

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерії машин, споруд та технологій

(назва факультету)

Автомобілів

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Удосконалення технологічного процесу технічного обслуговування з дослідженням характеристик турбованого двигуна на стислому природному газі

Виконали: студенти 6 курсу, групи МАм-62

МАм-61

спеціальності 274

«Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

Пиріжок С.С.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Войціх Р.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Рогатинський Р.М.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Левкович М.Г.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Зав. кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«20» листопада 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»
(шифр і назва спеціальності)

студенту Пиріжку Сергію Степановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технологічного процесу технічного обслуговування з дослідженням характеристик турбованого двигуна на стислому природному газі

Керівник роботи Рогатинський Роман Михайлович., д.т.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 20 » листопада 2023 року № 4/7-1072

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2023

3. Вихідні дані до роботи Характеристика технологічного процесу технічного обслуговування турбованого двигуна

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.

4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

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

Графічні результати тягово-швидкісних характеристик – 1А1.

Схема технологічних процесів ТО і ПР – 1А1.

Принципова схема системи живлення автомобілів з ГБО – 2А1.

Газовий редуктор – 1А1.

Схема технологічного процесу ремонту газової апаратури – 1А1.

Способи відновлення деталей – 1А1.

Принципова схема стаціонарної автогазозаправної станції – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 20.11.2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	23.11.2023	
2	Технологічний розділ	29.11.2023	
3	Конструкторський розділ	04.12.2023	
4	Науково-дослідний розділ	06.12.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	13.12.2023	
6	Оформлення графічної частини	20.12.2023	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.12.2023	

Студент

(підпис)

Пиріжок С.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Рогатинський Р.М.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(повна назва факультету)

Кафедра Кафедра автомобілів
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Цьонь О.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«20» листопада 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 274 «Автомобільний транспорт»

(шифр і назва спеціальності)

студенту Войціху Роману Мироновичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення технологічного процесу технічного обслуговування з дослідженням характеристик турбованого двигуна на стислому природному газі

Керівник роботи Рогатинський Роман Михайлович., д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «20» листопада 2023 року № 1071

2. Термін подання студентом завершеної роботи 20 грудня 2023

3. Вихідні дані до роботи Характеристика технологічного процесу технічного обслуговування турбованого двигуна

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Загально-технічний розділ. 2 Технологічний розділ. 3 Конструкторський розділ.

4 Науково-дослідний розділ. 5 Охорона праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

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

Пристрій для калібрування газових форсунок – 1А1.

Установка – 1А1.

Результати дослідження на одноциліндровому двигуні – 2А1.

Результати дослідження на двигуні об'ємом 1.7 л – 3А1.

Дільниця для ТО та дослідження ГБО автомобілів – 1А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к.т.н. доц. Ткаченко І.Г.		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	ст. викл. Стручок В.С.		

7. Дата видачі завдання 20.11.2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Загально-технічний розділ	23.11.2023	
2	Технологічний розділ	29.11.2023	
3	Конструкторський розділ	04.12.2023	
4	Науково-дослідний розділ	06.12.2023	
5	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	13.12.2023	
6	Оформлення графічної частини	20.12.2023	
7	Захист кваліфікаційної роботи магістра	25.12.2023	

Студент

_____ (підпис)

Войцїх Р.М.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Рогатинський Р.М.

_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Удосконалення технологічного процесу технічного обслуговування з дослідженням характеристик турбованого двигуна на стислому природному газі».

Робота виконана на кафедрі автомобілів ТНТУ ім. І. Пулюя. Керівник кваліфікаційної роботи магістра д.т.н., професор Рогатинський Р.М.

Пояснювальна записка складається з п'яти розділів і 125 сторінок формату А4 та 16 аркушів формату А1 графічної частини 3 сторінок додатків.

Ключові слова: ефективність двигуна, оптимізація процесів, турбований двигун, аналіз даних, надійність.

ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	10
1.1 Огляд та характеристики природного газу.....	10
1.2 Переваги та обмеження СПГ.....	14
1.3 Біогаз як автомобільне паливо.....	16
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	22
2.1 Аналітичне дослідження процесу створення повітряно-паливної суміші камерах згоряння газового мотора.....	22
2.2 Характеристики двигунів, працюють на стисненому природному газі....	32
2.3 Інженерні характеристики двигуна, що функціонує на скрапленому природному газі.....	37
2.4 Обмеження в роботі двигуна.....	38
2.5 Газобалонне обладнання (ГБО) для автомобілів.....	42
2.6 Обслуговування та ремонт автомобільних систем газового палива.....	45
2.7 Економічні показники двигуна.....	51
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	55
3.1 Апаратура та план тестувань.....	55
3.2 Застосування газів з вмістом водню в двигунах із внутрішнім згорянням	59
3.2 Підготовка форсунки для стиснутого природного газу.....	60
3.3 Вирішення задач з допомогою Autodesk Inventor та SolidWorks.....	65
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ.....	73
4.1 Дослідження, яке зосереджується на використанні мотора з одним циліндром.....	73
4.2 Результати досліджень для даного двигуна.....	76
4.3 Аналіз продуктивності мотора, виконаний на прикладі 1.7-літрового турбонаддувного агрегату.....	84
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	105
5.1 Охорони праці під час використання автотранспортних засобів, двигун яких працює на газовому паливі.....	105

	8
5.2 Основи оцінки хімічної обстановки.....	116
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	121
БІБЛІОГРАФІЯ.....	123
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Сучасний світ характеризується стрімким розвитком технологій і неперервним пошуком нових підходів до енергоефективності та екологічної безпеки. У цьому контексті, удосконалення технологічних процесів у сфері технічного обслуговування двигунів набуває особливого значення, особливо коли мова йде про турбовані двигуни, що працюють на стислому природному газі (СПГ). Ця дипломна робота спрямована на вивчення та удосконалення існуючих методик технічного обслуговування з акцентом на оптимізацію характеристик турбованих двигунів на СПГ.

Перехід на стиснений природний газ як паливо є важливим кроком у напрямку зниження викидів шкідливих речовин та підвищення енергоефективності. Турбовані двигуни, завдяки своїм конструктивним особливостям, забезпечують кращу продуктивність порівняно зі звичайними двигунами, але водночас вимагають більш складного та вдосконаленого технічного обслуговування.

В контексті даної роботи буде проведено аналіз існуючих технологічних процесів обслуговування, ідентифіковано потенційні напрямки для їх удосконалення та розроблено рекомендації щодо оптимізації роботи турбованих двигунів на СПГ. Особлива увага буде приділена підвищенню енергоефективності, зниженню витрат на обслуговування та покращенню екологічних показників.

Робота буде здійснена на основі глибокого теоретичного аналізу літературних джерел, практичних досліджень, а також аналізу даних, отриманих від виробників та сервісних центрів. Отримані результати дозволять не лише удосконалити існуючі методики обслуговування, але й внести вагомий вклад у розвиток технологій використання альтернативних видів палива в автомобільній промисловості. Ця робота сприятиме підвищенню якості та ефективності технічного обслуговування турбованих двигунів, а також допоможе вирішити важливі екологічні та економічні завдання, що стоять перед сучасним автомобілебудуванням.

1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Огляд та характеристики природного газу

Стиснений природний газ, або СПГ, переважно складається з метану (CH_4), доповненого іншими вуглеводнями, як-от етан, пропан, та бутан. За інформацією Центру альтернативного палива, у складі СПГ також присутні додаткові гази, такі як CO_2 , H_2S , N_2 , He та водяні пари. Існує думка, що походження СПГ пов'язане з мільйонами років розкладання рослинності та тварин. Цей газ формується на значних глибинах під землею, утримується між скелями та піском у підземних резервуарах, як і інші види викопного палива. Завдяки нижчій щільності, СПГ займає верхні шари, вище від нафти та води.

Для добування природного газу використовують бурові установки, що проникають через земну кору. Після видобутку газ проходить очищення від забруднень і постачається по трубопроводах до переробних заводів, а згодом - транспортним компаніям для доставки споживачам.

Перші випадки використання природного газу включали кип'ятіння води, освітлення вулиць, а пізніше він став популярним у домогосподарствах для нагрівання води, сушіння одягу та приготування їжі. Згідно з даними видобувних компаній, у 1950-х відбулося стрімке поширення використання природного газу, що спричинило будівництво великої мережі обладнання та трубопроводів. Використання газу у транспортній галузі почалося ще у 1930-х, проте з тих пір розвиток був незначний. Через відсутність суспільної підтримки, використання NGV обмежено переважно громадським транспортом.

Для використання в транспорті, природний газ стискається у форму СПГ, альтернативою чому є СПГ. Використання СПГ у автомобілях на альтернативному паливі є досить поширеним, оскільки це сприяє зниженню викидів шкідливих газів та забезпечує порівнянну продуктивність двигунів.

Природний газ є ключовим компонентом світової енергетики, пропонуючи відносно чистий, ефективний та гнучкий спосіб виробництва енергії. Однак, його використання та експлуатація вимагають обережності з огляду на екологічні виклики та необхідність переходу до більш сталого

енергетичного майбутнього.

За інформацією, первинне використання природного газу було зафіксоване в Китаї, де його застосовували для обробки морської води, видаляючи сіль, щоб перетворити її на питну. У Європі, першою країною, яка почала комерційно використовувати природний газ, була Велика Британія, причому його застосування спочатку обмежувалось лише освітленням вулиць. Ця практика поширилася на інші регіони, включаючи США. Після закінчення Другої світової війни були внесені удосконалення в процеси транспортування та зберігання природного газу, використовуючи технології того часу. З розширенням мережі постачання природного газу, він став широко популярним джерелом енергії.

Інтенсивні дослідження були проведені з метою визначення можливості заміни традиційних видів палива, як-от бензин та дизель, на природний газ. Згідно з дослідженнями, Італія стала лідером у вивченні природного газу як альтернативного виду палива, переобладнавши близько 235 000 транспортних засобів на використання цього палива. Наразі Сполучені Штати є найбільшим споживачем природного газу у світі, зі споживанням у 28.8%. В США функціонує майже 130,000 СПГ (автомобілів на природному газу), а в усьому світі їх кількість досягає приблизно 2.5 мільйонів.

У 2003 році було оголошено, що на світовому ринку діє більше ніж 40 виробників автомобілів, що працюють на природному газі, що свідчить про широке розгортання досліджень у цій області.

Переважно використовуваний як паливо для громадського транспорту, таксі, вантажних авто та інших автопарків по всьому світу, СПГ (стиснений природний газ) є економічно вигідним варіантом через високу витрату палива цими транспортними засобами. Це сприяє зниженню часу, необхідного для повернення інвестицій у переобладнання. З огляду на екологічні переваги СПГ як альтернативного палива, У Малайзії, незважаючи на обмежену популярність NGV та переважання традиційного палива через недостатньо розвинену інфраструктуру заправних станцій та тривалий процес заправки газом, робляться кроки для розширення використання СПГ. Це включає інформаційні кампанії та освітні програми, спрямовані на підвищення обізнаності серед

споживачів про переваги СПГ, , активно просуває використання СПГ, надаючи малайзійським водіям відповідні послуги та заправні станції. До того ж, Малайзія була обрана місцем проведення конференції Асоціації автомобілів на природному газі Азіатсько-Тихоокеанського регіону в 2005 році для обговорення новітніх технологічних досягнень у сфері СПГ.

Зазвичай природний газ містить суміш різних вуглеводнів, де домінуючим елементом є метан (CH₄). До складу також входять етан, пропан, бутан, азот і вуглекислий газ, а в деяких випадках можлива наявність слідів водяної пари та сірководню. Характеристики природного газу варіюються в залежності від його місця знаходження, способів обробки та переробки. Для проведення аналізу та порівнянь часто визначають максимальний та мінімальний склад газу.

Таблиця 1.1. Типовий склад природного газу у відсотках.

З'єднання	Типовий	Max.	Min.
Метан	87.4%	92.81%	79.1%
Етан	7.2%	10.31%	3.81%
пропан	1.9%	3.31%	0.41%
Бутан	0.8%	1.22%	0.11%
Азот	2.3%	8.72%	0.51%
Вуглекислий газ	0.91%	2.52%	0.22%

Недавні дослідження, присвячені автомобілям, що функціонують на природному газі, виявили значний вплив різних складових природного газу на ефективність та викиди двигунів. Було встановлено, що такі параметри, як теплотворна здатність, продуктивність, кількість незгорілих вуглеводнів та інших частинок у викидах, залежать від джерела природного газу, який використовується в якості палива. вказує, що цей вплив є особливо помітним у потужних двигунах із високим ступенем стиснення через збільшення явища "стуку" у двигуні, яке відбувається через передчасне запалювання паливно-повітряної суміші в камері згоряння, що може призвести до перегріву та зниження ефективності двигуна.

Для видалення домішок, таких як нафта, конденсат та водяні частинки,

сирий природний газ проходить очищення. Ці домішки можуть ускладнювати рівномірне подавання палива в двигун під час експлуатації, а іноді навіть призводити до його зупинки. Отриманий в результаті перегонки "сухий" природний газ майже повністю складається з метану.

У своєму первісному стані природний газ є неотруйним, безбарвним та без запаху. Для виявлення витоків, що можуть відчуватися людським носом, до нього додається Меркаптан, що надає газу запах сірководню або тухлих яєць. Інгаляція природного газу не впливає на роботу організму і не є шкідливою для здоров'я. Природний газ не випускає альдегідів та інших повітряних токсинів, які можуть бути проблематичними для інших видів палива.

Також природний газ є легшим за повітря через свою низьку щільність. Згідно з даними, витік природного газу є менш небезпечним, ніж витік бензину чи дизельного палива, оскільки газові пари розсіюються у повітрі, не накопичуючись на землі.

Антикорозійні властивості природного газу сприяють запобіганню іржі в резервуарах для зберігання, знижуючи ризик забруднення. У Таблиці 1.2 представлено порівняння фізичних властивостей стисненого природного газу (СПГ) та звичайного дизельного палива, де природний газ переважно складається з CH_4 , в той час як дизельне паливо містить більш довгі та складні вуглеводневі ланцюги. СПГ також має меншу молекулярну масу та густину порівняно з дизелем.

Дослідження встановили, що природний газ має обмежений діапазон спалювання між 5 та 15 відсотками, що означає, що спалювання можливе лише при певній концентрації газу в повітрі. Завдяки високій температурі займання, природний газ є безпечним у використанні та має низький ризик неконтрольованих вибухів.

Октанове число стисненого природного газу (СПГ) дорівнює 120, в той час як для бензину воно варіюється від 87 до 93. Октанове число визначає здатність палива запобігати "стуку" в двигуні. Вище октанове число свідчить про кращу опірність палива до детонації, що забезпечує ефективнішу та рівнішу передачу потужності двигуну. У порівнянні з дизельним паливом, яке використовується у двигунах із запалюванням від стиснення, порівняння не є

прямим, оскільки дизельне паливо оцінюється за цетановим числом, що відрізняється від октанового числа.

Таблиця 1.2. Властивості природного газу та дизеля.

Власність	Стиснений природний газ (СПГ)
Хімічна формула	CH_4
Молекулярний вага	16.04
Композиція за вага, %	
Карбон	75
Водень	25
Специфічна сила тяжіння	0,424
Щільність, кг/м^3	128
Температура кипіння, $^{\circ}\text{C}$	-31.7
Точка замерзання, $^{\circ}\text{C}$	-182
Спалах точка, $^{\circ}\text{C}$	-184
Самозаймання температура, $^{\circ}\text{C}$	540
Горючість межі, % обсяг	
Нижній	5.3
Вища	15
Специфічний Тепло, Дж/кг К	-

1.2 Переваги та обмеження СПГ

СПГ (стиснений природний газ) вважається одним з найекологічніших видів палива для двигунів через свої низькі рівні викидів оксидів азоту (NO_x), монооксиду вуглецю (CO) та вуглекислого газу (CO_2), які впливають на парниковий ефект та глобальне потепління. Що в СПГ відсутній бензол, що знижує ризик впливу на здоров'я від канцерогенних речовин.

Що використання автомобілів на природному газі значно знижує загальний вміст вуглеводнів (ТНС) та твердих частинок розміром менше 10

мікрометрів (PM10). Екологічні переваги є ключовою причиною, чому уряди по всьому світу підтримують використання СПГ у споживчому транспорті. Економічна вигода використання газомоторних двигунів також є важливою. Поточна ціна на природний газ становить 0,565 рингітів (0,195 австралійського долара) за літр, у порівнянні з 1,20 рингітів (0,414 долара США) за літр бензину і 0,881 рингіта (0,304 австралійського долара) за літр дизеля, що демонструє економію вартості палива на 53% і 27% відповідно повідомляє, що ціна на природний газ є стабільнішою, ніж на інші види палива. Значна економія витрат на СПГ спонукає транспортні компанії та споживачів розглянути можливість переходу на це альтернативне паливо.

Згідно з дослідженням, використання природного газу в автобусах забезпечує менший рівень шуму та вібрацій у порівнянні з традиційними видами палива, що сприяє подовженню терміну експлуатації та зниженню витрат на обслуговування. Оператори автопарків зазначають, що витрати на технічне обслуговування зменшуються на 40% завдяки рідкішим технічним перевіркам. Також відзначається, що двигуни СПГ працюють ефективніше, ніж бензинові, завдяки меншій кількості детонацій і широкому діапазону температурних норм.

На відміну від власників приватних авто, газомоторні двигуни більше використовуються в комерційному транспорті через високу вартість переобладнання. За даними Коаліції транспортних засобів на природному газі (2005), це зумовлено низьким рівнем виробництва СПГ та відсутністю економії за рахунок масштабу. Незважаючи на урядові ініціативи щодо популяризації СПГ, обізнаність споживачів ще недостатня через нечіткі маркетингові стратегії.

Дослідження виявили незначне зниження продуктивності двигуна на 10-15% у транспортних засобах, що працюють на СПГ. З'ясували, що нижчий ступінь стиснення в спеціалізованих двигунах СПГ порівняно з дизельними є головною причиною такого зниження продуктивності. Двигуни із запалюванням від іскри у спеціальних СПГ не працюють при ступені стиснення вище 11,5:1, але цю проблему можна вирішити за допомогою двопаливного двигуна, який буде обговорено пізніше.

Виявили, що відсутність заправних станцій є ще однією причиною непопулярності газомоторів серед споживачів. Наприклад, у Малайзії доступ до СПГ-станцій обмежений, оскільки лише наразі надає такі послуги. Власники транспортний засіб, що працює на природному газі зазначають, що тривалий процес декомпресії та заправки СПГ часто призводить до довгих черг на заправних станціях, створюючи незручності для власників.

Через газоподібний стан палива СПГ також спостерігається прискорене зношування випускних клапанів через ефект висушування.

1.3 Біогаз як автомобільне паливо

Під час анаеробного розкладання, коли органічний матеріал розпадається без доступу кисню, він розщеплюється різноманітними мікроорганізмами на декілька етапів. Як результат, утворюється газ, більша частина якого складається з метану та вуглекислого газу, відомий як біогаз, а також суспензія або тверда фракція, відома як дигестат, що містить залишки переробленого субстрату. Біогаз можна виробляти з різних типів органічних матеріалів, окрім лігніну, який не піддається анаеробному розкладанню. Склад субстрату визначає якість біогазу та його вміст метану. Звалищний газ, який утворюється під час розкладання органічних матеріалів на звалищах, схожий на біогаз, але має менший вміст метану і зазвичай містить азот з атмосферного повітря, що проникає в нього. На відміну від біогазу з ферм, звалищний газ може містити більшу кількість слідових газів.

Існує кілька технологій виробництва біогазу, зокрема одностадійне, двостадійне та сухе бродіння. Вибір субстрату, технології виробництва та методи збору газу впливають на його хімічний склад (див. таблицю 1.3).

Щоб підвищити якість сирого біогазу, газ зазвичай очищається від небажаних речовин, таких як сірководень, кисень, азот, вода та частинки. Основна причина цього - запобігання корозії та механічному зносу обладнання, в якому використовується біогаз. Основна відмінність у складі між біогазом та природним газом полягає у вмісті вуглекислого газу. Вуглекислий газ є одним із основних компонентів біогазу, тоді як у природному газі його дуже мало.

Крім того, природний газ також містить більш високі рівні вуглеводнів, відмінних від метану. Ці відмінності призводять до меншого енергетичного вмісту біогазу на одиницю об'єму порівняно з природним газом (Табл. 1.3). Відокремлення вуглекислого газу від біогазу в процесі модернізації робить енергетичний вміст модернізованого біогазу порівнянним з природним газом. Декілька країн визначили стандарти для інжектування модернізованого біогазу в мережу або для використання в якості палива для транспортних засобів. Франція, Німеччина та Швейцарія мають два рівні вимог до модернізованого біогазу з різними обмеженнями, що застосовуються для інжектування газу низької та високої якості. Швеція має один стандарт, визначений для біогазу, що використовується в якості палива для транспортних засобів.

Таблиця 1.3. Склад біогазу, звалищного газу та природного газу.

Параметр	біогаз	Звалище газ	Природний газ (датська)*	Природний газ (голландська)
Метан (об.%)	60-70	35-65	89	81
Інший гідро вуглецю (об.%)	0	0	9.4	3.5
Водень (об.%)	0	0-3	0	—
Карбон двоокис (об.%)	30- 40	15-50	0,67	1
Азот (об.%)	~0,2	5- 40	0,28	14
Кисень (об.%)	0	0-5	0	0
Водень сульфід (ppm)	0-4000	0-100 2.9		
		—		
Аміак (ppm)	~100	~ 5	0	—
Нижній опалювального значення (кВт·год/Нм ³)	6.5	4.4	11.0	8.8

Окрім метану та CO₂, біогаз також може включати в себе воду, сірководень, азот, кисень, аміак, силосани та частки. Рівень цих домішок залежить від типу субстрату, з якого виробляється газ. У процесах модернізації,

де CO₂ відокремлюється від біогазу, водночас усуваються і інші небажані елементи. Проте перед модернізацією очищення газу може бути корисним для запобігання корозії та механічного зносу устаткування.

Видалення води. Біогаз, що виходить з дигестора, насичений водяною парою, яка може конденсуватися в газопроводах і викликати корозію. Воду можна усунути за допомогою охолодження, стиснення, абсорбції або адсорбції. Збільшення тиску чи зниження температури дозволяє конденсувати воду з біогазу для її подальшого видалення. Просте охолодження можливе шляхом заковування газопроводу з конденсаційною пасткою в землю. Для адсорбції води використовують, наприклад, SiO₂, активоване вугілля або молекулярні сита, які регенеруються шляхом нагрівання або зниження тиску. Інші методи включають абсорбцію у розчинах гліколю або використання гігроскопічних солей.

Видалення сірководню. Сірководень утворюється в результаті мікробіологічного перетворення сполук із вмістом сірки (сульфатів, пептидів, амінокислот). Його концентрації у біогазі можна зменшити за допомогою осадження у рідині дигестора чи обробки газу, а також під час видалення CO₂.

Додавання іонів Fe²⁺ або Fe³⁺, наприклад у вигляді FeCl₂, FeCl₃ або FeSO₄, до дигестора спричиняє утворення майже нерозчинного сульфїду залїза, який видаляється разом із дигестатом. Цей метод переважно використовується в дигесторах із високим вмістом сірки або у випадках, де допустимий високий рівень H₂S у біогазі (наприклад, понад 1000 ppm). Розроблено кілька технологій для усунення H₂S з біогазу, які будуть описані далі.

Адсорбційний процес на активованому вугіллі. Сірководень ефективно адсорбується на внутрішніх поверхнях спеціально обробленого активованого вугілля з точно визначеними порами. Коли додають кисень (в умовах наявності води), H₂S окислюється в елементарну сірку, яка прилипає до поверхні. Щоб підвищити швидкість цієї реакції та загальну ефективність адсорбції, активоване вугілля обробляють або збагачують (шляхом додавання активної речовини до утворення активованого вугілля) перманганатом, йодистим калієм (KI), карбонатом калію (K₂CO₃) або оксидом цинку (ZnO) для каталітичної дії. Для введення в газову мережу чи використання як транспортного палива

дозволяються тільки невеликі кількості кисню в газі, тому процес окислення сірки в цьому випадку не є доречним. Тому зазвичай використовують вугілля, збагачене KI або імпрегноване перманганатом, оскільки додавання кисню не потрібно при використанні KI із зменшеним навантаженням. Хоча вугілля, імпрегноване ZnO, коштує дорожче, воно забезпечує надзвичайно ефективно видалення H₂S, досягаючи концентрацій менше 1 ppm.

Хімічна абсорбція. Один із найстаріших методів усунення H₂S - це використання розчинів гідроксиду натрію (NaOH) для промивання. Проте, через складність у поводженні з цією їдкою речовиною, його використання стало рідкісним, крім випадків обробки великих об'ємів газу або з високим вмістом H₂S. Сірководень також може бути адсорбований за допомогою матеріалу, покритого оксидом заліза (Fe(OH)₃ або Fe₂O₃), такого як пресовані мінерали або деревні стружки. У цьому методі біогаз пропускають через матеріал, оброблений оксидом заліза. Регенерація можлива обмежену кількість разів, після чого потрібно оновити наповнення колони. Система працює з двома колонами: одна абсорбує, а інша реоксидує. У випадку наявності невеликої кількості повітря у біогазі, система може функціонувати з однією колоною, але ефективність нижча, ніж у системи з двома колонами. Цей метод застосовувався у світових очисних спорудах стічних вод, до того як стало стандартом додавання Fe³⁺ для видалення фосфатів одночасно. Оксид заліза також використовується в SOXSIA® (окислення сірки та абсорбція силоксанів), каталізаторі, розробленому Gastreatment Services B.V., який абсорбує силоксани та видаляє H₂S з сирого газу. Можна видалити до 2000 ppm H₂S з газу при 40°C, атмосферному тиску та здатності обробляти 1000 Nm³ сирого газу на годину. Інший комерційний продукт для абсорбції сірководню з біогазу - це Sulfa Treat®.

Сірководень також можна абсорбувати у розчині феричного хелату, де іони Fe³⁺ редукуються до іонів Fe²⁺, а сірководень окислюється до елементарної сірки. Розчин феричного хелату регенерується в іншій судині за допомогою кисню та води. Технології хелатування призначені для великих навантажень і зазвичай не застосовуються на біогазових станціях. Процес, розроблений недавно нідерландською компанією Procede, базується на реакції

осадження між сірководнем і металевим іоном у водному розчині. Сформований металевий сульфід майже відразу осідає. Металевий іон регенерується за допомогою кисню, перетворюючи зв'язану сірку на діоксид сірки, який може використовуватися для виробництва сірчаної кислоти або гіпсу. Процес здатен очистити біогаз до рівня менше ніж 1 ppm сірководню. Він був випробуваний на пілотному заводі (5 Нм³/год) і буде доступний для біогазових заводів до 1500 Нм³/год. Acrion Technologies Inc. розробила систему CO₂ Wash® для очищення звалищного газу, яка видаляє силосани, сірчані та галогеновані сполуки, а також неметанові вуглеводні з звалищного газу [2]. Небажані сполуки відокремлюються рідким CO₂, отриманим з звалищного газу. Видалені сполуки, розчинені в рідкому CO₂, можуть спалюватися разом з звалищним газом. Додатково система CO₂ Wash® виробляє чистий рідкий CO₂ та газовий потік, що містить метан і CO₂. Рідкий CO₂ має чистоту 99,99%, а концентрації силосанів, хлорованих вуглеводнів та сірчаних сполук у газовому потоці всі нижчі від меж виявлення 5 ppb, 10 ppb та 100 ppm.

Біологічна обробка. Мікроорганізми родів *Thiobacillus* та *Sulfolobus* можуть окиснювати сірководень. Оскільки для цього процесу необхідний кисень, при біологічному десульфурованні вводять невелику кількість повітря (або чистого кисню для мінімізації вмісту азоту). Окислення можливе всередині дигестора і полегшується шляхом фіксації природно наявних у дигестаті мікроорганізмів. Іншою опцією є використання крапельного фільтра, через який проходить біогаз при виході з дигестора. На матеріалі фільтра ростуть мікроорганізми, а біогаз, змішаний з повітрям, стикається з протитоком води, яка містить поживні речовини. Сірковмісний розчин видаляється та замінюється, коли рівень рН падає нижче визначеного рівня. Обидва методи широко використовуються, але вони не підходять для використання біогазу як палива для транспорту або для інжектування в газову мережу через залишковий кисень. Компанією Profactor була розроблена альтернативна система, у якій процес абсорбції H₂S відділений від біологічного окислення до сірки, таким чином зберігаючи потік біогазу вільним від кисню.

Зазвичай у біогазі не міститься кисню, адже він споживається факультативними аеробними мікроорганізмами в дигесторі. Проте, якщо у

дигесторі присутнє повітря, азот залишається у газі після його виходу з дигестора. Кисень та азот можуть зустрічатися в звалищному газі, якщо його збирають під низьким тиском. Ці гази можна усунути за допомогою адсорбції активованим вугіллям, молекулярними ситами або мембранами, а також частково під час процесів десульфурування чи модернізації біогазу. Однак усунення цих компонентів складне та вимагає значних витрат, тому краще уникати їх наявності, якщо біогаз не використовується для комбінованих теплових електростанцій (КЕС) або котлів.

Аміак утворюється в процесі розкладання білків. Концентрація аміаку в газі залежить від складу субстрату та рН у дигесторі. Зазвичай аміак усувається під час сушіння газу або його модернізації, тому окремий етап очищення зазвичай не потрібен.

Силоксани, які містять зв'язок між кремнієм та киснем, часто використовуються в продуктах особистої гігієни, таких як дезодоранти та шампуні, і можуть присутні у біогазі з очисних споруд стічних вод та звалищного газу. При спалюванні силоксанів утворюється оксид кремнію у вигляді білого порошку, що може викликати проблеми в газових двигунах. Силоксани можна усунути шляхом охолодження газу, адсорбції на активованому вугіллі, активованому алюмінії, силікагелі, або абсорбції у рідких вуглеводневих сумішах. Вони також можуть бути видалені під час процесу відокремлення сірководню.

Частки, присутні в біогазі та звалищному газі, можуть викликати механічний знос у газових двигунах та турбінах. Ці частки зазвичай усуваються за допомогою механічних фільтрів.

Модернізація біогазу чи звалищного газу полягає у видаленні вуглекислого газу, що призводить до збільшення енергетичної щільності через зростання концентрації метану. Доступні кілька комерційних технологій модернізації біогазу, а також інші, що перебувають на рівні пілотних чи демонстраційних заводів, включаючи: Адсорбцію зі змінним тиском (PSA); Водне очищення; Органічне фізичне очищення; Хімічне очищення; Мембранне очищення.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналітичне дослідження процесу створення повітряно-паливної суміші у камерах згоряння газового мотора

Опис математичної моделі. У системі згоряння з двома стадіями, призначеній для гетерогенних сумішей, на етапі стиснення бідна суміш із циліндра перенаправляється до передкамери. Внаслідок цього відбувається розведення і зниження концентрації багатой суміші, яка сформована за допомогою додаткової подачі палива. Кількість палива, що подається у передкамеру, має бути вирахована таким чином, щоб співвідношення повітря до палива на момент запалювання становило приблизно 1.0. Для глибшого розуміння процесу створення суміші газоподібного пропан-бутану з повітрям у передкамері було розроблено нульову модель. Основа цієї моделі - припущення, що стосувалася сумішей на рідкому паливі. Модель враховує зміни у складі паливної суміші в передкамері, що виникають через подачу туди чистого газового палива або більш концентрованої суміші.

В ході модельних досліджень аналізувалася роль кількох параметрів у визначенні надлишкового співвідношення повітря до палива в суміші передкамери на етапі запалювання:

співвідношення повітря до палива для концентрованої суміші, що подається до передкамери до початку стиснення – λ_{ko} ,

рівень заповнення передкамери концентрованою запальною сумішшю – ξ ,

співвідношення повітря до палива для розбавленої суміші у циліндрі, яка потрапляє до передкамери під час стиснення – λ_c ,

інтенсивність згущення суміші в період стиснення – Φ .

Коефіцієнт зжаття мотора:

$$\varepsilon = \frac{V_k + V_\delta + V_s + V_t}{V_k + V_\delta + V_t}. \quad (2.1)$$

Об'єм циліндра на НМТ:

$$V_c = V_{ck} + \frac{\pi D^2}{4} S, \quad (2.2)$$

$$S = r \left(1 + \frac{\lambda_w}{2} \sin^2 \varphi - \cos \varphi \right), \quad (2.3)$$

$$\frac{\pi D^2}{4} r = \frac{V_s}{2}, \quad V_{ck} = \frac{V_s}{\varepsilon - 1}. \quad (2.4)$$

Текучий об'єм циліндра:

$$V_c = V_s \left(\frac{1}{\varepsilon - 1} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_w}{2} \sin^2 \varphi - \cos \varphi \right) \right). \quad (2.5)$$

Перетворення середнього об'єму в передкамері. Припускалося, що процес подачі концентрованої згорючої суміші до передкамери завершується на НМТ.

