

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний університет «Запорізька політехніка»

Машинобудівний ін-т, Транспортний ф-т

(повне найменування інституту, факультету)

Двигуни внутрішнього згорання

(повне найменування кафедри)

## Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему Визначення ефективності дизельного ДВЗ, що працює на біодизельних паливах різного складу

Виконав: студент(ка) 2м курсу, групи Т-410м  
Спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Двигуни внутрішнього згорання

Новосильцев І.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник д.т.н., проф. Слинько Г.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доцент Дядя С.І.

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»  
(повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Машинобудівний інститут, Транспортний факультет  
Кафедра Двигуни внутрішнього згорання

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»  
(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація) «Двигуни внутрішнього згорання»  
(назва освітньої програми (спеціалізації))

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри ДВЗ**

  
Слинко Г.І.  
“01” вересня 2021 року

**ЗАВДАННЯ**

**НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)**

Новосильцев Ігор Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Визначення ефективності дизельного ДВЗ, що працює на біодизельних паливах різного складу

керівник проекту (роботи) д.т.н., професор Слинко Г.І.,

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 25.11.2021 року №461

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 06 грудня 2021 р.








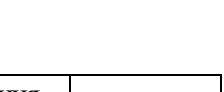
3. Вихідні дані до проекту (роботи) 4-тактний 4-циліндровий дизельний двигун ЯМЗ-5340 потужністю 140 кВт при 2300 хв<sup>-1</sup>

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз літератури за темою дослідження; тепловий розрахунок двигуна ЯМЗ-5340 на номінальному та дослідницьких режимах; дослідження впливу складу біодизельного палива на техніко-економічні показники двигуна; розрахунок економічної ефективності дослідження; розробка заходів з охорони праці

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

презентація до захисту з ілюстративним матеріалом основних положень магістерської роботи

## 6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-5	Слинько Г.І., д.т.н., професор		
6	Лазуткін М.І., к.т.н., доцент		 25.12.21.
7	Пожуєва Т.О., д.е.н., професор		
н/контроль	Слинько В.В., ст. викладач		

7. Дата видачі завдання «01» вересня 2021 року.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	05.09.2021	
2	Аналітичний огляд літератури	10.09.2021	
3	Методи досліджень та устаткування	20.09.2021	
4	Тепловий розрахунок двигуна ЯМЗ-5340	01.10.2021	
5	Дослідження впливу величини циклової подачі палива та коефіцієнту надлишку повітря на техніко-економічні показники двигуна	15.10.2021	
6	Дослідження впливу стану атмосферного повітря на техніко-економічні показники двигуна	01.11.2021	
7	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	10.11.2021	
8	Економічне обґрунтування наукової роботи	20.11.2021	
9	Формування висновків з магістерської роботи	25.11.2021	
10	Оформлення магістерської роботи, нормоконтроль	30.11.2021	
11	Розробка презентації та доповіді до захисту, виконання креслень	04.12.2021	
12	Подання роботи до захисту	06.12.2021	

Студент(ка)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Новосильцев І.В.

Керівник проекту (роботи)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Слинько Г.І.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 109 с., 25 табл., 16 рис., 60 джерел, 2 додатка.

### БІОДИЗЕЛЬ, ВИТРАТА ПАЛИВА, ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ, КОЕФІЦІЄНТ КОРИСНОЇ ДІЇ, ПАЛИВО, ПОТУЖНІСТЬ

Біодизель – це паливо, що складається з рослинного або тваринного жиру, яке використовують замість дизельного палива, або змішують в різних пропорціях. Відмінності складу та теплофізичних показників біодизельного палива мають суттєвий вплив на робочий процес дизельного ДВЗ. Менша вартість біодизеля та біодобавок, а також позитивні екологічні якості, у порівнянні з дизельним паливом, підтверджують перспективність та актуальність напрямку дослідження.

Проведено аналіз конструкції дизельного двигуна ЯМЗ-5340, розглянуто його технічні характеристики. За обраною методикою виконано теплові розрахунки двигуна при роботі на дизельному паливі та біодизелі ріпакових масел з високим та низьким вмістом ерукової кислоти. Визначено ефективні показники двигуна при збереженні незмінним з екологічних міркувань коефіцієнта надлишку повітря; при збереженні незмінною циклової масової витрати палива; при зміні температури та тиску атмосферного повітря.

Мета роботи – визначення ефективності сучасних дизельних ДВЗ, які працюють на біодизельному паливі.

Об'єкт дослідження – 4-тактний дизельний двигун ЯМЗ-5340 транспортного призначення.

Предмет дослідження – характер та величина впливу виду палива на техніко-економічні показники (ефективна потужність, ефективна витрата палива) 4-тактного дизеля.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМАТИКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1 Перспективи використання біодизельних палив	10
1.2 Властивості біодизельних палив	12
1.3 Вплив складу палива на показники роботи дизельних ДВЗ	14
1.4 Висновки за розділом	18
2 ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	20
2.1 Технічна характеристика двигуна ЯМЗ-5340	20
2.2 Конструкція двигуна ЯМЗ-5340	22
2.3 Системи керування та живлення двигуна	27
2.4 Основні положення методик дослідження	28
2.5 Висновки за розділом	30
3 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ЯМЗ-5340 НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ	31
3.1 Підготовка даних для розрахунку	31
3.2 Розрахунок в програмі Engine Calculation та визначення ефективних показників двигуна	38
3.3 Висновки за розділом	41
4 ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ РІЗНОГО СКЛАДУ ДЛЯ РІЗНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	44
4.1 Визначення властивостей біодизелів МЕРО різного кислотного складу	44
4.2 Висновки за розділом	49
5 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ЯМЗ-5340 ПРИ РОБОТІ НА БІОДИЗЕЛІ РІЗНОГО СКЛАДУ ЗА РІЗНИХ УМОВ	

