування призводить до кращої продуктивності та економії палива.

Експерименти показали, що через покращення тенденції до детонації змішане упорскування бензину та стисненого природного газу набагато краще, ніж просто бензиновий режим, з точки зору витрати палива та емісії шкідливих речовин. Порівняння показує, що при 3000 об/хв, масовій частці газу в 30% та умовах повного навантаження питома витрата палива, викиди CO та HC у комбінованому режимі покращуються на 16, 200 та 100% відповідно, ніж щодо бензинового режиму. Тим не менш, викид NOx вищий на 69%, що може ускладнити дотримання нормативних меж для роботи звичайних каталізаторів.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 83   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## Висновки по розділу

У цьому розділі розглядалося два дослідження на основі застосування стиснутого природного газу в двигунах внутрішнього згорання.

Перше дослідження ґрунтувалося на одноциліндровому двигуні внутрішнього згорання. У цьому дослідженні було з'ясовано, що основною складовою речовиною газу є метан. Максимальна потужність двигуна при використанні бензину становила близько 2,6-2,7 кВт при 3600 об/хв, при додаванні стисненого природного газу до циліндра ця потужність зменшилася до 2,2 кВт, це означає, що потужність впала приблизно на 18,5%. Ще одним мінусом двигуна на метані є тиск усередині циліндра, який в умовах моделювання зменшився на 20%, але є і позитивна сторона застосування газу в двигунах внутрішнього згорання - це токсичність. Емісія від шкідливих речовин зменшується в рази, а значить, і досягається головне завдання застосування метану – зменшення кількості викидів в атмосферу.

Друга робота присвячена дослідженню, середнього ефективного тиску, питомої витрати палива та емісії вихлопних газів. Ці дослідження проведені на основі 1,7 літрового турбованого двигуна.

У ході моделювання було проведено три досліди. У першому досвіді двигун працював тільки на бензині, у другому тільки на газі і в третьому досвіді було застосовано комбіноване упорскування стисненого природного газу (30% від загальної частки ППС) та бензину.

Питомий ефективний тиск при роботі двигуна на бензині виявився вищим на 7% ніж при роботі двигуна на газі, але в комбінованому режимі цей показник вдалося призвести до 16,2 бар, що еквівалентно роботі двигуна на бензині.

Питома витрата палива в комбінованому режимі склала 261,9 г/кВтч, цей же показник при роботі ДВЗ тільки на бензині становив 303,4 г/кВтч (+13% у порівнянні з комбінованим режимом), в режимі при використанні

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 84   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

лише стиснутого газу показник BSFC становив 233 4 г/кВтч (-11% % проти комбінованого режиму).

Наступні показники, які ми досліджували, – це емісія вихлопних газів. Емісія складається з трьох основних речовин:

Вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>);

Вуглеводень (HC);

Оксид азоту (NO<sub>x</sub>).

За цими трьома показниками ми зробили аналіз і ось що він показав. У комбінованому режимі показник CO склав 1,75 ppm, HC = 349,8 ppm, NO<sub>x</sub> = 1792,9 ppm. У режимі роботи двигуна тільки на бензині CO=5,2 ppm, HC=697,4 ppm, NO<sub>x</sub>=556,56 ppm. У режимі роботи двигуна тільки на стиснутому природному газі дані показники стали такими: CO = 0,43 ppm, HC = 201,1 ppm, NO<sub>x</sub> = 3446,9 ppm. Аналіз даних з вихлопних газів показує, що при застосуванні комбінованого впорскування показники HC і CO зменшуються, але при цьому збільшуються викиди NO<sub>x</sub>.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 85   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі було виконано аналіз вихідної потужності двигуна на стисненому природному газі. На основі цього аналізу можна зробити висновок про те, що монопаливний силовий агрегат на стиснутому природному газі задовольняє потреби людини в плані викидів в атмосферу шкідливих речовин при згорянні палива, проте його потужність сильно втрачається і через це він не може бути широко використаний в автомобільній промисловості. Небагато людей оберуть економічність на шкоду потужності двигуна. Однак є інше концептуальне рішення, яке вб'є одразу двох зайців – це двигун на стиснутому природному газі з турбіною. Він поєднує переваги монопаливного CNG двигуна і при цьому не втрачає потужності. Масштабне виробництво таких силових агрегатів може популяризувати двигуни на стиснутому природному газі.

Таким чином, у даній роботі було вирішено завдання, поставлені на початку, а також зроблено висновки щодо застосування монопаливних силових агрегатів у повсякденному житті. Найголовнішим завданням таких двигунів є вирішення завдання зменшення вихідної потужності, яку постаралися розкрити у цій роботі.

Турбований двигун на стислому природному газі – це майбутнє автомобілебудування, яке вже не за горами.