У камері попереднього згоряння із загальним об'ємом V_k , під час первинних умов (НМТ), можливо виокремити дві області: V_0 і V_r :

$$V_k = V_0 + V_r. \quad (2.6)$$

У області V_0 розташована концентрована суміш, що постачається в камеру за допомогою додаткової системи подачі, тоді як область V_r містить залишки вихлопних газів з попереднього робочого циклу двигуна. Рівень наповнення камери попереднього згоряння концентрованою сумішшю на старті такту стиснення на НМТ:

$$\xi = \frac{V_0}{V_k}. \quad (2.7)$$

Під час ініціювання запалювання за $\phi = \phi_z$, у камері попереднього згоряння можна розділити на три основні сектори: V_2 , V_0' і V_r' . Сектори V_0' і V_r' утворюють зону V_1 , яка під первісними умовами на НМТ займала повний простір камери V_k . Сектор V_2 включає розріджену суміш, що потрапляє з циліндра під час періоду стиску.

$$V_k = V_2 + V_1, \quad (2.8)$$

$$V_k = V_2 + V_0' + V_r'. \quad (2.9)$$

Представлялось, що в первісних умовах на НМТ ($\phi = 0$) рівень тиску та температури згорючої суміші у всьому просторі камери були ідентичними та відповідали показникам у циліндрі. Також гадалось, що потік рідини з циліндра в камеру попереднього згоряння є оптимальним і без втрат, і в момент ініціювання запалювання ($\phi = \phi_z$) рівні тиску та температури суміші у повному просторі камери та циліндра були однаковими. Рівняння стану газу для камери попереднього згоряння в первісних умовах, коли $\phi = 0$ і в момент запалювання, коли $\phi = \phi_z$, виглядає наступним чином:

$$p_o V_k = n_{o0}(MR)T_o, \quad (2.10)$$

$$p_z V_1 = n_{o1}(MR)T_z, \quad (2.11)$$

$$n_{o0}(MR) = n_{o1}(MR), \quad (2.12)$$

$$\frac{T_z p_o}{T_o p_z} = \frac{V_1}{V_k}. \quad (2.13)$$

Формула для визначення стану газу в просторі вище поршня в умовах, що існують на НМТ, коли $\phi = 0$, і в момент розпалу; там де $\phi = \phi_z$:

$$p_o V_m = n_{m0}(MR)T_o, \quad (2.14)$$

$$p_z V_z = n_{m1}(MR)T_z, \quad (2.15)$$

$$n_{m0}(MR) = n_{m1}(MR), \quad (2.16)$$

$$\frac{T_z p_o}{T_o p_z} = \frac{V_z}{V_m}. \quad (2.17)$$

Аналізуючи формули (2.13) та (2.17) отримано:

$$\frac{V_1}{V_k} = \frac{V_z}{V_m} = \frac{T_z p_o}{T_o p_z}, \quad (2.18)$$

$$\frac{V_z}{V_m} = \frac{V_k + V_\delta + V_x + V_t}{V_k + V_\delta + V_s + V_t}, \quad (2.19)$$

Поточний капациет циліндра:

$$V_x = \frac{V_s}{2} \left(1 + \frac{\lambda_w}{2} \sin^2 \varphi - \cos \varphi \right), \quad (2.20)$$

За умови внесення змін:

$$\frac{V_z}{V_m} = \frac{V_k + V_\delta + V_t + V_s \frac{1}{2} \Omega}{V_k + V_\delta + V_s + V_t}, \quad (2.21)$$

Внаслідок проведеної заміни:

$$\Omega = 1 + \frac{\lambda_w}{2} \sin^2 \varphi - \cos \varphi, \quad (2.22)$$

$$\frac{V_z}{V_m} = \frac{\frac{V_k}{a^*} + \frac{V_\delta}{a^*} + \frac{V_t}{a^*} + \frac{V_s}{a^*} \frac{1}{2} \Omega}{\frac{V_k + V_\delta + V_t + V_s}{V_k + V_\delta + V_t}}, \quad (2.23)$$

де

$$a^* = V_k + V_\delta + V_t.$$

$$\varepsilon = \frac{V_k + V_\delta + V_s + V_t}{V_k + V_\delta + V_t}, \quad (2.24)$$

Коефіцієнт зжаття:

$$\frac{V_z}{V_m} = \frac{\frac{1}{2} \Omega \left(\frac{2V_k}{\Omega(a^*)} + \frac{2V_\delta}{\Omega(a^*)} + \frac{2V_t}{\Omega(a^*)} + \frac{V_s}{a^*} \right)}{\varepsilon}, \quad (2.25)$$

$$\frac{V_z}{V_m} = \frac{\frac{1}{2} \Omega \left(\frac{2}{\Omega} + \frac{V_s}{a^*} \right)}{\varepsilon} = \frac{1 + \frac{1}{2} \Omega \frac{V_s}{a^*}}{\varepsilon}, \quad (2.26)$$

$$\varepsilon = \frac{V_k + V_\delta + V_t + V_s}{V_k + V_\delta + V_t} = 1 + \frac{V_s}{V_k + V_\delta + V_t}, \quad (2.27)$$

$$\frac{V_z}{V_m} = \frac{1 + \frac{1}{2} \Omega (\varepsilon - 1)}{\varepsilon}, \quad (2.28)$$

$$\frac{V_z}{V_m} = \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_w}{2} \sin^2 \varphi - \cos \varphi \right) \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} = \Phi, \quad (2.29)$$

де

$$a^* = V_k + V_\delta + V_t,$$

Відповідно до формули (2.18), первинний капацитет суміші, що займає передкамеру на НМТ:

$$V_1 = V_k \frac{V_z}{V_m}. \quad (2.30)$$

Останнім кроком є оцінка змін первинного капацитету передкамери на НМТ:

$$V_1 = V_k \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_w}{2} \sin^2 \varphi - \cos \varphi \right) \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right), \quad (2.31)$$

$$V_1 = V_k \Phi, \quad (2.32)$$

Рівень згущення суміші у процесі стиску Φ представляє відношення поточного капацитету циліндра і передкамери до найбільшого капацитету над поршнем на НМТ:

$$\Phi = \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\lambda_w}{2} \sin^2 \varphi - \cos \varphi \right) \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon}. \quad (2.33)$$

При урахуванні формул (18) та (32):

$$\frac{V_1}{V_k} = \frac{V_z}{V_m} = \frac{T_z p_o}{T_o p_z} = \Phi. \quad (2.34)$$

Підвищене відношення повітря до палива в передкамері в момент ігніції. Відношення зайвого повітря до палива в передкамері під час ігніції, за умови $\phi = \phi_z$, становить:

$$\lambda_{kz} = \frac{n_{O2kz}}{0.21 L_t n_{pkz}}, \quad (2.35)$$

Кількість молів кисню в передкамері на час запалення:

$$n_{O2kz} = n_{O2k} + n_{O2w} + n_{O2r}, \quad (2.36)$$

Кількість молів суміші в передкамері за початкових умов на НМТ:

$$n_0 = n_{ko} + n_{pko}, \quad (2.37)$$

$$n_0 = n_{N2k} + n_{O2k} + n_{pko}, \quad (2.38)$$

$$n_0 = n_{O2k} \left(\frac{n_{N2k}}{n_{O2k}} + 1 + \frac{n_{pko}}{n_{O2k}} \right), \quad (2.39)$$

$$n_0 = n_{O2k} \left(\frac{0.79}{0.21} + 1 + \frac{n_{pko}}{n_{O2k}} \right), \quad (2.40)$$

$$n_0 = n_{O2k} \left(4.76 + \frac{n_{pko}}{n_{O2k}} \right), \quad (2.41)$$

Підвищене відношення повітря до палива у суміші, що подається в передкамеру при НМТ:

$$\lambda_{ko} = \frac{n_{O2k}}{0.21 L_t n_{pko}}. \quad (2.42)$$

Обсяг молів суміші у передкамері при первинних умовах на НМТ.

$$n_0 = n_{O2k} \left(4.76 + \frac{1}{0.21 L_t \lambda_{ko}} \right), \quad (2.43)$$

$$n_0 = n_{O2k} \frac{1 + L_t \lambda_{ko}}{0.21 L_t \lambda_{ko}}. \quad (2.44)$$

Відповідно до формули стану газу, обсяг молекул суміші у передкамері під первісними умовами на НМТ:

$$n_0 = V_k \frac{p_o \xi}{(MR) T_o}, \quad (2.45)$$

Внаслідок аналізу формул (2.44) та (2.45) визначається обсяг молекул кисню у суміші всередині передкамери на НМТ:

$$n_{O2k} = \frac{V_k}{(MR)} \frac{p_o}{T_o} \frac{0.21 \xi L_t \lambda_{ko}}{1 + L_t \lambda_{ko}}. \quad (2.46)$$

Обсяг молекул паливної компоненти суміші у передкамері при НМТ:

$$n_{pko} = \frac{V_k}{(MR)} \frac{p_o}{T_o} \frac{\xi}{1 + L_t \lambda_{ko}}. \quad (2.47)$$

Обсяг молекул суміші, що потрапляє в передкамеру із циліндра під час процесу компресії:

$$n_w = n_{kw} + n_{pkw}, \quad (2.48)$$

$$n_w = n_{N2w} + n_{O2w} + n_{pkw}, \quad (2.49)$$

$$n_w = n_{O2w} \left(\frac{n_{N2w}}{n_{O2w}} + 1 + \frac{n_{pkw}}{n_{O2w}} \right), \quad (2.50)$$

$$n_w = n_{O2w} \left(4.76 + \frac{n_{pkw}}{n_{O2w}} \right), \quad (2.1)$$

Вважалось, що у циліндрі підвищене відношення повітря до палива суміші залишається стабільним і на старті воно відповідає показнику в момент ігніції:

$$\lambda_{co} = \lambda_{cz} = \lambda_c. \quad (2.52)$$

Підвищене відношення повітря до палива суміші у циліндрі:

$$\lambda_c = \frac{n_{O2w}}{0.21 L_t n_{pkw}}. \quad (2.53)$$

Обсяг молекул суміші, що переміщується з циліндра в передкамеру під час періоду компресії:

$$n_w = n_{O2w} \left(4.76 + \frac{1}{0.21 L_t \lambda_c} \right), \quad (2.54)$$

$$n_w = n_{O2w} \frac{1 + L_t \lambda_c}{0.21 L_t \lambda_c}. \quad (2.55)$$

Виходячи з формули стану газу, обсяг молекул суміші, що переміщується з циліндра в передкамеру під час періоду компресії:

$$n_w = (V_k - V_1) \frac{p_z}{(MR)T_z}, \quad (2.56)$$

Аналізуючи формули (2.55) і (2.56), можливо визначити обсяг молекул кисню в суміші, що переходить з циліндра у передкамеру під час стиску:

$$n_{O2w} = (V_k - V_1) \frac{p_z}{(MR)T_z} \frac{0.21 L_t \lambda_c}{1 + L_t \lambda_c}. \quad (2.57)$$

Зміна взаємозв'язку за формулою (2.13) полягає у:

$$V_1 = V_k \frac{T_z p_o}{T_o p_z}, \quad (2.58)$$

$$n_{O2w} = V_k \left(1 - \frac{T_z p_o}{T_o p_z} \right) \frac{p_z}{(MR)T_z} \frac{0.21 L_t \lambda_c}{1 + L_t \lambda_c}, \quad (2.59)$$

$$n_{O2w} = \frac{V_k}{(MR)} \frac{p_z}{T_z} \frac{0.21 L_t \lambda_c}{1 + L_t \lambda_c} - \frac{V_k}{(MR)} \frac{p_o}{T_o} \frac{0.21 L_t \lambda_c}{1 + L_t \lambda_c}. \quad (2.60)$$

$$n_{pkw} = (V_k - V_1) \frac{p_z}{(MR)T_z} \frac{1}{1 + L_t \lambda_c}, \quad (2.61)$$

Обсяг молекул паливної частини суміші, що переміщується з циліндра в передкамеру в період компресії:

$$n_{pkw} = V_k \left(1 - \frac{T_z p_o}{T_o p_z} \right) \frac{p_z}{(MR)T_z} \frac{1}{1 + L_t \lambda_c}, \quad (2.62)$$

$$n_{pkw} = \frac{V_k}{(MR)} \frac{p_z}{T_z} \frac{1}{1 + L_t \lambda_c} - \frac{V_k}{(MR)} \frac{p_o}{T_o} \frac{1}{1 + L_t \lambda_c}. \quad (2.63)$$

Обсяг молекул кисню у решті вихлопних газів передкамери з минулого робочого циклу двигуна:

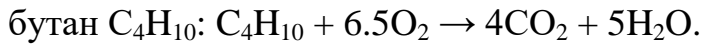
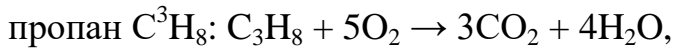
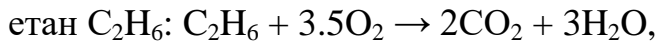
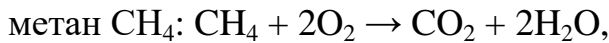
$$n_{O2r} = n_r u_{O2}, \quad (2.64)$$

$$n_{O2r} = \frac{V_k(1 - \xi)}{(MR)} \frac{p_o}{T_o} u_{O2}, \quad (2.65)$$

Вважається, що пропорція кисню у вихлопних газах, які зберігаються в передкамері після попереднього циклу роботи двигуна, обумовлена рівнем перевищення співвідношення повітря до палива в циліндрі. Об'єм азоту у вихлопах:

$$N_2 = 0.79 L_t \lambda_c. \quad (2.66)$$

Об'єм кисню у вихлопних газах (при $\lambda_c \geq 1$): Процеси горіння газового палива пропан-бутанової суміші:



$$\text{O}_2 = 0.21 L_t(\lambda_c - 1). \quad (2.67)$$

Обсяг вихлопних газів:

$$S = L_t(\lambda_c - 0.21) + 3\text{CH}_4 + 5\text{C}_2\text{H}_6 + 7\text{C}_3\text{H}_8 + 9\text{C}_4\text{H}_{10}, \quad (2.68)$$

Пропорція кисню в рештках вихлопних газів, що перебувають у передкамері після минулого робочого циклу двигуна:

$$u_{\text{O}_2} = \frac{0.21 L_t(\lambda_c - 1)}{L_t(\lambda_c - 0.21) + 3\text{CH}_4 + 5\text{C}_2\text{H}_6 + 7\text{C}_3\text{H}_8 + 9\text{C}_4\text{H}_{10}}. \quad (2.69)$$

Для полегшення використання символів:

$$U_{\text{CH}} = 3\text{CH}_4 + 5\text{C}_2\text{H}_6 + 7\text{C}_3\text{H}_8 + 9\text{C}_4\text{H}_{10}. \quad (2.70)$$

У підсумку визначено:

$$u_{\text{O}_2} = \frac{0.21 L_t(\lambda_c - 1)}{L_t(\lambda_c - 0.21) + U_{\text{CH}}}. \quad (2.71)$$

Останній розрахунок молів кисню у вихлопних газах, що залишилися у передкамері:

$$n_{\text{O}_2r} = \frac{V_k(1 - \xi) p_o}{(MR) T_o} \frac{0.21 L_t(\lambda_c - 1)}{L_t(\lambda_c - 0.21) + U_{\text{CH}}}. \quad (2.72)$$

Обсяг молів кисню у передкамері на момент запалювання:

$$n_{\text{O}_2kz} = n_{\text{O}_2k} + n_{\text{O}_2w} + n_{\text{O}_2r}. \quad (2.73)$$

Після застосування рівнянь (2.46), (2.60) та (2.72) був розрахований обсяг молів кисню в передкамері у час запалення:

$$n_{\text{O}_2kz} = \frac{0.21 V_k L_t}{(MR)} \left(\frac{p_o}{T_o} \frac{\xi \lambda_{ko}}{1 + L_t \lambda_{ko}} + \frac{p_z}{T_z} \frac{\lambda_c}{1 + L_t \lambda_c} - \frac{p_o}{T_o} \frac{\lambda_c}{1 + L_t \lambda_c} + \frac{p_o}{T_o} \frac{(1 - \xi)(\lambda_c - 1)}{L_t(\lambda_c - 0.21) + U_{\text{CH}}} \right). \quad (2.74)$$

Обсяг молекул палива у передкамері у момент ігніції:

$$n_{pkz} = n_{pko} + n_{pkw}. \quad (2.75)$$

Використовуючи формули (2.47) і (2.63), було визначено обсяг молекулу палива в передкамері у час запалювання:

$$n_{pkz} = \frac{V_k}{(MR)} \left(\frac{p_o}{T_o} \frac{\xi}{1 + L_t \lambda_{ko}} + \frac{p_z}{T_z} \frac{1}{1 + L_t \lambda_c} - \frac{p_o}{T_o} \frac{1}{1 + L_t \lambda_c} \right). \quad (2.76)$$

Перевищене відношення повітря до палива у передкамері під час запалювання для $\phi = \phi_z$:

$$\lambda_{kz} = \frac{n_{O2kz}}{0.21 L_t n_{pkz}}, \quad (2.77)$$

$$\lambda_{kz} = \frac{\frac{0.21 V_k L_t}{(MR)} \left(\frac{p_o}{T_o} \frac{\xi \lambda_{ko}}{1 + L_t \lambda_{ko}} + \frac{p_z}{T_z} \frac{\lambda_c}{b^*} - \frac{p_o}{T_o} \frac{\lambda_c}{b^*} + \frac{p_o}{T_o} \frac{(1-\xi)(\lambda_c-1)}{c^*} \right)}{0.21 L_t \frac{V_k}{(MR)} \left(\frac{p_o}{T_o} \frac{\xi}{1 + L_t \lambda_{ko}} + \frac{p_z}{T_z} \frac{1}{b^*} - \frac{p_o}{T_o} \frac{1}{b^*} \right)}, \quad (2.78)$$

де

$$b^* = 1 + L_t \lambda_c, \quad c^* = L_t (\lambda_c - 0.21) + U_{CH}.$$

Процес множення чисельника і знаменника на $\frac{T_z}{p_z}$

$$\lambda_{kz} = \frac{\frac{T_z p_o}{T_o p_z} \left(\frac{\xi \lambda_{ko}}{1 + L_t \lambda_{ko}} - \frac{\lambda_c}{1 + L_t \lambda_c} + \frac{(1-\xi)(\lambda_c-1)}{L_t (\lambda_c - 0.21) + U_{CH}} \right) + \frac{\lambda_c}{1 + L_t \lambda_c}}{\frac{p_o T_z}{T_o p_z} \left(\frac{\xi}{1 + L_t \lambda_{ko}} - \frac{1}{1 + L_t \lambda_c} \right)}. \quad (2.79)$$

Застосування співвідношення за формулою (2.34):

$$\frac{T_z p_o}{T_o p_z} = \frac{V_1}{V_k} = \Phi. \quad (2.80)$$

В результаті, перевищене відношення повітря до палива у передкамері під час ігніції:

$$\lambda_{kz} = \frac{\Phi \left(\frac{\xi \lambda_{ko}}{1 + L_t \lambda_{ko}} - \frac{\lambda_c}{1 + L_t \lambda_c} + \frac{(1-\xi)(\lambda_c-1)}{L_t (\lambda_c - 0.21) + U_{CH}} \right) + \frac{\lambda_c}{1 + L_t \lambda_c}}{\Phi \left(\frac{\xi}{1 + L_t \lambda_{ko}} - \frac{1}{1 + L_t \lambda_c} \right) + \frac{1}{1 + L_t \lambda_c}}, \quad (2.81)$$

$$U_{CH} = 3\text{CH}_4 + 5\text{C}_2\text{H}_6 + 7\text{C}_3\text{H}_8 + 9\text{C}_4\text{H}_{10}. \quad (2.82)$$

Коли подається винятково газове паливо в передкамеру при НМТ, що відповідає відсутності надлишку співвідношення повітря до палива у суміші $\lambda_{ko} = 0$, формула 2.(81) переходить у більш простий варіант:

$$\lambda_{kz} = \frac{\Phi \left(\frac{(1-\xi)(\lambda_c-1)}{L_t(\lambda_c-0.21)+U_{CH}} - \frac{\lambda_c}{1+L_t\lambda_c} \right) + \frac{\lambda_c}{1+L_t\lambda_c}}{\Phi \left(\xi - \frac{1}{1+L_t\lambda_c} \right) + \frac{1}{1+L_t\lambda_c}}. \quad (2.83)$$

$$\left| \frac{\partial \lambda_{kz}}{\partial \lambda_{ko}} \frac{\lambda_{ko}}{\lambda_{kz}} \right| = \left| \left[\Phi \frac{\frac{\xi}{1+L_t\lambda_{ko}} - \frac{\xi\lambda_{ko}L_t}{(1+L_t\lambda_{ko})^2}}{\Phi \left(\frac{\xi}{1+L_t\lambda_{ko}} - \frac{1}{1+L_t\lambda_c} \right) + \frac{1}{1+L_t\lambda_c}} + \frac{\Phi \left(\xi \frac{\lambda_{ko}}{1+L_t\lambda_{ko}} - \frac{\lambda_c}{1+L_t\lambda_c} + \frac{(1-\xi)(\lambda_c-1)}{L_t(\lambda_c-0.21)+U_{CH}} \right) + \frac{\lambda_c}{1+L_t\lambda_c}}{\left(\Phi \left(\frac{\xi}{1+L_t\lambda_{ko}} - \frac{1}{1+L_t\lambda_c} \right) + \frac{1}{1+L_t\lambda_c} \right)^2} \frac{\Phi \xi L_t}{(1+L_t\lambda_{ko})^2} \right] \left[\frac{\lambda_{ko} \Phi \left(\frac{\xi}{1+L_t\lambda_{ko}} - \frac{1}{1+L_t\lambda_c} \right) + \frac{\lambda_{ko}}{1+L_t\lambda_c}}{\Phi \left(\frac{\xi\lambda_{ko}}{1+L_t\lambda_{ko}} - \frac{\lambda_c}{1+L_t\lambda_c} + \frac{(1-\xi)(\lambda_c-1)}{L_t(\lambda_c-0.21)+U_{CH}} \right) + \frac{\lambda_c}{1+L_t\lambda_c}} \right] \right|. \quad (2.84)$$

Симуляція була здійснена для аналізу змін та реакції на збільшене відношення повітря до палива в передкамері λ_{kz} протягом такту компресії, від НМТ до моменту ігніції. Виконані обчислення мали на меті оцінити: вплив зміни збільшеного співвідношення повітря-палива згорючої суміші в передкамері при первинних умовах на старті такту компресії (λ_{ko}), вплив модифікації рівня наповнення передкамери концентрованою сумішшю (ξ) та вплив зміни збільшеного співвідношення повітря-палива суміші в циліндрі (λ_c) на збільшене співвідношення повітря-палива суміші в передкамері в момент запалення (λ_{kz}). Були визначені графіки λ_{kz} в залежності від рівня ущільнення суміші протягом такту компресії Φ . Розміри модельованого двигуна були взяті з дійсного двигуна. Обчислення були виконані для збільшеного співвідношення повітря-палива у діапазоні від 0 до 0.45, рівня наповнення передкамери концентрованою сумішшю від 0.06 до 0.96 та збільшеного співвідношення повітря-палива в циліндрі від 1.35 до 2.5 (на НМТ).

2.2 Характеристики двигунів, працюють на стисненому природному газі

На рис. 2.1. представлена схема стандартного вдосконаленого газового транспортного засобу з двома видами палива.

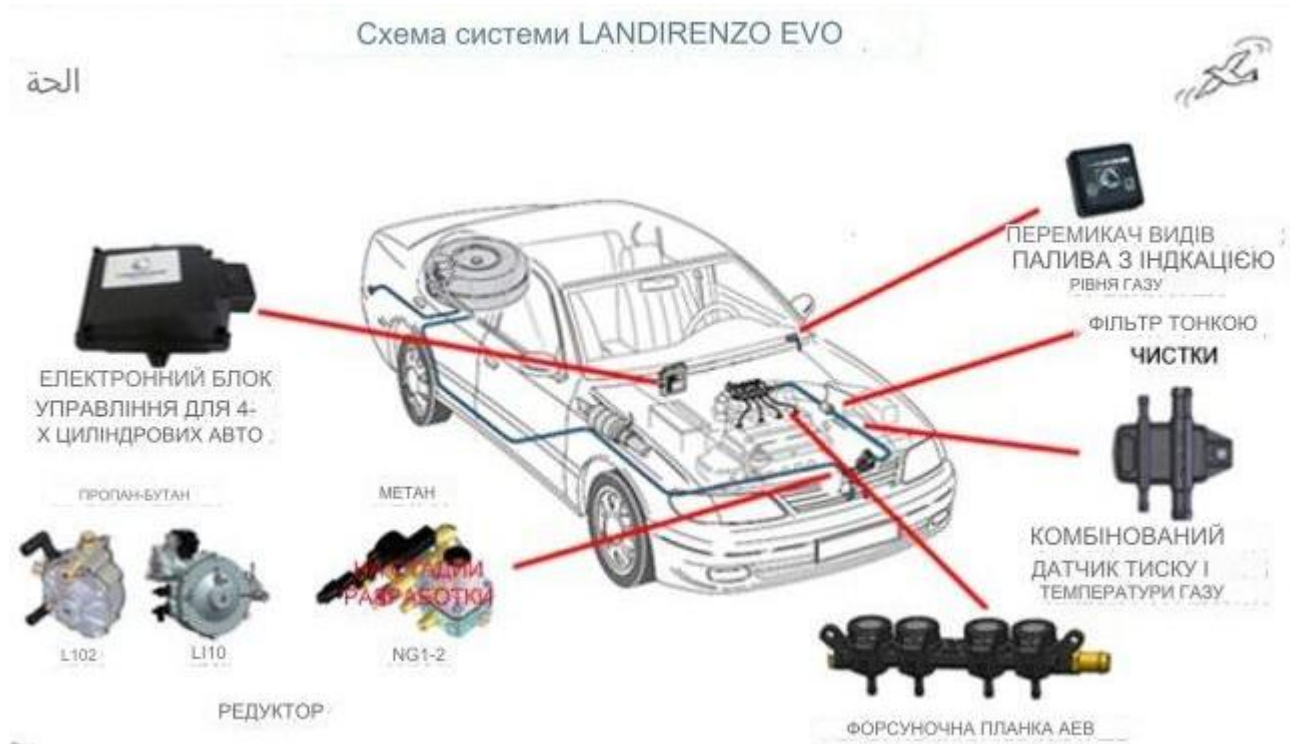


Рис. 2.1. Схема стандартного вдосконаленого газового транспортного засобу з двома видами палива.

Техніка розробки двигунів, що працюють на стисненому природному газі (СПГ), та їх переобладнання довела свою ефективність, при цьому відповідне обладнання для переобладнання широко доступне. В усьому світі численні виробники пропонують двигуни на СПГ як моно-паливні двигуни Отто-циклу, так і дизельні двигуни з можливістю роботи на двох видах палива. У Сполучених Штатах, компанія Cummins Westport Inc. є провідним виробником високоефективних двигунів СПГ для автомобільної промисловості. Компанія розробляє та реалізує двигуни із об'ємом від 6 ... 12 літрів (195...400 кінських сил) для використання в транспортних засобах, такими являються вантажні ТЗ і автобуси.

Cummins Westport ISX12 G (298 кВт) є потужним двигуном, що працює на стисненому природному газі, розробленим для широкого спектру тяжких транспортних засобів, включаючи спеціалізовані вантажівки для вивезення відходів та міські автобуси. Двигун ISX12 G використовує передову технологію стехіометричного горіння з охолоджуваною рециркуляцією вихлопних газів (SEGR), комбіновану з турбонадувом, що забезпечує високу продуктивність. Для відповідності екологічним стандартам викидів, двигун додатково

оснащений системою післяобробки вихлопних газів, що включає тришаровий каталізатор (TWC). Це робить його не тільки ефективним, але й екологічно чистим вибором для комерційного транспорту.

IVECO, як один з чільних європейських розробників та виробників автомобілів та силових установок на природному газі, пропонує різноманітний модельний ряд, який активно використовується як у державному, так і в приватному секторах. Наразі IVECO пропонує кілька видів газових двигунів, серед яких варто відзначити модель IVECO Sofim з об'ємом 3 літри (100 кВт) (рис. 2.2), модель IVECO Tector з об'ємом 6 літрів (рис. 2.3), а також IVECO Cursor з об'ємом 8 літрів та потужністю 200 кВт (рис. 2.4). Усі ці двигуни використовують спеціалізовану систему СПГ SI зі стехіометричним згорянням та інтегрованим тришаровим каталізатором (TWC), що забезпечує високу ефективність та екологічну чистоту викидів. Окрім цього, IVECO активно розробляє та впроваджує інноваційні рішення для підвищення продуктивності та екологічності своїх двигунів, зокрема шляхом вдосконалення системи управління двигуном та оптимізації процесів згоряння.

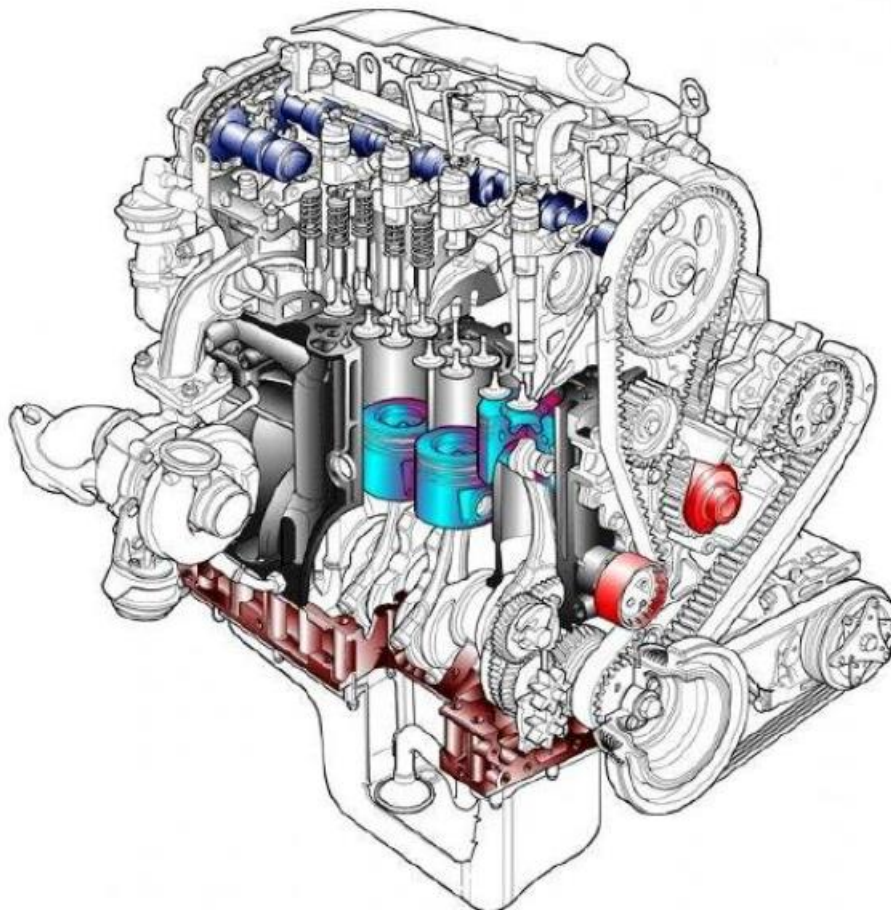


Рис.2.2. Схема ДВЗ Sofim 3л. (100кВт), виробництва ІВЕСО.



Рис.2.3.ДВЗТector8л.,виробництваф.IVECO.



Рис.2.4. ДВЗCursor8л.(200кВт),виробництваф.IVECO.

Автомобільний концерн Volvo є одним з провідних європейських виробників автобусів, що використовують стиснений природний газ (СПГ), посідаючи в цьому сегменті третє місце. З 1992 року компанія розробляє та виробляє як двопаливні, так і виключно на СПГ працюючі двигуни. Одним із їх флагманських продуктів є газовий двигун Volvo FM Methane-Diesel D13C (2.5), який має об'єм 13 літрів та потужність 460 кінських сил. Цей двигун відрізняється високою ефективністю та екологічною чистотою завдяки передовим технологіям згорання та обробки вихлопних газів.

Двигун двопаливний із коефіцієнтом стиснення 17,8:1 відрізняється тим, що використовує 75% стисненого природного газу або біометану у поєднанні з

дизельним паливом. Ця технологія базується на традиційному дизельному двигуні, але з додаванням газових форсунок для впорскування газу. Така конструкція забезпечує високу ефективність та зниження викидів.



Рис.2.5.ДвигунVolvoFMMetan - DieselD13C.

У рамках спеціалізованої лінійки СПГ-двигунів, компанія також пропонує модель G9A - 9,4-літровий шестициліндровий газовий двигун з потужністю 260 або 300 кінських сил та коефіцієнтом стиснення 10,25:1. Цей двигун відповідає вимогам Європейського Союзу щодо викидів вихлопних газів, відповідаючи стандартам Євро-5 та EEV, завдяки чому він є екологічно чистим вибором для транспортних засобів.

З 2006 року Mercedes-Benz розпочав виробництво спеціалізованого двигуна на стисненому природному газі (СПГ) M 447 hLAG (рис. 2.6) з потужністю 185 кВт. Цей двигун встановлюється на міських автобусах Mercedes-Benz Citaro, які відповідають екологічним стандартам Euro4/EEV, забезпечуючи високу ефективність та екологічну чистоту.

Останнім нововведенням компанії є впровадження монопаливного шестициліндрового двигуна M-936G з потужністю 302 кінських сил. Цей двигун, який також представлений на ілюстрації 1.6, вирізняється високою продуктивністю та ефективністю, водночас мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.



Рис.2.6.РозріздвигунаМ - 936G, виробництваф. Mercedes - Benz

2.3 Інженерні характеристики двигуна, що функціонує на скрапленому природному газі

Енергетична продуктивність моторів зумовлена різними чинниками, однак критичним аспектом є величина стиску в циліндрах. Більший стиск призводить до підвищення як теоретичної, так і реальної продуктивності. Індекс детонаційної стійкості газу варіюється між 120 та 130, що дозволяє двигуну працювати зі стиском до 16:1. Високий індекс детонаційної стійкості дає можливість газовим моторам CNG застосовувати вищий стиск для збільшення теплової ефективності, яка може бути на 10% більшою, ніж у бензинових моторів. Таким чином, деякі мотори CNG можуть досягати ККД до 35%, на відміну від 25% у бензинових моторів. Зауважимо, що модифіковані бензинові мотори не зможуть скористатися перевагами високого індексу детонаційної стійкості, оскільки рівень стиску в них налаштований під бензин. Описане вище покращення ефективності можливе лише у спеціальних газових моторах CNG.