ЕКСПЛУАТАЦІЇ	50
5.1 Підготовка даних	50
5.2 Результати теплового розрахунку при використанні палив БДвЕ і БДнЕ	51
5.3 Взаємозв'язок виду палива та коефіцієнта надлишку повітря дизельного двигуна	54
5.4 Вплив температури та тиску повітря на впуску на потужність та економічність двигуна ЯМЗ-5340, що працює на різних видах палива	55
5.4.1 Результати та аналіз теплового розрахунку	56
5.4.2 Визначення математичних функцій залежності величин $N_e$ , $g_e$ , $G_T$ від навколишніх температури та тиску	62
5.5 Висновки за розділом	68
6 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	70
6.1 Аналіз потенційних небезпек	70
6.2 Заходи по забезпеченню безпеки	71
6.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці	73
6.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях	79
6.4.1 Заходи з пожежної безпеки	79
6.4.2 Заходи з цивільного захисту	80
6.5 Висновки за розділом	81
7 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ	82
7.1 Оцінка технічного рівня двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на різних паливах	82
7.2 Розрахунок експлуатаційних витрат	86
7.3 Розрахунок економічного ефекту	89
7.4 Визначення витрат на проведення магістерської роботи	90
7.5 Висновки за розділом	95
ВИСНОВКИ	96
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	99
ДОДАТОК А	106
ДОДАТОК Б	109

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ

БДВЕ – біодизельне паливо МЕРО з високим вмістом ерукової кислоти;  
 БДнЕ – біодизельне паливо МЕРО з низьким вмістом ерукової кислоти;  
 град. ПКВ, ° ПКВ – кут повороту колінчастого валу;  
 ДВЗ – двигун внутрішнього згорання;  
 ДП – дизельне паливо;  
 ІПЕРО – ізопропіловий естер ріпакової олії;  
 МЕРО – метилові естери ріпакової олії;  
 МЕЖК – метилові естери жирних кислот;  
 ККД – коефіцієнт корисної дії;  
 СО – моноксид вуглецю (чадний газ);  
 ПК з ВДТ – персональний комп'ютер з відеодисплейним терміналом;  
 ФММ – фізико-математична модель;  
 ЯМЗ – Ярославський моторний завод;  
 NO<sub>x</sub> – оксиди азоту;  
 Н<sub>и</sub> – теплота згорання, МДж/кг;  
 η<sub>і</sub> – індикаторний ККД;  
 η<sub>м</sub> – механічний ККД;  
 η<sub>ν</sub> – коефіцієнт наповнення;  
 g<sub>е</sub> – ефективна питома витрата палива, кг/(кВт·год);  
 g<sub>і</sub> – індикаторна питома витрата палива, кг/(кВт·год);  
 n – частота обертання колінчастого валу, хв<sup>-1</sup>;  
 N<sub>е</sub> – ефективна потужність, кВт;  
 p<sub>е</sub> – середній ефективний тиск, Па;  
 p<sub>і</sub> – середній індикаторний тиск, Па.

## ВСТУП

Всі більш жорсткі вимоги до екологічності двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), що висуваються у провідних країнах світу, сприяють поступовому зниженню викидів двигунами всіх типів. Покращення показників, в тому числі й екологічних, сучасних ДВЗ досягається за кількома напрямками: модернізація систем паливоподачі та керування, використання більш ефективних систем наддуву, використання ДВЗ у складі гібридних силових установок, використання біопалив.

В Україні використання біопалив в дизельних ДВЗ наразі досить обмежене, зокрема, через законодавчі ініціативи. Більш широкому розповсюдженню біопалив заважає значна кількість застарілих ДВЗ на транспорті та в промисловості, обмеженість сировинної бази. Проте обидва цих фактора є тимчасовими, тому значне поширення біодизеля, за думкою ряду вчених, матиме місце вже в цьому десятилітті.

Експлуатація дизельних ДВЗ на біодизелі або на паливах із біодобавками має деякі особливості в робочому процесі. При цьому змінюються ефективні показники ДВЗ, навіть при невеликій кількості біодобавки.

Тому можна стверджувати, що визначення ефективності дизельного ДВЗ, що працює на біодизельних паливах різного складу, є актуальним питанням.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою даної роботи є визначення ефективності сучасних дизельних ДВЗ, які працюють на біодизельному паливі.

Для досягнення мети вирішувався ряд **завдань**:

- аналіз наукової та технічної літератури за темою дослідження, визначення властивостей біодизельних палив;
- аналіз особливостей конструкції об'єкта дослідження – дизельного



двигуна ЯМЗ-5340;

- визначення методик дослідження;
- тепловий розрахунок двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на дизельному паливі та на паливах із різним вмістом біодизеля;
- аналіз отриманих результатів.

**Об’єкт дослідження** – 4-тактний дизельний двигун ЯМЗ-5340 транспортного призначення.

**Предмет дослідження** – характер та величина впливу виду палива на техніко-економічні показники (ефективна потужність, ефективна витрата палива) 4-тактного дизеля.

