

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АТ-71.00.00.000 ПЗ

Група АТм-24-1

Трегер Владислав

2025

Інститут інженерної механіки та робототехніки

Кафедра автомобільного транспорту

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність: 274“Автомобільний транспорт”

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри АТ

Проф. _____ С.І. Криштопа

“ ___ ” _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту _____ Трегеру Владиславу Любомировичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи: Дослідження впливу рециркуляції палива на робочі параметри дизельного двигуна.

керівник роботи _____ Гнип М.М., д.ф., доцент
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ ___ ” листопада 2025 року № _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 18.12.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ. 4.1 Огляд літературних джерел 4.1.1 Викиди транспортних засобів 4.1.2 Вплив конструкції двигуна на паливо 4.1.3 Європейські норми викидів відпрацьованих газів 4.1.4 Заходи щодо зменшення вмісту NOX у паливі 4.1.4.1 Селективне каталітичне відновлення (СКВ) 4.1.4.2 Каталізатор накопичення NOx (NSC) 4.1.4.3 Рециркуляція відпрацьованих газів (EGR) 4.1.5 Класифікація систем EGR 4.1.6 Проблеми з рециркуляцією відпрацьованих газів (EGR) 4.1.7 Ефективність системи EGR 4.2 Методологія дослідження 4.2.1. Хід дослідження 4.3 Результати експериментальних досліджень 4.4 Охорона праці при роботі з дизельними двигунами та системами egr 4.4.1 Загальні положення 4.4.2. Потенційні небезпеки 4.4.3. Організаційні заходи 4.4.4 Технічні заходи 4.5 Висновки. 4.6 Перелік посилань на джерела. 4.7 Додатки .

5. Перелік графічного матеріалу

5.1 презентаційні плакати в PowerPoint.

Консультанти по магістерській роботі із зазначенням розділів

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

7. Дата видачі завдання 03.11.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. 4.1 Огляд літературних джерел 4.1.1 Викиди транспортних засобів 4.1.2 Вплив конструкції двигуна на паливо 4.1.3 Європейські норми викидів відпрацьованих газів	17.11.2025 р.	
2	4.1.4 Заходи щодо зменшення вмісту NOX у паливі 4.1.4.1 Селективне каталітичне відновлення (СКВ) 4.1.4.2 Каталізатор накопичення NOx (NSC) 4.1.4.3 Рециркуляція відпрацьованих газів (EGR) 4.1.5 Класифікація систем EGR	21.11.2025 р.	
3	4.1.6 Проблеми з рециркуляцією відпрацьованих газів (EGR) 4.1.7 Ефективність системи EGR	22.11.2025 р.	
4	4.2 Методологія дослідження 4.2.1. Хід дослідження 4.3 Результати експериментальних досліджень	29.11.2025 р.	
5	4.4 Охорона праці при роботі з дизельними двигунами та системами egr 4.4.1 Загальні положення 4.4.2. Потенційні небезпеки 4.4.3. Організаційні заходи 4.4.4 Технічні заходи	12.12.2025 р.	
6	4.5 Висновки. 4.6 Перелік посилань на джерела. 4.7 Додатки	18.12.2025 р.	
7	Готовність роботи до попереднього захисту.	18.12.2025 р.	

Студент _____ Трегер В. Л.
(Особистий підпис) (Розшифровка підпису)

Керівник _____ Гнип М.М.
(Особистий підпис) (Розшифровка підпису)

АНОТАЦІЯ

У цій роботі представлено вплив системи рециркуляції відпрацьованих газів на показники продуктивності дизельного двигуна. Під час випробувань двигун працював на звичайному мінеральному дизельному паливі. Двигун навантажувався на навантажувальний стенд, а параметри двигуна контролювалися за допомогою різних електронних пристроїв. Під час випробувань спостерігалось зниження концентрації NO_x у відпрацьованих газах у 3,06 рази після збільшення рециркуляції відпрацьованих газів з 0% до 30%. Однак це призвело до негативного побічного ефекту – збільшення димності до 79,5%. Рециркуляція відпрацьованих газів також збільшила викиди CO та CO_2 у відпрацьованих газах. Система рециркуляції відпрацьованих газів знизила ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна в режимах високого навантаження двигуна.

Ключові слова: паливо, рециркуляція, двигун, дизельне паливо, коефіцієнт корисної дії двигуна.

ABSTRACT

This paper presents the effect of the exhaust gas recirculation system on the performance indicators of a diesel engine. During the tests, the engine was operated on conventional mineral diesel fuel. The engine was loaded on a load bench, and the engine parameters were monitored using various electronic devices. During the tests, a decrease in the NOX concentration in the exhaust gases was observed by a factor of 3.06 after increasing the exhaust gas recirculation from 0% to 30%. However, this led to a negative side effect - an increase in smoke to 79.5%. Exhaust gas recirculation also increased CO and CO₂ emissions in the exhaust gases. The exhaust gas recirculation system reduced the effective engine efficiency in high engine load modes.

Keywords: fuel, recirculation, engine, diesel fuel, engine efficiency.

ЗМІСТ	С.
ВСТУП.....	6
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	9
1.1 Викиди транспортних засобів	9
1.2 Вплив конструкції двигуна на паливо	14
1.3 Європейські норми викидів відпрацьованих газів	16
1.4 Заходи щодо зменшення вмісту NOX у паливі	18
1.4.1 Селективне каталітичне відновлення (СКВ)	18
1.4.2 Каталізатор накопичення NOx (NSC)	19
1.4.3 Рециркуляція відпрацьованих газів (EGR)	20
1.5 Класифікація систем EGR.....	23
1.6 Проблеми з рециркуляцією відпрацьованих газів (EGR)	24
1.7 Ефективність системи EGR.....	30
2 МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	35
2.1. Хід дослідження.....	38
3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	40
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ДИЗЕЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ ТА СИСТЕМАМИ EGR.....	49

					MP.ATM-71.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Арк..	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Тренер В.Л.			Дослідження впливу рециркуляції палива на робочі параметри дизельного двигуна	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Гнип М.М.					6	
Реценз.						ІФНТУНГ, АТМ-24-1		
Н. контр.		Прунько І.Б.						
Затверд.		Криштопа С.І.						

4.1 Загальні положення	50
4.2. Потенційні небезпеки	50
4.3. Організаційні заходи	50
4.4 Технічні заходи	51
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....	54
ДОДАТКИ	57

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність. Сьогодні транспорт є одним з основних факторів, що впливають на якість повітря. Зі збільшенням кількості автомобілів атмосфера також стає більш забрудненою. Практично неможливо зменшити викиди автомобілів, які не оснащені нейтралізаторами, тому всі ці шкідливі речовини потрапляють у навколишнє середовище.

Під час процесу згоряння в двигуні утворюється кілька шкідливих і нешкідливих газів. Нешкідливими є водяна пара та вуглекислий газ. Водяна пара абсолютно нешкідлива, тоді як викиди CO_2 негативно впливають на навколишнє середовище. Вважається, що вуглекислий газ є основною причиною глобального потепління, тому його викиди необхідно зменшити. Утворення CO_2 прямо пропорційне витраті палива. Це означає, що для зменшення викидів CO_2 необхідно зменшити витрату палива. Двома найпроблемнішими продуктами викидів дизельного двигуна є оксиди азоту (NO_x) та тверді частинки (PM). Викиди вуглеводнів (HC) та чадного газу (CO) відносно низькі, і їх можна легко видалити з газів згоряння за допомогою каталізатора окислення. Найнебезпечнішими забруднювачами у вихлопних газах дизельного двигуна є тверді частинки та оксиди азоту (NO_x).

У Україні забруднення транспортними засобами також є актуальною темою. Автопарк автомобілів, що експлуатуються в Україні, досить старий, а їхній середній вік становить 14,4 роки [16]. Легко сказати, що старіші автомобілі забруднюють навколишнє середовище більше, оскільки вони відповідають старішому стандарту викидів Євро. Однак обнадійливо, що цей вік автомобілів з кожним роком стає молодшим. Згідно з даними за 2018 рік, середній вік щойно зареєстрованих автомобілів становив 11,4 роки. [17]

Навколишнє середовище також забруднюється невикористаними транспортними засобами, з яких можуть витікати різні робочі рідини, які,

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

потрапляючи на землю, негативно впливають на навколишнє середовище. Тому важливо, щоб транспортні засоби, непридатні для експлуатації, належним чином утилізувалися. [25]

Загальна частка дизельних автомобілів на ринку України у 2025 році становить близько 28.5% — 29% від усіх перепродажів та первинних реєстрацій, посідаючи друге місце після бензинових двигунів. Більшість поповнень дизельного автопарку (близько 75%) — це вживані машини, завезені з-за кордону.

Дизельні автомобілі, порівняно з автомобілями з двигунами Отто, характеризуються вищими викидами NO_x та твердих частинок у вихлопних газах, тому більшість новіших дизельних автомобілів мають системи нейтралізації цих забруднюючих речовин. Ці системи не дуже довговічні та ламаються, тому пошкоджені компоненти цих систем необхідно замінювати на нові.

Метою роботи дослідити вплив рециркуляції палива на роботу дизельного двигуна та показники викидів палива.

Завдання дослідження:

- розробити відповідну методологію проведення дослідження;
- оцінити вплив рециркуляції палива на характеристики двигуна та показники викидів палива;

Об'єкт дослідження – Дизельний двигун внутрішнього згорання.

Предмет дослідження – Вплив процесів рециркуляції палива на робочі параметри дизельного двигуна.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Розроблено відповідну методологію проведення дослідження;
2. Проведено оцінку впливу рециркуляції палива на характеристики двигуна та показники викидів палива.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наукова новизна. Розроблено методологію експериментального дослідження, яка дозволяє кількісно оцінювати ефективність рециркуляції палива та її вплив на екологічні показники.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу науково-технічної інформації, теоретичні та експериментальні дослідження основних робочих та екологічних показників роботи ДВЗ.

Особистий внесок автора полягає у комплексному виконанні всіх етапів дослідження — від постановки проблеми й методології до експериментів, аналізу та практичних рекомендацій.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Викиди транспортних засобів

Кількість автомобілів у світі зростає з кожним роком. Легкові автомобілі становлять 74% усіх транспортних засобів. Згідно з даними worldometers, у 2016 році, вперше в історії, за один рік було вироблено понад 70 мільйонів легкових автомобілів. [15].

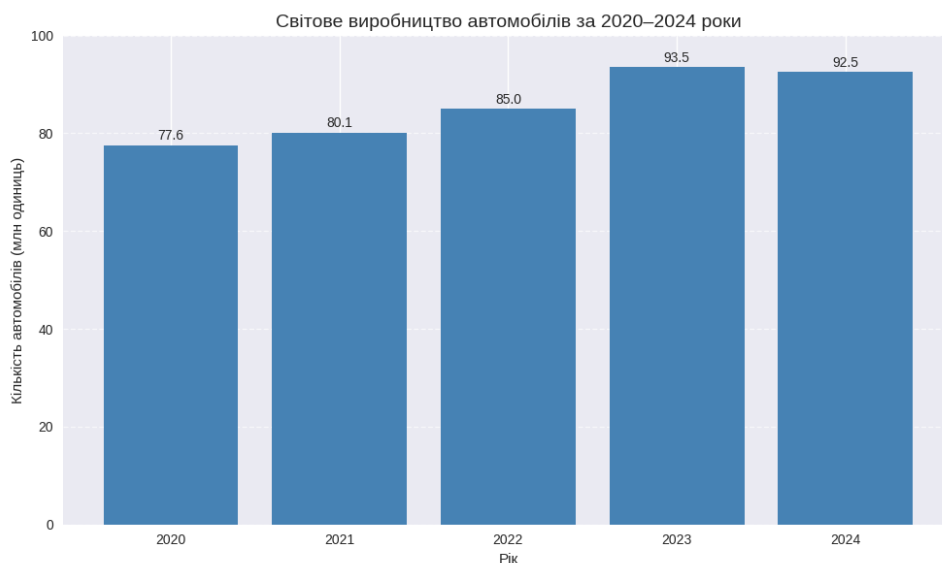


Рисунок 1.1 - Кількість автомобілів, що випускаються на рік.

Спостерігаючи за цими тенденціями видно, що інтенсивність автомобільного виробництва зростає з кожним роком, тому питанню забруднення від автомобілів необхідно приділяти велику увагу. Швидке збільшення кількості транспортних засобів, зменшення запасів нафти та збільшення забруднення атмосфери спричиняють атмосферні зміни глобального масштабу, які пов'язані з появою озонових дір, глобальним потеплінням та повеннями, і тому викликають занепокоєння вчених проблемами всієї транспортної енергетики. Забруднення повітря є дуже великою проблемою, особливо у великих містах, де потік транспортних

засобів високий. Політика у сфері охорони навколишнього середовища та здоров'я заохочує зменшення негативного впливу транспортних засобів на людей. [14]

Підсумовуючи, можна сказати, що основними негативними факторами транспортної діяльності є:

- забруднення повітря різними шкідливими речовинами;
- шум;
- забруднення водойм;
- використання (марнотратство) енергетичних (невідновлюваних) ресурсів;
- вплив інфраструктури (нової) на ландшафт;
- дорожньо-транспортні пригоди;
- затори на дорогах.

Склад вихлопних газів бензинових та дизельних двигунів залежить від складу та якості палива, а також технічного стану та режиму роботи двигуна. Вихлопні гази двигунів внутрішнього згорання містять близько 200 різних хімічних сполук, багато з яких шкідливі для людини та всієї біосфери. Це чадний газ, оксиди азоту, вуглеводні, альдегіди, сажа тощо. Однак атмосфера забруднюється не лише вихлопними газами транспортних засобів, а й картерними газами двигунів та вуглеводнями, що потрапляють у навколишнє середовище з паливного бака.[14]

Транспорт є одним з основних джерел забруднення, що впливає на парниковий ефект. Основними продуктами згорання двигуна внутрішнього згорання є CO₂, CO, NO_x, тверді частинки, CH₄, SO₂. [1]

Вуглекислий газ (CO₂) не є забруднювальною сполукою в атмосфері. Він необхідний для процесу фотосинтезу, але зі значним збільшенням кількості CO₂ в атмосфері в глобальному масштабі ця сполука разом з водяною парою, метаном (CH₄), закисом азоту (NO₂), озоном (O₃) та

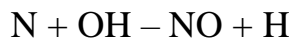
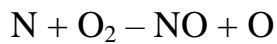
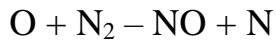
					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

хлорфторвуглецевими газами безпосередньо спричиняє утворення «парникового ефекту».

Чадний газ CO утворюється під час неповного згоряння палива за нестачі повітря. Його токсична дія ґрунтується на взаємодії з гемоглобіном у крові людини. CO, що виділяється на відкритому повітрі, розсіюється в атмосферному повітрі та не може завдати серйозної шкоди людині, але чадний газ опосередковано впливає на формування «парникового ефекту». CO в повітрі зв'язує гідроксильні радикали, тим самим уповільнюючи розкладання метану CH₄, а метан є прямою сполукою, яка утворює «парниковий ефект». Коли людина вдихає чадний газ, він з'єднується з гемоглобіном у крові, який зазвичай транспортує кисень. В результаті гемоглобін більше не може транспортувати кисень, що призводить до внутрішнього задухи. Навіть невеликі концентрації чадного газу можуть вбивати клітини, тому це може траплятися в місцях з надзвичайно високим рухом.

Оксиди азоту NO_x. Вихлопні гази двигунів виділяють значну кількість монооксиду азоту NO та діоксиду азоту NO₂. В атмосферному повітрі більша частина NO окислюється до NO₂, який є токсичним. Оксиди азоту утворюються за високих температур і тиску під час згоряння природного палива, коли азот у повітрі окислюється до N₂ під час процесу згоряння. Енергетична ефективність двигуна (а також витрата палива та викиди CO₂) безпосередньо залежить від ступеня стиснення двигуна, але зі збільшенням його викиди оксидів азоту також збільшуються, тому дизельні двигуни, які економніше використовують паливо, викидають більшу кількість оксидів азоту в атмосферу. NO_x шкідливі для легень, коли їх локальна концентрація стає дуже високою, сприяючи утворенню кислотних дощів. Вони утворюють смог у поєднанні з вуглеводнями. Принципова реакція утворення NO, коли двигун працює близько до стехіометричної суміші, така: [12]

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Тверді частинки (ТЧ) – це дрібні частинки, сажа та пил, які піднімаються в повітря. Викиди цих частинок у дизельних двигунах на 30-70% вищі, ніж у бензинових двигунах. Тверді частинки залишаються в атмосфері протягом певного періоду часу та можуть утворювати смог. Дуже дрібні частинки особливо токсичні та шкідливі для здоров'я, оскільки вони можуть накопичуватися в легенях, спричиняючи респіраторні захворювання та рак.

Вуглеводні СН у дизельних двигунах утворюються, коли згоряння в двигуні не завершено до кінця. Це викликано нестачею повітря під час згоряння. Оскільки в циліндрах дизельних двигунів зазвичай є надлишок повітря, майже все паливо згорає, тому викиди СН низькі. Вуглеводні беруть участь в утворенні фотохімічних окислювачів у тропосфері, що також впливає на процес руйнування озонового шару.

Діоксид сірки SO_2 виділяється при окисленні сірки в паливі та має прямий негативний вплив на здоров'я людини. Близько 7% від загальної кількості SO_2 , що потрапляє в атмосферу, пов'язано з транспортною діяльністю. [1]

Зростання кількості транспортних засобів спричиняє не лише забруднення повітря, а й забруднення води. Вплив транспортних засобів на забруднення води вивчений недостатньо добре, але відомо, що транспортні засоби сприяють забрудненню води важкими металами (марганцем, свинцем, хромом, нікелем тощо), які потрапляють у навколишнє середовище з продуктами згоряння, розливою нафтою та паливом. [14]

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 - Забруднювальні речовини за видами транспорту (г/т·км).