Молекулярна вага бензину (114,23 г/моль) значно перевищує таку у газу (16 г/моль). Завдяки своїй невеликій вазі, природний газ здатний створювати

більш рівномірну суміш з повітрям. У свою чергу, рідке паливо потребує додаткового часу для ефективного розподілу та випаровування для формування рівномірної газоповітряної суміші. Газ у газоподібному стані при звичайних умовах атмосфери має природну перевагу у вигляді кращої змішуваності та дифузії з повітрям, що має ключове значення для ефективного процесу горіння.

Економічність споживання палива відіграє ключову роль у порівняльному аналізі ефективності роботи двигунів внутрішнього згорання, що використовують різні типи палива. Численні дослідження виявили, що витрати палива у двигунах на стисненому природному газі (СПГ) були на 12-20% меншими порівняно з бензиновими двигунами у широкому спектрі робочих швидкостей. Така різниця може бути зумовлена наступними основними причинами:

Більша енергетична цінність газу (47,5 мегаджоулів на кілограм) у порівнянні з бензином (43,5 мегаджоулів на кілограм);

Затримка процесу горіння газу в порівнянні з бензином.

Через знижене споживання палива та підвищену енергетичну цінність, мотори, що функціонують на газу, демонструють на 5-12% кращу теплову продуктивність порівняно з бензиновими двигунами.

2.4 Обмеження в роботі двигуна

Ефективність роботи мотора на стисненому природному газі в значній мірі залежить від його дизайну та моделі. Однак ключовою проблемою, яка стоїть перед дослідниками та виробниками сьогодні, є зниження потужності цих двигунів. Ряд характеристик палива на основі СПГ, які впливають на потужність мотора, включають повільне розповсюдження вогню, пониження об'ємної продуктивності та відсутність процесу випаровування палива.

Додатково, через ці особливості СПГ, двигуни можуть вимагати спеціалізованого налаштування для оптимального горіння палива, що може включати зміни в конструкції двигуна та системі управління паливом. Також, зниження потужності може впливати на загальну ефективність транспортного

засобу, особливо при високих навантаженнях або в умовах інтенсивного використання.

Різні дослідження виявили, що швидкість горіння природного газу повільніша в порівнянні з традиційними паливами, такими як бензин або дизель. Це знижене темпо горіння призводить до подовження часу горіння порівняно з бензином чи дизелем, що може спричинити викид більшої кількості незгорілого природного газу через вихлопну систему. Оскільки метан (CH_4) є основним складником природного газу та має найнижчу швидкість горіння серед вуглеводнів, це веде до збільшення втрат енергії через теплопередачу, внаслідок чого вихідна потужність двигуна може знизитися на 5 до 10%.

Ці особливості природного газу вимагають вдосконалення систем управління двигуном та оптимізації процесів горіння для зменшення втрат енергії та підвищення продуктивності. Розробники двигунів працюють над технічними вдосконаленнями, включаючи покращення систем впорскування газу та удосконалення конструкції камери згорання, щоб забезпечити ефективніше та повніше горіння палива. Також розглядається впровадження нових матеріалів та технологій для зменшення теплових втрат та оптимізації загальної роботи двигуна.

Один з ефективних способів подолання недоліку низької швидкості горіння природного газу полягає у його комбінації з іншим паливом, яке характеризується швидким згоранням, таким як водень. Водень вважається оптимальним доповненням до природного газу через його високі показники розповсюдження полум'я (265-325 см/с).

Це поєднання з воднем не тільки підвищує швидкість горіння, але й сприяє збільшенню енергетичної ефективності та зменшенню викидів шкідливих речовин. Використання водню як добавки може також покращити загальні характеристики двигуна, забезпечуючи більш стабільне та повне горіння палива. Крім того, ця стратегія допомагає оптимізувати роботу двигуна в широкому діапазоні робочих умов та знизити ризик накопичення незгорілого газу у вихлопній системі.

Через два основних аспекти, а саме швидкість горіння та внутрішню продуктивність двигуна, звичайні двигуни на стисненому природному газі

(СПГ) мають нижчу потужність порівняно з бензиновими моторами. Різні дослідження показали, що автомобілі на бензині, переобладнані для використання природного газу, втрачають від 15% ... 20% своєї первинної потужності під час експлуатації. Було проведено значну кількість дослідницьких робіт для вивчення робочих характеристик двигунів на СПГ.

Ці висновки спонукали до розробки та вдосконалення технік модифікації та управління двигунами для оптимізації їх продуктивності при роботі на СПГ. Розробники прагнуть знайти шляхи для компенсації цих втрат потужності, включаючи поліпшення системи впорскування палива, збалансування повітряно-паливної суміші та оптимізацію конструкції камери згоряння, щоб підвищити ефективність та зменшити втрати продуктивності.

Аналізували функціональність 1468-кубічного сантиметра 12-клапанного, чотирьохциліндрового мотора зі ступенем стиснення 9,2. Досліджуваний мотор, спочатку розрахований на бензин, був переобладнаний для використання стисненого природного газу з використанням двопаливної системи. Виявилося, що в середньому мотор на СПГ виробляв на 16% менше потужності, ніж на бензині. Висновки показали, що рівні вихлопних газів та гальмівна потужність на СПГ були значно нижчими, ніж на бензині. Дослідження також демонструє, що потужність газового мотора була нижчою, ніж у бензинового аналога. Крім того, дослідники виконали експерименти на одноциліндровому 4-тактному двопаливному моторі для оцінки його продуктивності. Вони виявили, що об'ємний ККД та гальмівна потужність газового мотора були нижчі, ніж у бензинового. Ще одне дослідження включало вивчення впливу зміни випередження запалювання на продуктивність типового двопаливного 4-циліндрового карбюраторного двигуна об'ємом 1600 см³. Результати показали, що максимальна потужність газового двигуна складала 5-10% менше, порівняно з ефективністю при використанні бензину.

В ході наукових досліджень було вивчено робочі характеристики та рівень викидів двигуна Mazda B2000i SI, який працює на двох видах палива: природному газі та бензині. Це дослідження охоплювало різні умови експлуатації двигуна. Результати показали, що при використанні газу як

палива, гальмівна потужність та об'ємний коефіцієнт корисної дії двигуна знижуються на 11-14% порівняно з бензиновим двигуном. Однак, з іншого боку, використання газу збільшує теплову ефективність на 18% у порівнянні з бензиновим паливом.

Аналіз двох різних систем газового палива в двопаливних двигунах, працюючих на бензині та стисненому природному газі (CNG). Ці системи включали змішувальний та послідовний типи. Він досліджував різні аспекти, такі як ефективність, рівень викидів та споживання палива двопаливного двигуна. В результаті було встановлено, що послідовний метод заправки газом перевершує змішувальний метод. Також було виявлено, що втрати потужності у змішувальному типу в 1,78% більше, порівняно з послідовним.

У сфері розвитку двигунів на стиснутому природному газі (CNG) існує тенденція до пошуку більш ефективних методів впорскування палива, таких як пряме та портове впорскування газу в камеру згоряння. Пряме впорскування допомагає підвищити ефективність горіння, збільшуючи тепловий нагрів циліндра і сприяючи кращому перемішуванню паливно-повітряної суміші перед запаленням. Це сприяє підвищенню ефективності згоряння, що в свою чергу покращує потужність та крутний момент двигуна, а також знижує теплові та насосні втрати.

Водночас розробка двигунів з прямим упорскуванням є високовартісною та технічно складною. Це пов'язано з необхідністю модифікації головки блоку циліндрів для прямого впорскування палива та вимагає детального калібрування системи керування двигуном.

Крім того, розглядаються інноваційні підходи, такі як використання різних типів каталізаторів для оптимізації процесу згоряння і зниження викидів шкідливих речовин. Це може включати застосування нових матеріалів для каталізаторів, які ефективніше перетворюють вихлопні гази, зменшуючи вплив на навколишнє середовище. Також обговорюється використання розширеного діапазону контролю над впорскуванням палива, що дозволяє точніше регулювати процес згоряння в залежності від умов експлуатації. Всі ці нововведення мають на меті підвищити ефективність та екологічну безпеку двигунів на стиснутому природному газі.

2.5 Газобалонне обладнання (ГБО) для автомобілів

Газобалонне обладнання (ГБО) для автомобілів складається з кількох ключових компонентів, кожен з яких відіграє важливу роль у його функціонуванні. Основні елементи ГБО включають:

Газовий балон (рис 2.7) це основний елемент системи, який використовується для зберігання стисненого або зрідженого газу. Балони бувають різних розмірів та конфігурацій, в залежності від потреб транспортного засобу.



Рис. 2.7. Різновиди автомобільних газових балонів.

Редуктор (рис 2.8) цей пристрій знижує тиск газу з балона та перетворює його з рідкого стану в газоподібний, підготовлюючи до подачі в двигун.

Форсунки (рис 2.9) вони відповідають за впорскування газу в двигун. Кількість та тип форсунок залежать від конкретної конструкції двигуна.

Комутатор (рис 2.8) цей пристрій дозволяє перемикатися між роботою на бензині та газі, забезпечуючи плавний перехід між різними видами палива.

Газовий фільтр (рис 2.10) фільтрує газ перед його подачею в двигун, очищаючи його від забруднень та часток, які можуть потрапити під час заправки.



ГАЗОВІ РЕДУКТОРИ



Рис. 2.8. Газові автомобільні редуктори.



Рис. 2.9. Газові автомобільні форсунки.

Електронний контролер (рис 2.11) Управляє роботою всієї системи ГБО, оптимізуючи споживання палива та подачу газу залежно від робочих умов двигуна.

Комплект трубок та кріплень (рис 2.12) використовуються для з'єднання всіх компонентів системи між собою та з двигуном.

Для покращення ефективності та безпеки використання ГБО, важливо регулярно обслуговувати його компоненти та виконувати їхній технічний огляд. Також важливим аспектом є використання високоякісних компонентів та професійний монтаж обладнання, що значно знижує ризики і підвищує надійність системи.



Рис. 2.10. Газові автомобільні фільтри



Рис. 2.11. Електронний газовий контролер



Рис. 2.12. Комплект трубок та кріплень для газової установки

2.6 Обслуговування та ремонт автомобільних систем газового палива

Для забезпечення надійної роботи систем на газовому паливі, важливо систематично здійснювати обслуговування та ремонтні роботи у газових модулях. Процедури догляду за таким устаткуванням мають ті ж основні принципи, що й обслуговування стандартних бензинових систем автомобілів, і регулюються згідно з офіційними нормами, які описані у Регламентації щодо догляду та ремонту автотранспортних засобів.

Щоденне догляд за газовими системами автомобіля можна ефективно здійснювати власноруч, але для проведення перших та других технічних обслуговувань (ТО-1 та ТО-2) рекомендується звертатися до професійних сервісних центрів. Це пов'язано з необхідністю детального розбору та перевірки елементів системи, що працюють під високим тиском.

Додатково, спеціалізовані станції забезпечують глибоку діагностику та точне налаштування обладнання, що важливо для забезпечення безпеки та оптимальної роботи газових систем. Експерти мають необхідні знання та спеціальне обладнання для виявлення та виправлення будь-яких потенційних проблем, що можуть виникнути у газовому устаткуванні.

Щоденне обслуговування системи ГБО в автомобілі повинно проводитися як до початку поїздки, так і після її завершення та повернення авто в парковку.

Перед тим як вирушити в дорогу, важливо провести зовнішній огляд всієї газової системи, включаючи перевірку кріплення компонентів газового обладнання та утримуючих елементів газового циліндра, а також переконатися у відсутності витоків у всій системі. Також необхідно перевірити легкість запуску двигуна на газу та його роботу на холостому ходу та при різних обертах колінчастого валу.

Після повернення автомобіля в гараж слід знову перевірити герметичність газового балона та споживчих клапанів, а також очистити газові компоненти від пилу та бруду.

Додатково, на газових редукторах, де можливий збір масляного конденсату, необхідно здійснювати видалення цього конденсату кожні 4-5 заправок газом. Накопичення конденсату на мембрані другого ступеня редуктора може порушити його нормальну роботу.

Під час першого обслуговування системи газового палива в автомобілі проводиться широкий спектр робіт, які включають звичайне підтримувальне сервісування та додаткові очисні та змащувальні процедури.

Цей процес передбачає детальний огляд всіх частин газової установки, включно із перевіркою кріплення компонентів та балонних кронштейнів, а також тестуванням герметичності усєї системи. Особлива увага приділяється роботі запобіжних клапанів газового балона.

Додатково, під час першого сервісного візиту необхідно провести змащування різьбових з'єднань основних, заправних та споживчих клапанів. Щодо очисних процедур, вони включають чищення або заміну фільтруючого елемента в основному газовому фільтрі.

Також під час цього обслуговування виконується тестування герметичності газової системи за допомогою стисненого повітря або інертного газу під тиском 16,0 кгс/см². Перевіряється надійність запуску двигуна та стабільність його роботи на газі при різних обертах колінчастого валу. Крім того, вимірюється вміст СО у відпрацьованих газах і, за потреби, проводиться його регулювання.

Під час другого сервісного відвідування для системи ГБО, крім базових і початкових процедур обслуговування, проводяться додаткові діагностичні та налаштувальні заходи.

У цей період обслуговування на спеціалізованому стенді виконується тестування на герметичність газового редуктора, а також регулювання рівня тиску газу на обох ступенях редуктора. Також перевіряється вільний хід штоків та герметичність клапанів у обох ступенях редуктора, а також герметичність його розвантажувального механізму.

Крім того, під час другого обслуговування на автомобілі з ГБО перевіряється та при необхідності налаштовується кут випередження запалювання для оптимальної роботи двигуна на газі.

Додатково оцінюється кріплення кронштейнів газового балона до елементів кузова, стан і надійність закріплення газових компонентів і трубопроводів, функціонування датчиків рівня зрідженого газу. Також перевіряється стан системи подачі бензину, кріплення карбюратора до впускного патрубку та приєднання впускного патрубку до газового змішувача.

Щорічне сервісне обслуговування системи ГБО, що виконується раз на рік, включає в себе детальний огляд усіх елементів газової установки, у тому числі основного клапана та арматури циліндра.

У рамках цього обслуговування газовий редуктор, газовий міксер, основний клапан та інші клапани знімаються з автомобіля, розбираються, очищаються, а при потребі зношені компоненти замінюються на нові.

Після накопичення пробігу в 30-40 тисяч кілометрів рекомендується замінити гумово-технічні деталі в газовій системі.

Перед початком щорічного обслуговування циліндр з газом повністю спорожняється. Після цього знімають кришки наповнювального та споживчого клапанів без викручування їх корпусів для оцінки стану цих компонентів.

Запобіжний клапан також демонтують з балона і регулюють його на спеціальному стенді.

Ці процедури особливо важливі під час підготовки автомобіля до зимових умов експлуатації.

Що стосується спеціального обслуговування ГБО, яке проводиться кожні два роки, воно включає інспекцію газового циліндра, згідно з Правилами установки та безпечної експлуатації судин під тиском. Ця перевірка здійснюється на спеціалізованих пунктах з ліцензією від відповідних регуляторних органів.

Під час інспекції проводяться гідравлічні випробування циліндра під тиском 2,5 МПа. Після випробувань, за необхідності, циліндр перефарбовується, а на його пластину наноситься інформація про дату поточного випробування та дату наступного.

Основні проблеми, які часто виникають у автомобілях з газовими системами, які оснащені вакуумною або електронною системою керування і встановлені на авто з бензиновими карбюраторними чи форсунковими

двигунами, детально висвітлені в таблиці 2.1. Ця таблиця включає в себе вичерпний перелік типових проблем, з якими може зіткнутися водій, такі як неправильна робота газового редуктора, витік газу, проблеми з вакуумним керуванням або електронною системою управління. Також надається інформація про потенційні джерела цих проблем - від неправильного обслуговування до зносу компонентів - та методи їх вирішення, які можуть включати регулювання, заміну частин або професійний ремонт.

Використання цієї таблиці може значно спростити діагностику та вирішення проблем, пов'язаних з експлуатацією газових систем в автомобілях, допомагаючи водіям уникати серйозних поломок та зберігати систему у робочому стані. Важливо підкреслити, що деякі ремонтні роботи повинні проводитися лише кваліфікованими фахівцями, оскільки неправильне обслуговування або ремонт може призвести до серйозних проблем з безпекою.

Таблиця 2.1. Проблеми, які виникають у газових системах автомобілів, та їх ремонт

Причина несправності	Метод усунення
Двигун не пускається або вже працюючий двигун зупиняється під час руху	
Припинення подачі газу в змішувач:	
Утворення інею на поверхні редуктора - випарника	При температурі навколишнього середовища нижче +5 градусів запускати двигун на бензині і лише після його прогрівання до +40 градусів переходити на газ
У системі підігріву редуктора-випарника - повітряна пробка із-за зниження рівня рідини, що охолоджує, в системі охолодження двигуна	відновити нормальний рівень рідини, що охолоджує, в системі охолодження двигуна
Не відкривається електромагнітний клапан газового фільтру або пусковий	Перевірити відкриття клапанів по характерному клацанню у момент включення запалення. За відсутності клацання

електромагнітний клапан редуктора-випарника	перевірити і при необхідності відновити контакт проводів на клеммах клапанів. Несправні клапани замінити
Підвищена витрата палива при роботі двигуна на бензині після вироблення газу	
Збільшений опір протіканню повітря у впускному тракті карбюратора із-за невідповідності типу змішувача робочому об'єму двигуна	Замінити змішувач першої групи змішувачем другої групи
При роботі двигуна на газі спостерігається і витрата бензину	
Порушена герметичність електромагнітного бензинового клапана	Відновити герметичність або замінити клапан
Погіршення робочих характеристик двигуна після пробігу близько 50 тис. км. (приблизно 3 року експлуатації)	
Знос гумотехнічних деталей редуктора-випарника	Розібрати редуктор-випарник, видалити смолянисті відкладення. Відремонтувати або замінити деталі, що вийшли з ладу
Провали в роботі двигуна при різкому відкритті дросельних заслінок	
Зменшення прохідного перетину в каналах трійника-дозатора або автономного дозатора	Відрегулювати трійник-дозатор на всіх режимах роботи двигуна за допомогою регулювальних гвинтів. Відрегулювати автономний дозатор.
Зниження потужності двигуна, знижена максимальна швидкість автомобіля і ривки при його русі	
Засмічення фільтру електромагнітного газового клапана	Закрити витратний вентиль на балоні. Відвернути накидну гайку магістрального газопроводу від штуцера газового клапана. Відвернути стяжний болт або гвинти кріплення ковпака фільтру і зняти ковпак,

	<p>прагнучи не пошкодити прокладку ущільнювача. Зняти елемент, що фільтрує, розібрати його, промити в розчиннику (646, 647 і тому подібне) і продуту стислим повітрям. При сильному засміченні замінити елемент, що фільтрує.</p>
<p>Недостатньо відкритий клапан другого ступеня редуктора-випарника</p>	<p>Повернути за годинниковою стрілкою для збільшення подачі газу гвинт-регулятор на редукторі-випарнику.</p>
<p>Перекриття прохідного каналу редуктора-випарника і неєм унаслідок обмерзання редуктора із-за недостатнього підігріву.</p>	<p>Двигун не пускається або вже працюючий двигун зупиняється під час руху</p>
<p>Не відрегульований дозатор газу</p>	<p>Відвернути на півобороту гвинти трійника-дозатора або відрегулювати автономний дозатор (за наявності)</p>
<p>Діафрагми першого і другого ступенів редуктора-випарника пошкоджені або втратили еластичність</p>	<p>Частково або повністю розібрати редуктор. Якщо неможливо виправити пошкоджені діафрагми, замінити їх.</p>
<p>Утруднений пуск прогрітого двигуна або його нестійка робота в режимі холостого ходу</p>	
<p>Мимовільна зміна положення регульовального гвинта холостого ходу на редукторі-випарнику</p>	<p>Відрегулювати гвинтом холостого ходу тиск другого ступеня редуктора</p>
<p>Тиск у вторій ступені редуктора-випарника значно вищий або нижчий за норму</p>	<p>Повернути регульовальний гвинт другого ступеня редуктора-випарника проти годинникової стрілки для збільшення подачі газу і, отже, частоти обертання колінчастого валу двигуна і, навпаки, за годинниковою</p>

	стрілкою - для зменшення.
Пропуск газу через клапан другого ступеня редуктора-випарника або засмічення клапана	Очистити або замінити клапан. Відрегулювати регулювальним гвинтом холостого ходу тиск другого ступеня редуктора-випарника.
Підвищена витрата газу (при цьому спостерігається утруднений пуск двигуна і нестійка робота його в режимі холостого ходу)	
Недостатньо розрідження у вакуумному розвантажувальному пристрої редуктора-випарника:	
Негерметичний вакуумний шланг	Відновити герметичність приєднання вакуумного шланга або замінити його
Негерметична діафрагма розвантажувального пристрою	Від'єднати від впускного колектора двигуна вакуумний шланг і засмоктати через нього повітря. Якщо розрідження не відчувається, зняти кришку другого ступеня редуктора і розвантажувальний пристрій. Відновити герметичність діафрагми приклеюванням шматка капронової тканини або замінити її
Повітряна заслінка карбюратора невідкривається	Відрегулювати привід повітряної заслінки

2.7 Економічні показники двигуна

Ефективність двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), що працюють на природному газі, полягає не лише у покращенні економічності палива, але й у зниженні впливу на навколишнє середовище. Такі двигуни часто мають більш низьке споживання палива порівняно з традиційними бензиновими або дизельними двигунами, що призводить до зниження витрат на паливо.

Крім того, природний газ як паливо має меншу вартість за одиницю енергії у порівнянні з бензином чи дизелем, що також сприяє економічності. Це забезпечує додаткові фінансові переваги для споживачів, особливо при високих обсягах використання.

Водночас, двигуни на природному газі виробляють менше шкідливих викидів, таких як оксиди азоту та вуглекислий газ, що робить їх більш екологічно прийнятними. Це може привести до зниження екологічного податку та витрат на викиди, а також підвищення стандартів екологічної безпеки для автотранспорту.

Щоб далі підвищити економічність таких двигунів, розробники працюють над покращенням технологій впорскування палива та зменшенням втрат енергії при згорянні. Також розглядаються можливості використання більш ефективних систем очищення вихлопних газів та впровадження інноваційних технологій для подальшого підвищення енергоефективності та зниження викидів. Все це сприяє збільшенню економічної ефективності ДВЗ на природному газі як у короткостроковій, так і у довгостроковій перспективі.

Основною перевагою природного газу як джерела енергії є його доступність та економічність, особливо у контексті зростаючих цін на нафтові палива, такі як дизель та бензин. Ця вартісна ефективність стає все більш актуальною в умовах світової енергетичної кризи, де паливні витрати продовжують зростати. Хоча спочатку використання природного газу в автотранспорті було спрямоване переважно на зменшення екологічного впливу та контроль викидів, особливо у великих містах, тепер економічний аспект стає дедалі більш важливим.

В багатьох країнах світу вартість природного газу за еквівалент галона значно нижча, ніж ціна бензину або дизельного палива, навіть з урахуванням витрат на його компресію. Це робить газ вигідним, незважаючи на його порівняно нижчу теплову ефективність порівняно з дизельним паливом. Однією з особливостей природного газу є його відносна простота у переробці та транспортуванні від місць видобутку до кінцевого споживача, на відміну від бензину та дизельного палива, які вимагають складних та дорогих процесів переробки від сирової нафти.

Також природний газ менш схильний до різких коливань цін на світовому ринку, на відміну від нафти. Це забезпечує більшу стабільність цін для споживачів. Крім того, його ресурси розподілені більш рівномірно по планеті, що зменшує геополітичні ризики, пов'язані з постачанням.

Цінова перевага природного газу, безумовно, відіграє ключову роль у стимулюванні споживачів переходити з традиційних видів палива на газ, такий як метан або пропан. До того ж, усвідомлення важливості екологічної безпеки та стійкого розвитку також спонукає багатьох споживачів вибирати газ як альтернативне паливо, оскільки він має менший вплив на навколишнє середовище порівняно з викопними паливами.

Ще одним чинником, що сприяє популярності природного газу, є вдосконалення технологій газових двигунів та газових заправних станцій, що робить їх використання більш зручним і доступним для споживачів. Очікується, що ця тенденція продовжиться у майбутньому, оскільки газові технології продовжують розвиватися, а уряди багатьох країн підтримують перехід на альтернативні джерела енергії. Оцінки показують, що вартість природного газу виразно нижча за ціну бензину, складаючи приблизно дві третини від його ціни. Згідно з даними, опублікованими Агентством енергетичної інформації, стиснений природний газ (CNG) в середньому на 42% дешевший за дизельне паливо, враховуючи енергетичну цінність. Прогнозується, що до 2035 року різниця в цінах може збільшитись до 50%.

Багато автопарків, які використовують природний газ, вже фіксують 50%-не зниження витрат на паливо. Це забезпечує значні економічні переваги, особливо для великих транспортних компаній. В одному з недавніх досліджень, проведених Міністерством енергетики, було встановлено, що порівняно з використанням звичайного бензину, використання газу в транспортних парках може знизити витрати на паливо приблизно на 50%.

Додатково, перехід на природний газ дозволяє зменшити екологічний вплив транспорту, знижуючи викиди парникових газів і інших забруднювачів. Це не тільки сприяє сталому розвитку, але й відповідає зростаючим регулятивним вимогам у багатьох країнах. У майбутньому можливий подальший розвиток інфраструктури для забезпечення доступності природного

газу, що буде сприяти його ширшому використанню. Також розвиток технологій може дозволити подальше зниження вартості та підвищення ефективності використання природного газу в якості транспортного палива.

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Апаратура та план тестувань

Дослідження двигуна внутрішнього згоряння зазвичай проводиться за допомогою спеціалізованого обладнання для тестування.

Переведення на газовий тип палива часто здійснюється для двох категорій моторів: бензинових моторів невеликого об'єму, що застосовуються в особистих транспортних засобах, та дизельних агрегатів помірної міцності, які використовують у вантажних машинах та автобусах. Слід вести випробування на спеціалізованих стендах, враховуючи газові двигуни як невеликого, так і середнього розміру.

В такому випадку, для невеликого мотору рекомендовано встановлення пристрою для впорскування пального в циліндри, тоді як для агрегату помірної міцності оптимальним є використання компресора.

Компактний газовий мотор 4ГЧ7,5/7,35, розроблений на основі ГРП від компанії АвтоЗАЗ-Мотор, який масово виробляється ПАТ ЗАЗ, встановлюється на автомобілі типу Sens з бензиновим двигуном МеМЗ-307 рис.3.1, що використовує пальне АІ-95. В стандартному варіанті цей двигун має наступні параметри: діаметр циліндра – 75 мм; довжина ходу поршня – 73,5 мм; відношення стиснення 9,8; номінальна потужність – 51,5 кВт при 5200 об/хв. Для керування мотором використовується мікропроцесорна система Мікас 10.3.

Щоб визначити та обґрунтувати характеристики робочого циклу на дослідницькому обладнанні з мотором 4ГЧ7,5/7,35, було вмонтовано комплексне обладнання, яке забезпечує наступні умови:

здатність функціонувати на бензині, стисненому газі, водневому паливі, а також на їх комбінаціях у різних співвідношеннях;

здатність регулювати склад робочої суміші під час використання будь-якого типу пального;

здатність до контрольованого регулювання магнітуди кута передчасного запалювання;

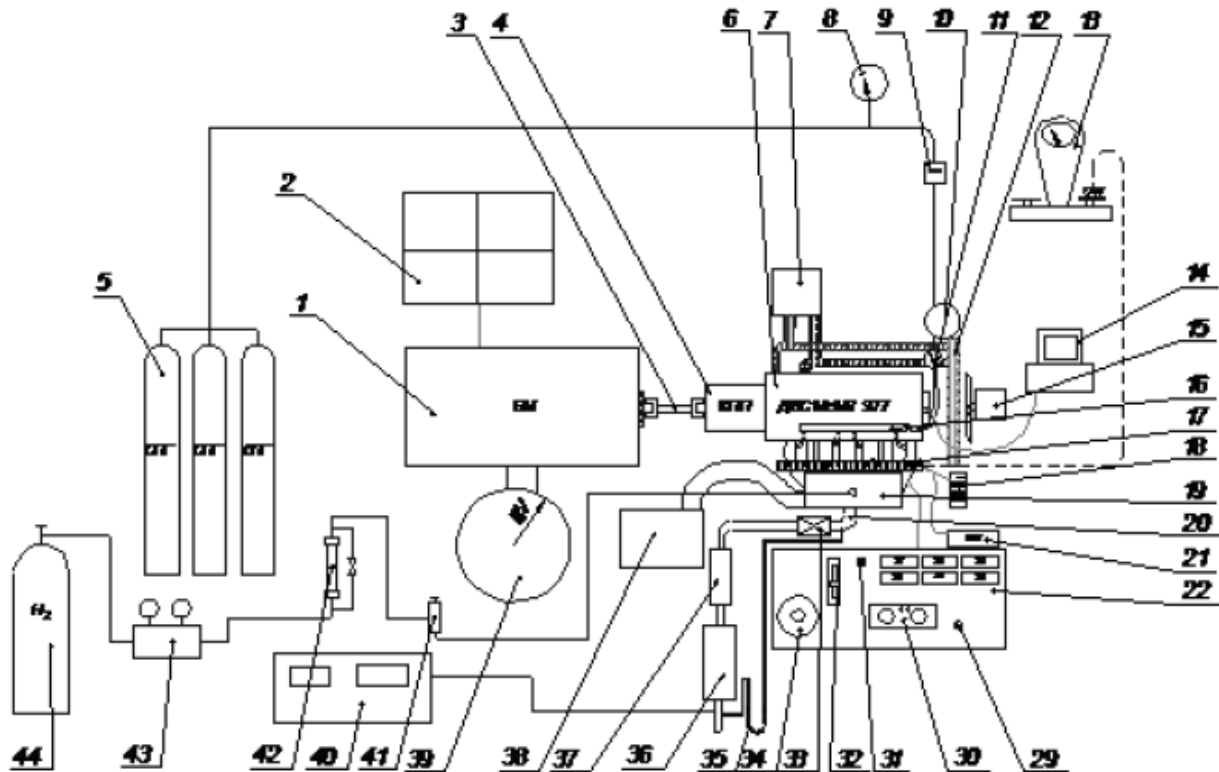


Рис. 3.1. Складові дослідницького стенду з урахуванням мотора MeMZ - 307 :

- 1 - балансувальний агрегат; 2 - комплект опорів; 3 - карданний механізм;
 4 - трансмісія; 5 - баки для газу; 6 - двигун 4ГЧ7,5 / 73,5; 7 - радіатор охолодження; 8 - тискомір; 9 - лічильник споживання газу; 10 - дворівневий газовий регулятор; 11 - тискомір; 12 - охолоджувач двигуна; 13 - тензометричні ваги для визначення споживання рідкого палива; 14 - система вимірювань та обчислень; 15 - вентиляційний пристрій; 16 - газова шина з інжекторами; 17 - бензинова шина з інжекторами; 18 - контролер газової системи; 19 - впускний колектор; 20 - вихлопний колектор; 21 - контролер мотора; 22 - панель керування; 23 - прилад для вимірювання температури охолоджувальної рідини; 24 - інструмент для визначення температури масла; 25 - пристрій для фіксації температури вихлопних газів; 26 - апарат для заміру тиску масла в мастильній системі; 27 - пристрій для фіксації швидкості обертання колінчастого валу; 28 - пристрій для заміру швидкості обертання ротора балансувальної установки; 29 - запальвальний замок; 30 - консоль приладів транспортного засобу; 31 - кнопка переключення палива; 32 - ручка керування дроселем; 33 - механізм для зміни опору впуску; 34 - пристрій для управління навантаженням двигуна; 35 - прилад для фіксації опору вихлопної системи; 36 - шумоглушник; 37 - резонансний пристрій; 38 - лічильник повітряного потоку; 39 - вагова система для визначення навантаження; 40 - аналізатор газів; 41 - голковий вентиль; 42 - ротаметр; 43 - регулятор; 44 - балон з воднем.

реєстрація значення опорного моменту на валу мотора протягом усього спектру зміни швидкості обертання колінчастого валу ($n = 800-5600$ об/хв);

фіксація тиску всередині циліндра мотора (індикаторна діаграма) з подальшим встановленням індикаторних параметрів;

фіксація споживання повітря та пального;

забезпечення постійного температурного стану мотора.

Додатково, автоматизована система аналізу гарантує збір даних з експериментів для швидкої обробки та формування потрібних баз даних.

Щоб забезпечити плавне регулювання моменту опору на валу мотора під час тестування, стенд оснащено електричним навантажувальним пристроєм МПБ-100.

Для передавання енергії від мотора до балансувальної установки вживається механічна трансмісія ВАЗ 2103, яка забезпечує роботу в широкому спектрі обертів колінчастого валу двигуна та карданної передачі. Стенд оснащений додатковим повітряним вентилятором 15 та теплообмінником 7, що дозволяють імітувати температурні умови якомога ближче до реальних умов експлуатації. Також на стенді встановлений шумоглушник і резонатор із стандартної системи вихлопу автомобіля Sens. Для модифікації опору у вихлопній системі передбачена заслінка 33.

Для аналізу функціонування мотора на альтернативних газоподібних паливах стенд оснащений газовою паливною установкою 4-го покоління, що містить: систему балонів із запасом газу 5, дворівневий газовий регулятор 10, трубопроводи високого та низького тиску, газову шину з форсункими 16, контрольний блок газової системи 18. На контрольній панелі 22 передбачена кнопка 31 для переключення між видами палива.

На дослідничому обладнанні з компактним газовим мотором 4ГЧ7,5/7,35 вмонтовано установку для введення доповнення до первинного палива.