**Наукова новизна роботи** полягає в наступному: знайдені квадратичні рівняння характеризують зміну ефективних потужності та витрати палива при експлуатації 4-тактних дизельних ДВЗ на біодизельному ріпаковому паливі за тиску та температури атмосферного повітря, притаманних різним регіонам України.

**Практична цінність роботи** полягає в наступному:

– розраховані в роботі значення величин  $H_u$ ,  $l_o$  і  $L_o$  для біодизеля МЕРО двох типів (з високим та низьким вмістом ерукової кислоти) двигуна ЯМЗ-5340 можна використовувати при розрахунках інших ДВЗ із запалюванням від стиснення;

– підвищення точності теплового розрахунку 4-тактних дизельних ДВЗ при їх роботі на біодизелі за допомогою комп’ютерної програми Engine Calculation;

– визначено характер та величину зміни ефективних показників двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на дизельному паливі та 2-х видів біодизеля МЕРО різного кислотного складу.

**Результати роботи апробовано на виробництві** – у транспортному цеху № 19 ПрАТ «Запорізький абразивний комбінат». Підприємством взято до впровадження використання біодизеля із високим вмістом ерукової кислоти для заміни дизельного палива для дизельних ДВЗ.

# 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМАТИКОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ

## 1.1 Перспективи використання біодизельних палив

Біодизель – це узагальнене назва ряду речовин, які можуть використовуватися як паливо в дизельних двигунах внутрішнього згорання (ДВЗ). В той час, як дизельне паливо (ДП) є продуктом переробки нафти, яка є скінченим ресурсом, біодизельні палива – це перспективна альтернатива ДП, оскільки відносяться до поновлювальних джерел енергії. Залежно від способу отримання, розрізняють три основних види біодизелю:

- Synfuel – переробка природного газу;
- Sunfuel – переробка органічної сировини (тирса, вугілля, інсектициди, продовольчі жири) при високій температурі (до 1600 °С);
- Biotroll – синтетичне паливо.

Сировинна база України дозволяє отримувати до 3,6 млн тон біодизелю за рік [1]. Для цього необхідно засівати відповідними культурами площу 65,5 тис. км<sup>2</sup>. В якості олійних культур для виробництва біодизелю в Україні отримали найбільшого поширення ріпак, в меншій мірі – соняшник. В інших країнах світу біодизель отримують з олії соєвих бобів та пальмової олії, мікроводоростей [2, 3]. З вказаних олій рядом способів отримують метилові (рідше етилові) естери жирних кислот [3]. В багатьох регіонах України, в тому числі і в Запорізькій області, вже працюють міні-заводи з виробництва біодизельного палива.

Біодизель може використовуватись як заміна ДП, так і в якості паливної добавки до ДП. Вміст біодизелю в ДП позначається буквою «В» і цифрою, наприклад, В20 – 20 % біодизелю, 80 % дизелю.

Найбільшого поширення біодизельне паливо отримало в країнах Західної Європи. Це знайшло відображення в нормативних документах стосовно палив для дизельних ДВЗ. Стандарти EN 14214, EN 590, DIN 51606

дозволяють наявність до 5 % добавки біодизелю до ДП. У Франції все товарне ДП має у складі добавку біопалива 5 % [4]. Велика кількість нових автомобілів у Європі, Америці та Азії ще заводом-виробником адаптовані до роботи на ДП з високим вмістом біопалива (паливо B20, B40, окремі виробники – до B100).

Перехід до використання таких палив вимагає заміни гумотехнічних виробів в системі живлення дизельних ДВЗ, оскільки вони швидко деградують під дією жирних кислот та спиртів – складових біопалива – на спеціальні матеріали класу KFM, що не реагують з біодизелем. Швидкий перехід з ДП на біодизель також може швидко засмітити паливні фільтри через високі миючі властивості біодизеля [5].

Окрім автотранспорту, біодизельне паливо використовується на тепловозах, авіації, в стаціонарних дизель-генераторах.

В Україні на даний час діє ДСТУ 7688:2015, згідно якого регулюється об'ємна частка метилових/етилових естерів жирних кислот (тобто власне добавка біопалива):

- для ДП марки B7 – від 5 % до 7 %;
- для ДП марки B5 – до 5 %;
- для ДП марки B0 – не дозволяється [5].

Вимоги до складу та властивостей біодизелю регулюються вимогами ДСТУ 6081:2009 «Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги», ДСТУ 7178:2010 «Паливо альтернативне. Естери етилові жирних кислот олій та жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги та методи контролювання», ДСТУ 8695:2016 «Паливо альтернативне для дизельних двигунів. Технічні вимоги» [2].

## 1.2 Властивості біодизельних палив

Залежно від виду сировини, з якої отримано біодизель, його характеристики можуть суттєво відрізнятися. Найбільш близькі до ДП за властивостями метилові та ізопропілові естери ріпакової та соєвої олій, метилові естери на основі пальмової олії суттєво відрізняються за властивостями [2, 6, 7].

В таблиці 1.1 наведено фізико-хімічні властивості ДП у порівнянні з ізопропіловим естером ріпакової олії (ІПЕРО) та метиловим естером ріпакової олії (МЕРО), які використовуються в Україні.