[14]

Вид транспорту	CO	CO ₂	NO _x	SO ₂	CH ₄	KD
Автомобільний транспорт	0,2...2,4	50...333	0,24...3,6	0,03...0,4	0,2...0,9	0,005...0,2
Залізничний транспорт	0,02...0,2	9...102	0,07...1,9	0,04...0,4	0,02...0,9	0,01...0,08
Морське суднопластво на короткі відстані	0,02...0,2	7,7...31	0,11...0,72	0,05...0,51	0,04...0,08	0,002...0,04
Внутрішнє водне суднопластво	0,11	33...81	0,26...1,45	0,04	-	0,02

Транспорт також впливає на ґрунт. Якість ґрунту дуже важлива, оскільки він є середовищем для росту харчових продуктів і водночас основою транспортної інфраструктури. З розвитком дорожньої інфраструктури втрачаються родючі земельні ділянки. Розвиток дорожньої інфраструктури зазвичай вимагає видалення рослинного шару, тому ці процеси прискорюють ерозію ґрунту. Дороги необхідно підтримувати в належному стані, особливо взимку. Солі, що розносяться взимку (наприклад, CaCl₂, NaCl₂), порушують активність ґрунтових бактерій, послаблюють структуру ґрунту та посилюють ерозію ґрунту. Ґрунт, як і вода, також може бути забруднений важкими металами від транспортних засобів [14].

Усі транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння створюють певний шум, який також шкідливий і викликає дискомфорт у людей. Також приділяється увага зменшенню шуму. Для людей рівень шуму вище 40 дБ може порушити їхнє самопочуття; вище 50 дБ – може викликати помірне подразнення, а вище 55 дБ – сильне подразнення.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Основними джерелами шуму є:

- шум автомобільного транспорту від перехресть та вулиць;
- шум на парковках автомобільного транспорту;
- шум від залізничних колій;
- авіаційний шум;
- шум від місцевих джерел тощо [14]

Транспортні засоби були основними споживачами невідновлюваних енергетичних ресурсів з початку 1970-х років, тому не дивно, що транспорт наразі є одним з основних енергоспоживаючих секторів (наразі на нього припадає 30-35% усіх споживаних енергетичних ресурсів). Зі збільшенням кількості транспортних засобів щороку зростає і споживання нафтових ресурсів. А нафта не є відновлюваним джерелом енергії, тому це лише питання часу, коли нафтові ресурси остаточно вичерпаються [14].

1.2 Вплив конструкції двигуна на паливо

Кількість відпрацьованих газів, що потрапляють в атмосферу, залежить не лише від складу палива та умов роботи двигуна, але й від його конструкції. На токсичність відпрацьованих газів значною мірою впливають форма камери згоряння та співвідношення її поверхні до об'єму, співвідношення ходу поршня до циліндра та фази відкриття клапанів. Конструктивні та керуючі можливості паливної системи мають фундаментальне значення для концентрації шкідливих речовин у відпрацьованих газах. Тип камери згоряння дизельних двигунів також значною мірою визначає токсичність відпрацьованих газів.[2]

Склад горючої суміші також є причиною утворення шкідливих вихлопних газів. Коли двигун працює з багатою сумішшю, вміст CO та CH у вихлопних газах збільшується. На склад горючої суміші впливають навантаження та швидкість двигуна. Залежно від навантаження коефіцієнт надлишку повітря (альфа) дизельних двигунів значно змінюється (від 1,258

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

до 5). Дизельні двигуни завжди працюють з надлишком повітря, тому СО у вихлопних газах становить невеликий відсоток.

Таблиця 1.2 - Вплив типу камери згоряння на токсичність продуктів згоряння.[2]

Тип камери згоряння	Кількість токсичних компонентів, г/л.с.*год		
	СО	СН	NO _x
З безпосереднім упорскуванням (Пряме впорскування)	5,5-8,5	0,75-2,6	9,5-12,5
З передкамерою (Непряме впорскування)	2,5-5,7	0,36-0,6	3,2-4,5

Дизельні двигуни, що працюють у різних режимах роботи, мають низький рівень викидів СО та СН, але дуже високий рівень оксидів азоту NO_x. Дизельні двигуни при максимальному навантаженні викидають не тільки багато оксидів азоту, але й сажу. У вихлопних газах дизельних двигунів приблизно в 5 разів більше сажі, ніж у бензинових. Сажа складається переважно з вуглецю та утворюється через нерівномірний розподіл палива в камерах згоряння при високих навантаженнях двигуна. Щоб зменшити токсичність вихлопних газів, двигун повинен працювати із середньою робочою швидкістю, а навантаження на двигун має бути середнім.

Двигуни автомобілів зазвичай працюють у нестабільних режимах. А склад палива значною мірою залежить від режиму роботи двигуна. Згідно зі статистикою, в умовах міського руху режими роботи двигуна можна розділити наступним чином: холостий хід та середня швидкість – 35% часу, середня швидкість з навантаженням – 29%, розгін – 22%, уповільнення – 14%.

Таблиця 1.3 - Викиди CO, HC та NO_x у різних режимах роботи. [2]

Компонент	Режими роботи двигуна			
	Холостий хід і середні оберти	Середні сталі оберти з навантаженням	Розгін	Уповільнення (гальмування)
CO %	0	0,1	0	0
HC %	0,04	0,02	0,01	0,03
NO _x ppm	60	850	250	30

З таблиці видно, що в дизельних двигунах при великому надлишку повітря виявляються лише сліди чадного газу, але велика кількість оксидів азоту виявляється при роботі двигуна під навантаженням. Важливим завданням удосконалення двигунів внутрішнього згорання є зменшення викидів вихлопних газів. Зі збільшенням індивідуального транспорту, а також зростанням транспортного сектору, дуже важливо обмежити вплив транспорту на навколишнє середовище та здоров'я людини. Це відображається в діях урядів, у всьому світі ці викиди обмежені. Тому розробники двигунів намагаються зменшити ці викиди.

1.3 Європейські норми викидів відпрацьованих газів

Стандарти викидів Євро визначають допустимі норми викидів, яким повинні відповідати нові автомобілі, що продаються в Європі. У Європейському Союзі викиди оксидів азоту (NO_x), чадного газу (CO), твердих частинок (PM), неметанових вуглеводнів (NMHC) та загальних вуглеводнів (THC) обмежені для багатьох типів транспортних засобів. До них належать легкові автомобілі, вантажівки, локомотиви, трактори, але не обмежуються деякими суднами та літаками. Для кожного типу транспортного засобу застосовуються різні стандарти. Відповідність стандарту Євро визначається шляхом роботи двигуна за стандартним випробувальним циклом.

Таблиця 1.4 - Порівняльна таблиця стандартів викидів Євро для двигунів Отто.[5]

Рівень	Дані	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
		г/км					
Двигуни Отто							
Euro 1	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	-	-
Euro 2	1996.01	2.2	-	0.5	-	-	-
Euro 3	2000.01	2.30	0.20	-	0.15	-	-
Euro 4	2005.01	1.0	0.10	-	0.08	-	-
Euro 5	2009.09b	1.0	0.10d	-	0.06	0.005e,f	-
Euro 6	2014.09	1.0	0.10d	-	0.06	0.005e,f	6.0×10 ¹¹ e,g

Таблиця 1.5 - Порівняльна таблиця стандартів викидів Євро для дизельних двигунів.[5]

Рівень	Дані	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM	PN
		г/км					
Дизельні двигуни							
Euro 1†	1992.07	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1.0	-	0.7	-	0.08	-
Euro 2, DI	1996.01a	1.0	-	0.9	-	0.10	-
Euro 3	2000.01	0.64	-	0.56	0.50	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.50	-	0.30	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09b	0.50	-	0.23	0.18	0.005f	-
Euro 5b	2011.09c	0.50	-	0.23	0.18	0.005f	6.0×10 ¹¹
Euro 6	2014.09	0.50	-	0.17	0.08	0.005f	6.0×10 ¹¹

Транспортні засоби, які не відповідають вимогам, не можуть продаватися в ЄС, але нові стандарти не поширюються на транспортні засоби, які вже перебувають на дорогах. Стандарти Євро для легкових автомобілів - це Євро 1, Євро 2, Євро 3, Євро 4, Євро 5 та Євро 6. Відповідні стандарти також застосовуються до важких транспортних засобів, але позначені римськими цифрами (Євро I, Євро II тощо). Перші стандарти викидів Євро набули чинності в 1992 році. [5]

1.4 Заходи щодо зменшення вмісту NO_x у паливі

Оксиди азоту є одними з найшкідливіших забруднювачів для природи та людини, тому заходи щодо їх зменшення є дуже актуальними в сучасному транспорті.

Існує кілька заходів для зменшення концентрації NO_x у паливі:

- Система селективного каталітичного відновлення (SRC);
- Каталізатор накопичення NO_x (NSC);
- Система рециркуляції палива.

1.4.1 Селективне каталітичне відновлення (СКВ)

Це система, яка обробляє вихлопні гази у випускному тракті. Ця система перетворює NO_x, що утворюються в процесі згоряння, на азот (N₂) та воду, які природним чином присутні в атмосфері. Використання системи SCR дозволяє конструкторам двигунів оптимізувати процес згоряння таким чином, щоб теплота згоряння палива використовувалася максимально ефективно, що зменшує витрату палива та кількість утворених дрібних твердих частинок. В результаті зменшується підвищений рівень викидів оксидів азоту у випускному тракті, незалежно від процесу згоряння. У системі SCR точно дозована рідина для вихлопних газів впорскується у потік вихлопних газів перед каталізатором за допомогою інжектора. Це нетоксичний, безбарвний та без запаху розчин сечовини та демінералізованої

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

води, що містить 32,5% за вагою. Найпоширенішою рідиною є марка «AdBlue». Кількість розчину, що впорскується, залежить від кількості оксидів азоту, що утворюються в двигуні, тобто від миттєвої швидкості та крутного моменту двигуна. Під час гідролізу з впорскуваної рідини утворюється аміак, який реагує з оксидами азоту та перетворює їх на азот та воду, які є абсолютно нешкідливими для навколишнього середовища [7]. Робота цієї системи контролюється блоком керування. Система SCR може зменшити викиди NO_x у вихлопних газах до 90% [20].

1.4.2 Каталізатор накопичення NO_x (NSC)

Каталізатор накопичення NO_x накопичує оксиди азоту. Пізніше, під час процесу регенерації, ці оксиди азоту видаляються шляхом їх регенерації в азот та вуглекислий газ. Основа цього каталізатора може бути виготовлена з кераміки або сплаву хрому, заліза та алюмінію [24]. Каталізатор NO_x також містить хімічно активні метали, які можуть швидко зв'язуватися з NO_2 . Найчастіше використовується нітрат барію, але цей каталізатор може зберігати лише NO_2 , тому перед ним встановлюється каталізатор окислення на основі платини, який може окислювати сполуки NO до NO_2 . Ці каталізатори працюють найефективніше лише за температури вище 250°C . [7]



Рисунок 1.2 - Вихлопна система Mercedes Benz Bluetec.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

1.4.3 Рециркуляція відпрацьованих газів (EGR)

Ще одним способом зменшення утворення оксидів азоту в дизельних двигунах є рециркуляція відпрацьованих газів [19].

Рециркуляція відпрацьованих газів може бути:

- Внутрішня EGR, на яку можуть впливати фази газорозподілу та яка характеризується часткою залишкових газів.
- Зовнішня EGR, коли відпрацьовані гази повертаються в камеру згоряння через додаткові труби.

Для зменшення викидів NO_x у вихлопних газах необхідно контролювати піки високих температур. Один з найпростіших способів зменшення викидів NO_x – це затримка впорскування палива в камеру згоряння. Цей метод є ефективним, але він збільшує витрату палива, що змушує використовувати більш ефективні методи зменшення викидів NO_x , такі як рециркуляція палива [13]. Зовнішня рециркуляція палива важлива під час роботи. Частина вихлопних газів спрямовується в камеру згоряння, де утворення оксидів азоту зменшується шляхом зниження температури згоряння палива. Кількість EGR, яку можна використовувати, обмежується різними факторами. Одним з них є достатнє постачання чистого повітря, необхідного для згоряння. Іншим – зниження ефективності двигуна, яке може бути спричинене великою кількістю EGR. Для подолання цих проблем використовуються системи EGR з перепадом тиску [7].

На сьогоднішній день EGR є одним з найпоширеніших методів зменшення викидів NO_x . Технологія EGR вперше була застосована в 1970 році, а з 1996 року вона використовується майже у всіх транспортних засобах, з моменту набрання чинності стандарту EURO 2. Система рециркуляції вихлопних газів дещо збільшує витрату палива, тому цю систему деякий час неохоче встановлювали у вантажівки, оскільки витрата палива дуже важлива для водіїв цих транспортних засобів. Ця система також

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

збільшує кількість твердих частинок у паливі, тому для максимального підвищення ефективності системи використовуються сажові фільтри. [7]

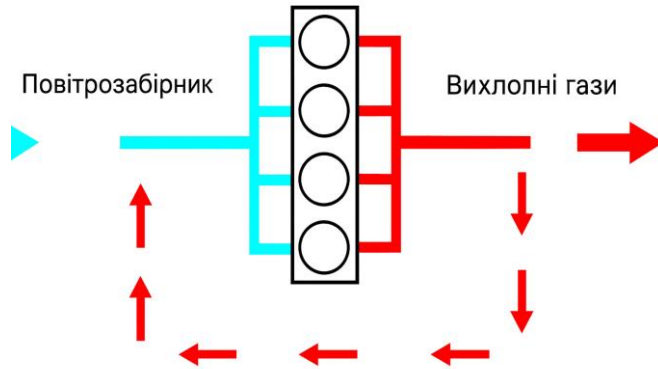


Рис. 1.3 - Загальна схема EGR.

Відпрацьовані гази в камері згоряння поведуться як інертні гази й не беруть участі в реакції згоряння. Це призводить до зниження температури згоряння внаслідок різних явищ.

Молекулам палива потрібно більше часу, щоб знайти молекулу кисню, з якою вони можуть прореагувати, оскільки навколо є багато інертних молекул. Це уповільнює швидкість згоряння та знижує температуру згоряння. Нижча температура згоряння безпосередньо зменшує утворення NO_x .

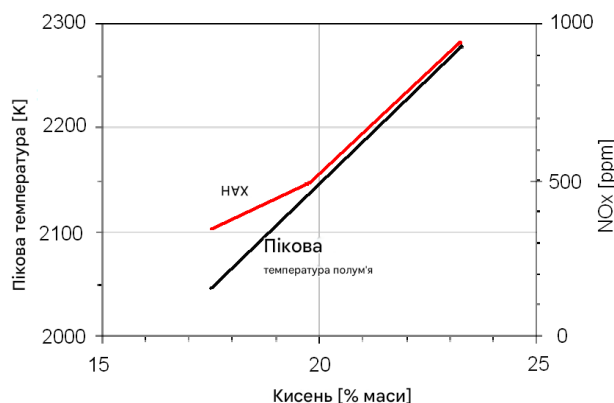


Рисунок 1.4 - Кількість утворення NO_x залежить від температури та маси вільного кисню.

Кількість повернених паливних парів у відсотках виражається за формулою: [26]

$$EGR (\%) = \left(\frac{MEGR}{Mt} \right) \times 100$$

де, MEGR – маса рециркульованих відпрацьованих газів, кг

Mt – загальна маса повітря, що всмоктується двигуном, кг

При використанні EGR слід враховувати кілька питань. Коли вихлопні гази відводяться з випускної системи перед турбокомпресором, енергія цих газів втрачається і не досягає турбокомпресора. Це зменшує корисну енергію вихлопних газів. Ще однією проблемою є брак свіжого повітря, коли двигун потребує потужності, тому під час розгону клапан EGR закритий, щоб дозволити двигуну отримувати свіже повітря та забезпечувати більше потужності. [7]

При використанні системи рециркуляції вихлопних газів (EGR) слід враховувати кілька труднощів. Якщо вихлопні гази виводяться з вихлопної системи перед турбокомпресором, енергія цього газу втрачається для турбокомпресора. Це зменшує корисну енергію вихлопних газів для стиснення впускного повітря і, таким чином, кількість повітря, що потрапляє в циліндр. Ця кількість повітря безпосередньо пов'язана з кількістю EGR, яку може прокачати двигун, оскільки обмежувальним фактором є співвідношення повітря/паливо в циліндрі.

Як згадувалося раніше, NO_x та утворення сажі пов'язані. Використання EGR зменшує співвідношення повітря/паливо, тому ризик надмірного утворення сажі зростає зі збільшенням швидкості EGR.

Отже, швидкість EGR обмежена межею димності. Якщо співвідношення повітря/паливо зменшується понад цю межу, утворення сажі різко зростає.

Ще однією проблемною областю є контроль викидів під час перехідних процесів. Оскільки бажано отримати максимальне прискорення

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

транспортного засобу, EGR зазвичай вимикається при збільшенні навантаження.

Таким чином, до циліндрів подається чисте повітря, а не суміш повітря та EGR, з вищою концентрацією кисню. Більша кількість кисню дозволяє спалювати більше палива і, отже, швидше збільшувати навантаження на двигун. Така стратегія призводить до піків викидів NO_x у перехідних частинах нового європейського їздового циклу (NEDC), як видно на рисунку 1.6.