Дослідницький стенд, розроблений для аналізу середньопотужного газового двигуна з іскровим запалюванням, був створений на основі газового мотора 6ГЧН13/14. Цей мотор виник в результаті переобладнання дизельного двигуна ЯМЗ-236 в двигун з іскровим запалюванням.

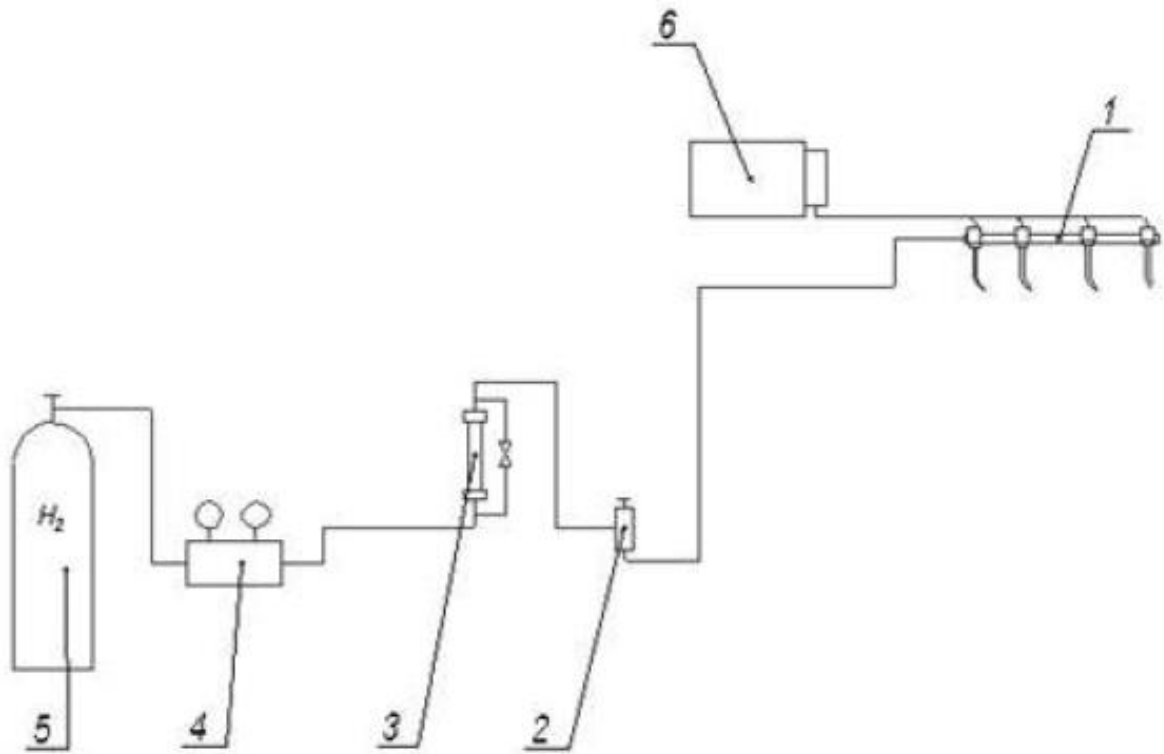


Рис. 3.2. Установка для введения дополнительных веществ у топливо: 1-шлях з форсунками; 2-голковий клапан; 3-пристрій для вимірювання потоку; 4-регулятор низького тиску; 5-циліндр з СПГ; 6-цифровий контрольний блок.



Рис. 3.3. Паливна система мотора 4ГЧ7,5/7,35.

Стенд укомплектований системою високоенергетичного запалювання, газотурбінною системою наддуву, розподіленою системою подачі стисненого природного газу, а також блоком для запису даних.

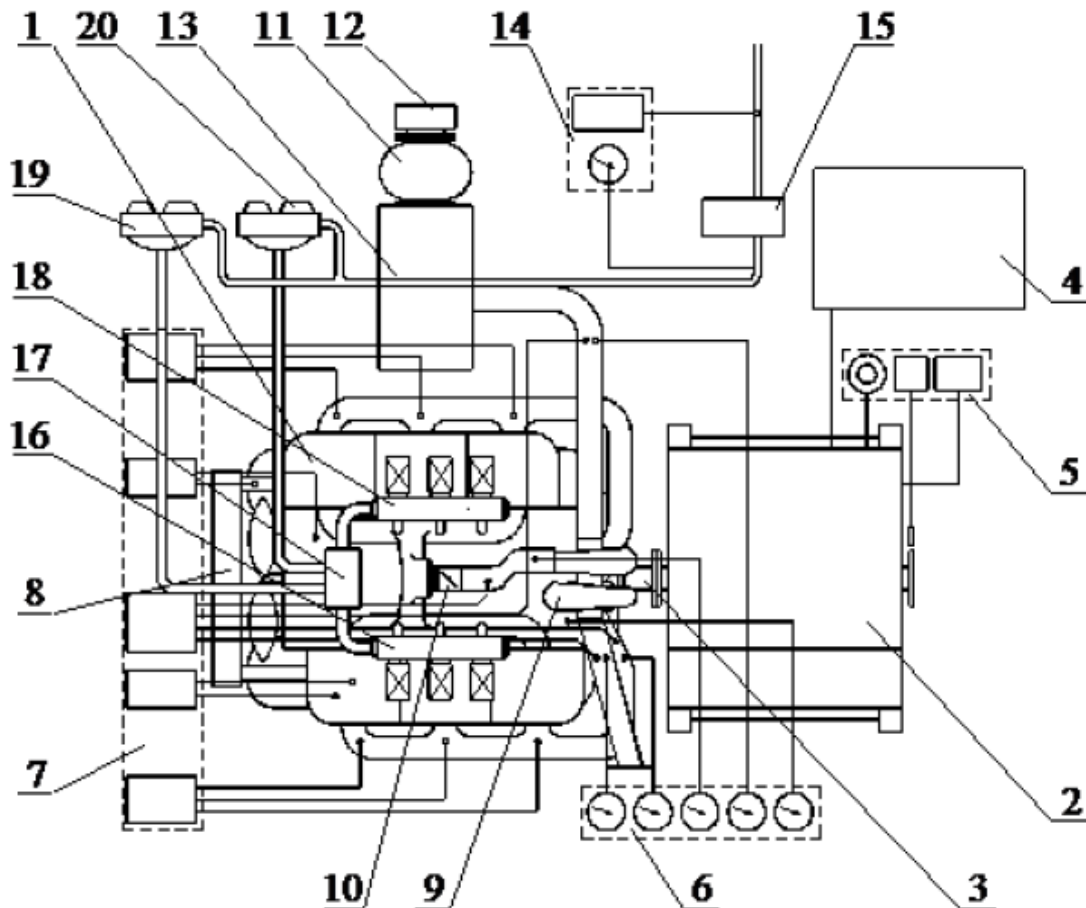


Рис. 3.4. Принципова схема експериментального стенду з урахуванням двигуна 6ГЧН13/14:1 - двигун 6ГЧН13/14; 2 - навантажувальний пристрій DS932 - 4N; 3 - карданна передача; 4 - навантажувальні реостати; 5 - блок управління навантаженням; 6 - блок контролю тисків; 7 - блок контролю температур; 8 - радіатор; 9 - турбокомпресор ТКР - 9; 10 - дросельна заслінка; 11 - лічильник витратиповітря; 12 - повітряний фільтр; 13 - ресивер; 14 - блок реєстрації параметрів газу; 15 - лічильник витрати газу; 16 - дозатор газу лівого ряду циліндрів; 17 - ресивер - заспокоювач; 18 - дозатор газу правого ряду циліндрів; 19, 20 - секвентальний газовий редуктор

3.2 Застосування газів з вмістом водню в двигунах із внутрішнім згорянням

Використання водню як палива для двигунів теплового типу історично зв'язане з розвитком цих моторів: так, перший двигун із внутрішнім згорянням та початкові моделі турбін функціонували на міському газі, який в основному є сумішшю водню та оксиду вуглецю з невеликою кількістю інших газів.

Подальший прогрес у сфері моторобудування продемонстрував, що більш вигідним у плані економіки та технологій, враховуючи конструктивні аспекти як двигуна, так і інфраструктури технічного обслуговування транспорту, є використання рідкого палива, переважно виробленого з нафти.

3.2 Підготовка форсунки для стиснутого природного газу

Існує кілька способів подачі палива в двигун. Один з цих способів - використання електронного паливного форсунки, який у цьому документі називається просто паливним форсункуом. У своїй найпростішій формі паливний форсунку - це клапан, через який паливо проходить від паливної рейки до впускного колектора. Кількість палива, яку отримує двигун, насправді не регулюється паливним форсункуом, а контролюється блоком управління двигуном (ECU). ECU - це комп'ютер на транспортному засобі, який отримує дані про об'єм повітря, що надходить у двигун, швидкість двигуна (у обертах за хвилину), хімічний склад вихлопних газів та інші параметри. ECU аналізує ці дані і визначає відповідну кількість палива, яка має бути впорснута в систему для досягнення стехіометричного згоряння при різних конструктивних точках, визначених вимірними параметрами. ECU на снігоході зі стисненим природним газом (CNG) зараз намагається досягти стехіометричного згоряння з неправильними параметрами палива, тому його потрібно перепрограмувати для роботи двигуна на стисненому природному газі. Для перепрограмування ECU для виробництва певної масової витрати CNG необхідно проаналізувати масову витрату стисненого природного газу за різних параметрів.

Паливо потрапляє в форсунку з паливної шини через вхід. Деталі можна знайти на Рисунку 3.5. вище. Всередині форсунки знаходиться спіраль з мідного проводу (вказана як електрична котушка на Рисунку 3.5), магніт і пружина. Електронний блок керування (ECU) надсилає електричні сигнали до електричної котушки через електричне підключення. Коли електрична котушка активована, вона викликає магнітне поле, що залучає магніт вгору уздовж форсунки. Це призводить до відведення плунжера з отвору клапана, дозволяючи паливу виходити через вихідний отвір форсунки.

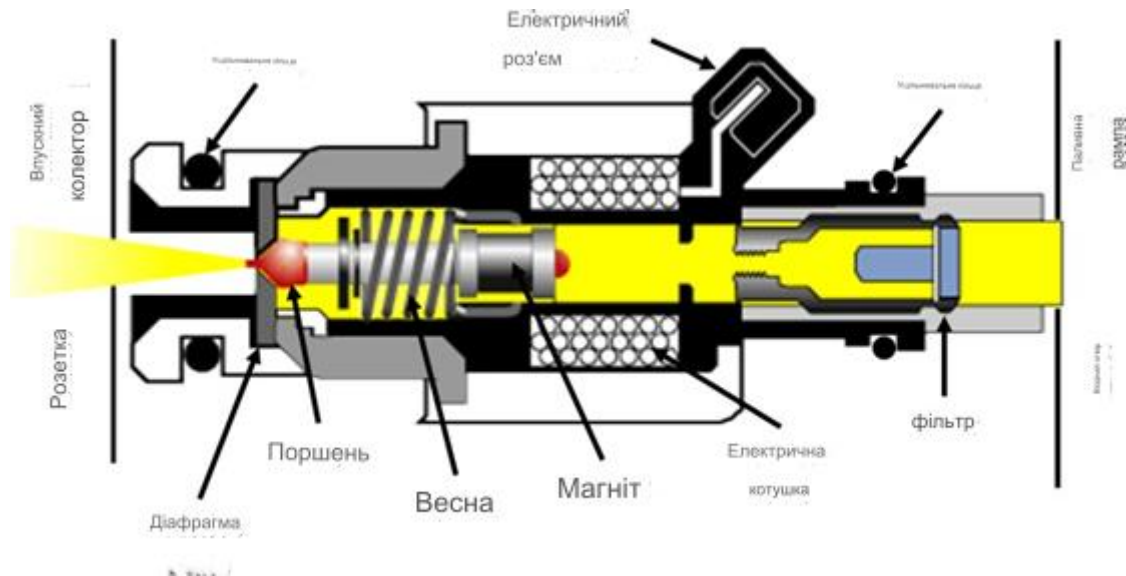


Рис. 3.5. Схема паливної форсунки

Коли ECU вимикає електричний струм до електричної котушки, пружина повертає плунжер назад, перешкоджаючи потоку палива через форсунку. Зазвичай клапан паливної форсунки розроблений так, щоб створювати певний малюнок розподілу палива, що впливає з форсунки. Для звичайного палива, такого як бензин чи дизель, форсунку має на меті розпилувати паливо, перетворюючи його на тонкий туман. Розпилення палива важливе для ефективного змішування з повітрям та повного згоряння під час горіння. Якщо клапан розроблено неправильно або пошкоджено, бензин чи дизельне паливо не буде правильно витікати з форсунки, знижуючи ефективність палива двигуна та збільшуючи його знос. Розпилення палива та створення гарного розпилення не є необхідними для інжекції стисненого природного газу. Оскільки CNG - це газоподібне паливо, воно легко змішується з повітрям і горить рівномірно.

Форсунку стисненого природного газу Delphi Multec, вибраний командою з Капстоун, має довжину приблизно 2,25 дюйми і ширину близько 0,75 дюйма, без урахування електричного з'єднувача, що стирчить з бічної частини форсунки. Цей паливний форсунку з каталожним номером 28371602 представлений на Рисунку 3.6. з правого боку.

Для даного наукового проекту був наданий форсунку Delphi Multec для стисненого природного газу з метою дослідження його структури, щоб можна було визначити та змоделювати рух палива. Використовуваний у дослідженні форсунку мав несправне ущільнювальне кільце біля вхідного отвору. Якщо б

цей форсунку застосовували в снігоході на CNG, з'єднання між паливною рейкою та форсунком було б неідеальним, що могло б спричинити витік палива.



Рис. 3.6. Форсунка для стисненого природного газу Delphi Multec

Для моделювання внутрішніх геометрій паливного форсунки, форсунку довелося розрізати навпіл. Перед здійсненням будь-яких незворотніх дій з паливним форсунком були зроблені фотографії форсунки у профілі, входу форсунки та його виходу. На всіх фотографіях була лінійка для масштабу. Дві з цих фотографій представлені як Рисунки 3.8. та 3.9. нижче. Зразок паливного форсунки потім був поміщений у прямокутну форму, вирівняний та залитий епоксидною смолою. Заливка форсунки в епоксидний прямокутник дозволяє легко розрізати його рівною лінією. Форсунку був залишений на ніч для висихання в епоксиді. Рисунок 3.7. вище показує форсунку, що висихає в епоксиді.

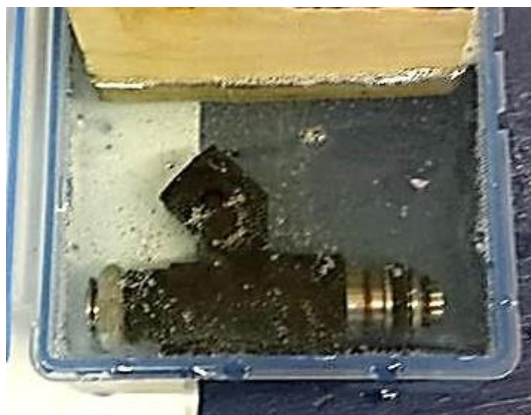


Рис. 3.7. Покриття форсунки епоксидною смолою.

Було запропоновано кілька методів для розрізання паливного форсунки навпіл. Розглядалися використання стрічкової пили, столу з пилою та фрезерного верстата, але вони не були використані, оскільки зуби могли б

пошкодити делікатну внутрішню геометрію форсунки. Ще одним варіантом було використання водомету, але, оскільки форсунку був дуже малим, не було хорошого способу утримати його стабільно для рівного розрізу. Четвертою розглянутою ідеєю було використання шліфувальної машини і шліфування однієї з поверхонь епоксидного прямокутника до досягнення середини форсунки. Цей метод також не був обраний, оскільки на шліфування більше чверті дюйма матеріалу, частина з якого є металом, знадобився б значний час. В кінцевому підсумку для розрізання паливного форсунки навпіл була вибрана пила для мокрої плитки.

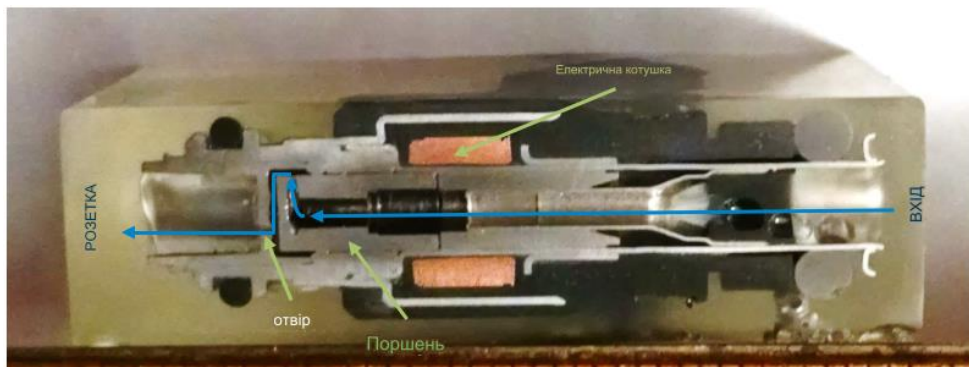


Рис. 3.8. Поперечний розріз форсунки для стисненого природного газу Delphi
Multec



Рис. 3.9. Площа отвору.

Зубці, які могли пошкодити форсунку зсередини, відсутні, тому форсунку було просто керувати під час розрізання, а цей спосіб був набагато простіший за шліфування. Незважаючи на те, що процес розрізання паливного форсунки пилкою для кахлю тривав довше, ніж планувалося, близько півгодини, результати були досить успішними. Перша спроба розрізати форсунку виявилася трохи меншою, ніж до середини, тому залишки були видалені

шліфувальною машиною на ремені. Далі форсунку був відшліфований з використанням все дрібнішого наждачного паперу. В процесі різання та шліфування в усіх щілинах форсунки накопичились металева стружка та пил. Форсунку було ретельно вичищено за допомогою зубних інструментів, щоб видалити всі відходи та змогти розглянути детальну структуру форсунки.

На Рисунку 3.8. нижче зображений розділений навпіл форсунку Delphi Multec для стисненого природного газу. Цей форсунку для CNG має кілька основних спільних рис з традиційним паливним форсункуом. Паливо, показане синіми стрілками, потрапляє в форсунку через вхід, переміщається через його тіло, проходить крізь отвір і виходить з виходу форсунки. Електромагнітна котушка з мідного дроту отримує електричні сигнали від ECU, створюючи магнітне поле, яке відсуває плунжер від отвору. Під час шліфування пружина, що повертає плунжер у закриті положення, була вилучена з форсунки за допомогою шліфувальної машини на ремені, тому на Рисунку 3.8 пружина не відображена.

Хоча видимий лише один канал через плунжер, насправді їх чотири. Повністю видимий тільки один канал, оскільки лінія різу перетинала лише один канал повністю. Чотири канали можна побачити на Рисунку 3.13 в розділі Autodesk Inventor нижче. Також існують чотири отвори, хоча лінія різу перетинала лише один з них. Чотири отвори зображені на Рисунку 3.9.

Розуміння розміру отворів у форсункуі палива, через які протікає стиснений природний газ, критично важливе для обчислення об'єму потоку CNG. Через мініатюрність цих отворів потрібен високоточний інструмент для вимірювань. Через відстань в квартал дюйма між вихідним отвором форсунки та самими отворами, штангенциркуль не в змозі досягти цих отворів для замірів. Тому необхідно було виявити альтернативний метод для визначення площі перерізу отворів.

AutoCAD існує можливість визначення площі об'єкта, що був намальований. Було зроблено фотографію вихідного отвору паливного форсунки з лінійкою для встановлення масштабу. Після цього зображення було внесено до проекту в AutoCAD. Над фотографією було намальовано лінію. Ця лінія мала довжину одного дюйма відповідно до масштабу лінійки на фото. Ця

лінія позначена зеленим кольором на Рисунку 3.8. праворуч. Зображення було пропорційно зменшено на коефіцієнт 1, поділений на довжину зеленої лінії (в дюймах). Таке масштабування дозволило досягти точності, при якій відстань між позначками одного дюйма на лінійці становила реальний 1 дюйм у програмі AutoCAD.

При детальному розгляді зображення вихідного отвору паливного форсунки, отвори були добре видні. Обриси отвору були акуратно відтворені за допомогою ліній та дуг. Створена форма була скопійована і застосована до трьох інших отворів для перевірки їхньої консистенції. Всі три додаткові отвори мали аналогічну форму до першого обведеного. На Рисунку 3.9. справа видно контури отворів, намальовані тонкими червоними лініями. Варто зазначити, що фігура, створена червоними лініями, точно повторює обриси країв отвору. Інструмент MEASUREGEOM в AutoCAD був використаний для визначення площі в межах цих червоних контурів. Площа була обчислена і становила 0.0036 квадратних дюймів, що відповідає площі перетину отворів на виході форсунки. На Рисунку 3.10. вище представлено обчислення площі всіх чотирьох отворів.



Рис. 3.10. Визначення площі отвору в програмі AutoCAD.

3.3 Вирішення задач з допомогою Autodesk Inventor та SolidWorks

Autodesk Inventor - це програма CAD, яка зосереджена на розробці 3D-візуалізацій об'єктів. Вона інтегрує простий у використанні інтерфейс AutoCAD з можливостями SolidWorks. Програма була вибрана завдяки її зручності у

використанні та можливості поєднання моделей, створених у ній, з SolidWorks Flow Simulation (програмою для обчислювальної гідродинаміки, описаною в наступному розділі).

Зображення поперечного перетину форсунки Delphi Multec для стисненого природного газу з лінійкою для масштабу було внесено у новий проект Autodesk Inventor. Це те ж саме зображення, що й на Рисунку 3.6, але без пояснювальних анотацій. Зображення було відмасштабовано так, що один дюйм відповідно до лінійки на зображенні дорівнював одному дюйму у проекті Autodesk Inventor.

Після відмасштабування зображення поперечного перетину форсунки до потрібного розміру, були простежені контури оболонки форсунки. Це охоплює вхід та канал форсунки, пластину отвору, через яку проходить стиснений природний газ, та вихід форсунки. Однак це не включало плунжер, який буде представлений окремою частиною. Не було необхідно детально відтворювати зовнішню частину форсунки, оскільки вона не впливала на потік в форсунку. Таким чином, зовнішній корпус форсунки було намальовано як пряму лінію між входом і виходом. Центральна лінія була проведена через середину паливного форсунки, щоб слугувати віссю обертання при створенні 3D-моделі. До проекту були додані необхідні зв'язки, аби гарантувати, що краї внутрішнього каналу залишаються паралельними до центральної лінії, а пластина отвору - перпендикулярною до неї. Надзвичайно важливо, щоб лінії, які простежують пластину отвору, були перпендикулярні центральній лінії, щоб при обертанні креслення отримана пластина була рівною. Креслення, зображене на Рисунку 3.11. нижче, було вибрано та обернене навколо центральної лінії, створюючи таким чином 3D-модель форсунки стисненого природного газу.

Орієнтація моделі форсунки змінюється так, що стає видимою пластина з отворами. Дана пластина обирається як нова база для креслення.

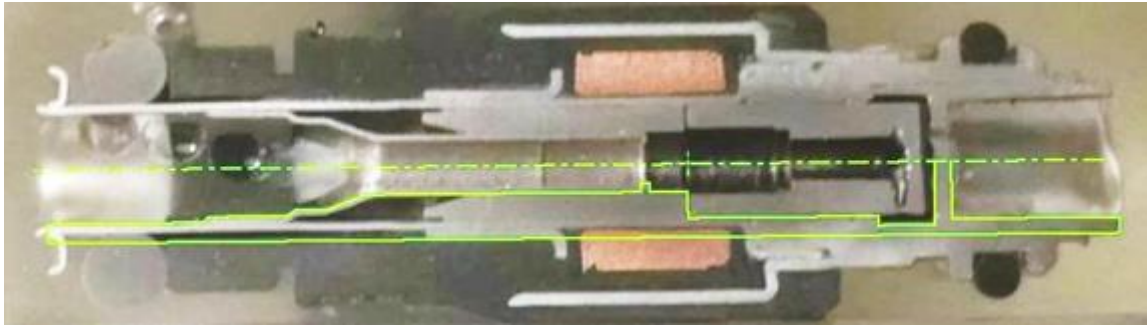


Рис. 3.11. Визначення площі перетину оболонки форсунки в autodesk inventor.

Зображення з отворами пропорційно збільшується до точного розміру, і центр пластини з отворами на фото узгоджується з центром пластини в моделі. Отвори обводяться аналогічно методу. Після цього отвори видовжуються та вирізаються через пластину. Завершена модель перевіряється та зберігається. Плунжер також був змодельований схожим чином на інші елементи форсунки. Ця деталь була відтворена з використанням пропорційного зображення (Рисунок 3.12 справа) і обернута навколо центральної осі. Чотири отвори для проходження палива припускалося, що мають незмінну площу перетину та розташовані під прямим кутом один до одного. Ці отвори були видовжені та вирізані через плунжер. Зображення цієї деталі відображено на Рисунку 3.13 справа.

Створено збірку в Autodesk Inventor із частин оболонки форсунки та плунжера. Обидві частини були зібрані так, що плунжер розміщений концентрично до оболонки форсунки. Плунжер також був встановлений у повністю відкритому положенні для моделювання потоку палива через цю конструкцію. Зображення готової збірки показано на Рисунку 3.14 нижче.

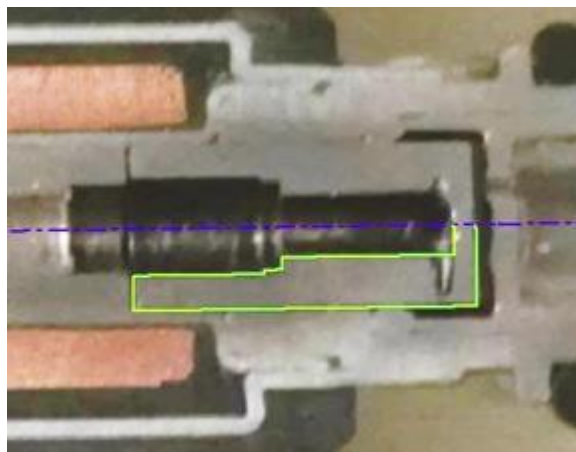


Рис. 3.12. Робота з форсункою і Autodesk Inventor .

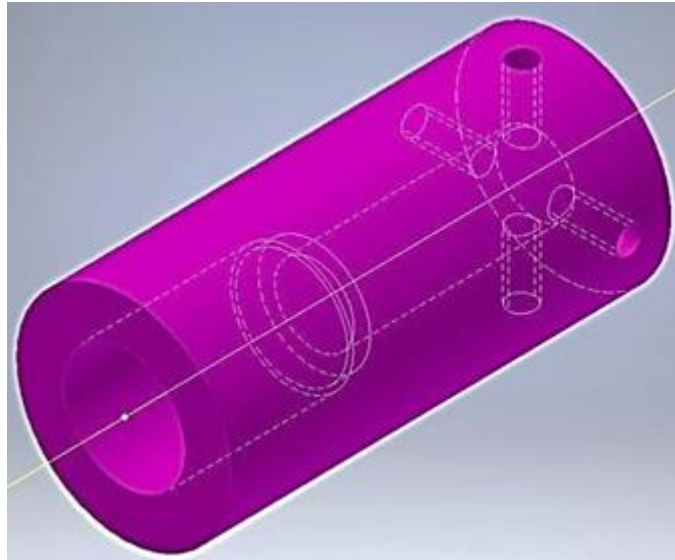


Рис. 3.13. Плу́нжер з видимими отворами в Autodesk Inventor

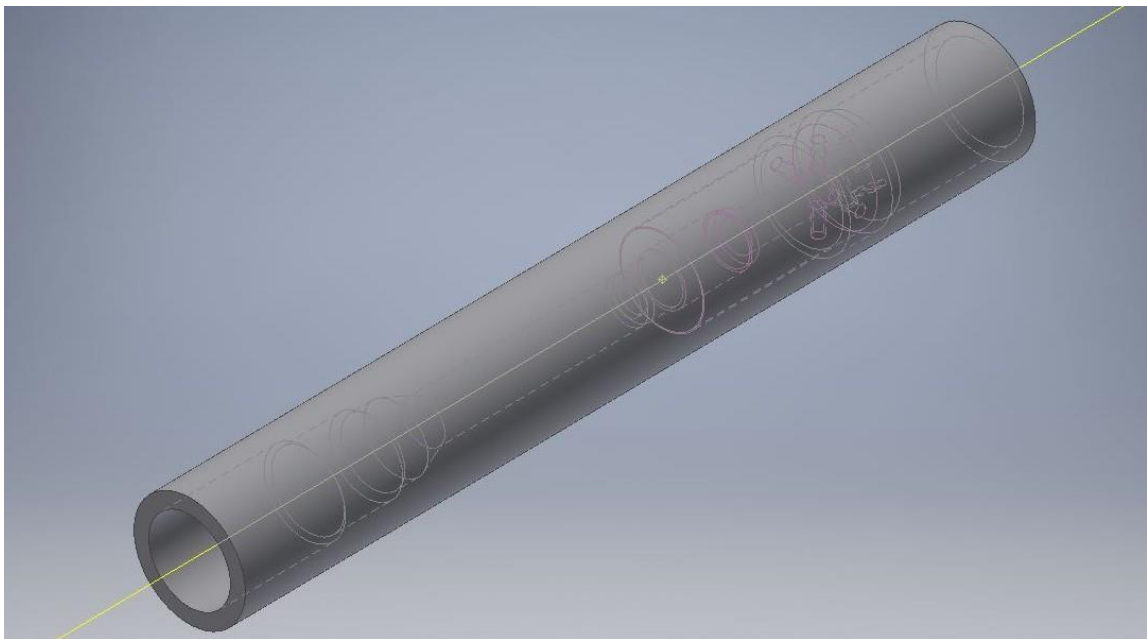


Рис. 3.14. Завершена зборка форсунки в Autodesk Inventor

SolidWorks Flow Simulation - це набір інструментів для обчислювальної динаміки рідин, який є частиною студентської версії SolidWorks. Розглядалися різні програми обчислювальної гідродинаміки, проте остаточний вибір був зроблений на користь SolidWorks Flow Simulation. Вибір був заснований на сумісності з Autodesk Injetor, можливості налаштування симуляцій та швидкості виконання розрахунків.

Модель інжектора Delphi Multec CNG, створена у Autodesk Inventor, була імпортована до SolidWorks. Прозорість моделі була налаштована так, щоб можна було оглянути внутрішні елементи інжектора. Модель інжектора представлена на Рисунку 3.15. нижче. Корпус інжектора, зображений сірим

кольором (обговорювався раніше), та плунжер у фіолетовому кольорі. Для початку аналізу руху рідини необхідно, щоб модель була герметичною, тобто вхід і вихід повинні бути закриті. Для закриття інжектора необхідно скористатися інструментом "Create Lids" з лівої верхньої частини панелі Flow Simulation та обрати поверхні для закриття інжектора. В цій моделі інжектор закритий на вхідних і вихідних поверхнях. На Рисунку 3.15 темно-сірий круг символізує кришку на вихідному боці інжектора.

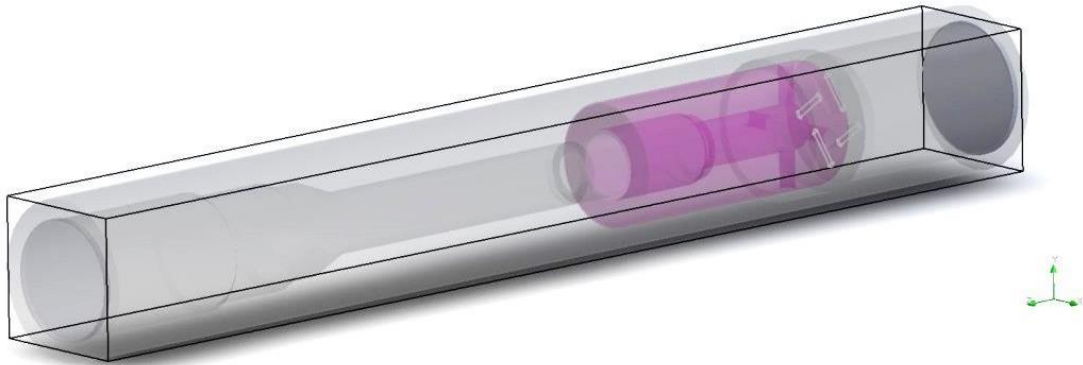


Рис. 3.15. Модель паливної форсунки в SolidWorks.

На даному етапі ініціюється новий аналіз потоку рідини, який у SolidWorks визначається як проект, за допомогою майстра (розміщеного у верхньому лівому кутку панелі Flow Simulation). У версії SolidWorks для студентів єдиним доступним стислим середовищем є вода. Природний газ також не доступний для вибору. Замість цього, для аналізу руху рідини через інжектор використовується метан, оскільки основним компонентом стисненого природного газу є метан. В аналізі руху рідини метан розглядається як нестисливе середовище, оскільки програма не дозволяє аналізувати стисливий потік метану.

Після створення нового проекту за допомогою майстра, потрібно встановити параметри для опису умов на вході та виході, відомі як граничні умови. Для створення нової граничної умови потрібно клацнути правою кнопкою миші на розділ Boundary Conditions у лівому бічному меню SolidWorks та вибрати Insert Boundary Condition. Вибрати місце застосування граничної умови. В цьому випадку створюється умова для внутрішньої поверхні кришки на вході. Вона визначає тиск і температуру входу метану в інжектор. Вхідний тиск встановлюється на різних рівнях загального тиску від 15 lbf/in^2 до 120 lbf/in^2 для різних проектів симуляції потоку, оскільки тиск у

паливній рейці коливається в цих межах. Цей діапазон значно перевищує межі, де метан може вважатися нестисливим, але через обмеження програми доводиться використовувати припущення про нестисливість. Температура завжди встановлюється на рівні 77 °F, оскільки це температура, за якої в підручнику Сонтага і Боргнакке вказані властивості матеріалів. Така ж процедура використовується і для виходу інжектора. Тиск на виході встановлюється на рівні 14.7 lbf/in², а температура - на 77 °F для усіх проектів симуляції потоку, оскільки ці значення відповідають стандартним атмосферним умовам. Процес встановлення граничних умов зображено на Рисунку 3.16 вище.