Таблиця 1.1 – Властивості ДП та біопалива [2]

Величина	Норматив для ДП згідно ДСТУ 7688:2015	Товарний ДП Євро-5 марки «Л»	ІПЕРО	МЕРО	Порівняння показника для ІПЕРО/ МЕРО відносно товарного ДП
1	2	3	4	5	6
Цетанове число	$\geq 51$	49	53	54	краще
Щільність при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	820...845	835	875	880	не відповідає
Масова частка поліциклічних ароматичних вуглеводнів, %	$\leq 8$	7	0	0	краще
Вміст сірки, мг/кг	$\leq 10$	8	4	3	краще
Зольність, % (мас.)	$\leq 0,005$	0,004	0,004	0,003	краще

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
Температура спалаху у закритому тиглі, °С	$\geq 55$	58	62	59	краще
Змашувальна здатність: діаметр плями зносу за температури 60 °С, мкм	$\leq 460$	450	420	430	краще
Кінематична в'язкість при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	2,0...4,5	3,7	12,1	5,6	не відповідає
Гранична температура фільтрованості, °С	$\leq -5$	-10	-3	-8	відповідає/ не відповідає

З таблиці 1.1 видно, що за більшістю показників «чисті» ІПЕРО та МЕРО відповідають умовам ДСТУ 7688:2015 для дизельного палива. Невідповідність щільності та в'язкості може викликати проблеми з прокачуванням палива в паливній системі двигуна. Збільшена температура границі фільтрованості може викликати проблеми в холодний період експлуатації. Тому доцільно ІПЕРО та МЕРО використовувати в якості біодобавок до ДП.

В роботі [2] розглянуто та обґрунтовано оптимальний склад двох паливних сумішей:

- 93 % дизельного палива і 7 % ІПЕРО;
- 93 % дизельного палива і 7 % МЕРО.

Фізико-хімічні властивості вказаних суміші повністю відповідають

вимогам ДСТУ 7688:2015. Дані суміші готуються дуже просто – механічним перемішуванням протягом 10 хв. Після цього паливні суміші не розшаровуються.

Нижча теплота згорання біодизеля менша за теплоту згорання ДП та складає, залежно від складу та походження:

- 31 МДж/кг [8];
- 39,6 МДж/кг для МЕРО з низьким вмістом ерукової кислоти [27];
- 38,3 МДж/кг для метилового естеру масла *Jatropha* [9];

### **1.3 Вплив складу палива на показники роботи дизельних ДВЗ**

З літератури відомо, що властивості біодизеля, отриманого з різної сировини, суттєво відрізняються. Як вже було сказано, для України актуальним є отримання біодизеля з ріпаку, соняшника, відходів різних жирів. В країнах світу більш поширений біодизель з сої, пальмової олії. Тому при пошуку наукової інформації варто приділяти значну увагу способу отримання біопалива.

В переважній кількості наукових робіт, що стосуються визначення впливу складу палива на показники роботи дизельних ДВЗ, надаються результати для паливних сумішей «дизельне паливо – біодобавка», де вміст біодобавки 5 %, 7 %, 20 %, або для 100 % біодизеля. Саме такі значення обґрунтовуються державними стандартами на паливні суміші для дизельних двигунів [10, 11].

З аналізу літературних джерел [12, 13] встановлено, що закордонні вчені провели багато порівняльних випробувань дизелів на дизельному паливі і біодизельному паливі. Основним результатом цих досліджень є те, що біодизельне паливо (та біодобавки) можна використовувати як заміну (або, відповідно, доповнення) для ДП. Проте водночас зазначається значна

відмінність в окремих фізико-хімічних показниках, що впливають на робочий процес та ефективність ДВЗ.

Кисень (~10 %) у молекулі метилового ефіру діє за наступними напрямками. Наявність окислювача безпосередньо в молекулі палива допомагає інтенсифікувати процес згорання і забезпечує більш високу температуру в циліндрі дизеля, що, з одного боку, сприяє підвищенню індикаторного й ефективного ККД двигуна, а з іншого – призводить до деякого збільшення оксиду азоту  $\text{NO}_x$  у відпрацьованих газах. Менша частка вуглецю (~77 %) у молекулі біодизельного палива призводить до зменшення його нижчої теплоти згорання на 13...15 % і збільшення годинної та питомої ефективної витрат палива. Для збереження номінальних параметрів двигуна при переведенні на біодизельне паливо треба змінювати регулювання паливної апаратури (упор рейки паливного насоса високого тиску встановлюють на збільшення циклової подачі палива) [12].

В роботі [14] наведено результати випробувань дизельного двигуна VAG 1.9 TDI 1Z легкового автомобіля Volkswagen Passat B4, на роликовому стенді при роботі на паливі наступного складу: 80 % ДП, 20 % метилових естерів жирних кислот (МЕЖК), отриманих з утилізованих відходів продовольчих жирів (рисунок 1.1).

За роботи дизеля на біопаливі спостерігається збільшення годинної витрати палива до 8 %, в порівнянні з витратою за роботи на дизельному паливі. За роботи дизеля на біопаливі спостерігається зменшення концентрації оксидів азоту на 3,28...9,62 % та димності відпрацьованих газів 4,35...22,28 %, в порівнянні з роботою на ДП. Однак, спостерігається збільшення концентрації оксиду вуглецю на 5,5... 13 % та концентрації вуглеводнів на 3...13,2% [14].

В роботі [9] наведено порівняльні результати експериментальних досліджень ефективних показників роботи двигуна Lister-Petter AC1 на дизельному паливі, на 20% і на 100 % метиловому естері масла *Jatropha* (J20 і J100 відповідно) (рисунок 1.2).