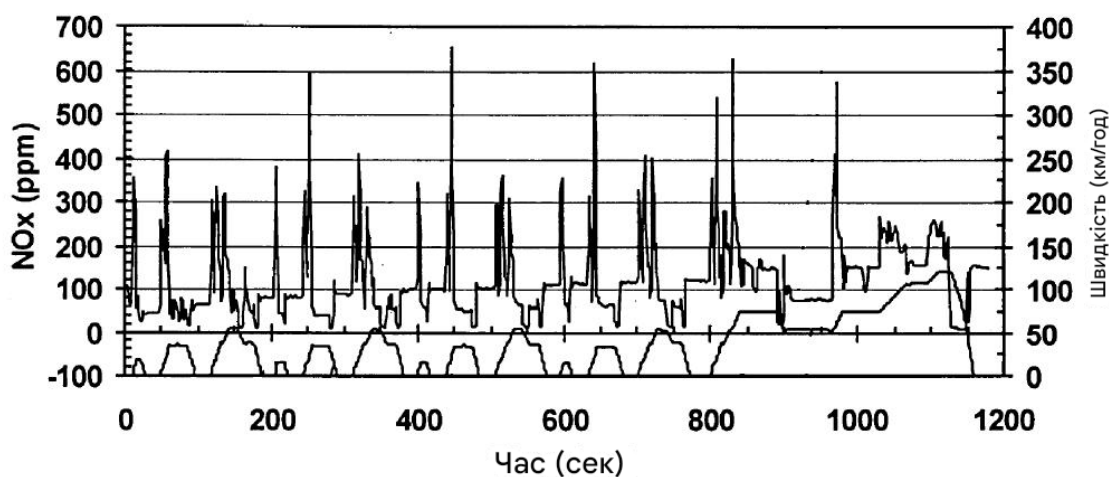


Рисунок 1.5 - Утворення NO_x під час NEDC [22]

1.5 Класифікація систем EGR

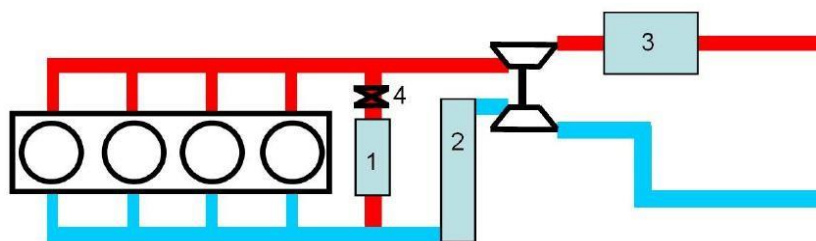
Системи EGR можна класифікувати за тиском і температурою рециркулюючих газів.

- Високий тиск.
- Низький тиск.
- Змішані.
- Охолоджені.
- Неохолоджені.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У системі високого тиску трубопровід веде частину відпрацьованих газів із випускного колектора в впускний колектор, де гази змішуються з повітрям. Трубопровід може мати один або кілька охолоджувачів для охолодження EGR-газів. Кількість EGR у системі регулюється клапаном EGR. Перевагою цієї системи є швидка реакція.

Також при використанні системи високого тиску EGR спостерігається менше викидів CO і HC, а недоліками є велика ймовірність накопичення сажі у впускному колекторі та на клапані EGR, а також зменшення відпрацьованих газів під час спрацювання системи EGR, оскільки ці гази не обертають лопаті турбіни, що знижує ефективність турбокомпресора.

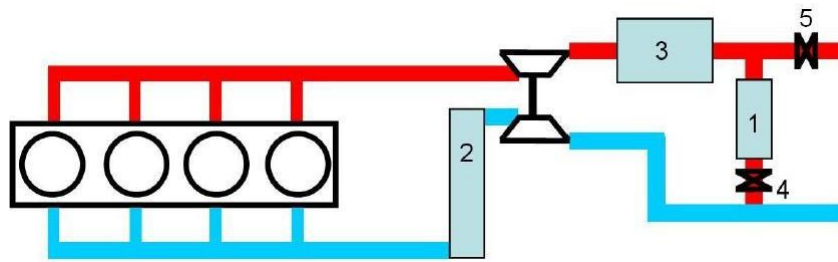


1 – охолоджувач EGR; 2 – проміжний охолоджувач повітря; 3 – фільтр твердих часток (DPF); 4 – клапан EGR.

Рис. 1.6 - Система рециркуляції відпрацьованих газів високого тиску (EGR)

У системі низького тиску відпрацьовані гази забираються з випускної труби після проходження через турбіну та фільтр твердих часток і подаються у впускний потік турбокомпресора. EGR також охолоджується проміжним охолоджувачем повітря. Це призводить до ще більшого зниження температури EGR, що забезпечує вищу ефективність рециркуляції та більше зменшення викидів NOx.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



1 – охолоджувач EGR; 2 – проміжний охолоджувач повітря; 3 – фільтр твердих часток (DPF); 4 – клапан EGR; 5 – випускна заслінка

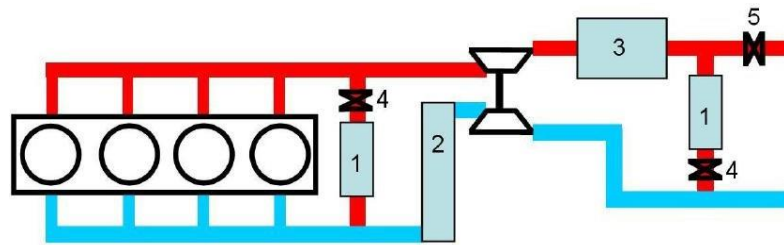
Рис. 1.7 - Система рециркуляції відпрацьованих газів низького тиску (EGR)

У системі низького тиску компресор та інтеркулер повинні витримувати проходження вихлопних газів. Кожна крапля, яка може утворитися внаслідок конденсації, може пошкодити чутливі деталі компресора. Тому охолоджувач EGR дуже важливий для запобігання конденсації. Проблеми засмічення в системі низького тиску можна уникнути, якщо використовувати фільтр твердих частинок. Таким чином, очищені вихлопні гази майже не містять частинок сажі, а ризик засмічення інтеркулера низький. Однак вихлопні гази можуть прискорити корозію колеса компресора. Основною перевагою цієї системи є те, що EGR може відбуватися в точках високого навантаження двигуна. Негативною особливістю системи EGR низького тиску є довгий трубопровід, заповнений вихлопними газами. Майже вся впускна труба, включаючи компресор та інтеркулер, заповнена сумішшю чистого повітря та вихлопних газів. Тому реакція на зміну вимог EGR слабка. Тому система працює досить повільно. Ще одним недоліком є ризик забруднення інтеркулера турбокомпресора, коли вихлопні гази не повністю очищені, що містять сажу після DPF. Це також призводить до вищих викидів CH_4 та CO_2 порівняно з системою високого тиску.

Змішана або гібридна система EGR поєднує системи високого та низького тиску.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, можна використовувати обидві системи, які більше підходять для певних дорожніх ситуацій. Таким чином, використовуючи обидва методи, можна досягти найкращої ефективності двигуна в певних точках навантаження.



1 – охолоджувачі EGR; 2 – проміжний охолоджувач повітря; 3 – фільтр твердих часток (DPF); 4 – клапани EGR; 5 – випускна заслінка

Рис. 1.8 - Гібридна система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR)

Таблиця 1.6 - Порівняння систем рециркуляції відпрацьованих газів високого та низького тиску

	Переваги	Недоліки
Система рециркуляції відпрацьованих газів високого тиску	Менші викиди HC і CO. Швидша реакція системи.	Більша ймовірність забруднення системи сажою. Менш стабільний розподіл рециркульованих газів по циліндрах двигуна.
Система рециркуляції відпрацьованих газів низького тиску	Добре охолодження рециркульованих відпрацьованих газів. Менша ймовірність забруднення системи сажою. Стабільніший розподіл рециркульованих газів по циліндрах двигуна. Вища ефективність системи.	Через конденсацію волога може пошкодити колесо турбіни. Повільніша реакція системи. Вищі викиди HC і CO.

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

Перші системи рециркуляції відпрацьованих газів не мали охолодження. У таких неохолоджених системах газів не охолоджувалися і надходили з випускного колектора у впускний колектор простим трубопроводом, що призводило до підвищення температури впускного заряду. З посиленням вимог стандарту EURO виникла необхідність знайти способи ще більшого зменшення викидів NOx. Тому було впроваджено використання охолоджувачів у системах.

У повністю охолоджених системах рециркуляції відпрацьованих газів газів охолоджуються перед змішуванням зі свіжим впускним повітрям за допомогою водяного теплообмінника. При цьому волога у відпрацьованих газах може конденсуватися, і краплі води можуть спричинити небажані ефекти всередині циліндрів двигуна. Проте охолоджена система є більш ефективною. Використання охолоджувача у впускному трубопроводі підвищує щільність газів і забезпечує нижчу температуру в кінці стиснення. Нижча температура згоряння призводить до зменшення кількості NOx у газах. [7]

1.6 Проблеми з рециркуляцією відпрацьованих газів (EGR)

Використання EGR для керування викидами призводить до низки викликів, які необхідно вирішувати порівняно з двигуном без EGR. Нижче наведено короткий перелік таких викликів, без претензії на повну вичерпність.

Ефективність

Оскільки потік EGR необхідно прокачувати через двигун, для цього потрібна певна насосна робота. Тому важливим завданням є зменшення енергії, необхідної для цього процесу. Уся енергія, доступна в двигуні, походить із палива, отже більш ефективна система EGR призводитиме до зниження витрати палива.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Вартість

Будь-яка додаткова деталь двигуна збільшує його вартість. І виробники, і споживачі прагнуть уникнути підвищення ціни на транспортні засоби. Тому важливим завданням є утримання вартості системи EGR на низькому рівні. Деякі з компонентів, які роблять двигун з EGR дорожчим порівняно з двигуном без EGR, — це охолоджувач і клапан EGR, турбонагнітач зі змінною геометрією (VGT), якщо він необхідний, додаткові трубопроводи та додаткові зусилля з калібрування.

Змішування

Утворення викидів усередині циліндра чутливо реагує на зміни кількості EGR у циліндрі, як зазначалося раніше. Тому для можливості калібрування системи згоряння та досягнення низького рівня викидів важливо добре знати кількість EGR, що потрапляє в кожен циліндр. Найпростішим способом досягти цього є забезпечення однакової кількості EGR для кожного циліндра. Щоб кожен циліндр отримував однакову кількість EGR, необхідно забезпечити якісне змішування повітря та EGR. Це може бути складним завданням, особливо з огляду на обмежений простір і пульсуючий характер потоків.

Керування

Кількість EGR, що надходить у циліндри, є важливим параметром керування двигуном. Разом із моментом упорскування палива та його масою, потоки повітря та EGR є параметрами, які калібруються для досягнення певного рівня викидів, витрати палива або вихідної потужності. Керування EGR пов'язане з різними труднощами. У стаціонарних режимах регулювання EGR має бути стабільним і не надто мінливим. У перехідних режимах бажаною є швидка реакція системи EGR, щоб уникнути пікових викидів. Водночас найважливіший вхідний параметр для регулювання EGR — кількість EGR — складно виміряти на двигуні з високою точністю.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Забруднення

EGR, як частина потоку відпрацьованих газів, що повертається в двигун, містить ті самі шкідливі компоненти, що й вихлопні гази, згадані раніше. Це означає, що в потоці EGR може переноситися значна кількість частинок сажі. З часом ці частинки призводять до забруднення стінок трубопроводів, клапанів, охолоджувачів, а для системи низького тиску — навіть колеса компресора. Тому складним завданням є розробка таких компонентів, які б витримували забруднення, або пошук способів його запобігання. Наприклад, для коліс компресора на алюміній може наноситися спеціальне покриття, яке підвищує його стійкість до агресивних складових забруднень. Щоб уникнути зіткнення частинок із колесом компресора, у тракці EGR для систем EGR низького тиску застосовується сажовий (частинковий) фільтр.

Конденсація

Значна частина відпрацьованих газів складається з водяної пари. Це означає, що під час охолодження EGR може відбуватися конденсація, унаслідок чого в рідкому стані вода потрапляє у впускний тракт. У невеликих кількостях це не становить проблеми. Однак за надмірної конденсації це може призвести до надходження великої кількості води в циліндри. У найгіршому випадку це здатне спричинити відмову двигуна, коли вода заповнює об'єм стискання двигуна. Тому важливо обмежувати охолоджувальну здатність охолоджувача EGR, особливо за низьких температур навколишнього середовища та під час холодного пуску.

Іншою проблемою, яка може виникнути внаслідок конденсації, є утворення сірчаної кислоти, якщо паливо містить сірку, як це має місце на деяких ринках, наприклад в Індії [41]. Ця кислота згодом спричиняє корозію алюмінієвих деталей двигуна. Навіть моторна олива може бути джерелом сірки та призводити до появи сірковмісних викидів у вихлопних газах [42].

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.7 Ефективність системи EGR

Дослідження на тему рециркуляції палива досить популярні в усьому світі, оскільки тема зниження викидів NO_x є дуже актуальною, оскільки це один з найшкідливіших забруднювачів, що викидаються в навколишнє середовище транспортними засобами. Юстас Жаглінскіс та ін. досліджували роботу системи рециркуляції палива двигуна 1.9 TDI 1Z виробництва концерну VAG з розподільним паливним насосом Bosch VP37 з дизельним паливом та паливною сумішшю B30 (суміш метилового естеру ріпаку та мінерального дизельного палива) при частоті обертання колінчастого вала $n = 2500 \text{ хв}^{-1}$. У цьому дослідженні двигун працював без рециркуляції палива та з рециркуляцією палива за програмою блоку керування двигуном. При відключенні системи рециркуляції відпрацьованих газів концентрація NO_x у відпрацьованих газах зростала до 40% при мінімальному та максимальному навантаженнях двигуна, і навіть до 65% при режимах високого навантаження. Тип палива в цьому випадку не мав великого значення, оскільки дуже схожі результати були зафіксовані як для дизельного палива, так і для суміші B30. [13]

Під час моніторингу димності палива не було виявлено суттєвої різниці між параметрами, зафіксованими для мінерального дизельного палива та суміші B30, але було відзначено, що вимкнення рециркуляції палива допомогло зменшити димність до 25%. [13]

Рециркуляція відпрацьованих газів впливає на параметр CO_2 , коли двигун працює в умовах навантаження $p_e = 0,1 - 0,4 \text{ МПа}$. Загалом, система рециркуляції відпрацьованих газів збільшує CO_2 на 1-3% протягом усього робочого діапазону системи рециркуляції відпрацьованих газів, і тип палива суттєво на це не впливає. [13]

Також спостерігалися відмінності в температурі вихлопних газів. Коли двигун працював з рециркуляцією вихлопних газів, спостерігалось зниження

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури вихлопних газів через зменшення кількості повітря, що бере участь у процесі згоряння. [13]

Рециркуляція палива також зменшила витрату палива. Питоме ефективне зниження витрати палива на 7-9% було зафіксовано при роботі двигуна в режимах навантаження $p_e = 0,4 - 0,6$ МПа.

Рециркуляція палива також впливає на концентрацію вуглеводнів у паливі. Рао С. та ін. провели дослідження, в якому спостерігалось збільшення кількості вуглеводнів зі збільшенням кількості рециркулюючого палива. На кількість вуглеводнів також впливала використана паливна суміш. Найвищі рівні вуглеводнів були виявлені при використанні лише мінерального дизельного палива, а найнижчі – при використанні суміші В30. [21]

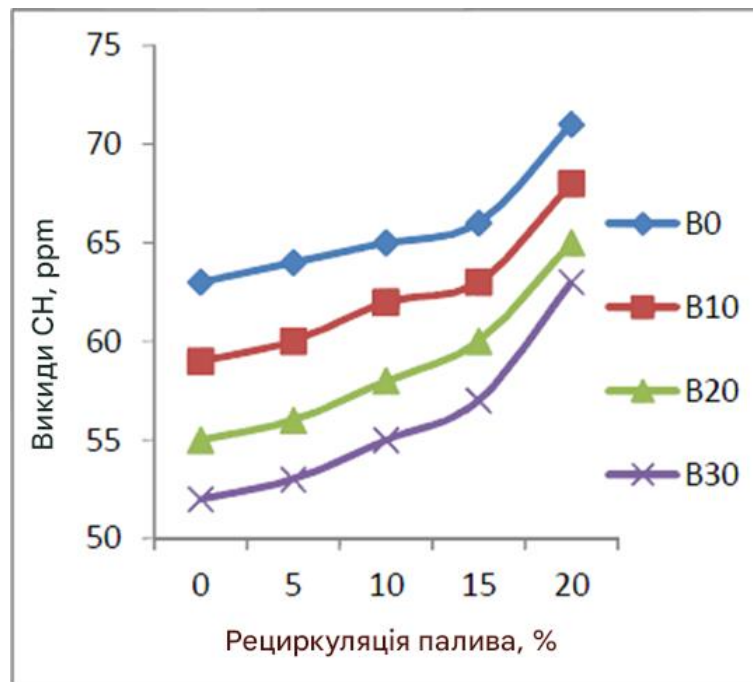


Рисунок 1.9 - Вплив ДР на концентрацію вуглеводнів у паливі.[21]

Ефективність рециркуляції палива також залежить від температури рециркулюючого палива. Кумаран П. вивчав вплив температури рециркулюючого палива на різні параметри дизельного двигуна. Для дослідження використовувався двоциліндровий чотиритактний дизельний двигун, який працював на різних режимах швидкості під час випробувань.