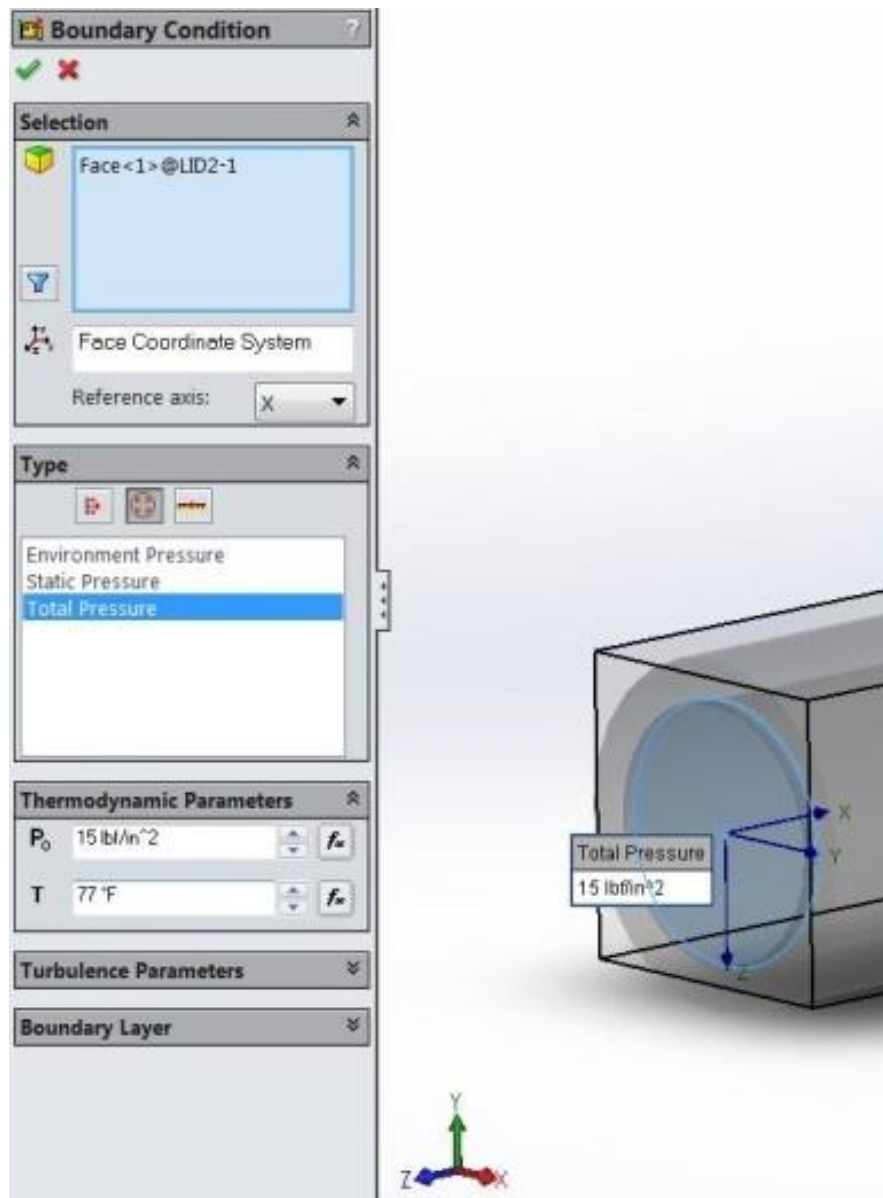


Рис. 3.16. Створення граничних умов у SolidWorks

Далі в процесі слід визначити ціль для аналізу потоку рідини. Встановлення цілі дозволяє програмі розрахувати конкретний результат. Натисніть правою кнопкою миші на Goals та створіть ціль для поверхні. З'явившеся меню представлено на Рисунку 3.17. справа для орієнтиру.

Оберіть внутрішню поверхню кришки на виході та виберіть Mass Flow Rate з меню Parameters. Колонка зліва в меню Parameters дозволяє вибирати значення, які будуть використані для розрахунків збіжності. Вибір забагато параметрів для збіжності істотно сповільнює час обчислень, тому важливо зняти відмітку з непотрібних значень для цього розрахунку інжектора. Передача тепла виключається, оскільки припускається, що інжектор адіабатичний. Всі значення у напрямках x та y також виключені, оскільки напрямок потоку - у z-напрямку. Однак важливо, що масовий потік включений для збіжності, адже цей показник повинен збігатися для точного розрахунку масового потоку через інжектор.

Проект зараз готовий для проведення аналізу. Натисніть на кнопку "Run" і спостерігайте за процесом ітерацій до моменту, коли розрахунки досягнуть збіжності. Завершивши аналіз, можливо сформувати звіт, використовуючи готовий шаблон. У цьому звіті містяться результати симуляції потоку рідини, зокрема, дані про масовий потік. Описана процедура була застосована для різних рівнів тиску в діапазоні від 15 lbf/in² до 120 lbf/in², щоб визначити, як тиск у паливній рейці впливає на масовий потік.

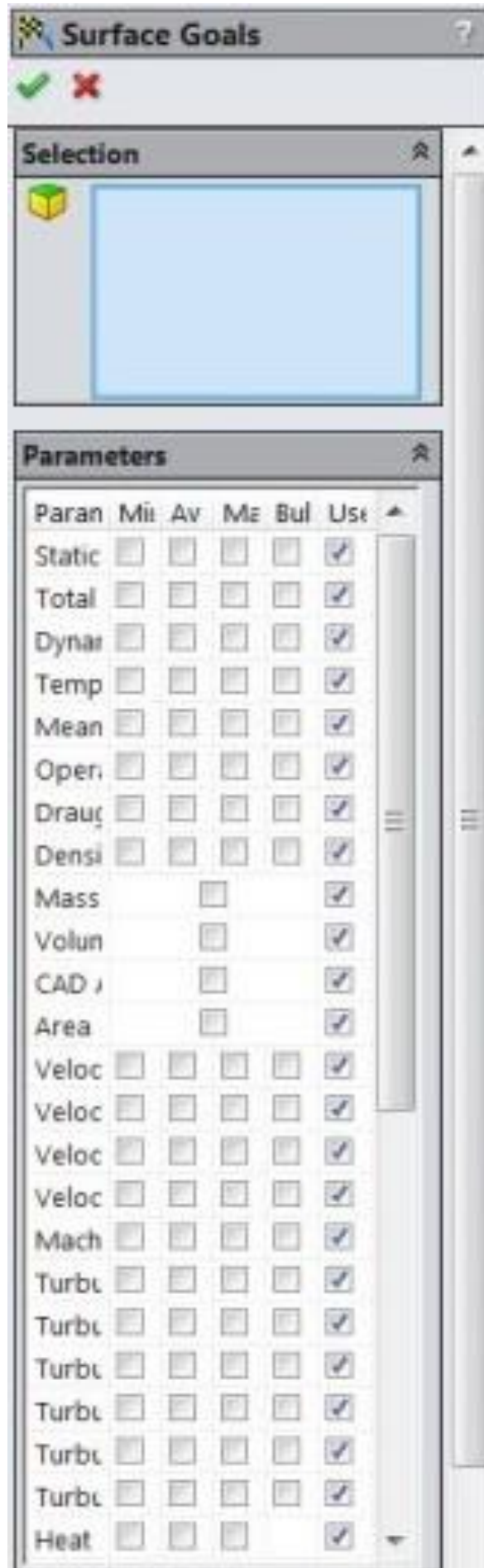


Рис. 3.17. Створення поверхневих цілей у SolidWorks

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ

4.1 Дослідження, яке зосереджується на використанні мотора з одним циліндром

Паливо, як основний компонент для роботи моторів, що спалюють паливо всередині, відіграє ключову роль у генерації енергії. Зі зростанням кількості людей на планеті, потреба у цьому паливі також зростає. Водночас, такі мотори сприяють екологічним проблемам, викидаючи шкідливі речовини у атмосферу. Це підкреслює необхідність шукати альтернативні, більш чисті джерела енергії для зменшення негативного впливу на довкілля.

Емісії, що виникають в результаті роботи традиційних двигунів, негативно впливають на навколишнє середовище, особливо викиди монооксиду вуглецю та оксидів азоту. Це спонукало фахівців у галузі автомобілебудування шукати заміну звичайному паливу. На зміну приходять екологічніші варіанти, такі як природний газ, біодизель та водень. Ці альтернативи не лише зменшують вплив на зміну клімату, але й сприяють зменшенню залежності від обмежених запасів нафти. Впровадження цих нових видів палива відкриває шлях до більш сталого майбутнього в автомобільній індустрії.

Це дослідження зосереджено на використанні метану, видобутого з надр Землі, подібно до інших видів викопного палива. Хоча метан має схожості з традиційними видами палива, його також можна вважати відновлюваним джерелом енергії через можливість переробки та повторного використання. Незважаючи на це, ефективність метану у виробництві енергії є нижчою порівняно з рідкими паливами. Ця характеристика вказує на потребу подальших досліджень для покращення його ефективності як альтернативного джерела енергії.

Більш детальний огляд характеристик цього газу доступний у табличному відображенні 4.1.

Згідно з інформацією, наведеною в таблиці 4.1, основним компонентом цього газу є CH_4 . Як було зазначено раніше, цей газ вважається відновлюваним ресурсом і може застосовуватися в моторах, що спалюють паливо всередині.

Використання метану в таких моторах дозволяє знизити обсяг викидів шкідливих речовин у повітря, хоча він забезпечує меншу потужність у порівнянні з бензином чи дизелем. Це дослідження було зосереджене на вивченні ефективності метану у моторі з одним циліндром, виявивши, що продуктивність мотора на метані відрізняється від звичайних моторів, з деталями, викладеними у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1. Характеристики 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

Таблиця 4.2. Характеристики метану та рідких видів палива.

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

Ця робота зосереджена на вивченні ефективності мотора з додаванням СН₄. Мотор, який тестувався, був оснащений спеціальним устаткуванням для роботи на стислому метані. Випробування проводилися за допомогою гідравлічного динамометра, який функціонував на двох видах палива: газі та рідкому паливі. Результати порівняння та аналізу цих двох типів палива були детально описані. На Ілюстрації 4.1 представлена схема динамометра, мотора та устаткування для модифікації автомобіля.

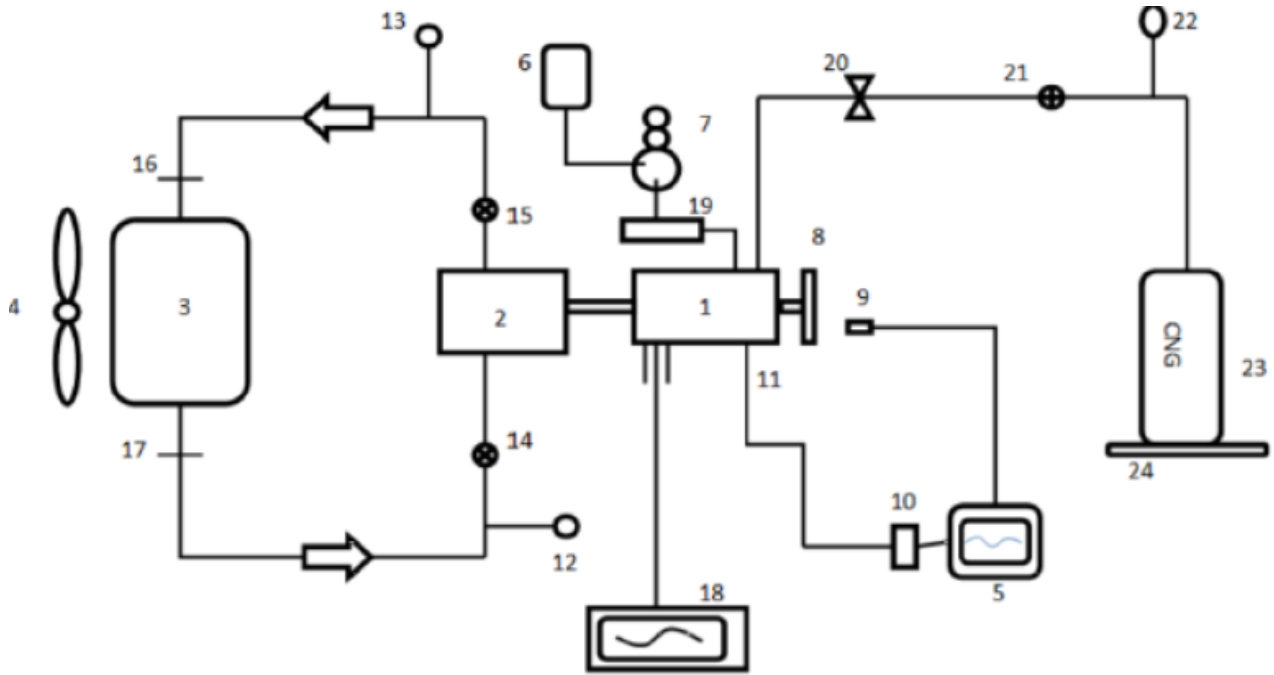


Рис. 4.1. Схема експериментальної установки :

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 – підсилювач; 11 – датчик тиску; 12 – манометр; 13 – манометр; 14,15 – клапани керування; 16,17 – термопари; 18 – газоаналізатор; 19 – паливний насос; 20 – датчик витрати; 21 – регулятор тиску; 22 – манометр; 23 – бак для газу; 24 – вага.

В цьому експерименті, фіксованою змінною був рівень вихідного тиску гідравлічного насоса. Цей тиск встановлювався на рівні, що дорівнює половині максимально можливої частоти обертання двигуна. У випадку, коли на двигун діє повний вихідний тиск, це може призвести до його відмови, сигналізуючи про надмірний тиск. Основною змінною, яку регулювали в експерименті, була швидкість обертання двигуна, вимірювана в обертах за хвилину.

В дослідженні ефективності передачі тепла від газу до охолоджувальної рідини в циліндрі застосовуються рівняння радіаційної теплопередачі. Це допомагає в аналізі того, як тепло від газу в циліндрі передається через випромінювання до охолоджувальної рідини, що є ключовим фактором у підвищенні ефективності двигунів.

$$\frac{Q}{A} = h(T_{газу} - T_{мен}) \quad (4.1)$$

де Q - визначається як сумарний обмін теплом (вимірюється в ватах на квадратний метр).

A - представляє собою довідкову площу циліндра (в квадратних метрах).

$T_{газу}$ - середньою температурою газу, зазвичай це 800 градусів за Цельсієм.

$T_{теп}$ - описує температуру теплоносія, яка зазвичай становить 80 градусів за Цельсієм.

h - коефіцієнтом теплопередачі, вираженим у ватах на квадратний метр на Кельвін.

Аналізуючи зміну потужності двигуна в залежності від використовуюваного палива, можна оцінити його робочі параметри. В експерименті порівнювали використання бензину і природного газу, зосереджуючись на тому, як кожен тип палива впливає на роботу двигуна. Таблиця 4.3 містить деталі щодо двигуна, що був використаний у дослідженні. Результати показують, як вибір палива впливає на ефективність двигуна, зокрема на його вихідну потужність.

Таблиця 4.3. Деталізація параметрів мотора

Параметр	Значення
Тип	Одноциліндровий
Діаметр поршня	67 мм
Хід поршня	52 мм
Такт	4 такта
Довжина шатуна	91 мм
Робочий об'єм циліндра	183 см ³
Потужність	2,6 КВт/3600 об/хв

4.2 Результати досліджень для даного двигуна

У рамках виконаних досліджень проводився аналіз даних, зібраних під час роботи одноциліндрового мотора на газі. Ці дані пізніше були порівняні з результатами, отриманими при використанні рідкого палива, такого як бензин.

Фокус дослідження був направлений на оцінку таких параметрів, як потужність мотора, тиск у циліндрі та загальна ефективність роботи мотора. Випробування включали накладення тиску на двигун за допомогою гідравлічного насоса. Дані про тиск, зафіксований манометром гідравлічного насоса, наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Результати досліджень для даного двигуна

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

За даними, представленими на ілюстрації 4.2, було виявлено, що ефективність рідкого палива перевищує ефективність газу. При низьких обертах, близько 2000 об/хв, рідке паливо демонструє вищу потужність, ніж CNG.

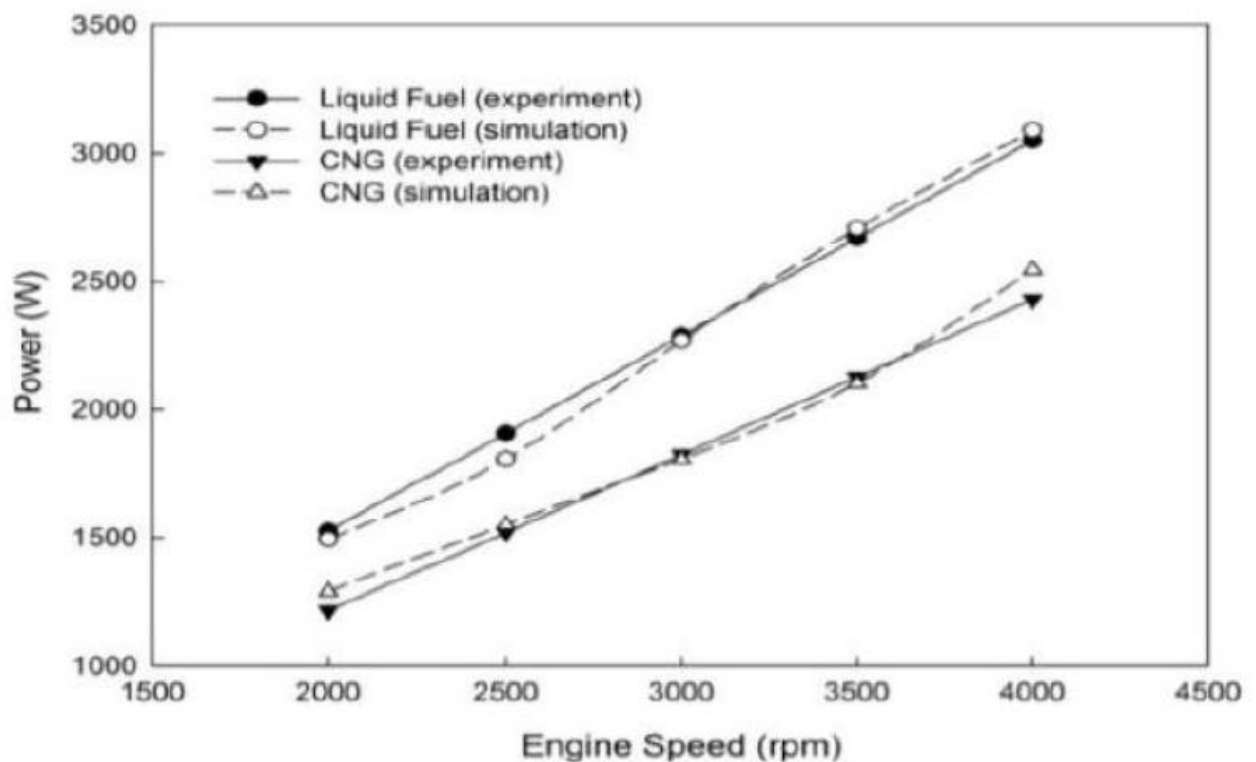


Рис. 4.2. Ефективність мотора при використанні різноманітних паливних ресурсів.

Схожі результати спостерігаються і при пікових обертах, приблизно 4000 об/хв. Аналізуючи експериментальні дані з таблиці 4.4, максимальна потужність нашого двигуна досягає 2,6 кВт при 3600 об/хв. Таким чином, як показано на ілюстрації 4.2, у цьому експерименті при використанні рідкого палива як енергетичного ресурсу на 3600 об/хв, потужність становила близько 2,7 кВт.

У випадку, коли в якості джерела енергії використовувався газ, потужність двигуна на рівні 3600 об/хв знизилася до 2,2 кВт, що свідчить про зниження продуктивності на 18,5%. Для демонстрації цього явища недовірливим спостерігачам, була створена імітаційна модель. Результати цієї моделі відображено на ілюстрації 4.2 за допомогою штрихової лінії. Модель була розроблена з урахуванням різних змін у робочих параметрах двигуна.

Модель відтворила аналогічні показники при низькій потужності. Мінімальна ефективність CNG може бути зумовлена кількома чинниками, зокрема, об'ємною продуктивністю. У порівнянні з рідким паливом, об'ємна ефективність CNG є меншою. Деталі щодо ККД двигуна зображені на ілюстрації 4.3.

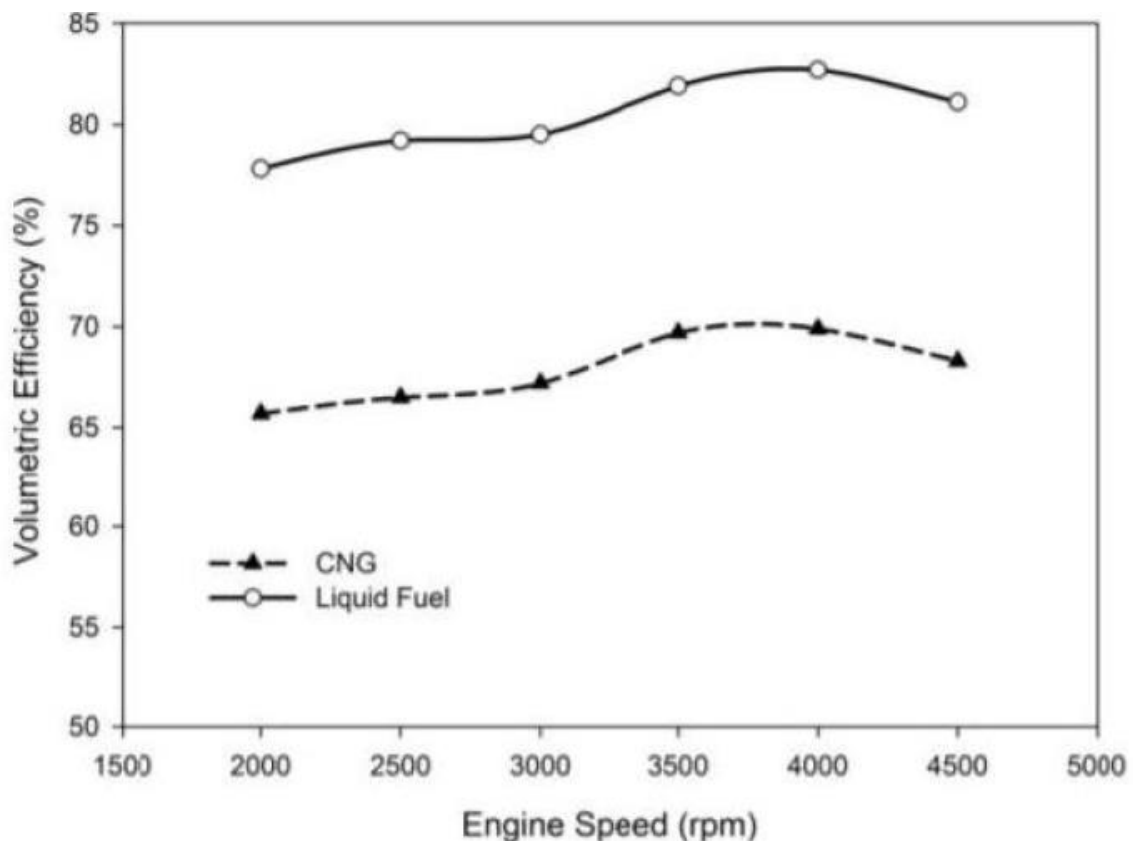


Рис. 4.3. Об'ємний коефіцієнт корисної дії

Як показано на ілюстрації 4.3, ефективність двигуна була вищою при використанні рідкого палива. В той же час, застосування газу в моторі призвело до зниження цього показника порівняно з рідким паливом. Це пониження коефіцієнта корисної дії може бути пояснено особливостями газоподібних речовин. Коли в двигун впорскується CNG, переважно складається з метану, відсутній ефект охолодження. Це обумовлено тим, що CNG вже перебуває у газоподібному стані при кімнатній температурі і виступає у ролі пари.

Таким чином, через відсутність охолодження при використанні газу, коефіцієнт корисної дії виявляється нижчим, ніж при використанні бензину. За даними, представленими на ілюстрації 4.3, найвищий об'ємний коефіцієнт корисної дії для обох видів палива спостерігається при обертах 3600 за хвилину. Це свідчить про те, що оптимальна потужність двигуна також досягається при цих обертах. Висновок експерименту полягає в тому, що максимальна ефективність двигуна співвідноситься з його піковою потужністю.

Окрім об'ємної ефективності, тиск у циліндрі також показує різні показники для метану та рідкого палива. Вимірювання тиску в циліндрі проводиться на різних етапах роботи двигуна, але особлива увага зосереджена на моменті запалювання. На основі аналізу результатів було виявлено, що при використанні газу як палива, тиск у циліндрі під час запалення виявляється нижчим, порівняно з використанням рідкого палива.

Ілюстрація 4.4 демонструє вплив CNG на рівень тиску всередині циліндра двигуна. Після аналізу та порівняння даних, наведених на графіках 4.3 і 4.4, було встановлено, що тиск у циліндрі з CNG значно нижчий порівняно з тиском при використанні рідкого палива на різних обертах двигуна. Це розходження в тиску відображає аналогічні тенденції у вихідній потужності тестованого двигуна, де тиск з газовим паливом зазвичай нижчий, ніж з рідким.

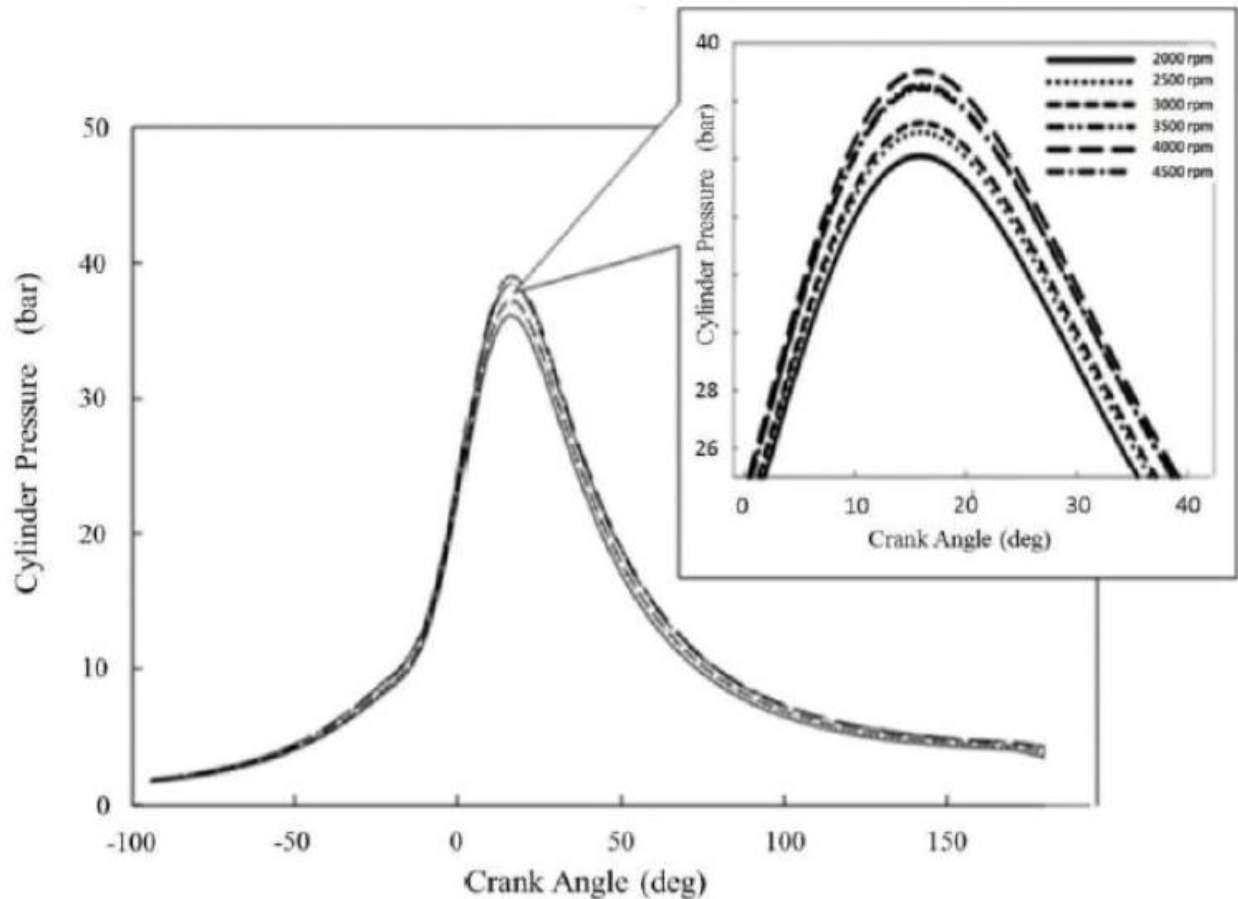


Рис. 4.4. Вплив газового палива на рівень тиску всередині циліндра мотора

На ілюстрації 4.4 представлено тиск у циліндрі для рідкого палива, тоді як на ілюстрації 4.5 - для природного газу. Спостерігається, що тиск всередині циліндра зростає з підвищенням швидкості обертання двигуна. Різниця у тиску на етапі запалювання між цими двома типами палива пояснюється різною щільністю та об'ємною продуктивністю. Згідно з даними таблиці 4.2, щільність рідкого палива переважає над щільністю CNG. Щільність палива відображає обсяг або вагу паливної частки у камері горіння.

Знижена щільність зумовлює менше спалювання палива та знижує температуру при запаленні. Це може бути причиною, чому швидкість теплопередачі при використанні газу нижча, ніж у випадку з рідким паливом. Вплив рідкого палива на швидкість теплопередачі у тестованому двигуні представлено на ілюстрації 4.7. Згідно з даними, відображеними на ілюстраціях 4.6 та 4.7, обидва типи палива (рідке та CNG) показують зростання швидкості теплопередачі зі збільшенням швидкості обертання двигуна. Графіки демонструють, що використання рідкого палива призводить до більш високої температури у двигуні.

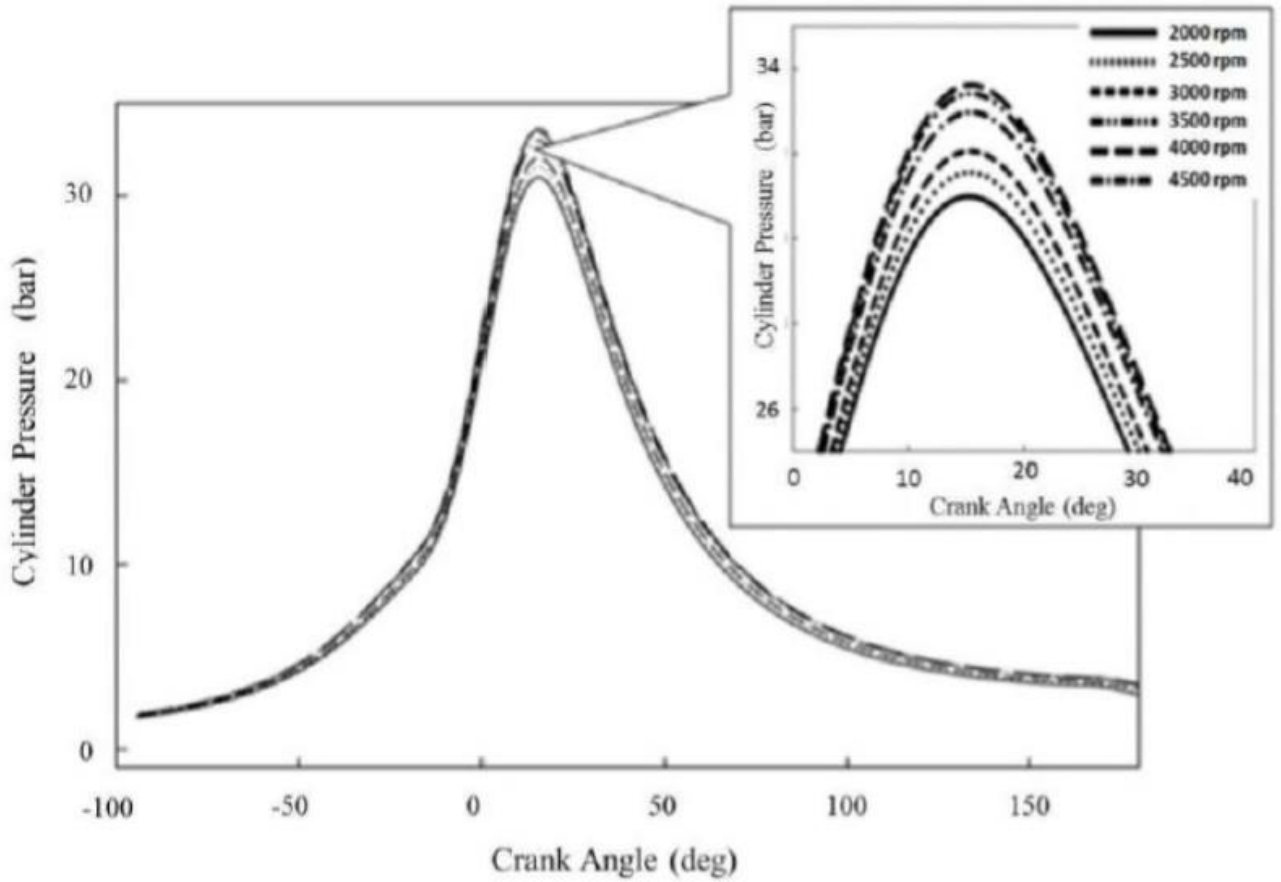


Рис. 4.5. Дія рідкого палива на тиск в циліндрах двигуна.