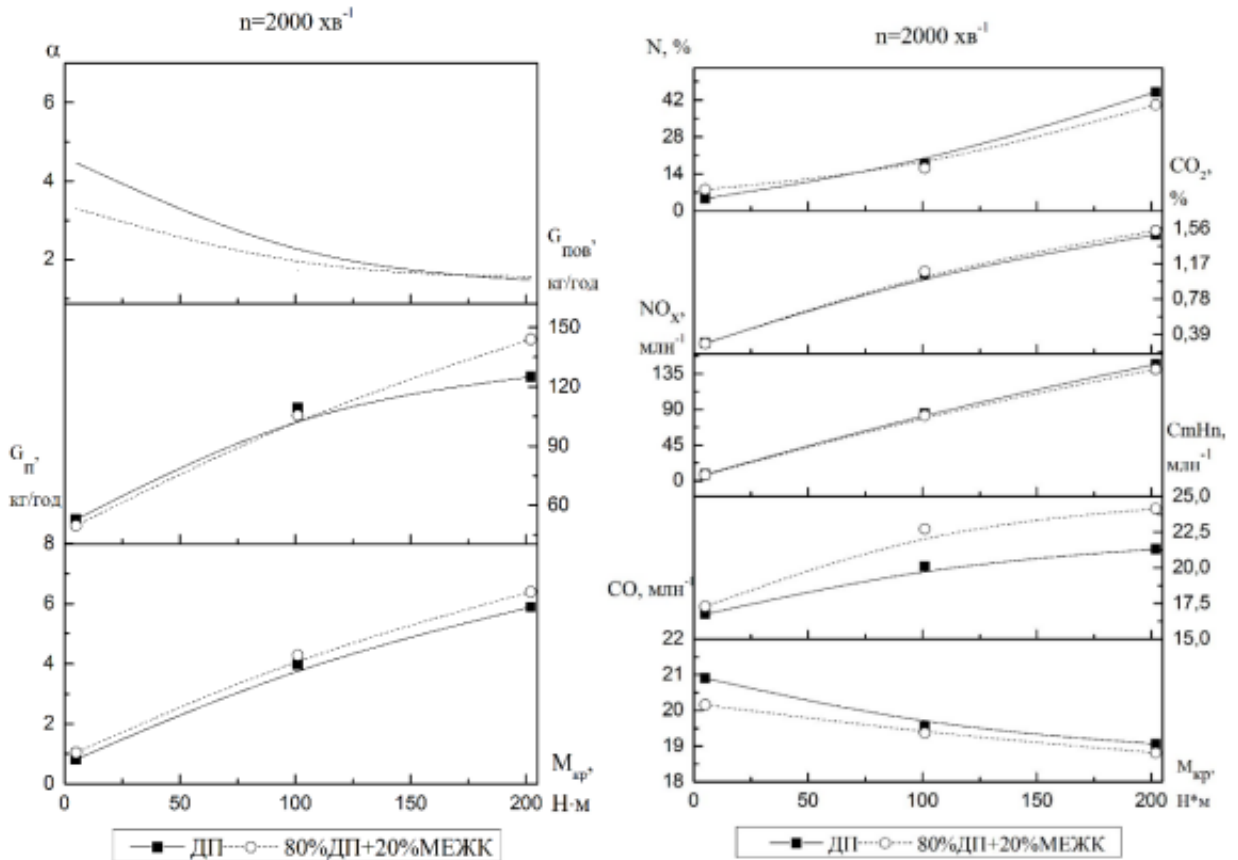


Рисунок 1.1 – Паливно-економічні та екологічні показники дизеля VAG 1.9 TDI 1Z при роботі на ДП та на паливній суміші 80 % ДП+20 % МЕЖК [14]

При роботі на паливі J100 після роботи на ДП спостерігалась зміна показників паливоподачі:

- початок впорскування більш ранній на 3 °ПКВ;
- час впорскування збільшився на 5 °ПКВ;
- початок згорання більш ранній на 3 °ПКВ;
- час згорання палива збільшився на 7 °ПКВ.

Більш високі значення об'ємного модулю розширення біодизеля і, як наслідок, швидкості розповсюдження хвиль тиску призводять до збільшення тиску і випередження впорскування біодизеля в порівнянні з дизельним паливом. Збільшенню тиску біодизеля також сприяє зменшення витоків через зазор плунжер-втулка паливного насоса, викликане підвищеною в'язкістю біодизеля.