1. Вивчено питання впливу застосування стиснутого природного газу в комбінованому двигуні, монопаливному силовому агрегаті та турбованому двигуні. Найперспективнішим є комбінований турбований силовий агрегат, тому що він найменше втрачає у вихідній потужності, і при цьому зменшує викиди шкідливих речовин в атмосферу.

2. Аналіз літератури встановив різні причини втрати потужності двигуна, такі як об'ємний ККД, низька швидкість займання паливо-повітряної

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 86   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

суміші. Ці проблеми вирішуються застосуванням комбінованих двигунів із турбіною, замість монопаливних силових агрегатів.

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 87   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петришин І.С. Дослідження енергетичної цінності природного газу в споживачів комунально-побутового сектору / І.С. Петришин, Т.І. Присяжнюк, О.А. Бас // Метрологія та прилади. – 2015. – № 6 (56). – С. 42 – 49.
2. Альферович В. В. Состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания / В. В. Альферович // БНТУ, 2011, 39 с.
3. Петришин І.С., Бас О.А., Присяжнюк Л.О. Комплекс технічних засобів для визначення теплоти згорання природного газу.// Вимірювальна техніка та метрологія. 2018. № 79(2). – С.5-12
4. Richter M. Development of a special single-sinker densimeter for cryogenic liquid mixtures and first results for a liquefied natural gas (LNG) / M. Richter, R. Kleinrahm, Lentner, R. Span // The Journal of Chemical Thermodynamics. – Volume 93, 2016. – P. 205 – 221.
5. Крижанівський Є.І. Використання CNG технології для постачання газу до України / Є.І. Крижанівський // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2012. – № 2(32). – С. 11-14.
6. Матіко Ф.Д. Методи розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу на основі спрощеного набору параметрів його складу / [Матіко Ф.Д., Матіко Г.Ф., Шоловій С.Ю.] // Методи та прилади контролю якості. – 2010. – № 25. – С. 22-26.
7. Мітков Б. В. Альтернативні палива транспортних засобів/Б. В. Мітков, В. Б. Мітков//Праці Таврійського агротехнологічного університету 2011, Вип 11,Т. 3.
8. Mileskin K.I. Gas as an alternative to petrol: the pros and cons of installing gas equipment / K.I. Mileskin // Behind the wheel. -2014- No6.-p.22. (Rus)
9. Manko I.V. Justification feasibility of transferring a car with a petrol engine for LPG by installing a modern system of gas supply / I.V. Manko, R.V. Symonenko //

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 88   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

Avtoshlyahovyk Ukraine. - 2013. - No 6. - p. 2-4. - Access:  
[http://nbuv.gov.ua/UJRN/au\\_2013\\_6\\_2](http://nbuv.gov.ua/UJRN/au_2013_6_2). (Ukr)

10. Електронний ресурс <https://ua.interfax.com.ua/news/blog/702505.html>

11. Мироненко В.П., Тарасенко О.М., Пригожинський В.М., Остап'юк О.Я. Автомобільний парк України: стан, проблеми, перспективи розвитку; за заг.Ред. А.М. Редзюка. К.: ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2016. 83-84с.

12. Kryshropa S. Experimental Research on Diesel Engine Working on a Mixture of Diesel Fuel and Fusel Oils [Text] / S. Kryshropa, L. Kryshropa, V. Melnyk, I. Prunko, B. Dolishnii, Ya. Demianchuk // Transport Problems. – Poland, Gliwice, 2017. – Volume 12, Issue 2. – p. 53-63.

13. Momeni, Movahed M., Basirat, Tabrizi H., Mirsalim, M.: Experimental investigation of the combined injection of gasoline and CNG in a turbocharged spark ignition engine. Energy Convers. Manag. 80, 126–136 (2014).

14. Baloo, M., Dariani, B.M., Akhlaghi, M., Chitsaz, I.: Effect of iso-octane/methane blend on burning velocity and flame instability. Fuel 144, 264–273 (2015).

15. Baloo, M., Dariani, B.M., Akhlaghi, M., AghaMirsalim, M.: Effects of pressure and temperature on laminar burning velocity and flame instability of iso-octane/methane fuel blend. Fuel 144, 264–273 (2015).

16. Електронний ресурс [https://zn.ua/ukr/energy\\_market/zalezhnosti-vid-importnoho-paliva-mozhna-zaraditi.html](https://zn.ua/ukr/energy_market/zalezhnosti-vid-importnoho-paliva-mozhna-zaraditi.html)

17. Mehrnoosh, D., Asghar, H.A., Asghar, M.A.: Thermodynamic model for prediction of performance and emission characteristics of SI engine fuelled by gasoline and natural gas with experimental verification. J. Mech. Sci. Technol. 26(7), 2213–2225 (2012).

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 89   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |

ДОДАТКИ

|      |      |          |        |      |                         |      |
|------|------|----------|--------|------|-------------------------|------|
|      |      |          |        |      | МРТАМ 22. 21209. 000 ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                         | 90   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                         |      |