охлажденной системы рециркуляции горения во всех случаях. Параметр CO также увеличивался при использовании охлажденной системы EGR во всех исследованных случаях. Охлажденная система EGR также влияла на концентрацию CO₂ в горении. При использовании охлажденного EGR концентрация CO₂ была ниже только на режимах скорости 2000 и 1800 об/мин. [9]

Система рециркуляции горения снижает давление в камере сгорания во время сгорания топлива. Это хорошо отражено в работе Джун Конга и др. Для исследования было использовано 4-цилиндровый, 4-тактный дизельный двигатель с системой впрыска топлива Common Rail и топливной смесью BD20 (80% минерального дизельного топлива и 20% рапсового масла). Коленчатый вал двигателя во время испытаний вращался со скоростью 2000 об/мин, а нагрузка составляла 30 Нм. В исследовании было выявлено, что пиковое давление в камере сгорания при использовании 20% и 30% рециркуляции топлива на 0,6 МПа ниже, чем давление, полученное без рециркуляции топлива. [8]

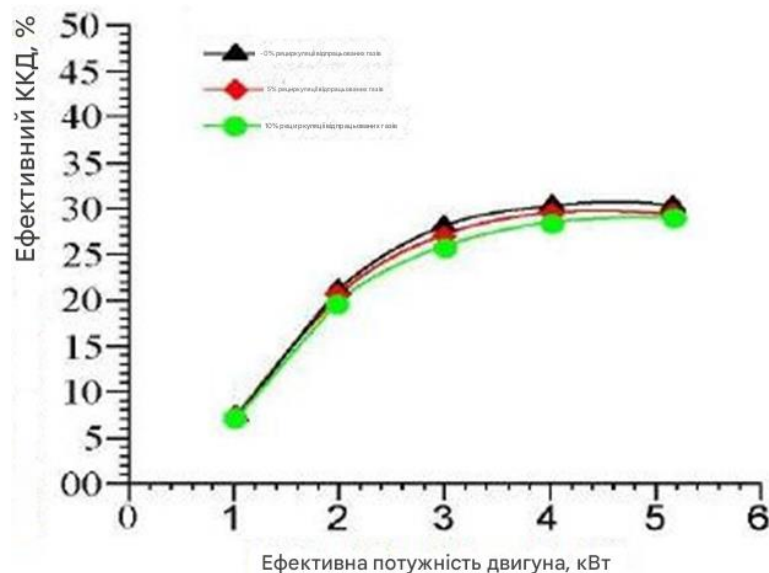


Рисунок 1.10 - Влияние EGR на средний эффективный КПД двигателя. [10]

Ефективний ККД також залежить від кількості рециркулюючого палива. Це добре відображено в науковій статті Гхоша С. та ін. Для дослідження було використано одноциліндровий чотиритактний дизельний двигун потужністю 5,2 кВт та крутним моментом 30 Нм.[10]

З аналізу отриманих даних очевидно, що рециркуляція палива знижує ефективний ККД пропорційно збільшенню кількості рециркульованого палива.[10].

З наданої інформації можна зробити висновок, що система рециркуляції палива має значний вплив на різні показники роботи двигуна. Система DR значно знижує концентрацію NO_x у паливі, але вона також має негативний вплив. Система рециркуляції палива знижує ефективний ККД двигуна та збільшує димність палива. Крім того, система DR збільшує концентрацію CO_2 та CH у паливі та питому ефективну витрату палива. Дослідження на тему рециркуляції палива є цінними та надають багато інформації про вплив цієї системи на параметри двигуна, тому було б корисно провести аналогічні випробування та підтвердити або спростувати результати інших авторів.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні використовувався дизельний двигун Fiat 1.9 JTD (85 кВт) з безпосереднім уприскуванням палива, системою рециркуляції вихлопних газів високого тиску, турбонаддувом та електронною системою керування (EVS). Більше технічних даних про двигун наведено в таблиці. [11]

Таблиця 2.1. Технічні дані Fiat 1.9 JTD.

Назва двигуна	FIAT 1.9JTD 8v 115 HP (85 кВт)
Тип двигуна	Рядний чотирициліндровий з турбонаддувом
Система подачі палива	Common Rail Direct Injection (CRDI), Bosch
Діаметр циліндра двигуна	82 мм
Хід поршня в циліндрі	90,4 мм
Загальний об'єм двигуна	1910 см ³
Ступінь стиснення	18.0 ± 0,45:1
Максимальна потужність двигуна	85 кВтW (115 к.с.) при 4000 min ⁻¹
Максимальний крутний момент двигуна	255 Нм при 2000 min ⁻¹
Частота холостого ходу колінчастого вала	850 ± 20 min ⁻¹
Система газорозподілу	ОНС
Кількість клапанів	8
Максимальний тиск впорскування палива	1400 бар (140 ± 0,5 МПа)
Система рециркуляції палива	Система високого тиску з електричним клапаном EGR
Код клапана EGR	Fiat 55215029
Код паливного насоса високого тиску	Bosch 0445010007
Код паливної форсунки	Bosch 0445110119
Електронна система керування	Bosch EDC15C7

Таблиця 2.2. Параметри, виміряні приладом Testo 350x1.

Параметр	Одиниці вимірювання
Кисень O ₂	%
Чадний газ CO	ppm
Вуглекислий газ CO ₂	%
Оксид азоту NO	ppm
Діоксид азоту NO ₂	ppm
Оксиди азоту NO _x	ppm
Вуглеводні CH	ppm

Контроль різних параметрів двигуна здійснювався за допомогою діагностичного пристрою Bosch KTS 540 з використанням ноутбука з операційною системою Microsoft Windows 13.



Рисунок 2.2 - Діагностичний пристрій Bosch KTS 540

Таблиця 2.3. Дані моніторингу Bosch KTS 540.

Параметр	Одиниці вимірювання
Тиск наддуву	бар
Маса повітря	мг/год
Температура впускного повітря	°C
Температура охолоджувальної рідини	°C

2.1. Хід дослідження

Під час випробувань використовувалися звичайні мінеральні літні дизельні палива [11].

Перед початком випробувань двигун було розігріто до робочої температури 90 °С. Було отримано характеристики навантаження двигуна при 2000 хв⁻¹ і 2500 хв⁻¹ обертів. Для дослідження було обрано шість різних величин навантаження двигуна.

Таблиця 2.4. Режими навантаження.

№ з/п	Навантаження, Н·м
1	49,03
2	88,23
3	117,68
4	147,1
5	176,52
6	205,94

Кількість рециркулюючого палива змінювалася з кроком 10% від 0% до 30%. Це робилося за допомогою широтно-імпульсного модулятора. Параметром, за яким ми можемо судити про кількість рециркулюючого палива, є параметр вимірювача маси повітря. Щоб правильно визначити кількість рециркулюючого палива, спочатку необхідно знати кількість маси повітря при постійно вибраному навантаженні двигуна, коли клапан EGR закритий. Щоб отримати 10%, 20% або 30% рециркуляції палива, кількість маси повітря повинна бути на той самий відсоток меншою, ніж коли клапан EGR закритий. Тому, контролюючи параметри маси повітря та керуючи широтно-імпульсним модулятором, клапан EGR відкривається таким чином, щоб маса повітря, що всмоктується в двигун, зменшувалася на відсоток, на який ми хочемо отримати кількість рециркулюючого палива.

Стенд навантаження, кількість рециркулюючого палива та кількість палива, що впорскується в двигун, регулюються до отримання стабільного навантаження при стабільних вибраних обертах колінчастого вала двигуна. Показники приладу реєструються лише при стабільному навантаженні двигуна та стабільній частоті обертання колінчастого вала.

Кожне випробування проводилося один раз.

Після випробувань було розраховано основні показники роботи двигуна. Потужність двигуна:

$$N_e = \frac{M_e \cdot \pi \cdot n}{30}, \quad (2.1)$$

де M_e - крутний момент, Нм

n - швидкість обертання колінчастого вала двигуна, хв⁻¹

$\pi = 3,14$

Середній ефективний тиск:

$$P_e = \frac{N_e \cdot \tau}{i \cdot V_h \cdot n}, \quad (2.2)$$

де N_e – ефективна потужність двигуна, кВт

τ – кількість тактів

i – кількість циліндрів двигуна

V_h – робочий об'єм циліндра

n – оберти колінчастого вала двигуна, хв⁻¹

Ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД).

$$\eta_e = \frac{3600}{g_e \cdot Q_H}, \quad (2.3)$$

де g_e – питомі ефективні витрати палива, г/кВт·год

Q_H – нижча теплота згоряння палива, МДж/кг.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Система рециркуляції палива мала значний вплив на різні параметри дизельного двигуна. Найбільшу частину NO_x становив монооксид азоту NO , кількість якого в паливі значно перевищувала кількість діоксиду азоту NO_2 . При вимкненій рециркуляції палива та роботі двигуна на максимальному навантаженні, коли колінчастий вал обертається зі швидкістю 2000 хв-1, спостерігалось, що найбільшу частину NO_x становить NO і перевищує NO_2 аж у 32,7 раза. За тих самих умов, лише при 2500 хв-1, NO перевищує NO_2 у 29,2 раза. За тих самих умов, лише при низькому навантаженні двигуна (0,33 МПа), різниця між цими двома газами значно менша. При швидкості обертання колінчастого вала 2000 хв-1 NO перевищує NO_2 лише у 8 разів, а при 2500 хв-1 – лише в 4,16 раза. Концентрація NO швидко зростає зі збільшенням навантаження двигуна, тоді як концентрація NO_2 зростає значно повільніше.

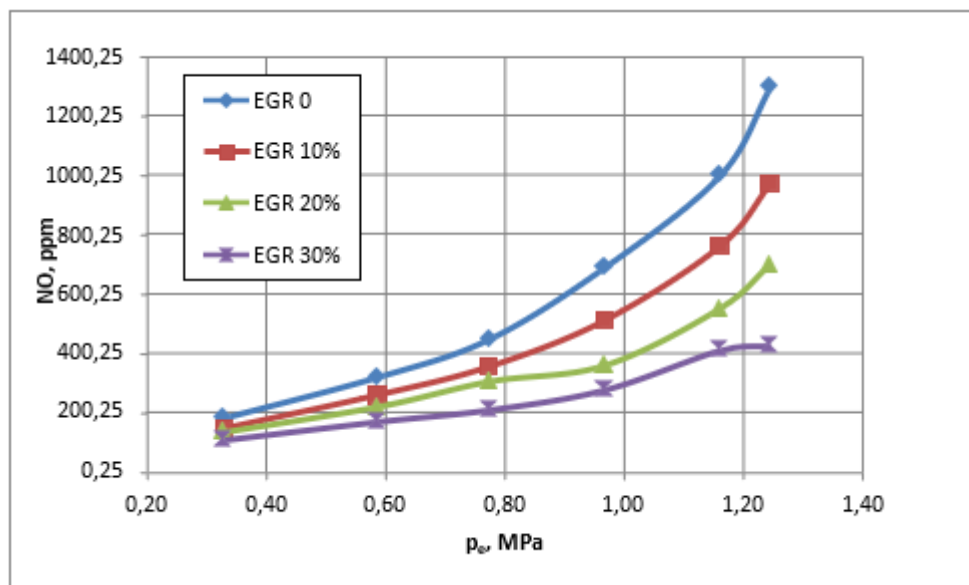


Рисунок 3.1 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO у пальному при швидкості обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

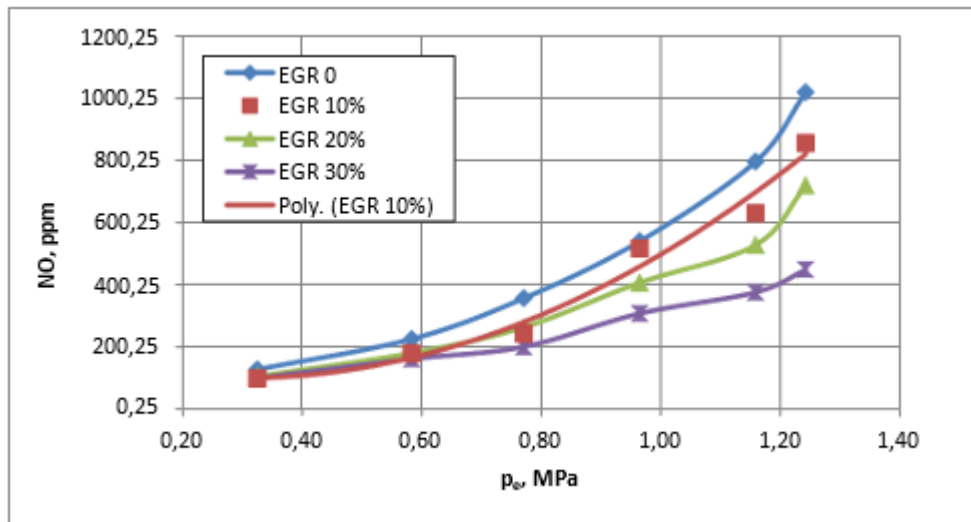


Рисунок 3.2 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1.

Спостерігаючи за роботою рециркуляції димових газів, ми бачимо, що вона найефективніше знижує концентрацію NO в режимах високого навантаження, а також ефективно знижує концентрацію NO₂ в усіх досліджених режимах навантаження. NO₂ приблизно в 5 разів токсичніший за NO, тому дуже важливо, що рециркуляція димових газів має значний вплив на ці гази.

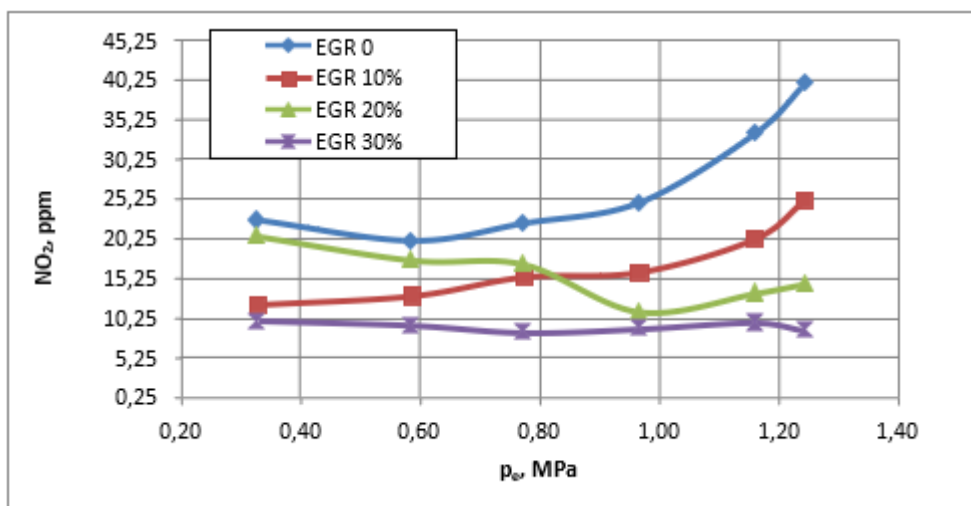


Рисунок 3.3 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO₂ у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1

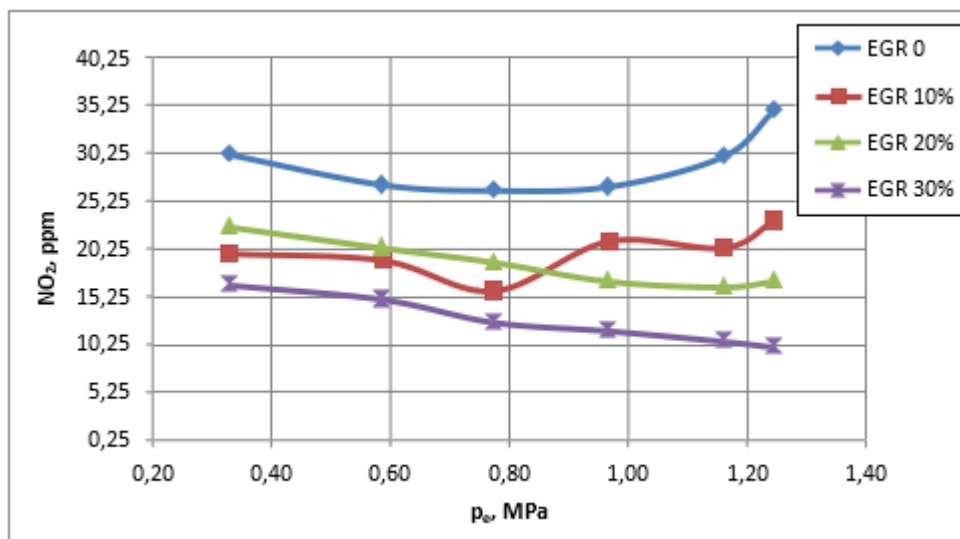


Рисунок 3.4 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO_2 у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1.