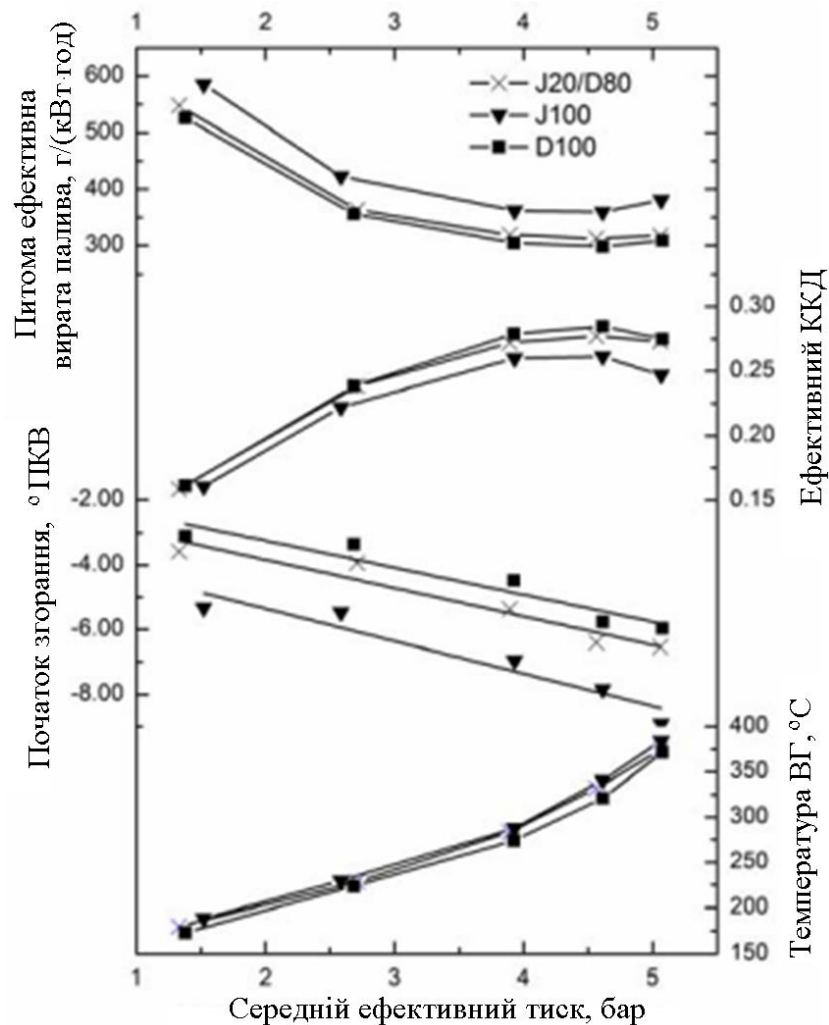


Рисунок 1.2 – Паливно-економічні та екологічні показники дизеля Lister-Petter AC1 при роботі на ДП, та на паливних сумішах J20 і J100 при  $3600 \text{ хв}^{-1}$  [9]

В результаті переході від ДП до палива J100 збільшився максимальний тиск за цикл з 7,41 МПа до 7,67 МПа. Швидкість наростання тиску зменшилась з 0,67 МПа/град до 0,51 МПа/град.

Рисунок 1.2 ілюструє зміну ефективних показників двигуна при номінальній частоті обертання. Питома ефективна витрата біодизеля J100 і суміші J20/D80 вище витрати дизельного палива на всіх навантаженнях. При цьому збільшення витрат J20/D80 пропорційно його складу. Питомий ефективний ККД зменшується від D100 до J100, але зберігає при цьому пропорційність для J20/D80 [9].

Згорання біодизеля починається раніше при всіх значеннях навантаження. Однак незважаючи на це, температура відпрацьованих газів

вище для біодизеля. Підвищена температура відпрацьованих газів – це результат збільшеної витрати біодизеля, необхідного для забезпечення тієї ж потужності, що і при згорянні дизельного палива. Про збільшення циклової подачі біодизеля свідчить також збільшення його тиску і тривалості впорскування [9].

Ретельний аналіз даних [9] показує, що тільки 10 % збільшеної на 20 % витрати J100 може бути пояснено меншою на 10 % нижчою теплотою згорання біодизеля. Залишок слід віднести на рахунок погіршення ефективного ККД двигуна.

Зростання ефективного ККД можна отримати затримкою часу згорання, чого можна домогтися введенням до складу палива добавки з низьким метановим числом, наприклад, бутанолу (метанове число 25, нижча теплота згорання 33,08 МДж/кг) [9].

Наведені результати стосуються біодизельного палива, отриманого з масла *Jatropha* та з відходів продуктових жирів. Актуальним питанням є визначення визначення ефективності дизельного ДВЗ, що працює на біодизелі, отриманому з ріпаку, а також на паливних сумішах «ДП–біодизель» в різних пропорціях.

#### **1.4 Висновки за розділом**

1. З аналізу літературних джерел, порівняння властивостей ДП та біодизелю визначено переваги, в тому числі екологічні, від використання останнього [2, 5, 10–12, 15–17]:

- міжремонтний термін експлуатації двигуна зростає на 50 %;
- краще змащування біодизеля сприяє збільшенню строку служби паливних форсунок;
- більше цетанове число біодизелю (51..54 одиниць, порівняно з 49...51

у ДП), що покращує запуск двигуна, знижує рівень шуму і димність при роботі двигуна;

- висока температура спалаху робить біодизель одним з найбільш пожежобезпечних видів палива;

- зменшення викидів CO до 10...12 %, вуглеводнів до 10...35 %, сірки до 100 %, твердих часток та сажі – до 20...60 %.

- позитивний вуглецевий баланс в природі;

- біодизель, потряпляючи в ґрунти та ґрунтові води, швидко розкладається (90 % розпадається за 21 день, 99 % – за 28 днів)

2. Визначено недоліки біодизелю:

- метанол в складі біодизелю викликає руйнування гумових виробів;

- малий строк зберігання біодизелю (не більше 3 місяців);

- висока температура загустіння, внаслідок чого для палив з високим вмістом % біодизеля необхідно підігрівати паливний бак та паливопроводи;

- нерівномірність властивостей біодизелю від його складу та сировини, з якої його отримано;

- збільшення викидів NO<sub>x</sub>;

- недостатня наукова вивченість використання біодизелю, впливу біодизелю на ефективність роботи ДВЗ.

3. Оскільки виробництво та споживання біодизельного палива в Україні в наступні роки буде тільки зростати, а кількість ДВЗ, що їх використовує, також, є актуальним питання дослідження впливу ефективності сучасного дизельного ДВЗ, що працює на біодизельних паливах різного складу. Для проведення досліджень треба застосовувати адаптовані математичні моделі та сучасні розрахункові програми циклу ДВЗ.