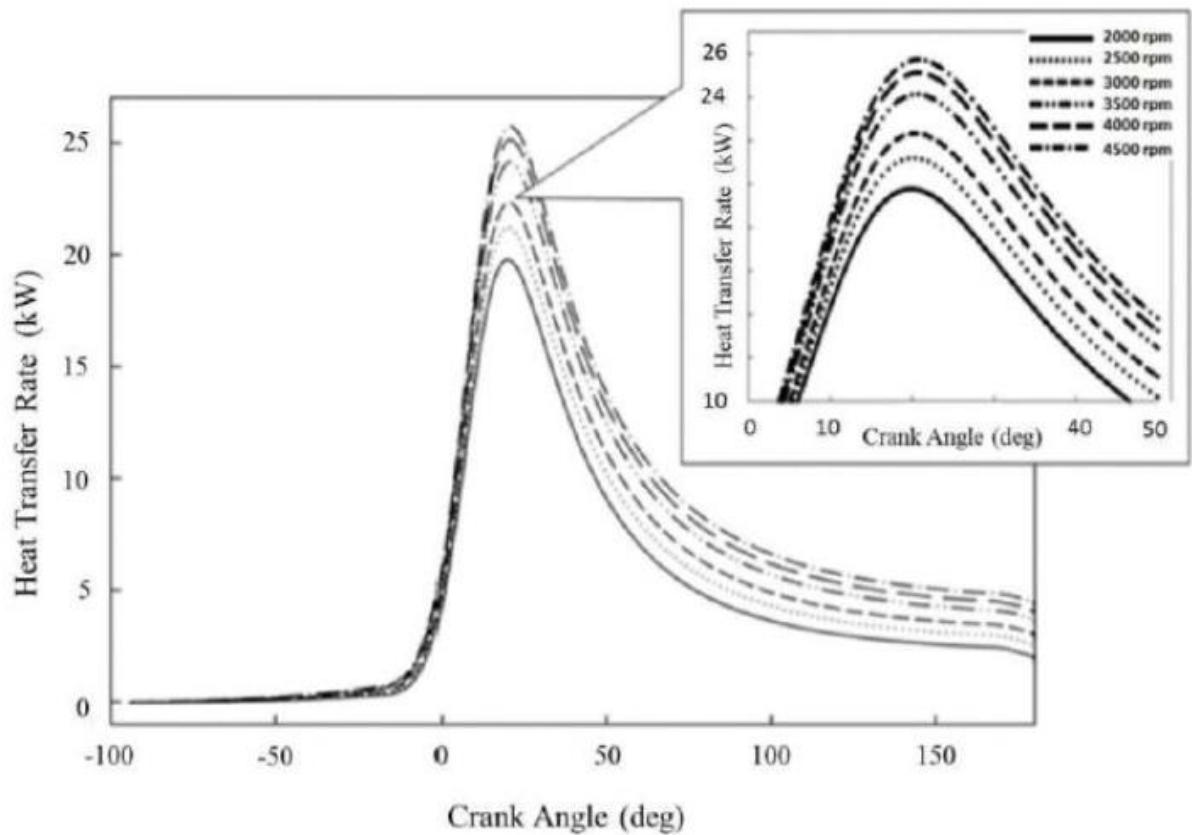


Рис. 4.6. Дія використання рідкого палива на рівень теплопередачі при зміні кутів обертання колінвала.

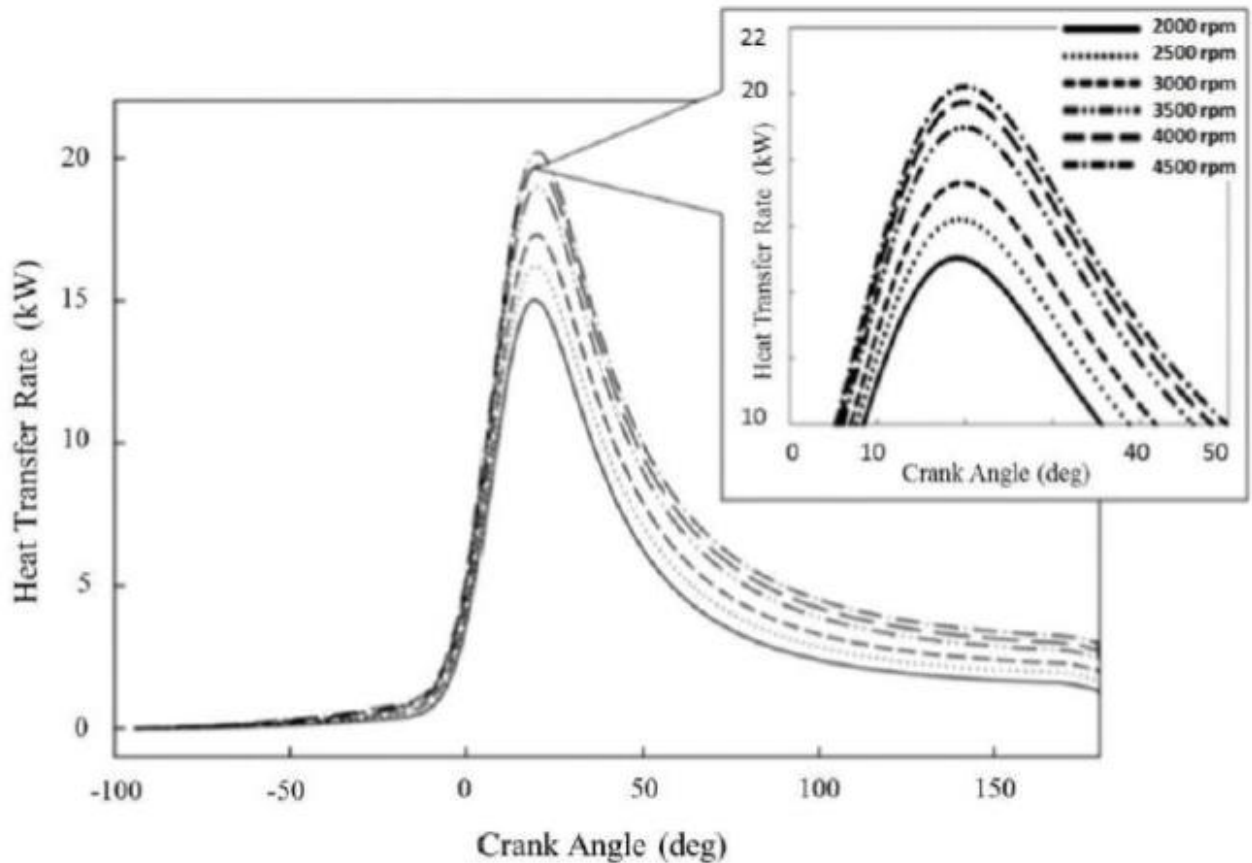


Рис. 4.7. Дія використання стисненого газу на ефективність тепловіддачі залежно від положення колінчастого валу при його обертанні.

Коли використовується газ як паливо, швидкість теплопередачі падає на 5 кВт у порівнянні з використанням рідкого палива. За даними, відображеними на ілюстраціях 4.6 та 4.7, максимальна швидкість теплопередачі для рідкого палива досягає 27 кВт при обертах двигуна 4500 об/хв. У той же час, при аналогічних обертах, швидкість теплопередачі для CNG становить 20 кВт.

В рамках цього дослідження використовувався одноциліндровий двигун із системою іскрового запалення для аналізу ефекту стисненого природного газу (CNG) на подібні двигуни. Гідравлічний динамометр застосовувався для оцінки ефективності роботи як на газу, так і на рідкому паливі. Сенсори були задіяні у випробуваннях для збору даних про фазу запалювання обох типів палива. Генерація тепла від кожного виду палива також була проаналізована, щоб виявити, яке з них сприяє більшій тепловіддачі в двигуні. Висновки дослідження показують, що використання метану веде до зниження тиску всередині циліндра на 20% порівняно з бензином. Швидкість теплопередачі від CNG виявилася на 23% нижчою в порівнянні з бензином. Результати пояснюють, чому газ генерує на 18,5% менше енергії, ніж рідке паливо. Таким

чином, потрібні технічні поліпшення для більш ефективного використання метану як альтернативного палива.

За результатами проведеного аналізу, використання стисненого газу як палива виявилось менш ефективним у порівнянні з рідкими паливними матеріалами. Ефективність стисненого газу знизилась до 18,5% відносно рідкого палива, що пояснюється нижчим об'ємним ККД через його фізичні характеристики. Це спостерігається особливо при порівнянні тиску в циліндрі під час згоряння: для рідкого палива при піку оборотів двигуна (4500 об/хв) тиск сягає близько 40 бар, тоді як для стисненого природного газу при аналогічних оборотах тиск у циліндрі становить всього 32 бар. Це вказує на те, що для підвищення ефективності використання газу як палива потрібно враховувати його фізичні обмеження та шукати шляхи оптимізації властивостей газу для підвищення його тиску і, відповідно, потужності двигуна.

Зменшений тиск, який виникає під час спалювання газу, є результатом його відносно низької щільності порівняно з рідкими паливами. Ця характеристика газу також призводить до обмеженого виробництва тепла під час горіння. Такий низький рівень тепловиділення корелює з температурою горіння газу. Крім того, процес передачі тепла від газу до стінок двигуна відбувається повільніше порівняно з рідким паливом. Під час експерименту було виявлено, що при оборотах двигуна 4500 об/хв тепловіддача газу складає близько 20 кВт. Це підкреслює необхідність розробки спеціалізованих технологій та систем для підвищення теплового ефекту та ефективності газу як палива, що допоможе покращити його загальну продуктивність у двигунах.

Проте, у випадку рідкого палива, ефективність передачі тепла при тих самих оборотах двигуна вища, досягаючи 26 кВт. Це означає, що загальний коефіцієнт корисної дії рідкого палива перевищує показники газу. Втім, з іншого боку, стиснений природний газ (CNG) має перевагу у вигляді довшого терміну служби двигуна, оскільки його низька теплова передача зменшує навантаження на стінки циліндрів. Для підвищення продуктивності двигунів, що працюють на CNG, розглядається використання передових технологій, зокрема передпалівних камер та систем прямого впорскування. Ці інновації

спрямовані на підвищення генерації енергії, що дозволить покращити ефективність газових двигунів і зробити їх більш конкурентоспроможними у порівнянні з двигунами на рідкому паливі.

4.3 Аналіз продуктивності мотора, виконаний на прикладі 1.7-літрового турбонаддувного агрегату

У цьому дослідженні вивчається можливість використання гібридного підходу до впорскування, комбінуючи стиснений природний газ (CNG) з бензином у 1,7-літровому турбонаддувному двигуні. Основна мета полягає у визначенні оптимальних параметрів роботи двигуна для підвищення його продуктивності та покращення роботи каталітичних конвертерів. Використання CNG як альтернативного виду палива у двигунах з іскровим запаленням може сприяти економії палива та зниженню рівня шкідливих викидів.

Оптимізація викидів призвела до зниження загальної продуктивності двигуна. Завдяки високому октановому числу та стійкості до детонації, метан перевершує бензин, дозволяючи двигунам на природному газі працювати з вищими ступенями стиснення, що сприяє поліпшенню ефективності. Гібридний турбонаддувний двигун, що працює на обох видах палива - метані та бензині - відкриває нові можливості, щоб об'єднати переваги метану, зменшуючи його недоліки. Це дослідження надає обнадійливі перспективи для досягнення майбутніх екологічних стандартів, використовуючи лише трьохкомпонентний каталізатор, оскільки умова стехіометричного згоряння зберігається на всіх режимах роботи двигуна.

Виявлено, що двигуни на стисненому природному газі (CNG) з детальним управлінням співвідношенням повітря/палива (A/F) і застосуванням вдосконалених систем очищення вихлопних газів відповідають вимогам каліфорнійських екологічних стандартів SULEV1. Вже встановлено в багатьох дослідженнях, що метан як паливо має свої переваги; використання стисненого природного газу як альтернативи традиційним рідким викопним паливам сприяє зниженню викидів вуглекислого газу та покращує екологічність енергетичних ресурсів у транспортній галузі.

Однією з проблем, що виникає при використанні стисненого природного газу у двигунах, є зменшена швидкість поширення полум'я, що спричиняє зростання температури внутрішніх елементів мотора. Додатково, обмежений об'ємний коефіцієнт корисної дії та енергетична щільність газу призводять до зниження крутного моменту, особливо у двигунах без турбонаддуву.

Біпаливні двигуни з іскровим займанням, які вже доступні на ринку, обладнані окремими системами для впорскування як газового, так і рідкого палива. Ці двигуни здатні функціонувати на газі чи рідкому паливі, але їхня конструкція не дозволяє повною мірою використовувати потенціал обох видів палива. Ідея цієї інноваційної стратегії впорскування, яка була відома ще з початку 2000-х, полягає у суміщенні впорскування газоподібного палива з високим октановим числом та рідкого палива, такого як бензин, з високою енергетичною щільністю, для досягнення оптимальних переваг обох паливних систем.

Турбонаддувний двигун здатний генерувати більшу потужність порівняно з аналогічним двигуном без наддуву, що ефективно підвищує співвідношення потужності до ваги. Турбіна використовує кінетичну та теплову енергію від вихлопних газів високої температури, перетворюючи її на енергію для приводу компресора, мінімізуючи при цьому збільшення втрат від перекачування. Використання стисненого природного газу в таких двигунах з іскровим запаленням пропонує додаткові переваги, включаючи підвищену стійкість до детонації та збільшену специфічну вихідну потужність.

З іншого боку, у порівнянні з бензиновими двигунами, атмосферні двигуни, що використовують метан, мають знижений об'ємний коефіцієнт корисної дії на 4–10% через меншу енергетичну щільність метану, що впливає на зменшення крутного моменту. Додатково, існує підвищений ризик накопичення відкладень на поверхні впускних клапанів через відсутність бензинового очищувального ефекту.

Зменшена швидкість розповсюдження полум'я також спричиняє збільшення температури внутрішніх елементів мотора.

Дослідники з асоціації SAE займалися вивченням суміщеного впорскування бензину та газу в атмосферний двигун з іскровим займанням із системою впорскування палива во впускний колектор.

Дослідження спеціалістів показало, що ризик детонації при використанні гібридного палива є меншим, ніж при використанні виключно бензину, а також відзначено скорочення часу необхідного для запалювання. Вдосконалення у налаштуваннях системи запалювання та досягнення ідеального співвідношення повітря і палива ведуть до зростання теплової ефективності на 10–27% у порівнянні з традиційними бензиновими двигунами.

У численних дослідженнях розглядалася ефективність гібридного впорскування бензину та метану в турбонаддувний двигун з іскровим займанням, де обидва види палива подавались во впускний колектор. Ступінь стиснення основного мотора було підвищено із 9,5 ... 11,5. Встановлено, що завдяки вищій термічній та об'ємній ефективності порівняно з окремим використанням бензину чи метану, крутний момент двигуна зростає при застосуванні комбінованого впорскування.

Було проведено аналіз впливу гібридного впорскування бензину та стисненого природного газу (CNG) в турбонаддувному двигуні з іскровим займанням, де бензин впорскують безпосередньо в циліндри, а метан – через впускний колектор. Застосування цього підходу сприяло підсиленню сідел клапанів, щоб уникнути їх ерозії під впливом високих теплових навантажень. Дослідження показало, що використання такої комбінації бензину і газу забезпечує більший крутний момент на виході двигуна, порівняно з традиційним бензиновим мотором.

Дослідження, проведене на турбонаддувному двигуні, виявило деякі недоліки при його роботі на бензині, включаючи необхідність затримки запалювання для уникнення детонації та використання багатої паливно-повітряної суміші для захисту внутрішніх частин. Однак ці проблеми можуть бути ефективно вирішені за допомогою одночасного впорскування бензину та стисненого природного газу. Результати експерименту свідчать, що таке комбіноване впорскування покращує теплову ефективність у порівнянні з виключно бензиновим режимом. З іншого боку, певні проблеми, пов'язані з

роботою двигуна на CNG, такі як високий тиск у циліндрах і втрати тепла в охолоджувальній системі, також можуть бути мінімізовані за рахунок використання комбінованого впорскування бензину та CNG.

Було виконано термодинамічне моделювання циклу традиційного чотиритактного двигуна, використовуючи як бензин, так і метан, для аналізу його робочих характеристик та рівня викидів. Застосування першого закону термодинаміки дозволило визначити залежність температури та тиску в циліндрах від кута обертання колінчастого валу. Ці результати були порівняні з відповідними експериментальними даними існуючих двигунів з іскровим запалюванням, що функціонують на обох видах палива. Дослідження виявило, що продуктивність двигуна на метані була на 11% нижчою, ніж на бензині, в діапазоні обертань від 1500 до 4000 об/хв, що пов'язано з підвищеною об'ємною ефективністю.

Зазвичай, коли двигун функціонує на зрідженому природному газі, індекс питомого споживання палива (ISFC) зменшується на 16% у зазначеному діапазоні швидкостей. Проте, в цьому ж діапазоні оборотів, специфічні викиди CO₂, CO, та рівень неповного згоряння вуглеводнів (UHC) істотно знижуються на 33%, 60% та 53% відповідно, тоді як концентрація оксидів азоту (NO_x) зростає на 50%.

Дослідники із Каліфорнії займались експериментами на сумішах метану/ізооктану та стисненого природного газу/ізооктану. У цьому дослідженні метан (головний складник CNG) був доданий у двох відсоткових співвідношеннях, 30% і 70%, до ізооктану (стандартного компонента бензину). Результати виявили, що включення метану в ізооктан підвищує швидкість розповсюдження полум'я в розбавлених сумішах, проте зменшує цю швидкість в концентрованих сумішах.

Останні дослідження підтверджують, що одночасне введення газу та рідкого палива в двигуни з іскровим запалюванням може спричинити значну взаємодію між цими двома видами палива. Проте, зосередження у цих дослідженнях було переважно на аспектах продуктивності, оборотного моменту і теплової ефіцієнтності двигунів. В рамках цього моделювання було

вивчено процес спільного впорскування метану та бензину в чотирициліндровий турбонаддувний двигун об'ємом 1,7 літра.

Центральний фокус даного дослідження полягає у визначенні оптимального рівня ефективності двигуна, а також у розробці способів зниження викидів і підвищення ефективності перетворення каталітичного конвертера.

Знаходження балансу між робочими характеристиками двигунів та впливом на довкілля є критично важливим, особливо в умовах автомобільної індустрії, де часові рамки розробок неперервно зменшуються, а законодавчі вимоги до максимально допустимих рівнів емісій забруднюючих речовин стають суворішими. Дотримання цих законодавчих норм викидів можливе тільки через ретельну оптимізацію систем видалення вихлопних газів.

Експериментальний комплекс у цьому дослідженні включає чотирициліндровий двигун із чотирма клапанами на кожен циліндр, обладнаний турбонаддувом і об'ємом 1,7 літра, а також із фіксованою паливною системою. На ілюстрації 4.8 зображено схему підключення різних компонентів двигуна та систем управління, які використовуються у ньому.

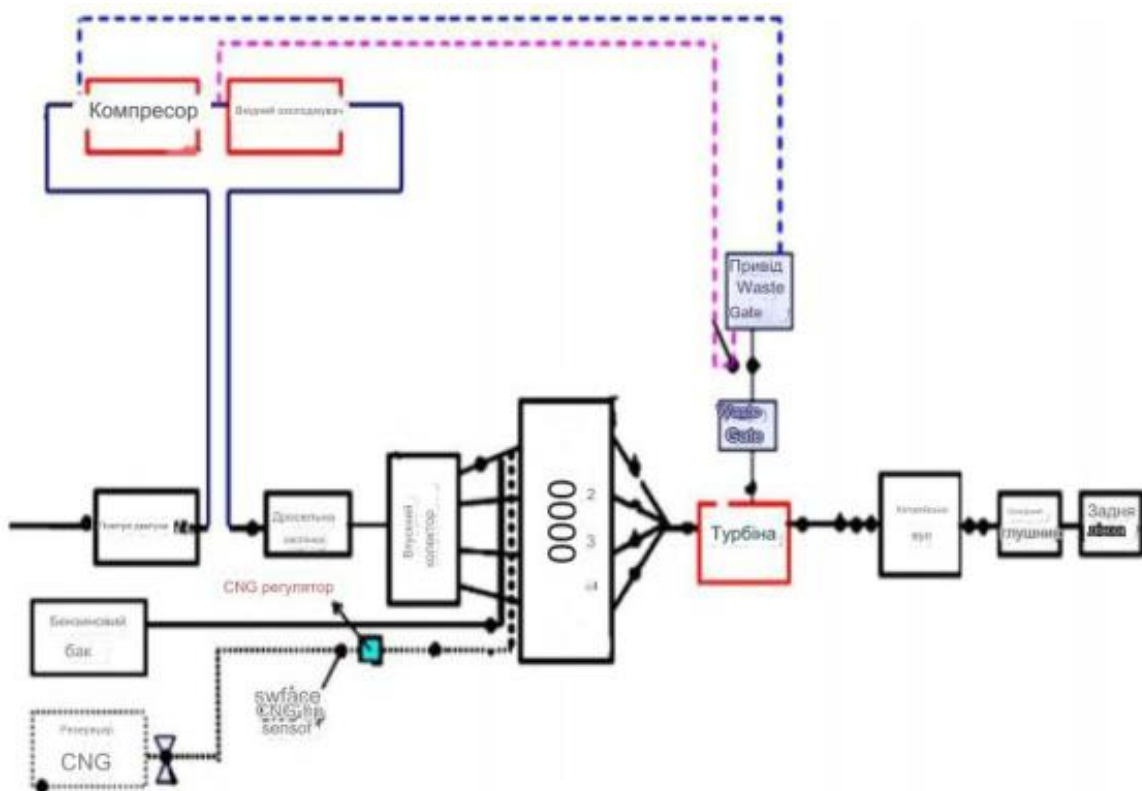


Рис. 4.8. Суттєва діаграма біпаливного турбонаддувного двигуна та асоційованих з ним систем керування.

В таблиці 4.5 представлено технічні параметри двигуна, який був застосований для проведення тестів.

Таблиця 4.5. Технічні параметри двигуна об'ємом 1,7 літра.

Парметри двигуна	
Тип двигуна	Турбований
Діаметр поршня	78,6 мм
Хід поршня	85 мм
Об'єм	1650 см ³
Максимальна потужність	110 кВт
Максимальні обороти двигуна	5500 об/хв
Максимальний крутячий момент	215 Нм
Обороти двигуна при максимальному крутячому моменті	2200-4800 об/хв
Тип компресора	Центробіжний компресор
Турбіна	Одна

Двигун підключений до вихрострумового гальмівного динамометра AVL моделі АРА 1F4-E-0509, здатного розвивати максимальну потужність 120 кВт і досягати швидкості до 8000 об/хв. Схематичне зображення двигуна та різних управлінських пристроїв експериментального стенда наведено на рисунку 4.9.

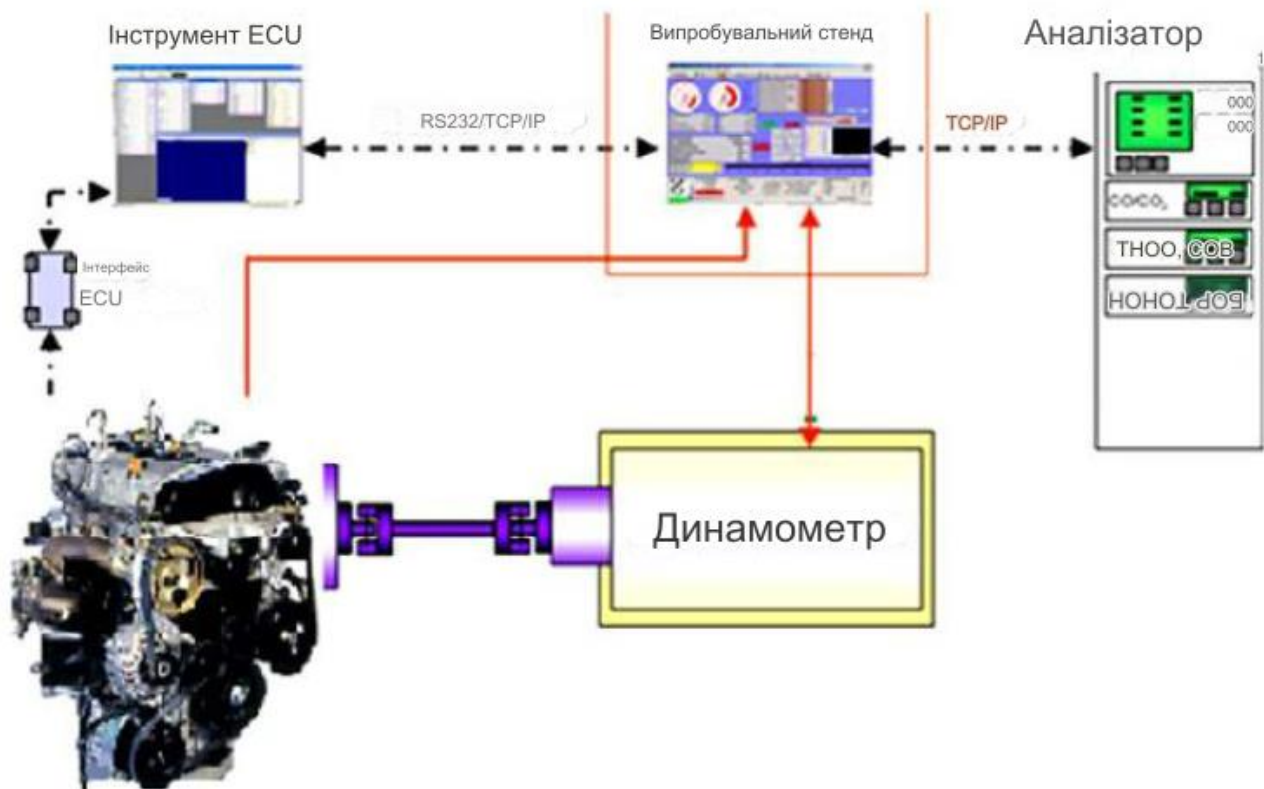


Рис. 4.9. Схематичне зображення двигуна та налаштування експериментального управління пристроями.

Збір інформації про роботу двигуна відбувається за допомогою електронного блоку управління (ЕБУ) та систем моніторингу на тестовому стенді. Для паралельного запису та аналізу зібраних даних від двигуна та його управлінського блоку використовувалось програмне забезпечення INCA2. Ця програма забезпечує аналіз даних двигуна, включаючи значення лямбда, різні температури, напругу тощо. Система керування на тестовому стенді є ключовою для регулювання необхідних параметрів двигуна, таких як температура охолоджуючої рідини, тиск та температура масла, подача палива, впускне повітря, викиди вихлопних газів та характеристики потоків.

Управління двигуном здійснюється за допомогою блоку управління (ECU), який вироблений оригінальним обладнавачем OEM. ECU регулює співвідношення повітря до палива, підтримуючи його близько до стехіометричного коефіцієнта, залежно від частоти та інтенсивності, виходячи з інформації від датчика кисню в вихлопних газах НЕГО. Впускне повітря комбінується з бензином і метаном у потрібному співвідношенні повітря до палива і з визначеним вмістом стисненого природного газу. Під час горіння цієї суміші утворюються вихлопні гази з високими тиском та температурою, що потім надходять в турбіну. Швидкість обертання турбіни регулюється за допомогою затвора, що дозволяє відводити вихлопні гази з турбіни.

Таблиця 4.6 включає технічні дані динамометра та вимірювальних інструментів, використаних під час тестування. Розхід стисненого природного газу фіксується за допомогою масового витратоміра типу Коріоліса від компанії Emerson, модель CMF010. Тиск всередині циліндрів визначається та записується за допомогою чотирьох датчиків тиску AVL GH12D, встановлених у кожному циліндрі. Ключові показники викидів вихлопних газів реєструються за допомогою аналізаторів Horiba MEXA-7000.

Для порівняння ефективності двигуна на бензині та стисненому природному газі, виконуються тестування при повному навантаженні та різних швидкостях обертання. У першій частині цього аналізу вивчаються тестові результати в режимах роботи на бензині та метані. Ці результати представлені на рисунку 4.10, де зображено середній ефективний тиск ВМЕР та питоме

споживання палива BSFC для бензину та СПГ при швидкостях від 1000 ... 5500 об/хв.

Таблиця 3.6. Характеристики динамометра та інструментарію для тестування.

1. Динамометр						
Дино типу	Максимальний крутний момент (Нм)	Максимальна швидкість (об/хв)	Максимальна потужність (кВт)	Інерція (кг м ²)	Вага (кг)	
AVL APA 1F4-E_0509	509	8000	120	0,35	600	
2. Контроль температури палива						
Модель	Стабільність (°C)	Температура палива вихід (°C)	Температура палива вхід (°C)	Температура навколишнього середовища (°C)		
AVL 753C	Краще 0,02	10-80	від -8 до +70	5-50		
3. Вимірювач споживання CNG						
Модель	Тип палива	Номинальна витрата передавача (кг/год)	Максимальний потік (кг/год)	Нульова стабільність (кг/год)	Точність щільності (кг/м ³)	Темп. точність (C)
Емерсон CMF010	Рідина	1700/2700 0-82	108	0,002	2	1 +0,5%
Емерсон CMF010	газ	1700/2701 0-32	65	0,002	—	1 +0,5%
4. Аналізатор АЧХ						
Модель	Вимірювання	Імпеданс (Ω)	Температура навколишнього середовища (°C)	Вологість (%)	Температура газу (°C)	
IPCO DHBS102	0,7;1,4	0-174	5-45	менше 80	-7 до 900	

Розрахунок показників BSFC (питоме споживання палива) виконується відповідно до наступної формули:

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

Менша теплова енергія LHV загального об'єму палива, що подається у камеру згоряння (комбінація бензину та газу), визначалася шляхом лінійного розрахунку з даних про масовий розхід кожного типу палива окремо. Технічні дані стисненого газу, визначені згідно зі стандартами ASTM, представлено в Таблиці 4.7.

Як правило середній най ефективний тиск в процесі використання стисненого природного газу є на 4–14% нижчим порівняно з бензиновими двигунами на всіх швидкостях обертання. Це пов'язано з меншою швидкістю запалювання газу в порівнянні з бензином, що призводить до збільшення негативної роботи при використанні CNG. Для поліпшення цієї ситуації у газових двигунах можна застосовувати передчасне запалення, адже стійкість CNG до детонації значно вища, ніж у випадку з бензином.

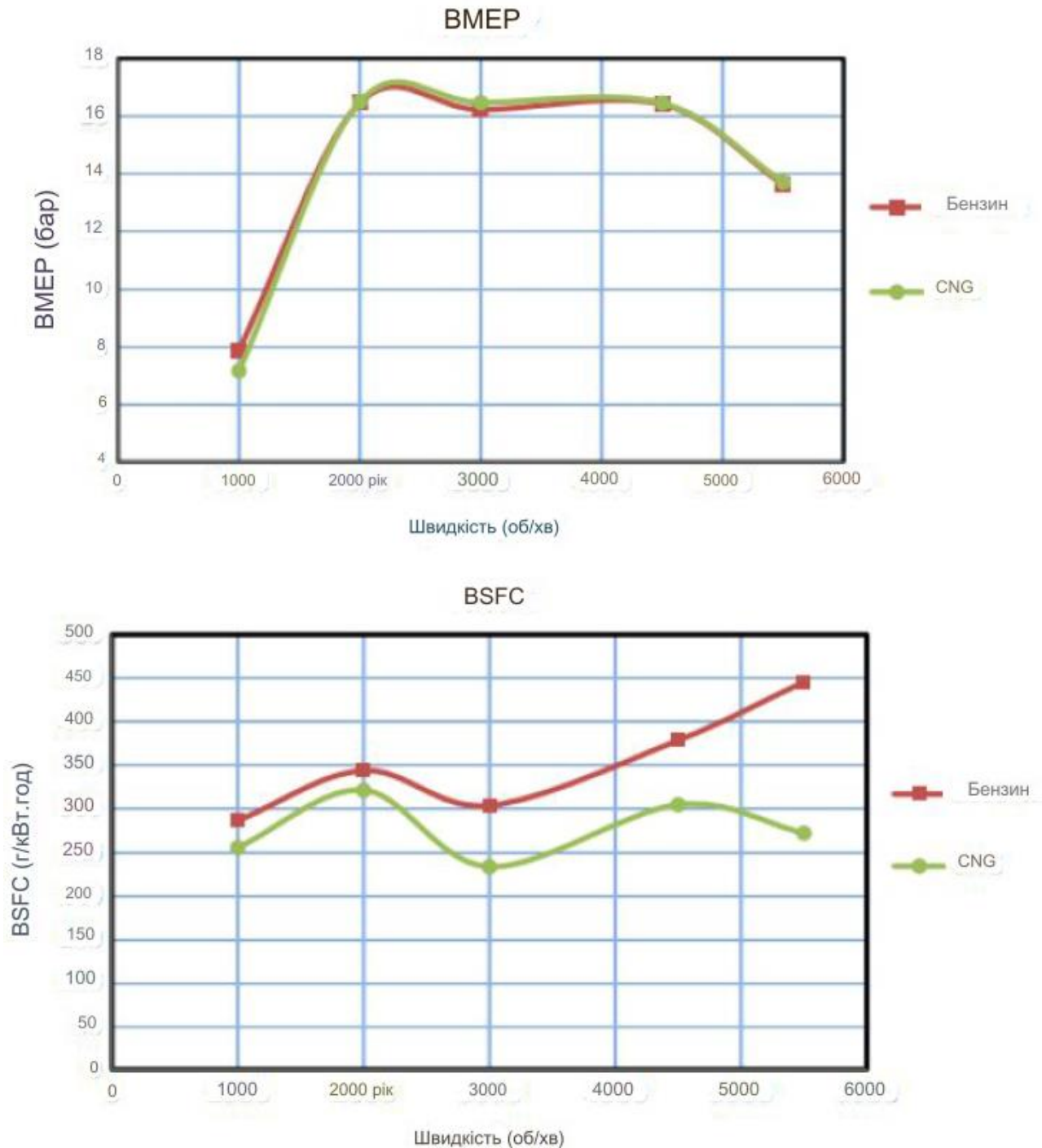


Рис. 4.10. Діаграми, що показують залежність середнього ефективного тиску BMEP та питомого споживання палива BSFC від швидкості обертання двигуна.