У літературі NO та NO_2 разом називають оксидами азоту (NO_x) і розглядаються як один елемент. Як видно з представлених графіків, викиди NO_x збільшуються зі збільшенням середнього ефективного тиску p_e . Система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) суттєво впливає на викиди оксидів азоту. При обертанні колінчастого вала двигуна з частотою 2000 хв-1 та максимальному навантаженні концентрація NO_x у відпрацьованих газах зменшувалася аж у 3,06 раза, при 30% рециркуляції відпрацьованих газів. При досягненні 20% рециркуляції відпрацьованих газів зниження досягало 1,88 раза, а при 10% рециркуляції було зафіксовано зниження в 1,34 раза. При обертанні двигуна з частотою 2500 хв-1 ефективність системи EGR була нижчою. Зниження викидів NO_x у цьому випадку склало лише 2,03 раза, при тому ж максимальному навантаженні. При рециркуляції димових газів 20% зниження становило 1,43 раза, а при 10% рециркуляції – 1,19 раза. Зменшення викидів NO_x у димових газах визначалося відповідно зниженою температурою горіння в камері згорання.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

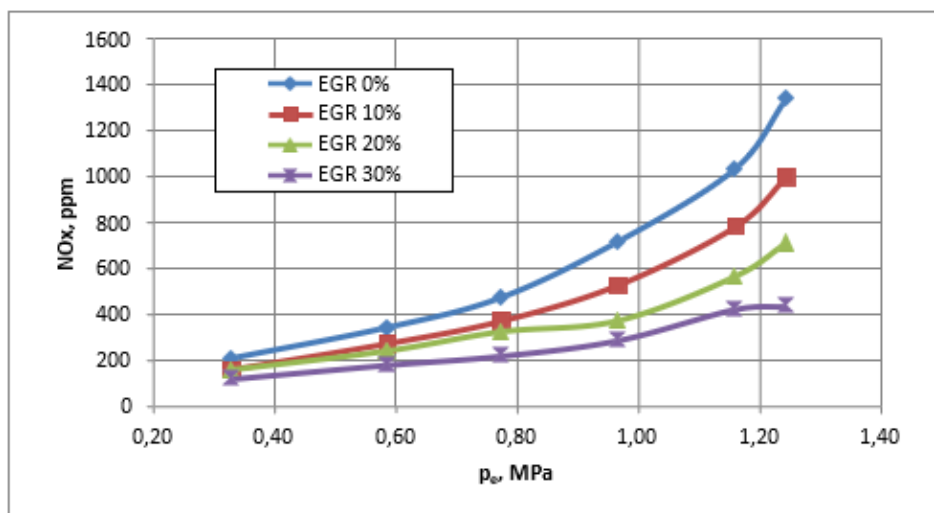


Рисунок 3.5 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO_x у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1

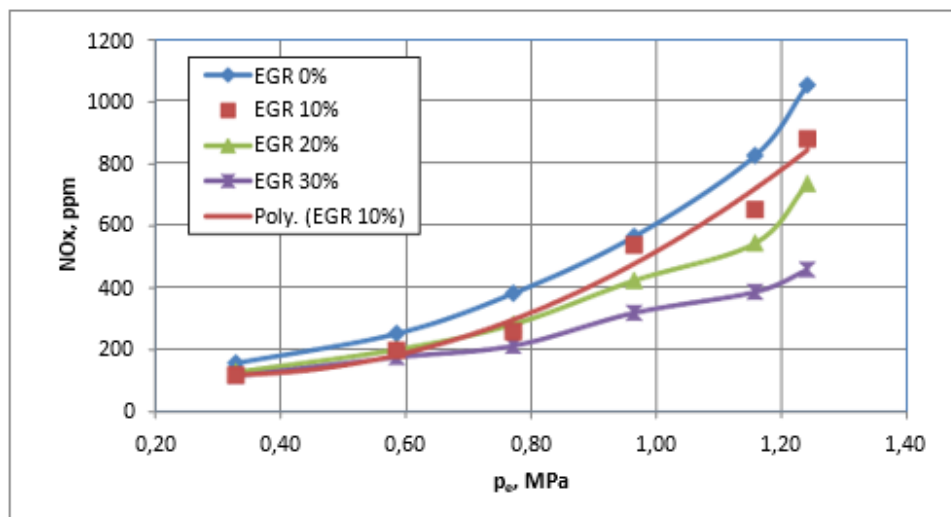


Рисунок 3.6 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO_x у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1

Система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR) значно знизилася кількість NO_x у газах, оскільки через зменшення концентрації кисню в процесі згоряння знизилася температура згоряння. Проте було відзначено й негативний ефект — значне збільшення димності газів. При обертах колінчастого вала двигуна 2000 хв^{-1} і середньому ефективному тиску 1,245 МПа димність зростає від 0 % до 79,5 %. Трохи менше зростання димності спостерігалось при 2500 хв^{-1} , тоді збільшення становило від 0 % до 32,1 %

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

при тому ж середньому ефективному тиску 1,245 МПа.

Однак помітне зростання димності газів відбувалося лише при рециркуляції понад 20 %. Цікаво, що при невеликій рециркуляції газів димність не збільшувалася прямо пропорційно навантаженню двигуна, а досягала максимуму в діапазоні 0,59–0,97 МПа. Очевидно, що при використанні системи рециркуляції відпрацьованих газів зменшення вмісту оксидів азоту відбувається за рахунок підвищення димності газів.

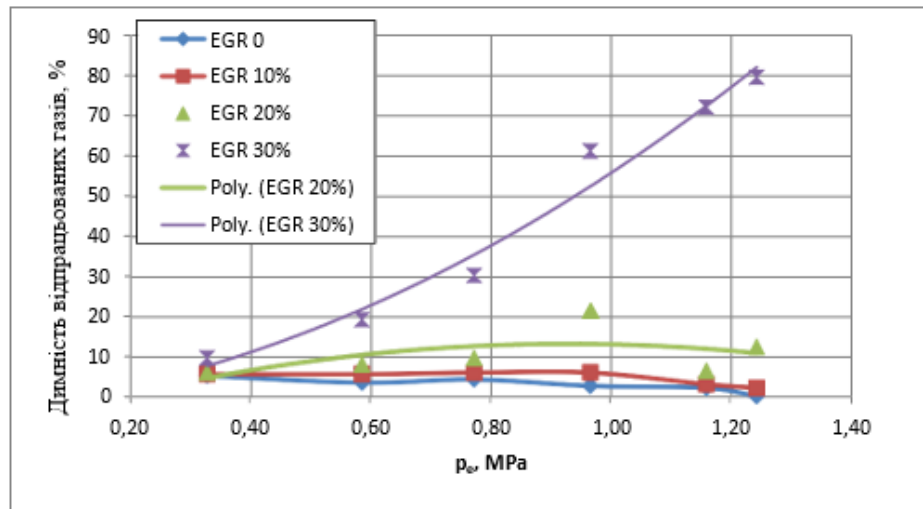


Рисунок 3.7 - Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на димність газів при 2000 хв⁻¹ обертах колінчастого вала двигуна.

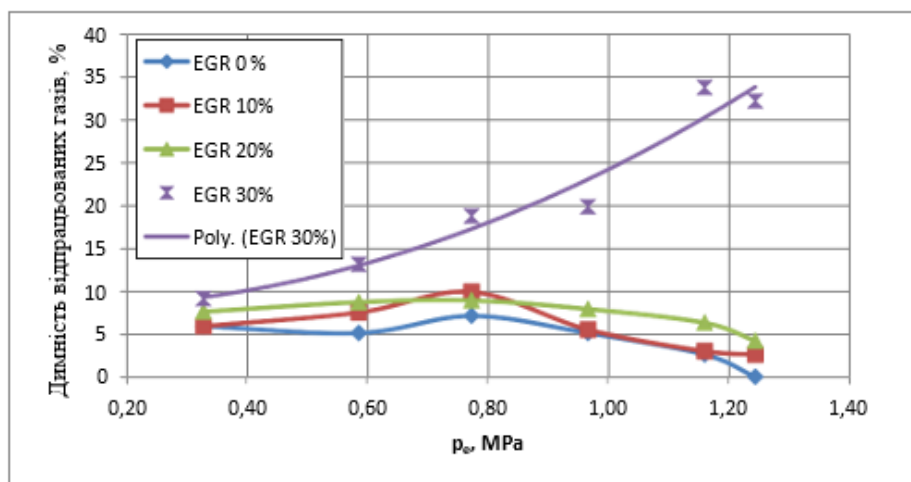


Рисунок 3.8 - Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на димність газів при 2500 хв⁻¹ обертах колінчастого вала двигуна.

Концентрація CO_2 у вихлопних газах зростала зі збільшенням навантаження на двигун та рециркуляції вихлопних газів. Це чітко видно на рисунках. Це пояснюється тим, що все більше CO_2 повертається через рециркуляцію вихлопних газів, що збільшує у них вміст CO_2 .

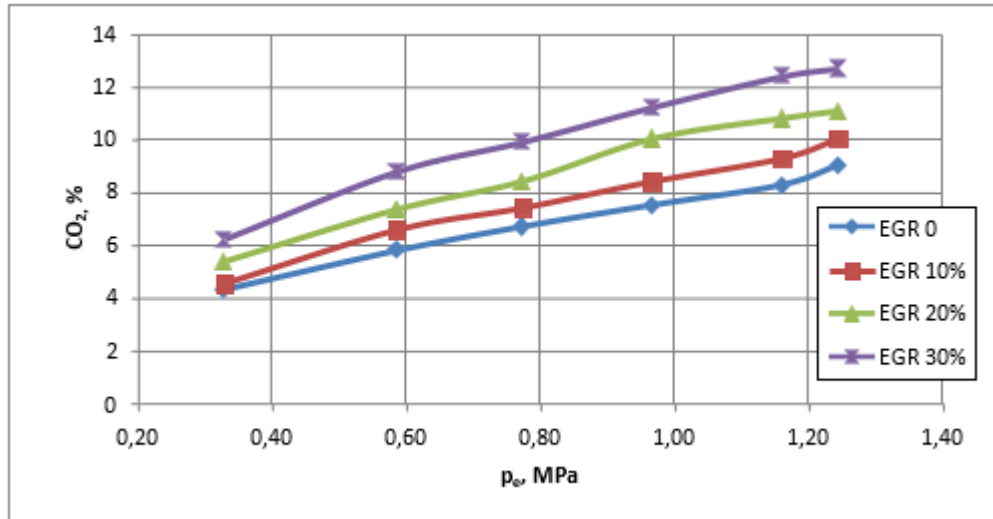


Рисунок 3.9 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію CO_2 у пальному при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1

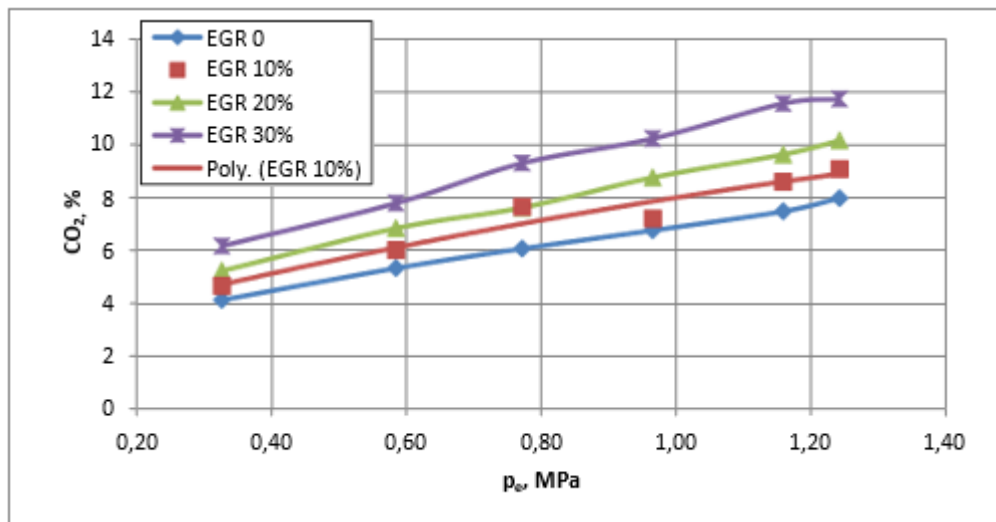


Рисунок 3.10 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію CO_2 у пальному при швидкості обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Система рециркуляції палива також впливає на витрату палива. При низькому навантаженні двигуна суттєвої різниці у витраті палива немає, але зі збільшенням навантаження на двигун витрата палива також зростає. На це явище впливає брак свіжого кисню в циліндрах двигуна, що погіршує процес згоряння палива в двигуні. При частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000/хв-1 та середньому ефективному тиску 1,24 МПа та 30% рециркуляції палива спостерігалось збільшення порівняльної ефективної витрати палива з 220 г/кВт·год до 246 г/кВт·год. Коли кількість палива, що повертається у впуск, не перевищувала 20%, порівняльна витрата палива збільшувалася лише на 3,6%, а 10% рециркуляція практично не впливала на витрату палива. Програма керування клапаном EGR вже запрограмована так, що при вищих точках навантаження клапан EGR закривається, і рециркуляція палива не відбувається, тому можна сказати, що примусово вимкнувши систему рециркуляції палива, ми не матимемо жодних відчутних переваг у плані зниження витрати палива.

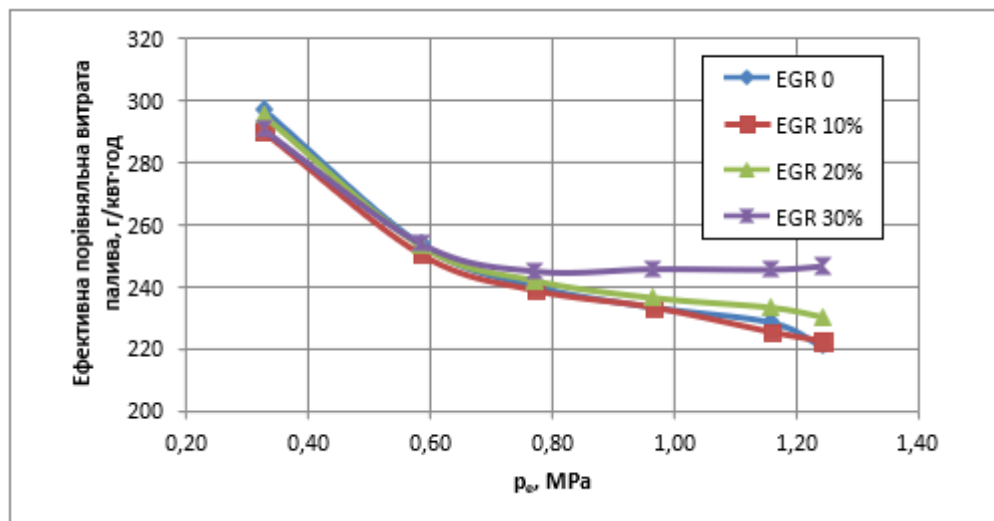


Рисунок 3.11 - Вплив рециркуляції палива на порівняльну ефективну витрату палива при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

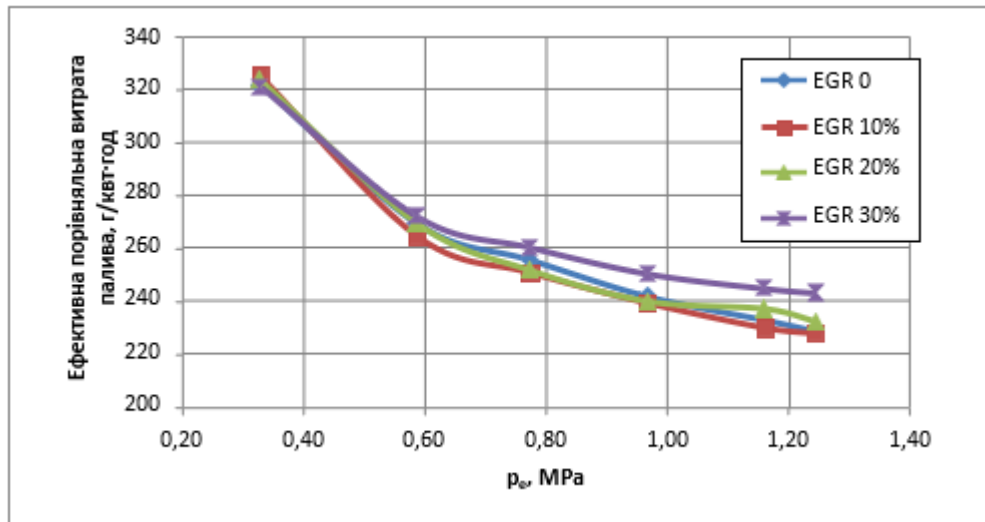


Рисунок 3.12 - Вплив рециркуляції палива на порівняльну ефективну витрату палива при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1.

Ефективний ККД двигуна дещо збільшився при 10% рециркуляції палива, але при високих швидкостях рециркуляції палива EGR знижує ефективний ККД двигуна. Це спостерігалось як у режимах швидкості обертання колінчастого вала 2000 хв-1, так і 2500 хв-1.

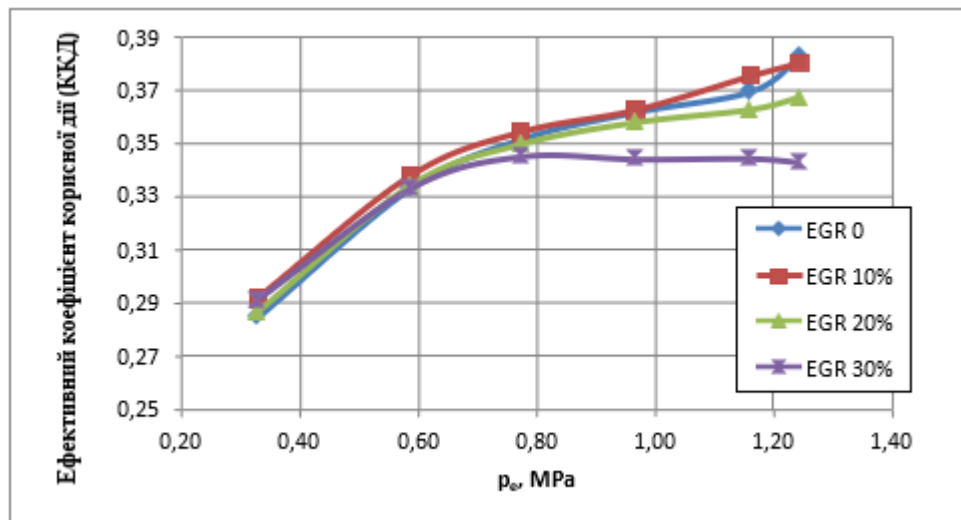


Рисунок 3.13 - Вплив рециркуляції палива на ефективний ККД при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

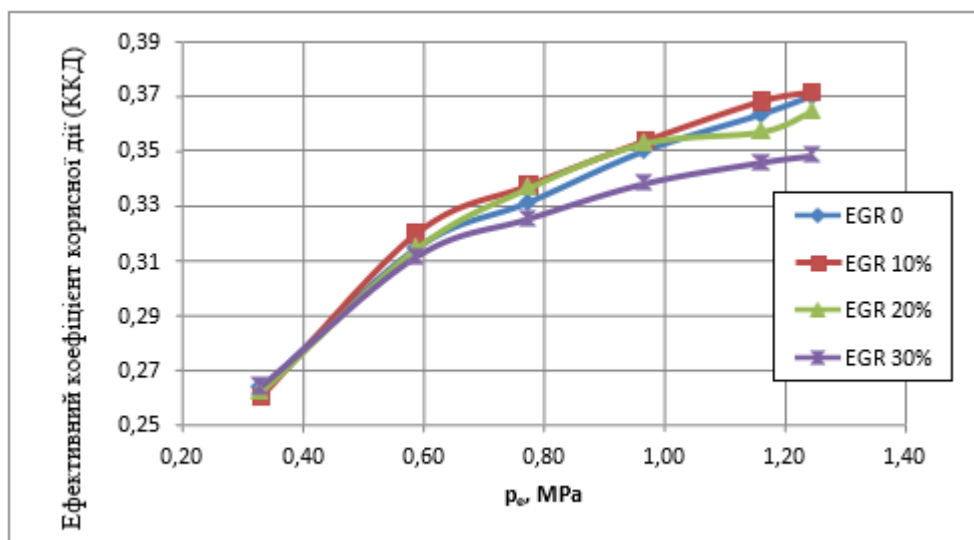


Рисунок 3.14 - Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на ефективний коефіцієнт корисної дії за частоти обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв^{-1} (об/хв).