## 2 ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Технічна характеристика двигуна ЯМЗ-5340

Двигуни серії ЯМЗ-534 розроблені на Ярославському моторному заводі за участю компанії AVL List. Екологічні характеристики серії відповідають Євро-4, з перспективою підвищення до Євро-6. Сфера застосування двигунів ЯМЗ-534 досить обширна. Завод випускає більше 25 модифікацій двигуна, які використовуються як силовий агрегат для автотранспортної техніки, що пересувається як по дорогах загального користування, так і для армійської техніки у позашляховому виконанні, як промислові мотори для приводу насосних установок і компресорних станцій, в дизельних електростанціях, як судновий дизель, двигун для дорожньої і екскаваторної техніки [18].

Залежно від модифікації розрізняються технічні характеристики двигунів ЯМЗ-534, зокрема, потужність від 100 кВт до 158 кВт.

Всі двигуни серії ЯМЗ-534 мають турбонаддув, однаковий робочий об'єм 4,43 л, розмірність  $S/D = 128/105$  мм.

На додаток до турбонаддуву дизель ЯМЗ-534 отримав охолоджувач наддувочного повітря, що встановлюється безпосередньо на виробі, в якому застосовується силовий агрегат. Збільшену енергію впорскування в камеру згоряння забезпечує паливна апаратура типу Common Rail від компанії Bosch. Включення приводу крильчатки вентилятора забезпечує спеціальна муфта [18].

Електронний блок управління (ЕБУ) двигунів ЯМЗ-534 обладнаний сучасною захистом від перевищення максимальної частоти обертів (щоб двигун не йшов «в рознос») і температури охолоджуючої рідини, зниження мінімального допустимого тиску в масляній магістралі. У разі фіксації аварійної ситуації останов двигуна відбувається в автоматичному режимі.

В таблиці 2.1 наведено характеристики двигуна базової модифікації ЯМЗ-5340. На рисунку 2.1 показана швидкісна характеристика двигуна.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика двигуна ЯМЗ-5340 [19, 22, 24]

Показник і розмірність	Величина
Число і розташування циліндрів	4, рядне
Діаметр циліндра, мм	105
Хід поршня, мм	128
Робочий об'єм циліндрів, л	4,43
Потужність, кВт (к.с.)	140 (190)
Частота обертання, хв <sup>-1</sup>	2300±25
Максимальний крутний момент, Н·м	710
Крутний момент при частоті обертання 1000 хв <sup>-1</sup> , Н·м	470
Частота обертання, хв <sup>-1</sup> – при макс. крутному моменті – мінімальна – максимальна	1300...1600 700±50 2650
питома витрата палива, г/(кВт·год) – мінімальна, при частоті обертання 1300 хв <sup>-1</sup> – при номінальній потужності	197 <sup>+5%</sup> 213,5 <sup>+5%</sup>
Годинна витрата палива при номінальній потужності, кг/год, не більше	31
Маса, кг	480
Ресурс, тис. км	1000
Використання	Вантажні автомобілі, самосвали, тягачі МАЗ 4х2, 4х4, 6х2, 6х4 масою до 12 т, автопоїзди до 21 т
Умови експлуатації	від –60 °С до +50 °С, до 4500 м над рівнем моря