Компресія природного газу в циліндрі викликає зменшення обсягу, що негативно впливає на об'ємну продуктивність і спричиняє зниження ефективності тиску. При застосуванні метану відзначається зниження потужності, однак середній ефективний тиск, який служить мірою продуктивності двигуна, залишався стабільним на всіх рівнях швидкості, як це видно на прикладі графіка 4.10. Це демонструє, що хоча використання метану має певні обмеження, воно все ще забезпечує достатню рівномірність

продуктивності, особливо в умовах різних режимів використання. Такий підхід може відігравати ключову роль у розробці більш ефективних і екологічно чистих двигунів у майбутньому.

Таблиця 4.7. Характеристики стисненого природного газу.

Ідентифікація зразка: P: 2500 psig, T: °C			
Немає.	КОМПОНЕНТ	Метод випробування	Результат
1	H ₂ S	ASTM D 5504	1,6 ppm
2	N ₂	ASTM D 1945	3,9 мол.%
3	C ₁	ASTM D 1945	89,6 мол.%
4	CO ₂	ASTM D 1945	1,0 моль%
5	C ₂	ASTM D 1945	3,6 мол.%
6	C ₃	ASTM D 1945	1,12 моль%
7	IC ₄	ASTM D 1945	0,24 моль%
8	NC ₄	ASTM D 1945	0,31 моль%
9	ICS	ASTM D 1945	0,10 моль%
10	NC ₅	ASTM D 1945	0,07 моль%
11	C ₆	ASTM D 1945	0,04 моль%
12	C ₇	ASTM D 1945	0,02 моль%
Всього			100,0
			Результати
Розрахована середня молекулярна маса (г/моль)			17,99
Обчисліть питому вагу газу, повітря = 1,000 (маса повітря в м. = 28,964 г/моль)			0,621
Обчисліть густину газу в кг/м ³ (P 1013,25 мбар, T = 15 °C)			0,761
Розрахувати нижчу теплотворну здатність (P 1013,25 мбар, T = 15 °C)			
МДж/м ³			34,53
БТЕ/фут ³			922,7
Розрахувати вищу теплотворну здатність (P 1013,25 мбар, T = 15 °C)			
МДж/м ³			38,27
БТЕ/фут ³			1022,5

Зазвичай, використання природного газу приводить до зниження виробленої потужності та крутного моменту на 10% у порівнянні з використанням бензину. Основною причиною цього є менша енергетична щільність газоподібного палива, що впливає на зниження продуктивності двигуна під час процесу всмоктування. При використанні газу особливо помітне падіння потужності було зафіксовано при вищих оборотах двигуна, що обумовлено повільнішим поширенням полум'я в CNG порівняно з бензином. Ці

фактори свідчать про необхідність подальшого вдосконалення технологій газових двигунів для підвищення їхньої ефективності, особливо в умовах високих навантажень і швидкостей. Розробка більш ефективних систем згоряння та оптимізація процесів подачі палива можуть допомогти максимізувати потенціал газоподібного палива.

Графік 4.10 демонструє адаптовані дані про витрату палива (BSFC) для різних оборотів двигуна. Порівняно з бензином, витрата газу виявляється на 11-39% меншою. Для бензину та стисненого природного газу (CNG) найнижчі показники BSFC складають 300 та 235 г/кВт год відповідно при 3000 об/хв. Ця різниця зумовлена тим, що калорійність CNG на 12% вища в порівнянні з бензином, незважаючи на нижчу генерацію потужності, що дозволяє двигуну на метані використовувати менше енергії на вироблення одиниці потужності за тих самих умов експлуатації. Графік також підкреслює, що оптимальна витрата палива досягається при середніх оборотах. На низьких оборотах, вища витрата BSFC пов'язана з інтенсивнішою тепловою передачею, а на високих - з підвищеним тертям у двигуні. Ці відомості важливі для розробки більш ефективних та економічних двигунів, здатних максимально використовувати потенціал CNG, знижуючи при цьому екологічний вплив.

На оборотах вище 4500 об/хв спостерігається зменшення витрати стисненого газу як палива. Це пояснюється тим, що при роботі двигуна на стисненому газі можливе використання більш розрідженого паливного змішування, оскільки газ має вищий поріг стійкості до детонації. Натомість при використанні бензину необхідно використовувати більш насичене паливо для запобігання детонації та контролю за високою температурою вихлопних газів. Ці дані вказують на те, що стиснений газ може бути більш ефективним у високообертових режимах, що відкриває нові можливості для оптимізації двигунів, особливо для високопродуктивних застосувань. Розвиток технологій паливних систем і керування співвідношенням повітря-паливо в стиснених газових двигунах може сприяти покращенню екологічних показників та ефективності використання палива.

Емісії вихлопних газів, такі як вуглеводні, оксид вуглецю та оксиди азоту для двох типів палива, демонструються на діаграмі 4.11.

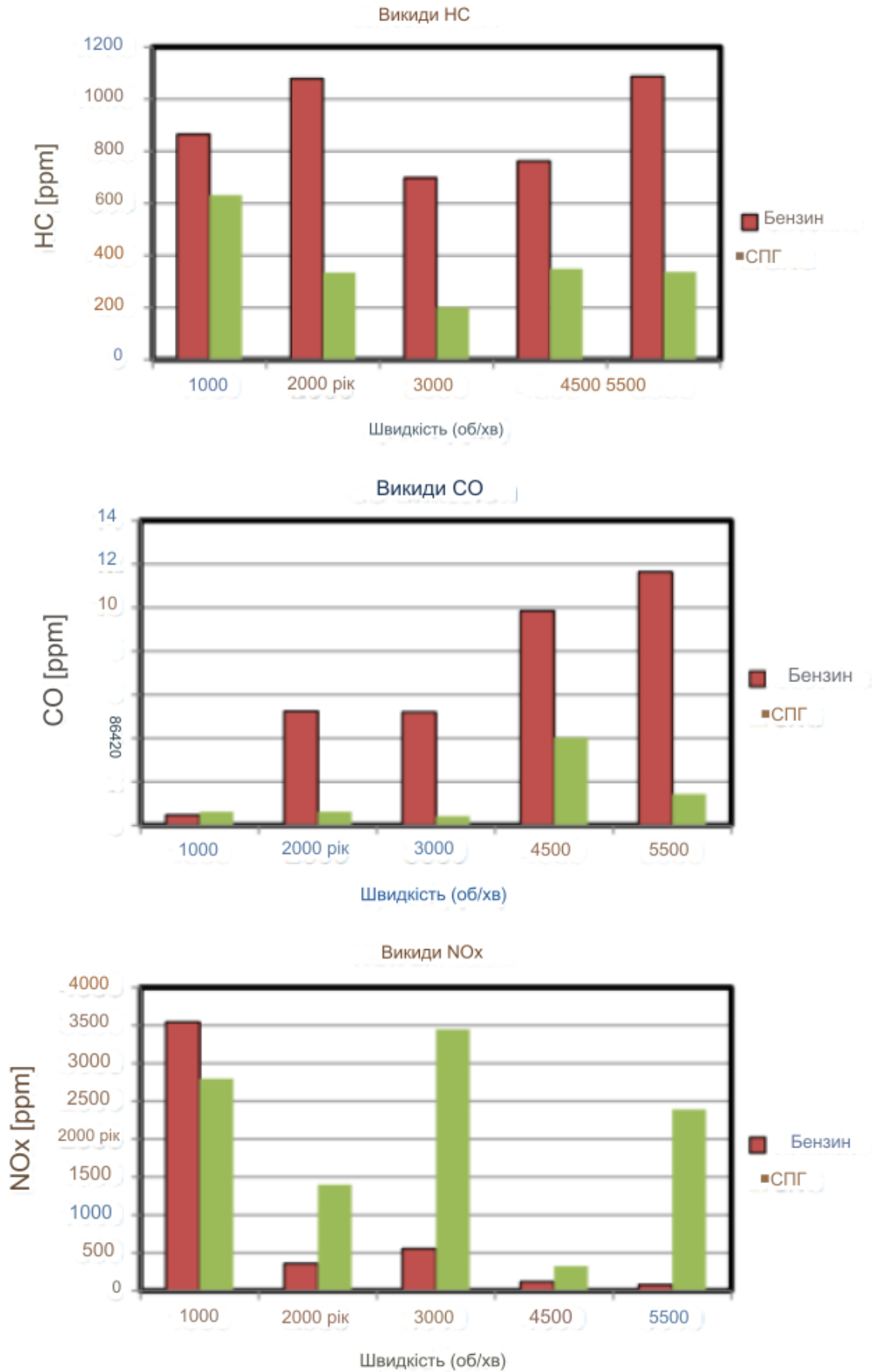


Рис. 4.11. Змінність викидів оксидів азоту (NO_x), оксидів вуглецю (CO) і оксидів азоту (NO_x) відображена на графіках в залежності від швидкості обертання двигуна.

Ці дані надають цінну інформацію для порівняння екологічного впливу різних видів палива, що може бути важливим для вибору більш екологічно чистих альтернатив. Розуміння різниці в емісіях між різними видами палива дозволяє розробляти стратегії для зниження загального впливу на довкілля та відповідати встановленим екологічним стандартам, а також сприяє розробці технологій очищення вихлопних газів.

Дослідження виявили, що використання газу як палива призводить до зниження емісії незгорілих вуглеводнів у порівнянні з бензином у всьому діапазоні обертів двигуна. При роботі двигуна на стисненому природному газі спостерігається зменшення викидів вуглеводнів на 25-72%, що є наслідком більш ефективного згоряння газу. Також відзначено, що автомобілі на газі характеризуються значно нижчим викидом оксиду вуглецю. В порівнянні з бензином, викид CO при використанні CNG знижується на 30-91%, оскільки газ забезпечує більш повне згоряння і менше залежить від насиченості паливно-повітряної суміші. Завдяки високому вмісту водню та простій хімічній структурі CNG (основно CH_4) виробляє менше оксиду вуглецю, ніж бензин. Щодо викидів оксидів азоту, показаних на рисунку 4.11, зазначено, що використання стисненого газу призводить до вищих показників NO_x , особливо на високих оборотах через підвищену температуру в циліндрі. Однак, через кращі антидетонаційні властивості газу, двигун може підтримувати нижчу температуру вихлопних газів, що усуває необхідність у зміні кута запалювання для запобігання детонації. Це дозволяє уникнути збагачення паливної суміші та зберігати її стехіометричний баланс.

А друга частина дослідження були проведені тести з використанням гібридного впорскування бензину та стиснутого природного газу (CNG). Ці тести здійснювались при різних швидкостях обертання двигуна та під час максимального навантаження, з варіюванням пропорцій природного газу. Експеримент проведено при 3000 об/хв, що є точкою максимального крутного моменту. Результати цього дослідження представлені на ілюстраціях 4.12 і 4.13. Ці випробування мають велике значення для розуміння впливу комбінованого використання різних видів палива на характеристики двигуна, включаючи ефективність, викиди та загальну продуктивність. Такий підхід дозволяє

виявити оптимальні умови для ефективного згоряння та підвищення економічності, що є ключовим для розвитку екологічно чистіших та ефективніших транспортних засобів.

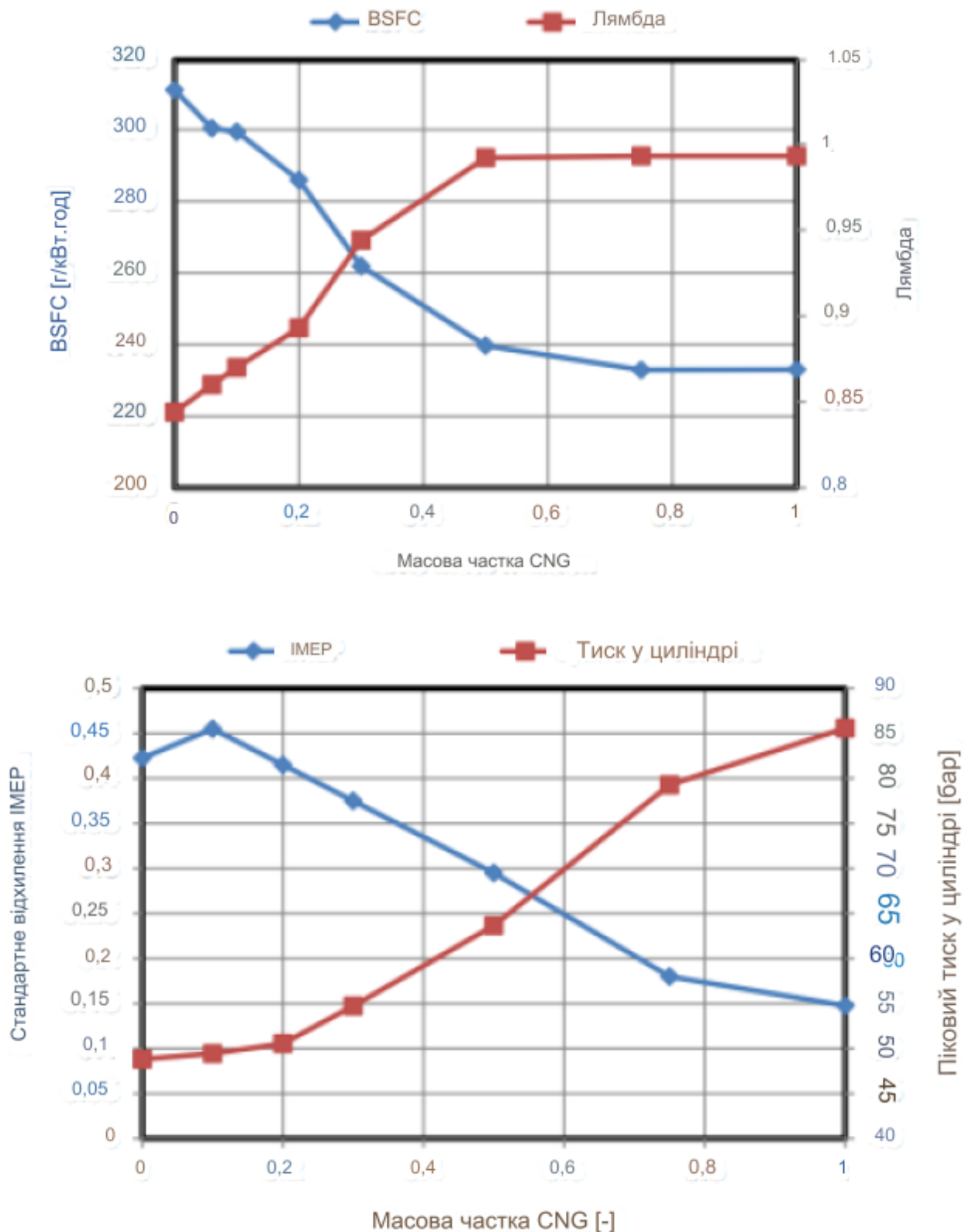


Рис. 4.12. Получені дані з експерименту, в якому комбінували бензин і газ.

Крізь обмеження механічні конструкції двигуна, максимальна можлива потужність була обмежена. Цю потужність вже можна досягти при 20% масовій

частці газу в паливній суміші. Таким чином, застосування вищих пропорцій газу в суміші може сприяти економії палива та зниженню рівня емісій. Це відкриває можливості для оптимізації споживання палива, особливо у ситуаціях, де важливо збалансувати вихідну потужність і екологічність. Розвиток та впровадження стратегій, які враховують масову частку газу, може значно підвищити загальну ефективність двигунів, зменшуючи при цьому викиди шкідливих речовин та забезпечуючи більш стійке використання ресурсів.

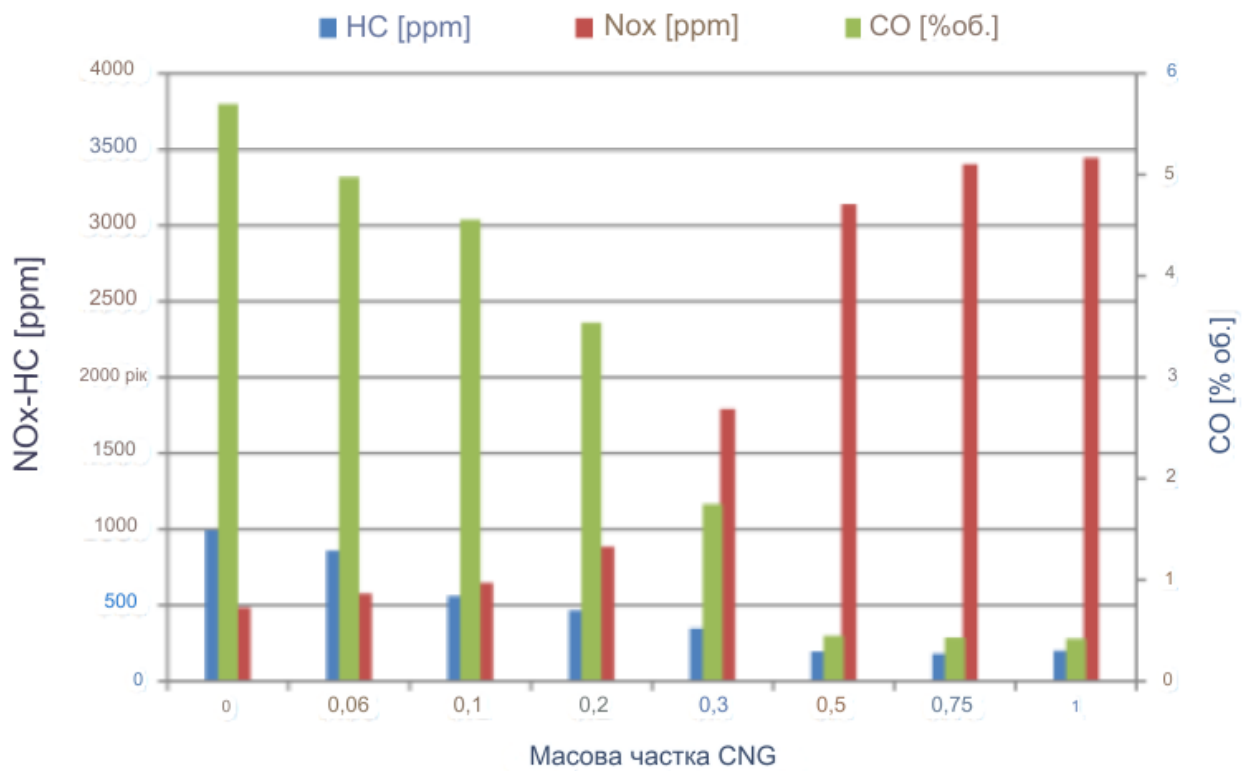


Рис. 4.13. Перефразуй текст так щоб не залишилося даних слів і доповни його.

Діаграма 4.12 відображає залежність специфічної витрати палива та коефіцієнта лямбда від пропорції газу у паливі. Порівняння цієї діаграми з діаграмою 4.10 виявляє, що споживання палива BSFC при 10% газу в паливній суміші еквівалентне чистому бензиновому режиму. Це обумовлено меншою різницею в часі займання та однаковою величиною лямбда, а також підвищеною швидкістю повітряного потоку. На цій же діаграмі показано, що зі зростанням частки стисненого природного газу знижується стандартне відхилення середнього ефективного тиску IMEP, що пов'язано з меншою теплотворною здатністю CNG. Також лямбда-крива демонструє, що додавання газу допомагає домогтися стехіометричного режиму роботи двигуна. Без

використання газу, двигун би працював у збагаченому режимі на чистому бензині. Додавання газу збільшує якість паливної суміші, зменшуючи ризик детонації і, отже, усуваючи необхідність збагачення паливно-повітряної суміші. Це сприяє підвищенню ефективності використання палива та зниженню викидів шкідливих речовин.

В процесі роботи двигуна виявляється, що процес згоряння не є однаковим у кожному циклі. Максимальний тиск у двигуні, що функціонує належним чином, може коливатися на 30% між окремими циклами. Такі коливання згоряння можуть виникати через зміни в таких параметрах як масова частка решткових газів, рівень турбулентності та неоднорідність паливно-повітряної суміші (наприклад, крапельної форми палива у суміші), які впливають на початкове розширення вогнища полум'я та в результаті спричиняють варіативність згоряння в окремих циклах. Збільшення частки стиснутого природного газу в паливній суміші дозволяє регулювати кут запалення. Таким чином, максимальний тиск має тенденцію зростати, як це продемонстровано на графіку 3.12. Ці знахідки мають важливе значення для розробки та налаштування двигунів, спрямованих на підвищення їхньої ефективності та зниження викидів шкідливих речовин, особливо в контексті використання змішаних палив.

З ростом тиску спостерігається зниження пропорції решткових газів, а однорідність паливно-повітряної суміші покращується з підвищенням концентрації стиснутого газу. Для підтримання стабільної потужності, необхідно збільшити максимальний тиск у циліндрі, що можливо завдяки підвищенню інтенсивності іскри та збільшення об'єму паливного заряду. Ці аспекти є ключовими для оптимізації роботи двигунів, оскільки вони впливають на ефективність згоряння та загальні характеристики двигуна. Зокрема, точне регулювання тиску, однорідності суміші та параметрів зажигання може значно підвищити ефективність використання палива та знизити емісію шкідливих речовин, що має важливе значення для розвитку екологічно чистих транспортних засобів.

На ілюстрації 4.13 представлено результати вимірювань емісії під час роботи двигуна на суміші палив. З цих результатів видно, що з ростом частки

стиснутого природного газу (CNG) в суміші відбувається зниження емісії вуглеводнів та оксиду вуглецю, але зростає кількість оксидів азоту (NO_x). Це зумовлено відмінностями у складах газу порівняно з бензином та його різною поведінкою під час згоряння. Збільшення тривалості запалення та наближення до стехіометричного балансу паливно-повітряної суміші спричиняє зростання NO_x при вищій частці газу. Це відбувається через зростання максимальної температури у циліндрі та через підвищений вміст кисню в продуктах згоряння, що стимулює формування NO_x. Ці відомості є критично важливими для розробки ефективних стратегій зниження викидів, особливо при використанні комбінованих палив, а також для покращення екологічних характеристик двигунів, використовуючи різні види палива.

Аналізуючи дослідження, показане на графіку 4.13, можна відзначити, що оптимальне зниження обсягу вихлопних газів відбувається, коли паливна суміш містить від 20 до 30% стисненого природного газу. Це спостереження вказує на те, що певне співвідношення газу у паливній суміші може значно впливати на екологічні показники двигуна. Така інформація є цінною для розробки більш чистих та ефективних технологій двигунів, які використовують комбіновані палива.

Емісія частинок вуглеводнів HC та оксиду вуглецю CO виявилась значною при використанні чистого метану через високий рівень очищення, що обмежує подачу палива. Коли вводиться бензин, час інжекції газу скорочується, що зменшує обмеження на потік палива. Найнижчі показники емісії спостерігались при 30% масовій частці стисненого газу, оскільки це забезпечувало оптимальне потрапляння газу в циліндри. У порівнянні з даними на графіку 4.11 при 3000 об/хв, викиди HC і CO при комбінованому використанні газу і бензину були приблизно вдвічі меншими, ніж у режимі виключно на бензині, тоді як викиди NO_x виростили в три рази.

Ймовірно, суміш, що містить метан, бензин і повітря, у разі комбінованого впорскування, виявляється значно більш однорідною, ніж суміш чистого бензину з повітрям, тому ризик формування незгорілих вуглеводнів (HC) є нижчим. Ці дані демонструють можливість досягнення оптимального балансу між ефективністю роботи двигуна, витратами палива та викидами

вихлопних газів при використанні близько 30% стисненого природного газу в паливно-повітряній суміші. Такі висновки, представлені в таблиці 4.8, важливі для розвитку технологій двигунів, що зменшують негативний вплив на довкілля, забезпечуючи при цьому високу продуктивність та економічність.

Таблиця 4.8 Показує порівняння між комбінованим впорскуванням з 30% CNG та роботою на єдиному паливі при 3000 об/хв на повне завантаження.

Назва	Функціонування виключно на бензині	Функціонування виключно наСПГ	Функціонування виключно на змішаному паливі 30% СПГ
Ефективний середній тиск BMEP, бар	16,3	16,3	16,3
Витрата палива BSFC, г/кВтгод	303,5(+17%)	234(-11%)	263,9
CO, ppm($1 \cdot 10^{-6}$)	5,3(+200%)	0,44(-76%)	1,76
HC, ppm	697,5(+100%)	201,2(-43%)	349,9
NOx, ppm	556,56(-69%)	3447,9(+193%)	1793,9

Згідно з даними таблиці 4.8, у режимі використання комбінованого палива спостерігається оптимальність усіх характеристик, за винятком рівня викидів NOx. Проте переваги спільного згоряння двох видів палива, особливо під час роботи двигуна на повному навантаженні, є значними, адже ризик детонації в таких умовах підвищений, а двигуни на бензині зазвичай використовують багаті суміші. При зниженні навантаження на двигун ризик детонації знижується, дозволяючи використовувати стехіометричні суміші. З огляду на те, що каталітичні нейтралізатори вихлопних газів стають дедалі поширенішими в двигунах, такі умови стехіометричного згоряння можуть значно підвищити ефективність цих систем. Це, у свою чергу, покращує загальну продуктивність двигунів та сприяє зниженню емісії шкідливих речовин, що є важливим аспектом в контексті екологічної безпеки та сталого розвитку.

Дослідження демонструє, що режим впорскування, що поєднує бензин і стиснений природний газ (CNG), є значно ефективнішим у плані витрати палива та зниження викидів вуглеводнів (HC) та оксиду вуглецю (CO) порівняно з режимом, що використовує виключно бензин. Втім, як і передбачалося, це призводить до зростання викидів оксидів азоту (NO_x). Згідно з результатами, при середньому ефективному тиску 16,2 бар і повному навантаженні 3000 об/хв з 30% масовою часткою CNG, специфічна витрата палива, CO та HC покращуються на 16%, 200% та 100% відповідно, у порівнянні з режимом на чистому бензині. Це вказує на потенціал комбінованого використання палива для підвищення ефективності та зниження негативного впливу на навколишнє середовище, що є ключовим у розробці більш сталого та екологічного транспорту.

Дослідження підтверджує, що паливна суміш, в якій газова компонента складає 30%, представляє собою оптимальний баланс між ефективністю двигуна та рівнем викидів. При цьому також відмічено істотне скорочення споживання палива. Тестування двигунів із турбонаддувом при максимальному навантаженні продемонструвало покращення взаємодії між двома видами палива, особливо в умовах інтенсивної роботи.

У цьому експерименті проаналізовано ряд сучасних досліджень, присвячених роботі двигунів, що працюють на двох видах палива. Виявлено, що у більшості досліджень основний акцент робився на аналіз механічних та термічних аспектів таких двигунів. Однак у рамках цього експерименту особлива увага була приділена дослідженню викидів вихлопних газів і їх впливу на ефективність каталітичних нейтралізаторів. Цей підхід є важливим для розуміння взаємодії між різними системами двигуна та впливу вихлопних газів на екологічну ефективність транспортних засобів, а також може допомогти у вдосконаленні технологій зменшення шкідливих викидів.

Дослідження ефективності суміші стисненого газу та бензину було проведено на інжекторному турбонаддувному двигуні об'ємом 1,7 літра. Ця конфігурація поєднує позитивні аспекти обох видів палива, забезпечуючи не тільки підвищену об'ємну продуктивність, але й ефективний захист від детонації. В результаті, газ функціонує як підсилювач октанового числа,

оптимізуючи час запалення та заміщаючи необхідність збагачення паливною сумішшю на бензині, зберігаючи при цьому високу ефективність двопаливного двигуна. Також важливо, що при використанні суміші газу та бензину при повному навантаженні можливо зберегти стехіометричний баланс, що дозволяє традиційним каталітичним триходовим нейтралізаторам працювати ефективно на всіх режимах двигуна. Дослідження показало, що специфічна витрата палива знизилася на 13% при 3000 об/хв в умовах повного навантаження порівняно з використанням тільки бензину. Таким чином, висновок полягає в тому, що комбіноване упорскування палива сприяє підвищенню продуктивності двигуна та економії палива.

Дослідження виявило, що завдяки зниженню ризику детонації, використання суміші бензину та стисненого природного газу значно перевершує режим на чистому бензині у плані ефективності споживання палива та зниження викидів шкідливих речовин. При обертах двигуна 3000 за хвилину, 30% масової частки газу та умовах повного навантаження спостерігається покращення специфічної витрати палива та зменшення емісії CO та HC на 16, 200 та 100% відповідно у порівнянні з режимом на бензині. Проте, викиди NOx у комбінованому режимі збільшуються на 69%, що може створити труднощі у відповідності до екологічних стандартів при використанні звичайних каталізаторів. Ці висновки підкреслюють необхідність подальшого вдосконалення технологій двопаливних систем, щоб максимізувати їхні переваги та мінімізувати потенційні негативні наслідки.

Під час модельного аналізу було проведено три експерименти. В рамках першого експерименту двигун працював виключно на бензині, другий був зосереджений на роботі двигуна на газу, а в третьому експерименті використовувалася комбінована стратегія упорскування, зі стисненим природним газом, який становив 30% від загального об'єму паливно-повітряної суміші, у поєднанні з бензином. Цей підхід дозволив оцінити ефективність різних паливних режимів та їх вплив на загальні характеристики двигуна, включаючи витрату палива, продуктивність та викиди.

Під час роботи двигуна на бензині, середній ефективний тиск був на 7% більшим, ніж під час роботи на газі. Проте, у комбінованому режимі

використання газу та бензину, цей параметр було досягнуто на рівні 16,2 бар, що дорівнює показнику при роботі двигуна виключно на бензині. Це свідчить про ефективність комбінованого паливного режиму, який дозволяє досягти високих показників продуктивності, зберігаючи при цьому баланс між різними видами палива. Така стратегія може бути ключовою для розробки більш ефективних та екологічно сталіших транспортних рішень.

Специфічна витрата палива у комбінованому режимі дорівнювала 261,9 г/кВтгод. У порівнянні з цим, при використанні виключно бензину показник споживання палива був 303,4 г/кВтгод, що на 13% вище, ніж у комбінованому режимі. У той же час, при роботі двигуна тільки на стисненому газу, показник специфічної витрати палива (BSFC) складав 233,4 г/кВтгод, що на 11% менше, ніж у комбінованому режимі. Ці дані демонструють значну ефективність використання комбінованого палива у порівнянні з однокомпонентними паливними системами, вказуючи на потенціал такого підходу для покращення паливної ефективності та зниження викидів.

Наступний етап нашого дослідження був зосереджений на аналізі емісії вихлопних газів. Основними складовими емісії, на які ми звертали увагу, були: діоксид вуглецю (CO_2), вуглеводні (HC) та оксиди азоту (NO_x). Ці компоненти є критично важливими для оцінки екологічного впливу двигунів, оскільки вони безпосередньо впливають на якість повітря та відповідність екологічним стандартам.

Аналіз трьох ключових компонентів викидів вихлопних газів виявив наступне. У комбінованому режимі рівень оксиду вуглецю (CO) становив 1,75 ppm, вуглеводнів (HC) – 349,8 ppm, а оксидів азоту (NO_x) – 1792,9 ppm. При роботі двигуна тільки на бензині викиди CO були 5,2 ppm, HC – 697,4 ppm, NO_x – 556,56 ppm. У той же час, при використанні виключно стисненого природного газу, показники викидів склали: CO – 0,43 ppm, HC – 201,1 ppm, NO_x – 3446,9 ppm. З цього аналізу випливає, що застосування комбінованого впорскування знижує рівні CO та HC, але одночасно призводить до збільшення викидів NO_x .

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Охорони праці під час використання автотранспортних засобів, двигун яких працює на газовому паливі

Інструкція з охорони праці під час використання автотранспортного засобу, двигун якого працює на газовому паливі, є інструкцією за видом робіт та встановлює вимоги безпеки під час експлуатації газобалонних автомобілів та інших автотранспортних засобів, двигуни яких працюють на стисненому природному газі (СПГ) або зрідженому нафтовому газі (ЗНГ).

Інструкцію з охорони праці для водія транспортного засобу, двигун якого працює на газовому паливі (далі - Інструкція), розроблено на основі Порядку опрацювання і затвердження власником нормативних актів з охорони праці, що діють на підприємстві, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 21.12.1993 № 132, Положення про розробку інструкцій з охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 29.01.1998 № 9, Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Держнаглядохоронпраці від 26.01.2005 № 15, з урахуванням вимог Правил охорони праці на автомобільному транспорті, затверджених наказом МНС України від 09.07.2012 № 964, Правил експлуатації колісних транспортних засобів, затверджених наказом Міністерства інфраструктури України від 26.07.2013 № 550; Вимог до перевірки конструкції та технічного стану колісного транспортного засобу, методи такої перевірки, затверджених наказом Міністерства інфраструктури України від 26.11.2012 № 710 та розділу 6.7 ДСТУ 3649:2010 «Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання».