Ефективний ККД особливо значно знизився при максимальному навантаженні двигуна та 30% рециркуляції палива. Зниження з 0,38 до 0,34 було зафіксовано, коли швидкість обертання колінчастого вала досягла 2000 хв^{-1} . Дещо менше зниження спостерігалось при 2500 хв^{-1} . У цьому випадку ефективний ККД знизився з 0,37 до 0,348. У режимах низького навантаження рециркуляція палива не мала суттєвого впливу на ефективний ККД.

Високий рівень чадного газу CO зазвичай вказує на те, що двигун працює на занадто багатій паливній суміші. Загалом, концентрація CO є показником ефективно спаленого палива. Концентрація CO збільшується, коли в процесі згоряння бракує кисню. Це чудово відображається на діаграмах, якщо розглядати криву EGR 30%. Коли двигун працює на 2000 хв^{-1} , концентрація CO починає зростати вже з ефективного середнього тиску 0,77 МПа, подібне явище відбувається при 2500 хв^{-1} , але це починає проявлятися лише тоді, коли навантаження двигуна досягає 0,97 МПа. При рециркуляції 20% та 10% вміст CO не так сильно збільшувався, оскільки в камерах згоряння двигуна все ще було достатньо кисню.

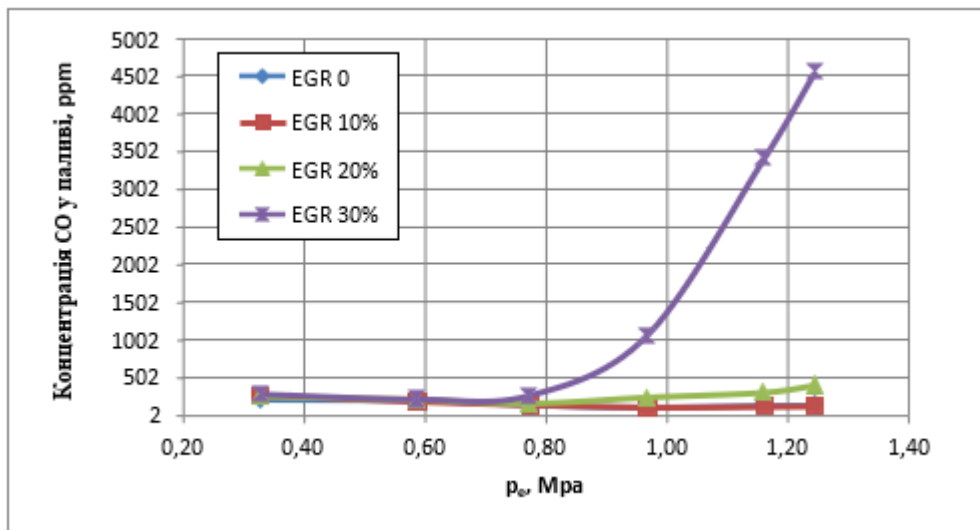


Рисунок 3.15 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію CO у пальному при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1

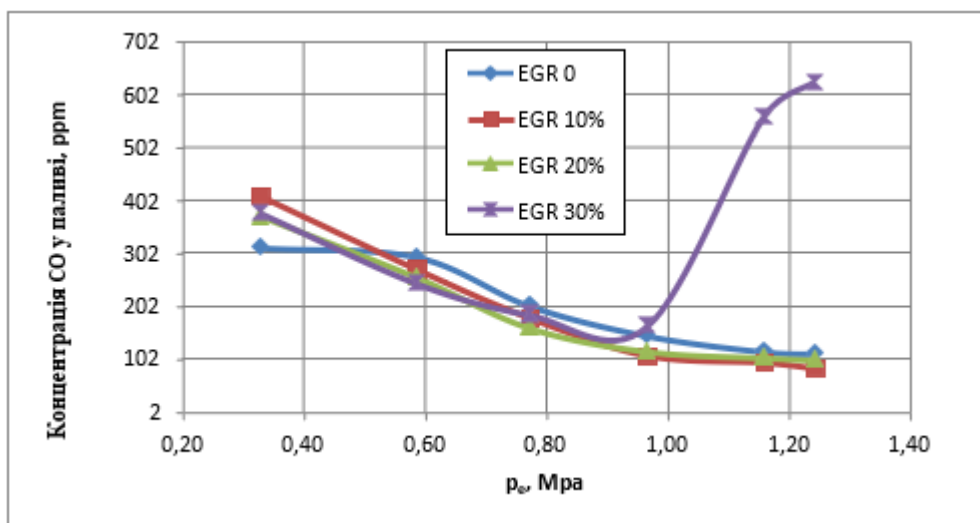


Рисунок 3.16 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію CO у пальному при швидкості обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1

Таким чином, рециркуляція палива впливає на більшість параметрів дизельного двигуна внутрішнього згорання. Це чудовий засіб зменшення викидів NO_x у паливі, але він має низку недоліків, таких як збільшення димності, зниження ефективного ККД тощо.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ДИЗЕЛЬНИМИ ДВИГУНАМИ ТА СИСТЕМАМИ EGR

4.1 Загальні положення

Робота з дизельними двигунами, обладнаними системами рециркуляції відпрацьованих газів (EGR), потребує дотримання комплексу заходів охорони праці. Це зумовлено високими температурами робочих процесів, токсичністю продуктів згоряння та наявністю електронних систем керування. Основна мета заходів безпеки полягає у збереженні здоров'я персоналу, попередженні професійних захворювань та аварійних ситуацій.

4.2. Потенційні небезпеки

- Хімічні фактори: оксиди азоту (NO_x), чадний газ (CO), вуглеводні та сажа, що утворюються у процесі роботи двигуна.
- Фізичні фактори: високі температури поверхонь двигуна та охолоджувача EGR, шум, вібрація.
- Пожежонебезпечні фактори: витік дизельного палива, мастильних матеріалів, перегрів елементів системи.
- Електробезпека: ризик ураження струмом при роботі з електронними блоками керування та датчиками системи EGR.

4.3. Організаційні заходи

- Проведення інструктажів з охорони праці та регулярних перевірок знань персоналу.
- Забезпечення робочих місць системами вентиляції для видалення токсичних газів.
- Організація зон безпечного доступу до двигунів та агрегатів.
- Встановлення пожежних сигналізацій та засобів первинного пожежогасіння.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

4.4 Технічні заходи

4.1 Використання індивідуальних засобів захисту

Для забезпечення безпеки персоналу при роботі з дизельними двигунами та системами EGR необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ), що відповідають вимогам ДСТУ EN 529:2006 та ДСТУ EN 166:2001:

- Респіратори – для захисту органів дихання від оксидів азоту, чадного газу та сажі.
- Захисні окуляри – для запобігання потраплянню частинок сажі та хімічних реагентів у очі.
- Термостійкі рукавички – для захисту від опіків при контакті з гарячими поверхнями охолоджувача та клапана EGR.
- Спецодяг із антистатичними властивостями – для зменшення ризику займання при роботі з паливними системами.

4.2 Регулярна діагностика та очищення системи EGR

Система рециркуляції відпрацьованих газів схильна до засмічення продуктами згоряння, що може призвести до перегріву та зниження ефективності двигуна. Тому необхідно:

- Проводити планову діагностику відповідно до регламенту виробника.
- Використовувати спеціалізовані стенди для перевірки працездатності клапана та охолоджувача.
- Застосовувати екологічно безпечні миючі засоби для очищення від сажі та нагару.
- Вести журнал технічного обслуговування, що відповідає вимогам ISO 9001:2015 (система менеджменту якості).

4.3 Контроль герметичності паливних та газових магістралей

Паливні та газові магістралі повинні відповідати вимогам ДСТУ EN ISO 15500-9:2018. Основні заходи:

- Регулярна перевірка з'єднань на предмет витоків.
- Використання датчиків тиску та газоаналізаторів для контролю

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

герметичності.

- Застосування ущільнювальних матеріалів, стійких до високих температур та хімічних впливів.

4.4 Використання шумопоглинаючих матеріалів та антивібраційних кріплень

Робота дизельних двигунів супроводжується підвищеним рівнем шуму та вібрацій, що може негативно впливати на здоров'я персоналу. Для зменшення цього впливу застосовуються:

- Шумопоглинаючі кожухи та панелі, що відповідають вимогам ДСТУ ISO 1999:2018.

- Антивібраційні кріплення та демпфери, які знижують навантаження на конструкцію та зменшують ризик професійних захворювань опорно-рухового апарату.

- Використання акустичних екранів у приміщеннях сервісних станцій.

- Регулярний контроль рівня шуму та вібрацій із застосуванням сертифікованих вимірювальних приладів.

5. Санітарно-гігієнічні вимоги

- Допустимі концентрації NO_x та CO у робочій зоні не повинні перевищувати встановлених нормативів.

- Робочі приміщення повинні бути обладнані системами примусової вентиляції.

- Персонал має проходити регулярні медичні огляди для контролю стану органів дихання та слуху.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Рециркуляція відпрацьованих газів ефективно знижує концентрацію NOx у газах. Ефективність рециркуляції пропорційно зростає зі збільшенням навантаження двигуна. Збільшення рециркуляції газів від 0 до 30 % призвело до зменшення концентрації NOx у газах у 3,06 рази при обертах колінчастого вала 2000 хв^{-1} і середньому ефективному тиску двигуна 1,24 МПа.

При рециркуляції газів до 20 % було відмічено, що система EGR має мінімальний вплив на димність газів і витрату палива. Проте при збільшенні рециркуляції до 30 % димність газів зросла до 79,5 %, а питомі витрати палива збільшилися на 11,8 % при 2000 хв^{-1} і 1,24 МПа середнього ефективного тиску двигуна.

Рециркуляція газів понад 20 % недоцільна через значне збільшення димності газів і витрат палива при середньому ефективному тиску 1,24 МПа.

Концентрація CO помітно зростала зі збільшенням навантаження двигуна та кількості рециркульованих газів. При роботі двигуна на 2000 хв^{-1} концентрація CO почала зростати вже від 0,77 МПа середнього ефективного тиску. Зростання CO зумовлене нестачею свіжого повітря в камерах згоряння двигуна, через що утворюється багатий паливно-повітряний суміш. Особливо висока концентрація CO була зафіксована при 2000 хв^{-1} і 30 % рециркуляції газів, досягнувши 4548 ppm при середньому ефективному тиску 1,24 МПа.

Рециркуляція газів підвищила ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна при 10 % рециркульованих газів, проте при збільшенні рециркуляції до 30 % ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна знизився.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. J. Cook, D. Nuccitelli, S. A. Green, M. Richardson, B. Winkler, R. Painting, R. Way, P. Jacobs and A. Skuce, "Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature," *Environmental Research Letters*, vol. 8, p. 24, 2013.
2. European Environment Agency (EEA), "<http://www.eea.europa.eu>," European Environment Agency (EEA), 14 March 2012.
3. European Automobile Manufacturers Association, ACE.
4. J. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York: McGraw Hill, 1988.
5. Euro emission standarts. <https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards/>
6. J. Kahrstedt, A. Blechstein, O. Mailwald and J. Kabitzke, "Grundlegende Untersuchungen zu Low-NOx-Brennverfahren für PKW-Dieselmotoren unter Nutzung zusätzlicher Variabilitäten," in *6. Internationales Stuttgarter Symposium*, Stuttgart, 2005.
7. Reifart S. *EGR-Systems for Diesel Engines*. KTH industrial engineering and manegement. 2010.
8. Jun Cong Ge., Min Soo Kim., Sam Ki Yoon., Nag Jung Choi. Effects of Pilot Injection Timing and EGR on Combustion, Performance and Exhaust Emissions in a Common Rail Diesel Engine Fueled with a Canola Oil Biodiesel-Diesel Blend. *MDPI engines*. 2015
9. Kumaran P. Performance Investigation of Diesel Engine with Hot and Cold EGR. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*. 2016, 0974-2115
10. Ghosh S., Dutta D. Effects of EGR on the Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine Operated on Diesel Oil and Soybean Oil Methyl Ester (SOME). *International Journal of Engineering Inventions*. 2012. 2278-7461
11. Labeckas G., Slaviskas S., Kanapkiene I. Study of the Effects of Biofuel-Oxygen of Various Origins on a CRDI Diesel Engine Combustion and Emissions. *MDPI Energies* 2019.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Hussain J., Palaniradja K., Alagumurthi N., Manimaran R. Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance and Emission characteristics of a Three Cylinder Direct Injection Compression Ignition Engine. Alexandria Engineering Journal, 2012, 51: 241 – 247.

13. Žaglinskis J., Daukšys V., Raplis P., Meleika M. Deginių recirkuliacijos sistemos įtaka dyzelinu ir B30 mišiniu dirbančio variklio darbo rodikliams. Proceedings of the 18th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania. 2015.

14. Nuostolių, patiriamų dėl neigiamo transporto poveikio urbanistinėse zonose, įvertinimas. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Užsakovas: Lietuvos Respublikos susisiekimo ministerija. 2008.

15. R. A. Schubiger, "Untersuchungen zur Rußbildung und -oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung - Thermodynamische Kenngrößen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie," Dissertation, ETH Zürich, 2001.

16. J. Xi and B.-J. Zhong, "Soot in Diesel Combustion Systems," Chem. Eng. Technol., vol. 29, no. 6, 2006.

17. A. Maiboom, X. Tauzia and J.-F. Hétet, "Experimental study of various effects of exhaust gas recirculation (EGR) on combustion and emissions of an automotive direct injection diesel engine," Energy, vol. 33, pp. 22-34, 2008.

18. S. Pischinger, Vorlesungsumdruck Verbrennungsmotoren Band II, Aachen: Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen, 2000.

19. G. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch and F. Otto, Verbrennungsmotoren. Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung, Wiesbaden: B.-G.-Teubner-Verlag, 2006.

20. R. Tofighi, N. Tillmark, E. Daré, A. Aberg, J. Larsson and S. Ceccatelli, "Hypoxia-independent apoptosis in neural cells exposed to carbon monoxide in vitro," Brain Research, vol. 1098(1), pp. 1-8, 2006.

21. "DieselNet Technology Guide: Engine Design for Low Emissions," Ecopoint Inc., 11 2006.[Online]. Available: www.dieselnets.com.

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. J. Patchett, R. Verbeek, K. Grimston, G. Rice, J. Calabrese and M. Van Genderen, "Control System for mobile NO_x SCR". United States Patent Application Publication, Patent US 2004/0128982 A1, 2004.

23. M. K. Khair and H. Jääskeläinen, "Exhaust Gas Recirculation," Dieselnet.com, Ecopoint Inc., 2012.

24. S. Reifarth and H.-E. Ångström, "Transient EGR in a long-route and short-route EGRsystem," in ASME ICES2009-76107, Milwaukee, 2009.

25. R. Zhang, F. Charles, D. Ewing, J.-S. Chang and J. Cotton, "Effect of Diesel Soot Deposition on the Performance of EGR-coolers," in SAE 2004-01-0122, 2004.

26. Naresh P., Madhava V., Hari Babu A.V. Exhaust Gas Recirculation System. Science Q, Journal of bioprocessing and chemical engineering. 2015

27. Agrawal A., Singh S., Sinha S., Shukla M. Effect of EGR on the exhaust gas temperature and exhaust opacity in compression ignition engines. Department of Mechanical Engineering, and 2Environmental Engineering and Management, Indian Institute of Technology, India. 2003

					MP.AT-71.00.00.000 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Комплект ілюстративного матеріалу до захисту магістерської роботи



студента групи АТ_м-24-1

Трегера Владислава Любомировича



ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ПАЛИВА НА РОБОЧІ ПАРАМЕТРИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА

Науковий керівник: доц. Гнип М.М.

Івано-Франківськ
2025р.

МЕТА і ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1

Актуальність. Сьогодні транспорт є одним з основних факторів, що впливають на якість повітря. Зі збільшенням кількості автомобілів атмосфера також стає більш забрудненою. Практично неможливо зменшити викиди автомобілів, які не оснащені нейтралізаторами, тому всі ці шкідливі речовини потрапляють у навколишнє середовище.