На транспортному засобі, двигун якого працює на газовому паливі, повинні застосовуватися автомобільні газові балони, що відповідають вимогам: ДСТУ UN/ECE R 67-01:2002 «Єдині технічні приписи щодо: I. Офіційного затвердження спеціального обладнання дорожніх транспортних засобів, двигуни яких працюють на зрідженому нафтовому газі; II. Офіційного

затвердження дорожнього транспортного засобу, оснащеного спеціальним обладнанням для використання зрідженого нафтового газу як палива, стосовно установлення такого обладнання»; ДСТУ UN/ECE R 110-00:2002

«Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження: I. Елементів спеціального обладнання дорожніх транспортних засобів, двигуни яких працюють на стиснутому природному газі; II. Дорожніх транспортних засобів, стосовно установлення елементів спеціального обладнання офіційного затвердженого типу для використання в їхніх двигунах стисненого природного газу»; ДСТУ UN/ECE R 115-00:2008 «Єдині технічні приписи щодо офіційного затвердження: I Спеціальних модифікованих систем ЗНГ (зріджений нафтовий газ), які встановлюють на колісні транспортні засоби, двигуни яких працюють на ЗНГ; II.

Спеціальних модифікованих систем СПГ (стиснений природний газ), які встановлюють на колісні транспортні засоби, двигуни яких працюють на СПГ».

Додаткові небезпечні та шкідливі виробничі чинники, що діють під час використання двигуна транспортного засобу на газовому паливі:

підвищена загазованість повітря робочої зони внаслідок витікання газу із газобалонного обладнання;

загоряння газового обладнання, спалах конструкційних і ущільнюючих неметалевих матеріалів тощо;

вибух посудини, що перебуває під тиском (балона);

вибух вуглеводневої суміші у разі досягнення відповідної концентрації газу.

У разі залучення до робіт на транспортному засобі, двигуни якого працює на газовому паливі, водій повинен пройти інструктаж за відповідною інструкцією з охорони праці за професією та мати допуск (відповідну категорію) до керування цим транспортним засобом. Робота водія автотранспортного засобу відноситься до робіт, де є потреба у професійному доборі.

За даною інструкцією водій інструктується перед початком роботи (первинний інструктаж), а потім через кожні 3 місяці (повторний інструктаж). Результати інструктажу заносяться в Журнал реєстрації інструктажів з питань

охорони праці (на робочому місці; в журналі після проходження інструктажу повинен бути підпис того, хто інструктує, та водія.

Перед допуском до самостійної роботи та відсутності достатнього досвіду керування транспортним засобом водій проходить стажування (дублювання) в установленому на підприємстві порядку.

Під час виконання робіт на автотранспортному засобі, двигуни яких працюють на газовому паливі, працівник забезпечується спецодягом та спецвзуттям за основною професією (наприклад, Інструкції з охорони праці для вантажного автомобіля).

Кількість встановлених на транспортному засобі балонів для газового палива не повинна перевищувати передбаченої експлуатаційною документацією. Заборонено встановлювати балони та будь-які інші елементи газобалонного обладнання у моторному відсіку або салоні автобусі загального користування. Заправний блок газового балона повинен розміщуватися зовні транспортного засобу.

Балони улаштовуються стаціонарно. Балони оснащуються стаціонарними вузлами кріплення або закріплюються на транспортному засобі за допомогою рами (кронштейнів) та стрічкових хомутів кріплення, у цьому разі відстань між будь-яким газовим балоном і поверхнею дороги повинна складати не менше ніж 0,2 м.

Балони оснащуються газонепроникними кожухами, що встановлюються поверх арматури балона (за винятком випадків, коли балон встановлено зовні транспортного засобу).

Балони для стисненого природного газу (СПГ) обладнуються клапанами з ручним керуванням (витратними вентилями) або автоматичними клапанами балонів.

Арматура балонів для зрідженого нафтового газу (ЗНГ), що встановлена зовні транспортного засобу, повинна бути захищена від потрапляння бруду та вологи.

Газопроводи, що проходять крізь пасажирський салон або не вентилязоване багажне відділення, повинні бути мінімальної довжини та захищені газонепроникним кожухом.

Жорсткі газопроводи мають бути виготовлені з суцільнотягнутих трубок із неіржавіючої сталі або сталі з антикорозійним покриттям. Для газобалонного обладнання, що працює на зрідженому нафтовому газі (ЗНГ), можуть використовуватися жорсткі газопроводи з суцільнотягнутих трубок із міді з гумовим або пластмасовим захисним покривом. Заборонено використовувати паяні або зварні з'єднання газопроводів, зубчаті з'єднання обтисненням. Трубки з неіржавіючої сталі повинні бути з'єднані лише фітингами з неіржавіючої сталі. Жорсткі та гнучкі газопроводи не повинні розміщуватися поблизу точок піддомкращування.

Газове обладнання може бути обладнано системою перемикання виду палив для забезпечення від постійного одночасного подавання в двигун більше ніж одного виду палива, за винятком короткочасного подавання двох палив під час перемикання системи живлення двигуна з одного виду палива на інший та для газодизельних транспортних засобів, що використовують дизельне паливо для запалювання газоповітряної суміші.

Газова система живлення транспортного засобу повинна бути герметичною. Складові газової паливної системи не можна розташовувати в межах 100 мм від системи випуску відпрацьованих газів, якщо вони не мають належного теплозахисного кожуха (екрана).

На газобалонному обладнанні повинно бути відповідне маркування та попереджувальні знаки: «Обережно! Інші небезпеки» із пояснювальною табличкою із ЗАБОРОНЕНО експлуатувати газобалонне обладнання із балонами, в яких:

- вийшов граничний термін використання;
- вийшов строк призначеного технічного опосвідчення;
- пошкоджений корпус балона; несправні вентиля;
- відсутні належні пофарбування, надписи, клейма;
- газове обладнання із балонами іншого призначення.

Газобалонне обладнання підлягає періодичному технічному обслуговуванню. Робочі манометри підлягають перевірці у спеціалізованій організації не рідше ніж 1 раз на 12 місяців.

Максимально допустимий робочий тиск газу у балоні визначається експлуатаційною документацією.

ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПЕРЕД ПОЧАТКОМ РОБОТИ

Вимоги безпеки перед початком роботи на транспортному засобі з газобалонним обладнанням аналогічні вимогам безпеки під час експлуатації транспортного засобу, передбачених інструкцією з охорони праці за професією.

Перед виїздом на лінію необхідно провести профілактичне обслуговування згідно з вимогами експлуатаційної документації транспортного засобу. Перевірити герметичність та справність газової апаратури, а також надійність кріплення газового балону та кронштейнів.

У разі виявлення витікання газу із балонів через вентиля, запобіжний клапан або іншу арматуру на лінії і неможливості його усунення випустити газ із балонів в атмосферу в безпечному місці подалі від людей і джерел вогню. Випуск газу проводити з вимкненими двигуном і «масою».

Для огляду транспортного засобу у темний час доби користуватися переносним електричним світильником із захисним ковпаком (з безпечною напругою) або акумуляторним ліхтарем.

Перед виїздом на лінію пройти передрейсовий медичний огляд та отримати підтвердження справності транспортного засобу у особи, відповідальної за технічний стан транспортних засобів (механіка).

У разі виявлення несправностей у роботі транспортного засобу інформувати керівника робіт або механіка, не приступати до роботи, поки не будуть усунені несправності, що впливають на безпеку праці.

У разі погіршення самопочуття інформувати керівника робіт або звернутися до медичного працівника.

Для підготовки транспортного засобу до виїзду на лінію повинен надаватися на початку зміни необхідний час.

ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ

Вимоги безпеки під час заправлення транспортного засобу газовим паливом

Заправляти транспортний засіб газом тільки у передбачених для цього місцях (газонаповнювальних станціях).

Перед заправленням транспортного засобу газовим паливом:

висадити пасажирів із кабіни (кузова) або салону транспортного засобу;

зупинити двигун, вимкнути запалювання;

закрити магістральний вентиль, витратні вентиля мають бути відкриті.

Перед початком наповнення балонів газом спочатку відкрити вентиль наповнення на транспортному засобі, а потім вентиль заправної колонки. Після наповнення спочатку закрити вентиль заправної колонки, а потім вентиль наповнення на транспортному засобі. Від'єднувати та приєднувати газонаповнювальні шланги тільки тоді, коли обидва вентиля закриті.

Запірні вентиля відкривати повільно, щоб уникнути гідравлічного удару, а закривати - не докладаючи великих зусиль, щоб не пошкодити ущільнювачі.

Якщо під час заправлення виявлено виток газу із газонаповнювального шлангу, негайно закрити вихідний вентиль на газонаповнювальній колонці, а потім - наповнювальний вентиль на транспортному засобі.

Під час заправлення газобалонного транспортного засобу дотримуватися заходів щодо попередження попадання зрідженого газу в очі і на відкриті частини тіла.

Під час заправлення газовим паливом **ЗАБОРОНЕНО**:

стояти біля газонаповнювального шланга і балонів;

підтягувати гайки з'єднань паливної системи та стукати металевими предметами;

проводити регулювання та ремонт газової апаратури;

виконувати роботи, що викликають іскроутворення;

палити та користуватися відкритим вогнем;

працювати без рукавиць;

заправляти балони зрідженим газом (пропан-бутан) вище допустимої норми заповнення ємності балона;

заправляти балони, якщо строк огляду їх минув, або у випадку витoku газу з системи.

Вимоги безпеки під час роботи на лінії. Вимоги безпеки під час роботи на транспортному засобі з газобалонним обладнанням аналогічні вимогам безпеки

під час роботи транспортного засобу, передбачених інструкцією з охорони праці за професією.

Під час експлуатації транспортного засобу керуватися експлуатаційною документацією заводів-виробників транспортного засобу та газобалонного обладнання.

Для підігрівання двигуна транспортного засобу і системи живлення, ліквідації закупок використовувати тільки гарячу воду, повітря або пару. Заборонено використовувати паяльну лампу та інших способів підігрівання з застосуванням відкритого вогню.

Запуск двигуна транспортного засобу з можливістю використання декількох видів палива (наприклад, газове паливо та бензин) проводити тільки на паливі одного виду.

Перед запуском двигуна переконатися, що транспортний засіб загальмований стоянковим гальмом, важіль перемикачів передач у нейтральному положенні. Двигун запускати за допомогою стартера. Прогріти двигун транспортного засобу (за необхідності).

Перед запуском двигуна транспортного засобу, розташованого у закритому приміщенні (боксі) або після тривалої стоянки, дотримуватися таких заходів безпеки:

- переконатися у відсутності запаху газу;

- переконатися в надійності кріплення газових балонів та кронштейнів;

- відкрити двері або вікна приміщення;

- відкрити для провітрювання не менше як на 3 хвилини капот, люки відсіків балонів і двері (в автобусах), багажне відділення (у легкових автомобілів);

- переконатися в герметичності газової апаратури, трубопроводів і з'єднань системи живлення двигуна транспортного засобу;

- запірні вентиля відкривати повільно, щоб уникнути гідравлічного удару,

- а закривати - не докладаючи великих зусиль, щоб не пошкодити ущільнювачі.

У разі появи запаху газу негайно зупинити транспортний засіб, закрити витратні газові вентиля, виявити та усунути причини витоків газу. За відсутності

у водія необхідних засобів виробництва або неможливості безпечного виконання ремонту транспортного засобу викликати технічну допомогу. Про виявлені несправності інформують безпосереднього керівника або іншу відповідальну особу підприємства.

Під час експлуатації транспортних засобів заборонено:

запускати двигун і працювати на автомобілі з несправною газовою апаратурою та витоку газу з балону або системи живлення;

робота двигуна на суміші двох палив: бензину та газу;

дозаправляти балони або випускати (зливати) газ у безпосередній близькості від місць стоянки інших автомобілів або поблизу джерел вогню та місць знаходження людей;

зупиняти автомобіль ближче 5 м від місця роботи з відкритим вогнем, а також - користуватися відкритим вогнем ближче 5 м від автомобіля;

користуватися вогнем (наприклад, палити) у безпосередній близькості від приладів системи живлення двигуна (зокрема, газобалонним обладнанням);

проводити перевірку герметичності системи живлення, пошук та усунення інших несправностей відкритим полум'ям;

перевіряти або регулювати прилади електрообладнання,

не переконавшись у відсутності газу під капотом двигуна та в інших можливих місцях його накопичення;

експлуатувати автомобіль зі знятим газовим фільтром;

використовувати газопроводи (наприклад, шланги) «кустарного виробництва» та в'язальний дріт для з'єднання шлангів подачі газу чи води (використовувати хомути);

допускати закручення, деформування, перегинання шлангів;

використання шлангів зі слідами мастила; регулювати або ремонтувати газову апаратуру (крім регулювання холостого ходу) при працюючому двигуні;

ударяти по газовій арматурі та арматурі, що знаходиться під тиском;

залишати у проміжному положенні витратні газові вентиля, вони мають бути повністю відкриті або закриті;

застосовувати додаткові важелі для відкривання або закривання витратних або вентилів наповнювання;

експлуатувати транспортний засіб на бензині з відкритим електромагнітним клапаном і витратними магістральними газовими вентилями;

застосовувати для миття двигуна бензин та інші легкозаймісті рідини;
допускати на двигуні та карбюраторі скупчення бруду та мастила;
залишати на двигуні забруднені пально-мастильними матеріалами та обтиральні матеріали;
запускати двигун за наявності тиску у балонах менше 0,5 МПа (0,5 кгс/см²).

У разі тривалої стоянки транспортного засобу закрити магістральний та витратні вентиля, випрацювати весь газ із системи живлення, після чого виключити запалювання і відключити «масу». У разі нетривалої зупинки транспортного засобу (не більше 10 хвилин) магістральний вентиль дозволяється залишати відкритим.

У разі зупинки транспортного засобу водій, покидаючи кабінку, вживає заходів щодо самовільного руху транспортного засобу: вимикає запалювання або перекриває подачу газу, встановлює важіль перемикачів передач у нейтральне положення, загальмовує транспортний засіб стоянковим гальмом.

Виходячи з салону транспортного засобу, водій повинен попередньо переконатися у стані поверхні в місці виходу (наявність слизькості, сторонніх предметів тощо), а при виході на проїзну частину дороги - ще й у відсутності руху як у попутному, так у зустрічному напрямках.

Вимоги безпеки під час технічного обслуговування газобалонного обладнання. Під час технічного обслуговування транспортного засобу виконувати вимоги безпеки праці, що встановлені експлуатаційною документацією для технічного обслуговування та ремонту транспортного засобу.

Газобалонне обладнання оглядати візуально не рідше одного разу за робочу зміну. Перевірку герметичності з'єднань газового обладнання і визначення місць витікання газу проводять за допомогою спеціальних приладів (газоіндикаторів, течешукачів) або мильної емульсії. Поточна перевірка

манометрів здійснювати шляхом короткочасного встановлення стрілки манометра на нуль.

Для підтягування гайок газобалонної апаратури попередньо перекрити магістральний вентиль. Технічне обслуговування газової апаратури проводити з використанням інструменту, що не утворює іскру (обмідненого або оцинкованого). Під час технічного обслуговування використовувати засоби праці за призначенням.

Проводити регулювання двигуна на холостому ході. Роботи, не пов'язані з регулюванням газового обладнання, проводити з вимкненою системою запалювання і вимикачем «маси» двигуна транспортного засобу. Не повинен проводитися ремонт газобалонного обладнання при працюючому або вимкненому гарячому двигуні при включеній системі запалювання.

Перед перевіркою та регулюванням приладів і системи електрообладнання закрити всі вентиля газового обладнання та провітрити підкапотний простір, а у разі розміщення газового балона в багажнику, кузові-фургоні додатково провітрити ці відділення.

Під час виконання робіт, не пов'язаних з регулюванням двигуна,.

Під час проведення робіт, що пов'язані з усуненням несправностей арматури балонів або їх зняттям, газ із балонів автомобіля попередньо злити в інший балон, а балони продути стисненим повітрям.

4.3.8 По закінченні технічного обслуговування і ремонту газового обладнання газобалонних автомобілів перевіряти на герметичність всю систему живлення (омилюванням всіх з'єднань і арматури), використаний матеріал обтирання мастила скласти в металеві ящики з кришками.

Перед здачею газобалонного автомобіля в капітальний ремонт газовий балон звільнити від газу, зняти з автомобіля і перед здачею на склад промити і пропарити.

Під час технічного обслуговування та ремонту транспортного засобу дотримуватися заходів щодо попередження попадання зрідженого газу в очі і на відкриті частини тіла.

Для попередження випадків обморожування під час усунення несправностей транспортного засобу зимою (при мінусових температурах)

роботи виконувати у рукавицях. При мінусовій температурі не торкатися руками без рукавиць металевих частин.

ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ

Вимоги безпеки під час закінчення роботи на транспортному засобі з газобалонним обладнанням аналогічні вимогам безпеки під час закінчення роботи транспортного засобу, передбачених інструкцією з охорони праці за професією.

Якщо транспортний засіб технічно справний, проводити його щоденне технічне обслуговування згідно з інструкцією з експлуатації транспортного засобу та встановити транспортний засіб у передбачене для стоянки місце.

Під час постановки транспортного засобу в закрите приміщення (бокс) переконатися в роботоздатності системи вентиляції приміщення. Не дозволяється стоянка газобалонних автомобілів в боксах з оглядовими ямами, а також в боксах, не обладнаних вентиляцією, що забезпечує 3-х кратний обмін повітря на годину.

Перед постановкою транспортного засобу на стоянку перевірити його технічний стан:

перекрити магістральний вентиль і вентилі на газовому балоні і виробити газ з трубопроводів паливної системи;

вимкнути запалювання і вимикач маси транспортного засобу;

перевірити відсутність витоку газу з системи газопостачання мережі живлення двигуна транспортного засобу.

У приміщеннях, що використовуються для стоянки транспортного засобу, **ЗАБОРОНЕНО:**

палити та користуватися відкритим вогнем;

заряджати акумуляторну батарею;

захарашувати приміщення та проходи до них сторонніми матеріалами;

встановлювати транспортний засіб на шляхах евакуації.

Після встановлення транспортного засобу на стоянку вжити заходів щодо самовільного руху транспортного засобу: вимкнути запалювання або перекрити подачу пального, встановити важіль перемикачів передач в нейтральне

положення, загальмовувати стоянковим гальмом та за необхідності встановити упорні колодки.

Доповісти особі, відповідальній за технічний стан транспортного засобу (механіку), або безпосередньому керівникові про несправності, що мали місце під час роботи. У разі виявлення несправності транспортного засобу зареєструвати заявку на ремонт з переліком несправностей, що підлягають усуненню.

Руки вимити спеціальним миючим засобом, потім водою з милом.

Зняти спецодяг, слецвзуття і скласти в відведене місце.

Засоби виробництва (робочий інструмент та пристрої) покласти у спеціально відведене місце (шафу).

Виходячи з приміщення вимкнути всі пристрої.

Про всі відхилення і порушення, що виникли в роботі необхідно повідомити свого безпосереднього керівника, механіка.

Для прибирання робочого місця та засобів виробництва повинен надаватися в кінці зміни необхідний час. Не залишатися на ніч в транспортному засобі.

5.2 Основи оцінки хімічної обстановки

Небезпечна хімічна обстановка може створитися в результаті аварій з викидом (розливом) отруйних речовин (ОР), сильнодіючих отруйних речовин (СДОР) або у разі застосування хімічної зброї (в тому числі під час терористичних актів) з утворенням зон хімічного зараження й осередків хімічного ураження.

Хімічна обстановка - це сукупність наслідків хімічного зараження території отруйними чи сильнодіючими отруйними речовинами, які негативно впливають на населення, формування ЦЗ і діяльність об'єктів економіки.

Для визначення масштабів, характеру, ступеня впливу небезпечних хімічних речовин на людей, тварин, рослини, воду, а також розробки доцільних дій формувань ЦЗ і населення під час ліквідації хімічного зараження й

проведення робіт на об'єкті здійснюють оцінку хімічної обстановки методом прогнозування або за даними хімічної розвідки.

Вихідними даними для оцінки хімічної обстановки є;
район і час застосування хімічної зброї або потрапляння в довкілля ОР;
тип і кількість ОР або СДОР;
ступінь захищеності людей, тварин, продуктів харчування, кормів;
топографічні умови місцевості, характер забудови, наявність лісових насаджень на шляху поширення зараженого повітря;

метеоумови: швидкість і напрямок вітру в приземному шарі, температура повітря і ґрунту, ступінь вертикальної стійкості повітря,

Є три види вертикальної стійкості повітря: інверсія, ізотермія і конвекція.

Інверсія виникає при ясній погоді, малій швидкості вітру (до 4 м/с), у вечірній час, приблизно за 1 год до заходу сонця і припиняється протягом години після сходу сонця. При інверсії нижні шари повітря холодніші за верхні, що перешкоджає розсіюванню його по висоті і створює найбільш сприятливі умови для збереження високих концентрацій зараженого повітря.

Конвекція виникає при ясній погоді, малих швидкостях вітру (до 4 м/с), приблизно через 2 год після сходу сонця і припиняється десь за 2-2,5 год до заходу сонця. При конвекції нижні шари повітря нагріваються сильніше ніж верхні і це сприяє швидкому розсіюванню зараженої хімічною речовиною хмари і зменшенню її уражаючої дії.

Ізотермія спостерігається в хмарну погоду і характеризується стабільною рівновагою повітря в межах 20- 30 м від земної поверхні. Ізотермія, так само як і інверсія, сприяє тривалому застою парів ОР і СДОР на місцевості, в лісі, населених пунктах.

Оцінка хімічної обстановки на об'єктах, що можуть потрапити в зону хімічного зараження, включає визначення:

розмірів і площі зони хімічного зараження;
часу підходу зараженого повітря до зазначеного об'єкта;
часу уражаючої дії СДОР;
меж можливих осередків хімічного ураження;
можливих втрат людей в осередках хімічного ураження.

Втрати серед населення залежать від часу, протягом якого зберігаються уражаючі концентрації отруйних хімічних речовин, а також термінів ліквідації наслідків небезпеки хімічного ураження.

Під час перебування людей в осередку хімічного ураження на відкритій місцевості без протигазів ураження отримує практично 100% населення. У разі повного забезпечення населення засобами індивідуального захисту втрати не перевищать 10-12%. Зазначені втрати можуть бути пов'язані з несвоєчасним застосуванням засобів захисту, закінченням терміну придатності засобів захисту, значним часом перебування у зараженій зоні, коли захисні (поглинаючі) властивості засобів захисту дихання вичерпуються.

Глибина поширення зараженого повітря

У разі застосування бойових отруйних речовин вони можуть переноситися з вітром на значні відстані.

Глибина поширення зараженого повітря - це відстань від повітряної межі району застосування хімічної зброї до межі поширення зараженого повітря з уражаючими концентраціями.

Вона залежить від рельєфу місцевості, метеорологічних умов, щільності забудови населених пунктів, наявності лісових насаджень. Максимальну глибину поширення зараженого повітря при застосуванні БОР можна оцінити за допомогою таблиці.

При конвекції глибина (Γ) поширення хмари зараженого повітря зменшується приблизно у 2 рази, при інверсії збільшується в 1,5-2 рази. При нестійкому вітрі глибина поширення зарину в 3 рази, а іприту - у 2 рази менша. У населених пунктах із суцільною забудовою і лісових масивах глибина поширення зараженого повітря зменшується в середньому в 3,5 рази.

Ширина зони хімічного зараження (Π) визначається за такими співвідношеннями:

$\Pi = 0,03 \cdot \Gamma$ - при інверсії;

$\Pi = 0,15 \cdot \Gamma$ - при ізотермії;

$\Pi = 0,8 \cdot \Gamma$ - при конвекції;

з використанням формули (И.А.Семенов, 1993) -

$$A = L \cdot K,$$

де: А - ширина забруднення БОР (км),

L - глибина забруднення БОР (км),

K - ступінь вертикальної стійкості повітря.

Визначення площі зони забруднення БОР. За площу зони хімічного забруднення БОР (И.А.Семенов, 1993) приймається площа рівнобедреного трикутника, що дорівнює половині результату від помноження глибини розповсюдження забрудненого повітря на ширину зони хімічного забруднення.

Розрахунок за формулою:

$$S = L \cdot A \div 2 ,$$

де: S - площа забруднення БОР (км²),

L - глибина розповсюдження забрудненого БОР повітря (км),

A - ширина зони забруднення БОР (км).

Визначення часу уражаючої дії ОР. Час уражаючої дії визначається стійкістю ОР в осередку хімічного ураження.

Стійкість ОР - це час хімічного та фізичного розпаду ОР під дією зовнішніх факторів, після закінчення якого особовий склад формувань ЦЗ і населення зможуть знаходитись у зоні ураження без засобів захисту.

На стійкість БОР визначеного типу на місцевості впливають такі фактори, як швидкість вітру, температура ґрунту і повітря, рельєф місцевості тощо.

На місцевості без рослинності знайдене за таблицею значення стійкості необхідно перемножити на 0,8. Стійкість БОР у лісі в 10 разів більша, ніж наведено в таблиці. Стійкість зарину взимку - від 1 до 5 діб, Ві-Ікс - понад один місяць.

Втрати людей в осередку хімічного ураження. Втрати (загибель та не смертельне отруєння) людей, у т. ч. особового складу формувань ЦЗ, залежать від чисельності людей, які опинилися у зоні зараження, площі осередку, рівня захищеності людей, своєчасності використання засобів індивідуального та колективного захисту (протигазів, сховищ).

Рівні захищеності людей:

високий - люди добре підготовлені, щоб застосувати індивідуальні засоби захисту, забезпечені укриттями;

середній - люди задовільно підготовлені до застосування індивідуальних засобів захисту, забезпечені перекритими щілинами, мають змогу укриватися у виробничих приміщеннях і житлових будинках;

слабкий - люди незадовільно підготовлені, щоб застосувати індивідуальні засоби захисту, розміщені на відкритій місцевості або у відкритих щілинах.

Можливі втрати людей в осередках ураження визначаються за таблицями.

При утворенні зон можливого хімічного зараження з концентраціями НХР перевищуючими ГДК необхідно організувати захист населення в захисних спорудах, а при необхідності евакуацію. Виводити людей завжди треба в напрямку перпендикулярному до напрямку вітру.

Населення евакуюється з небезпечної зони і повертається тільки коли концентрація НХР у повітрі зменшиться до нормальних меж.

В плані цивільного захисту об'єкта на мирний час плануються заходи захисту від небезпечних хімічних речовин (НХР):

інженерно-технічні заходи зі зберігання та використання НХР;

забезпечення засобами індивідуального захисту;

оповіщення про безпеку ураження;

хімічна розвідка;

використання засобів колективного та індивідуального захисту;

надання допомоги ураженим;

евакуація населення з небезпечної зони;

локалізація та ліквідація зараження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У даній роботі було проведено комплексне дослідження та удосконалення технологічного процесу технічного обслуговування турбованого двигуна, який працює на стислому природному газі. Робота була спрямована на підвищення ефективності обслуговування та оптимізацію роботи таких двигунів з метою зменшення споживання природного газу та викидів шкідливих речовин в атмосферу.

У процесі виконання роботи були досягнуті наступні основні результати та висновки:

Аналіз існуючого стану проведено аналіз та обґрунтування актуальності проблеми був проведений огляд сучасних тенденцій у використанні стислого природного газу в автомобільному транспорті та проблем, пов'язаних з технічним обслуговуванням турбованих двигунів на газі.

Здійснено комплекс досліджень, спрямованих на вивчення основних параметрів роботи турбованого двигуна на стислому природному газі. Були виміряні та проаналізовані такі характеристики, як ефективність, викиди шкідливих речовин, ресурс двигуна тощо.

На основі отриманих результатів була розроблена та впроваджена методика технічного обслуговування турбованого двигуна на стислому природному газі. Ця методика включає в себе рекомендації щодо регулярного обслуговування, налаштування та діагностики двигуна.

За допомогою розробленої методики та використання нових підходів до обслуговування, було досягнуто покращення ефективності роботи турбованого двигуна на стислому природному газі. Це включає в себе зменшення викидів, підвищення ефективності споживання газу та забезпечення стабільності роботи.

Результати роботи відкривають широкі перспективи для подальших досліджень у галузі технічного обслуговування турбованих двигунів на стислому природному газі. Можливості оптимізації процесів та вдосконалення методик є важливим завданням для підвищення ефективності та екологічної стійкості автомобільних транспортних засобів.

Отже, робота успішно вирішує завдання удосконалення технологічного процесу технічного обслуговування турбованого двигуна на стислому природному газі. Вона пропонує конкретні практичні рішення та може бути використана в автомобільній індустрії для підвищення ефективності та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Полякова М.П. «Чим поганий скраплений газ для автомобілів»/М.П Полякова – Київ: Вид-во «Ранок» - 210 ст.: іл.- Бібліограф .: с.20-25.

2. ДСТУ 4047-2001 «Гази вуглеводневі скраплені паливні для комунальнопобутового споживання».-Введ. 2001-05-07.:Вид-во стандартів, 2001, 55 с.

3. Басовский Л. Е .. Протасев В. Б. Управління якістю: Підручник. - М .: /Л.Е. Басовський. В.Б. Протасев.:ИНФРА-М, 2001., 212 с.

4. Ляшук О.Л., Гудь В.З., Пиндус Ю.І., Левкович М.Г., Хорошун Р.В. Методичний посібник до виконання кваліфікаційної роботи магістра за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр» галузі знань 27 «Транспорт» спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» – Тернопіль: Видавництво ТНТУ, 2020. – 66 с.

5. Гевко І.Б Техніко-економічне обґрунтування процесу механічної обробки з використанням комбінованого свердла-мітчика / І.Б.Гевко, Р.Я., Лещук, І.І.Стойко, Н.М.Марчук, М.Д.Сіправська // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст.–Вип. 40.–Луцьк, 2018. С.21-31.

6. Техніко-економічне обґрунтування інженерних рішень на СТО та АТП : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Ляшук О.Л., Луциків І.В., Плекан У.М., Клендій В.М. - Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 276 с.

7. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Гудь В.З., Левкович М.Г., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. - Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. 544 с.

8. Конспект лекцій з курсу «Технології обслуговування автотранспортних засобів». / Р.В. Хорошун, О.Л. Ляшук, Н.Т. Навроцька. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ, 2021. – 194 с.

9. Ляшук О.Л. Конспект лекцій з дисципліни«Технічна експлуатація автомобілів» для студентів спеціальності 274 «Автомобільний транспорт» / О.Л. Ляшук, В.М.Клендій, Р.В.Хорошун. – Тернопіль: Вид. ТНТУ – 2018. – С. 302.

10. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: Підручник – К.: Знання. 2003. – 511 с.
11. Лудченко О.А. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів: організація і управління: Підручник – К.: Знання. 2004. – 478 с.
12. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів. Технологія [Текст]: Підручник. / О.А. Лудченко. - Київ: Знання-Прес, 2007. - 527с.
13. Основи технології виробництва та ремонту автомобілів : Навчальний посібник / Укладачі : Гевко І.Б., Рогатинський Р.М., Ляшук О.Л., Левкович М.Г., Гудь В.З., Сташків М.Я., Сіправська М.Д. – Тернопіль : Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. – 544 с.
14. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-trailer body bottom. Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport. 2023, 118, 161-172. ISSN: 0209-3324. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.11>.
15. Sokil, B., Lyashuk, O., Sokil, M., Vovk, Y., Lebid, I., Nevko, I., Khoroshun R Matviyishyn, A. (2022). Methodology of Force Parameters Justification of the Controlled Steering Wheel Suspension. Communications, 24(3), B247-B258.
16. Охорона праці в галузі та цивільний захист: навчальний посібник / Ю. А. Гасило, О. А. Крюковська. К. О. Левчук, Р. Я. Романюк. — Кам'янське : ДДТУ, 2017. — 369 с.
17. Безпека в надзвичайних ситуаціях : навч. посібник для студентів ЗВО України : у 2 ч. Ч. 1: Надзвичайні ситуації / М. Л. Лисиченко, В. В. Вамболь, С. О. Вамболь, М. М. Кірієнко, І. А. Черепньов, В. М. Власовець ; за ред. М. Л. Лисиченка ; ХНТУСГ. – Харків : ТОВ “ПромАрт”, 2021. – 202 с.
18. Охорона праці на автомобільному транспорті : навчальний посібник / Пістун І. П., Хом'як Й. В., Хом'як В. В. - 2-ге вид., стер. - Суми : Університетська книга, 2015. - 374 с.
19. Lyashuk, O., Levkovych, M., Vovk, Y., Gevko, I., Stashkiv, M., Slobodian, L., Pyndus, Y. The study of stress-strain state elements of the truck semi-

trailer body bottom (2023) Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 118, pp. 161-172. (Scopus).

20. Aulina, V., Kropivnya, V., Kuzyka, O., Lyashuk, O., Bosyia, M., Vovk, Y., Kropivnaa, A., Sokol, M., Senyk, A., Slobodyan, L. The Influence of Titanium as a Desferoidizing Element on the Stability of Production of Magnesium Cast Irons with Compacted Graphite (2021) Tribology in Industry - Kragujevac : University of Kragujevac, 4 (43), pp. 654-666. (Scopus).

21. Євдін О.М., Могильниченко В.В. та ін. Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій. Т.1. "Техногенна та природна небезпека". Т.3."Інженерно- технічні заходи цивільного захисту (цивільної оборони) та містобудування". Посібник.- К.: КІМ, 2007, 2008.

22. ГБО [Електронний ресурс]. URL: <https://ukr.lpgtech.ua/>.

23. ГБО [Електронний ресурс]. URL: <https://grand-gas.com.ua/blog/shema-ustanovki-gbo-4-pokoleniya.html>.

24. ГБО [Електронний ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=MhnPu8oB6Sk>.

25. ГБО [Електронний ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=TJgM9q-1km0>.

26. Навчальний посібник «Техноекологія та цивільна безпека. частина «Цивільна безпека»» / автор-укладач В.С. Стручок– Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., – 156 с.