Метою роботи дослідити вплив рециркуляції палива на роботу дизельного двигуна та показники викидів палива.

Завдання дослідження:

- розробити відповідну методологію проведення дослідження;
- оцінити вплив рециркуляції палива на характеристики двигуна та показники викидів палива;

Об'єкт дослідження – Дизельний двигун внутрішнього згорання.

Предмет дослідження – Вплив процесів рециркуляції палива на робочі параметри дизельного двигуна.

Практичне значення отриманих результатів полягає у наступному:

1. Розроблено відповідну методологію проведення дослідження;
2. Проведено оцінку впливу рециркуляції палива на характеристики двигуна та показники викидів палива.

МЕТА і ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наукова новизна. Розроблено методологію експериментального дослідження, яка дозволяє кількісно оцінювати ефективність рециркуляції палива та її вплив на екологічні показники.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу науково-технічної інформації, теоретичні та експериментальні дослідження основних робочих та екологічних показників роботи ДВЗ.

Особистий внесок автора полягає у комплексному виконанні всіх етапів дослідження — від постановки проблеми й методології до експериментів, аналізу та практичних рекомендацій.

Світове виробництво автомобілів за 2020–2024 роки

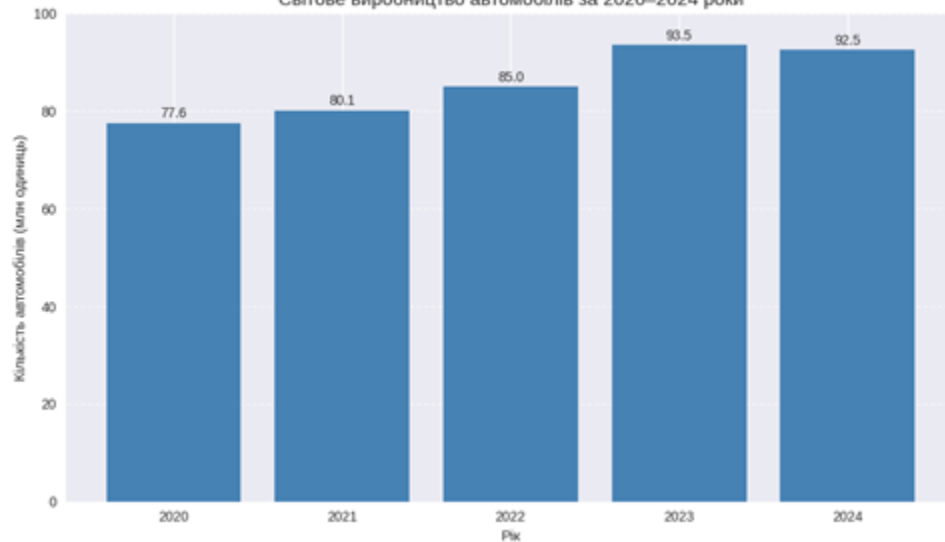


Рисунок 1 - Кількість автомобілів, що випускаються на рік

Таблиця 2- Викиди CO, HC та NOx у різних режимах роботи

Компонент	Режими роботи двигуна			
	Холостий хід і середні оберти	Середні сталі оберти з навантаженням	Розгін	Уповільнення (гальмування)
CO %	0	0,1	0	0
HC %	0,04	0,02	0,01	0,03
NO _x ppm	60	850	250	30

Таблиця 1 - Забруднювальні речовини за видами транспорту (г/т·км)

Вид транспорту	CO	CO ₂	NO _x	SO ₂	CH ₄	КD
Автомобільний транспорт	0,2...2,4	50...333	0,24...3,6	0,03...0,4	0,2...0,9	0,005...0,2
Залізничний транспорт	0,02...0,2	9...102	0,07...1,9	0,04...0,4	0,02...0,9	0,01...0,08
Морське судноплавство на короткі відстані	0,02...0,2	7,7...31	0,11...0,72	0,05...0,51	0,04...0,08	0,002...0,04
Внутрішнє водне судноплавство	0,11	33...81	0,26...1,45	0,04	-	0,02

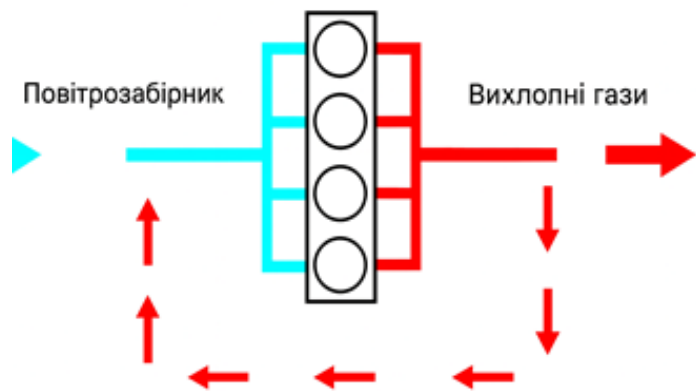


Рисунок 2 - Загальна схема EGR

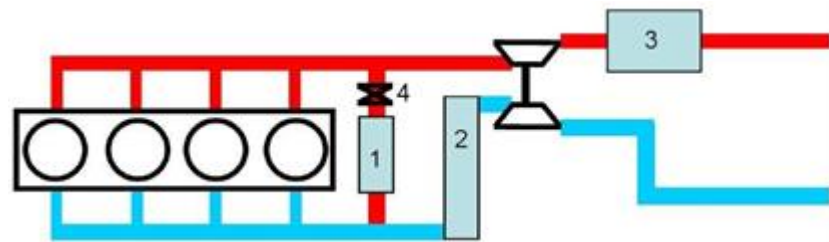


Рисунок 3 - Система рециркуляції відпрацьованих газів високого тиску (EGR)

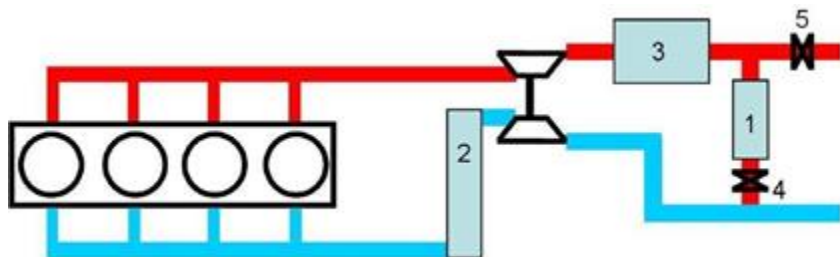


Рисунок 4 - Система рециркуляції відпрацьованих газів низького тиску (EGR)

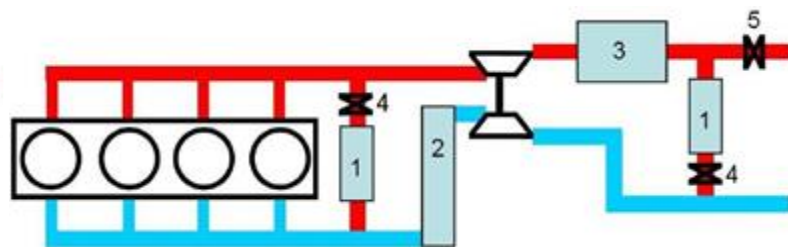


Рисунок 5 - Гібридна система рециркуляції відпрацьованих газів (EGR)

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Таблиця 3 - Технічні дані Fiat 1.9 JTD

Назва двигуна	FIAT 1.9JTD 8v 115 HP (85 кВт)
Тип двигуна	Рядний чотирициліндровий з турбонадувом
Система подачі палива	Common Rail Direct Injection (CRDI), Bosch
Діаметр циліндра двигуна	82 мм
Хід поршня в циліндрі	90,4 мм
Загальний об'єм двигуна	1910 см ³
Ступінь стиснення	18.0 ± 0,45:1
Максимальна потужність двигуна	85 кВтW (115 к.с.) при 4000 min ⁻¹
Максимальний крутний момент двигуна	255 Нм при 2000 min ⁻¹
Частота холостого ходу колінчастого вала	850 ± 20 min ⁻¹
Система газорозподілу	ОНС
Кількість клапанів	8
Максимальний тиск впорскування палива	1400 бар (140 ± 0,5 МПа)
Система рециркуляції палива	Система високого тиску з електричним клапаном EGR
Код клапана EGR	Fiat 55215029
Код паливного насоса високого тиску	Bosch 0445010007
Код паливної форсунки	Bosch 0445110119
Електронна система керування	Bosch EDC15C7



Рисунок 6 - дизельний двигун Fiat 1.9 JTD 85 kW

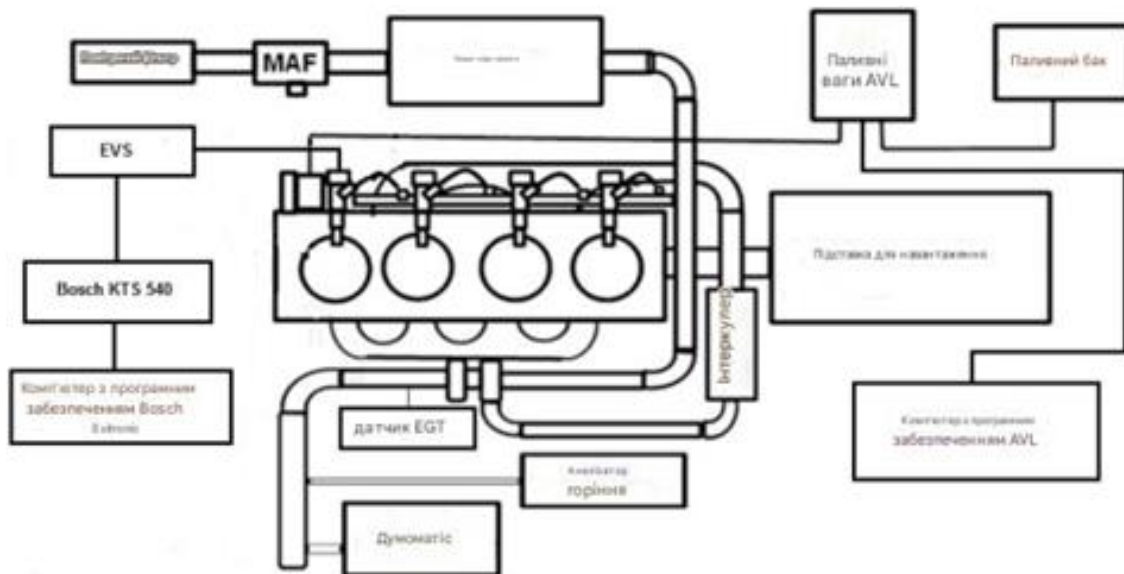


Рисунок 7 - Схема випробувального стенду



Рисунок 8 – Діагностичний пристрій Bosch KTS 540

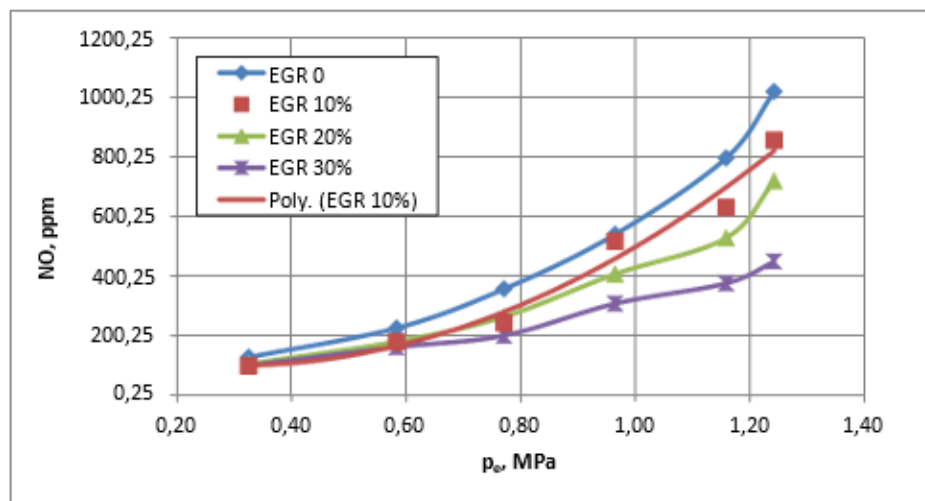
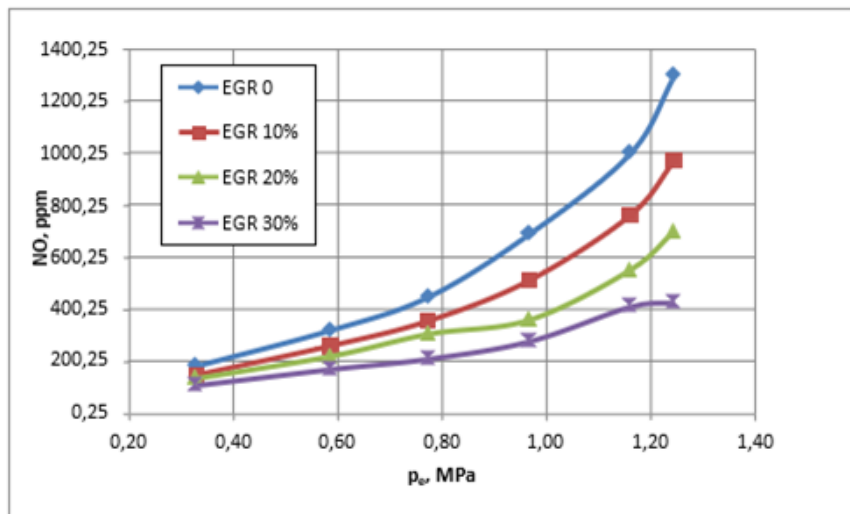


Рисунок 9 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO у пальному при швидкості обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1.

Рисунок 10 – Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1.

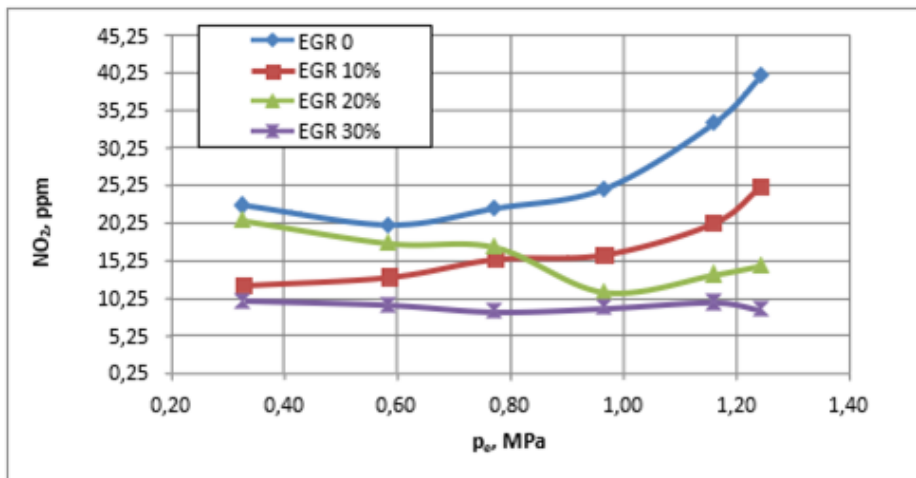


Рисунок 11 – Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO₂ у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1

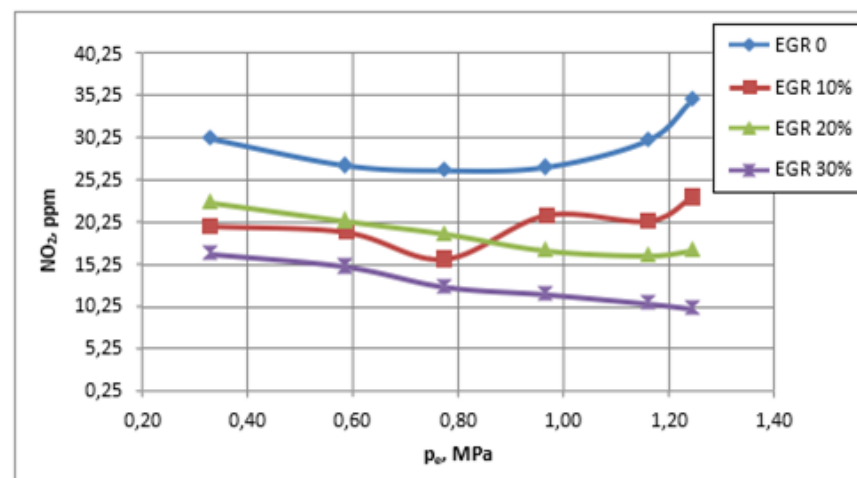


Рисунок 12 – Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO₂ у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1.

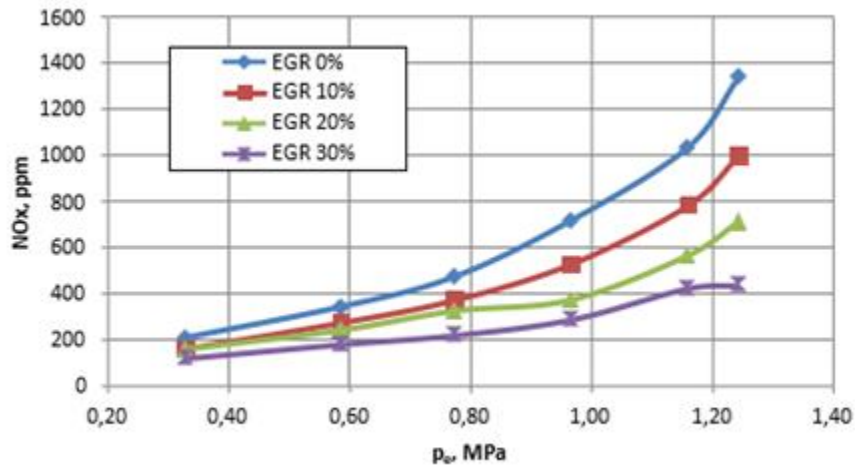


Рисунок 21 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO_x у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв⁻¹

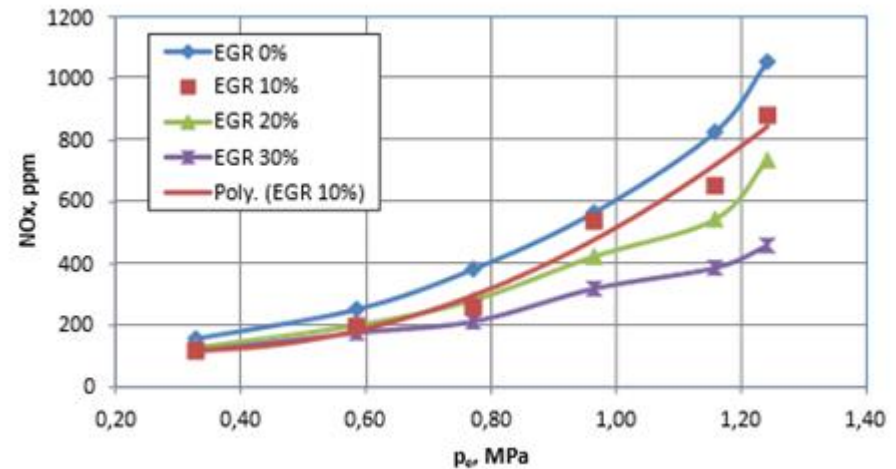


Рисунок 22 – Вплив рециркуляції палива на концентрацію NO_x у паливі при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв⁻¹

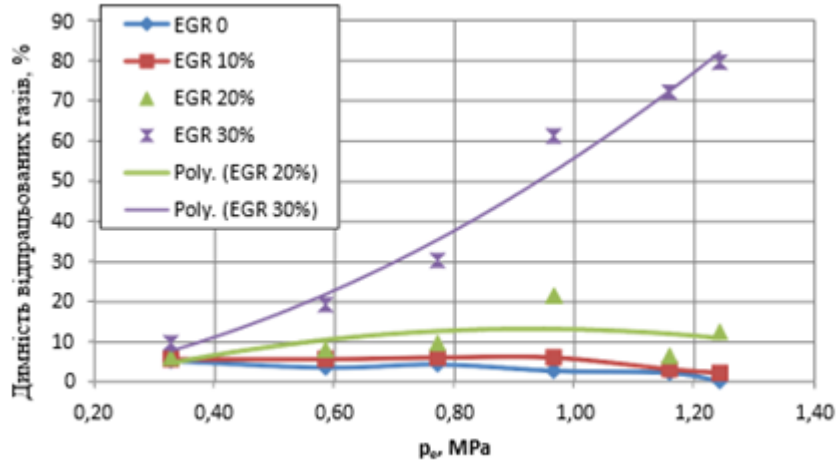


Рисунок 23 – Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на димність газів при 2000 хв⁻¹ обертах колінчастого вала двигуна

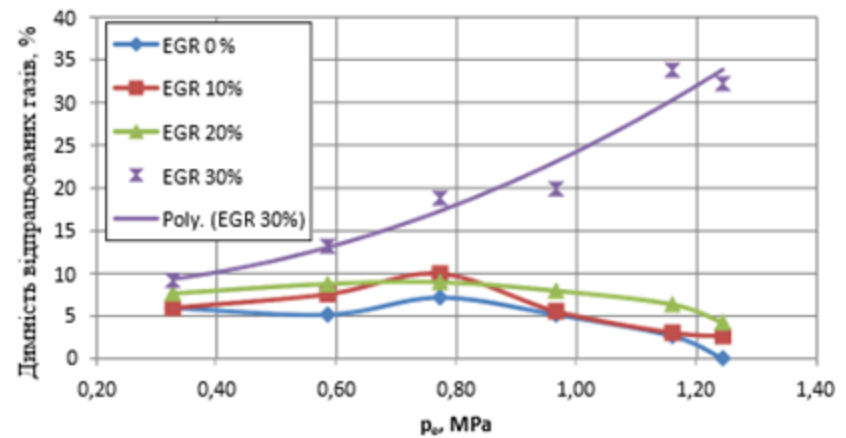


Рисунок 24– Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на димність газів при 2500 хв⁻¹ обертах колінчастого вала двигуна.

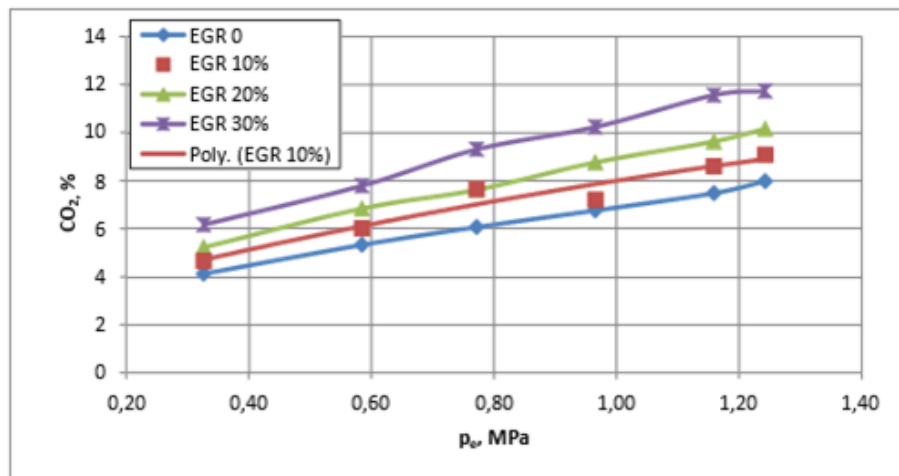
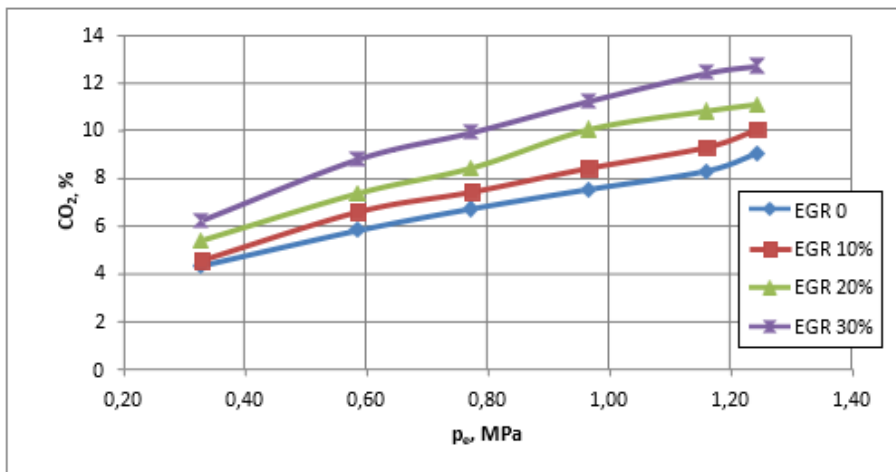


Рисунок 25 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію CO₂ у пальному при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1

Рисунок 26 – Вплив рециркуляції палива на концентрацію CO₂ у пальному при швидкості обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1.

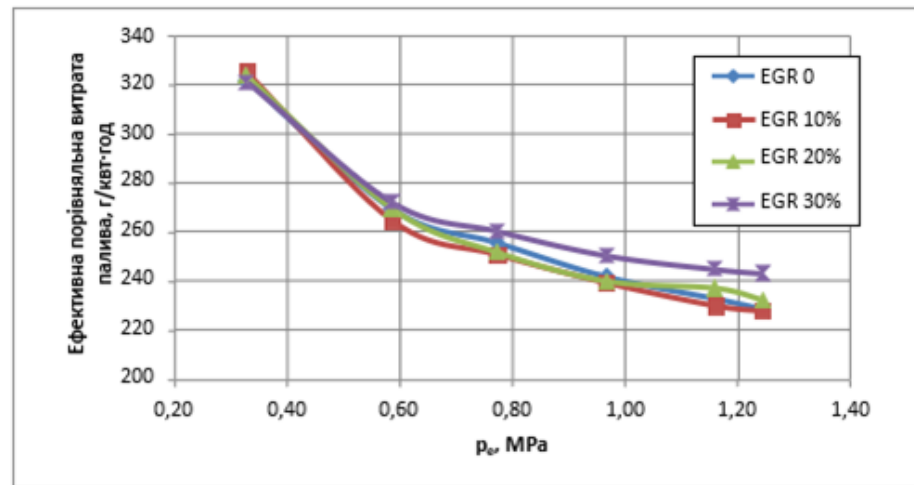
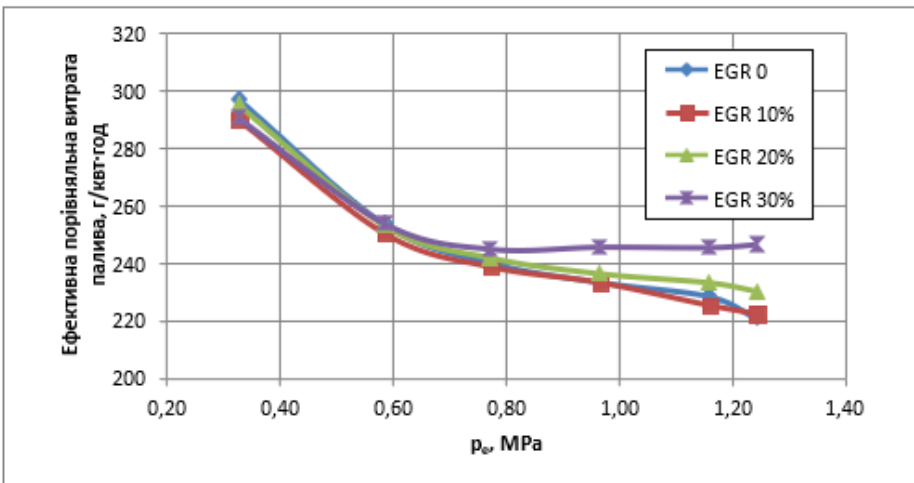


Рисунок 27 – Вплив рециркуляції палива на порівняльну ефективну витрату палива при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв-1.

Рисунок 28 - Вплив рециркуляції палива на порівняльну ефективну витрату палива при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв-1.

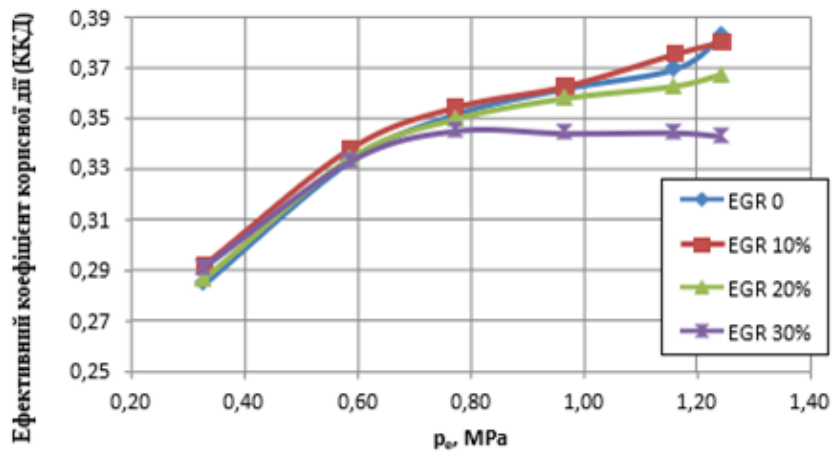


Рисунок 29 - Вплив рециркуляції палива на ефективний ККД при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв⁻¹.

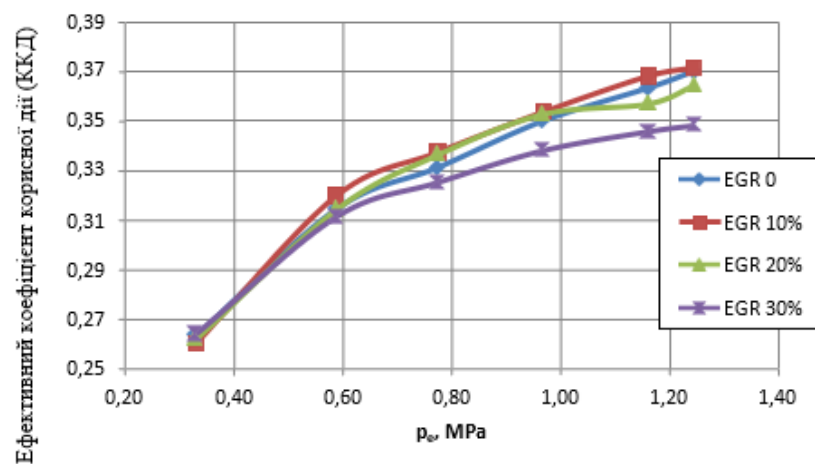


Рисунок 30 – - Вплив рециркуляції відпрацьованих газів на ефективний коефіцієнт корисної дії за частоти обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв⁻¹ (об/хв).

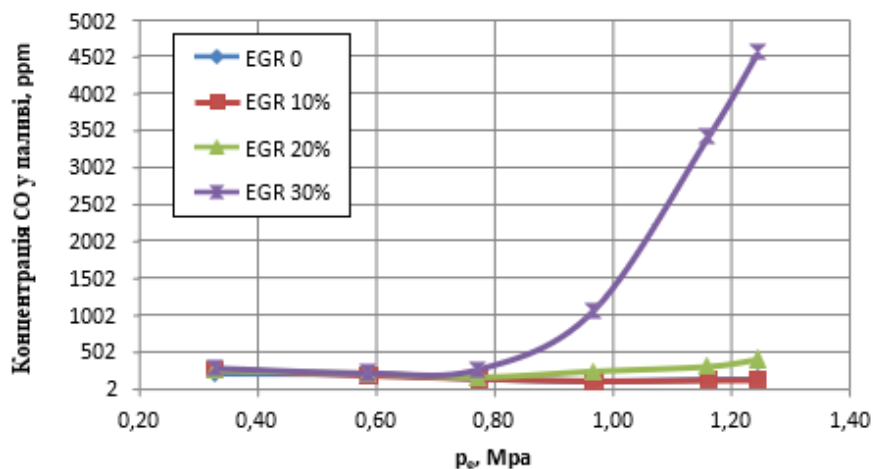


Рисунок 31 – Вплив рециркуляції палива на концентрацію СО у пальному при частоті обертання колінчастого вала двигуна 2000 хв⁻¹

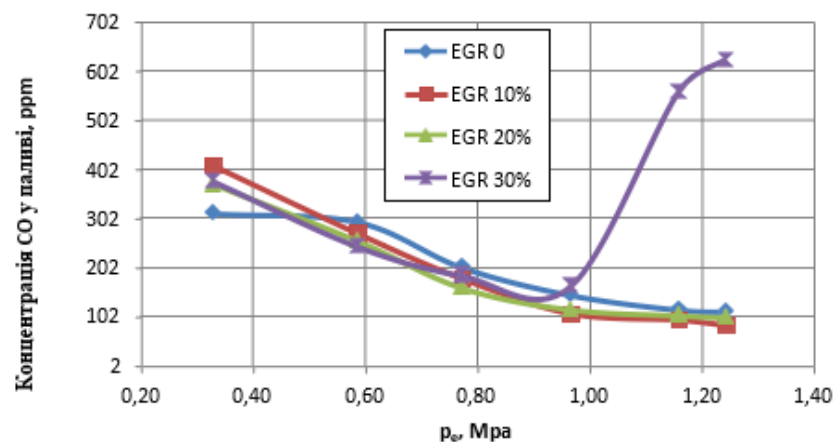


Рисунок 32 - Вплив рециркуляції палива на концентрацію СО у пальному при швидкості обертання колінчастого вала двигуна 2500 хв⁻¹

ВИСНОВКИ

Рециркуляція відпрацьованих газів ефективно знижує концентрацію NO_x у газах. Ефективність рециркуляції пропорційно зростає зі збільшенням навантаження двигуна. Збільшення рециркуляції газів від 0 до 30 % призвело до зменшення концентрації NO_x у газах у 3,06 рази при обертах колінчастого вала 2000 хв⁻¹ і середньому ефективному тиску двигуна 1,24 МПа.

При рециркуляції газів до 20 % було відмічено, що система EGR має мінімальний вплив на димність газів і витрату палива. Проте при збільшенні рециркуляції до 30 % димність газів зросла до 79,5 %, а питомі витрати палива збільшилися на 11,8 % при 2000 хв⁻¹ і 1,24 МПа середнього ефективного тиску двигуна.

Рециркуляція газів понад 20 % недоцільна через значне збільшення димності газів і витрат палива при середньому ефективному тиску 1,24 МПа.

Концентрація CO помітно зростала зі збільшенням навантаження двигуна та кількості рециркульованих газів. При роботі двигуна на 2000 хв^{-1} концентрація CO почала зростати вже від $0,77 \text{ МПа}$ середнього ефективного тиску. Зростання CO зумовлене нестачею свіжого повітря в камерах згоряння двигуна, через що утворюється багатий паливно-повітряний суміш. Особливо висока концентрація CO була зафіксована при 2000 хв^{-1} і 30% рециркуляції газів, досягнувши 4548 ppm при середньому ефективному тиску $1,24 \text{ МПа}$.

Рециркуляція газів підвищила ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна при 10% рециркульованих газів, проте при збільшенні рециркуляції до 30% ефективний коефіцієнт корисної дії двигуна знизився.