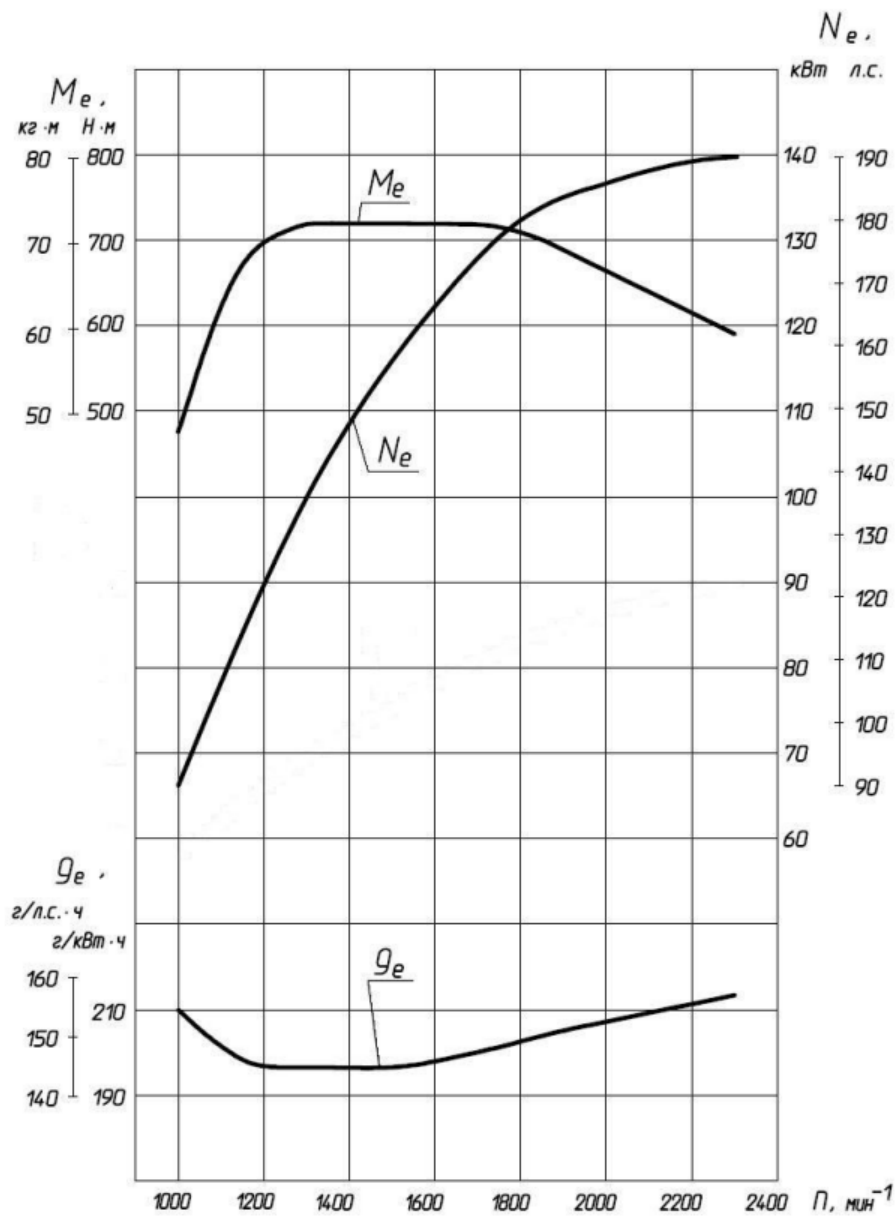
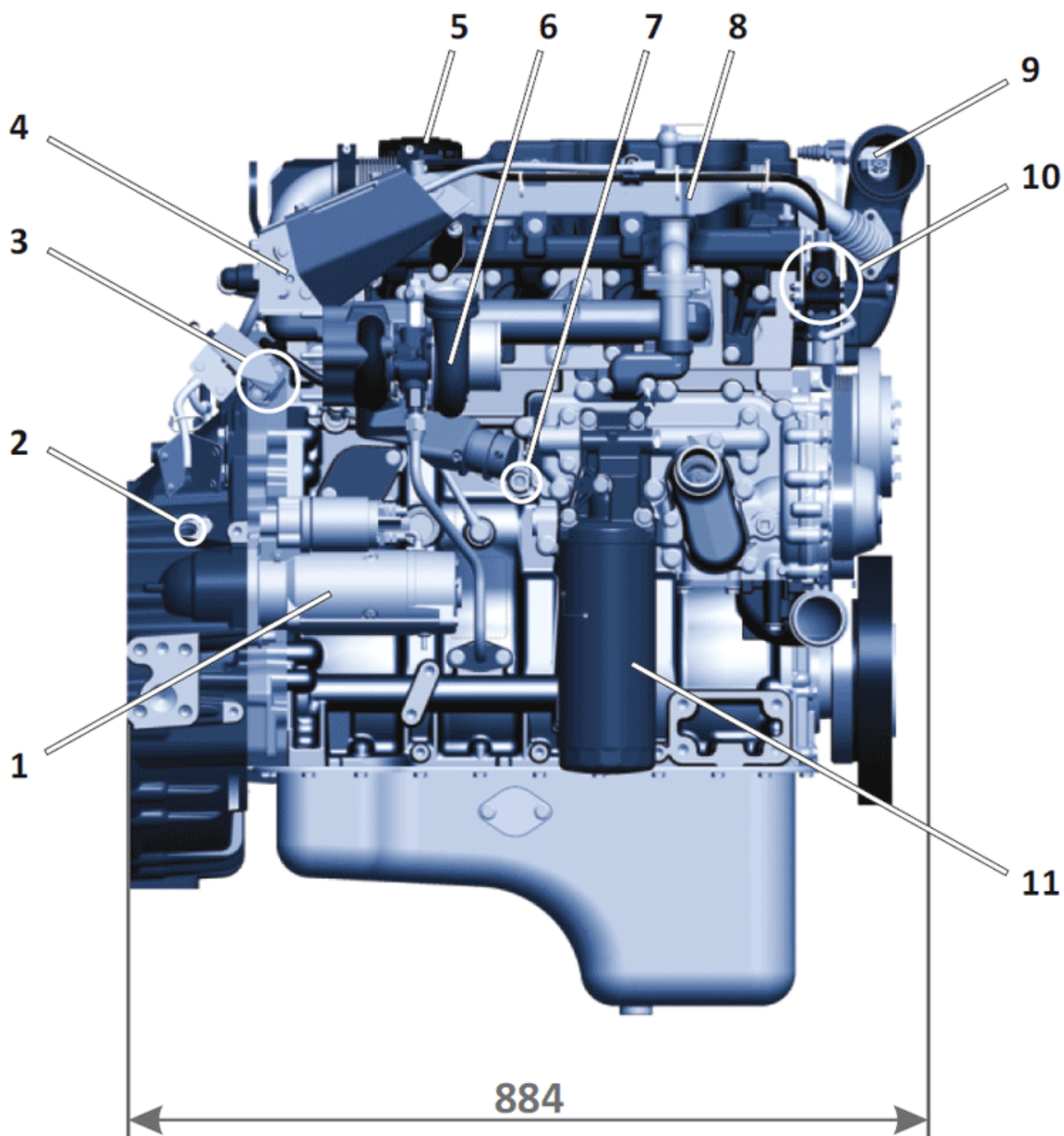


Рисунок 2.1 – Швидкісна характеристика двигуна ЯМЗ-5340 [19]

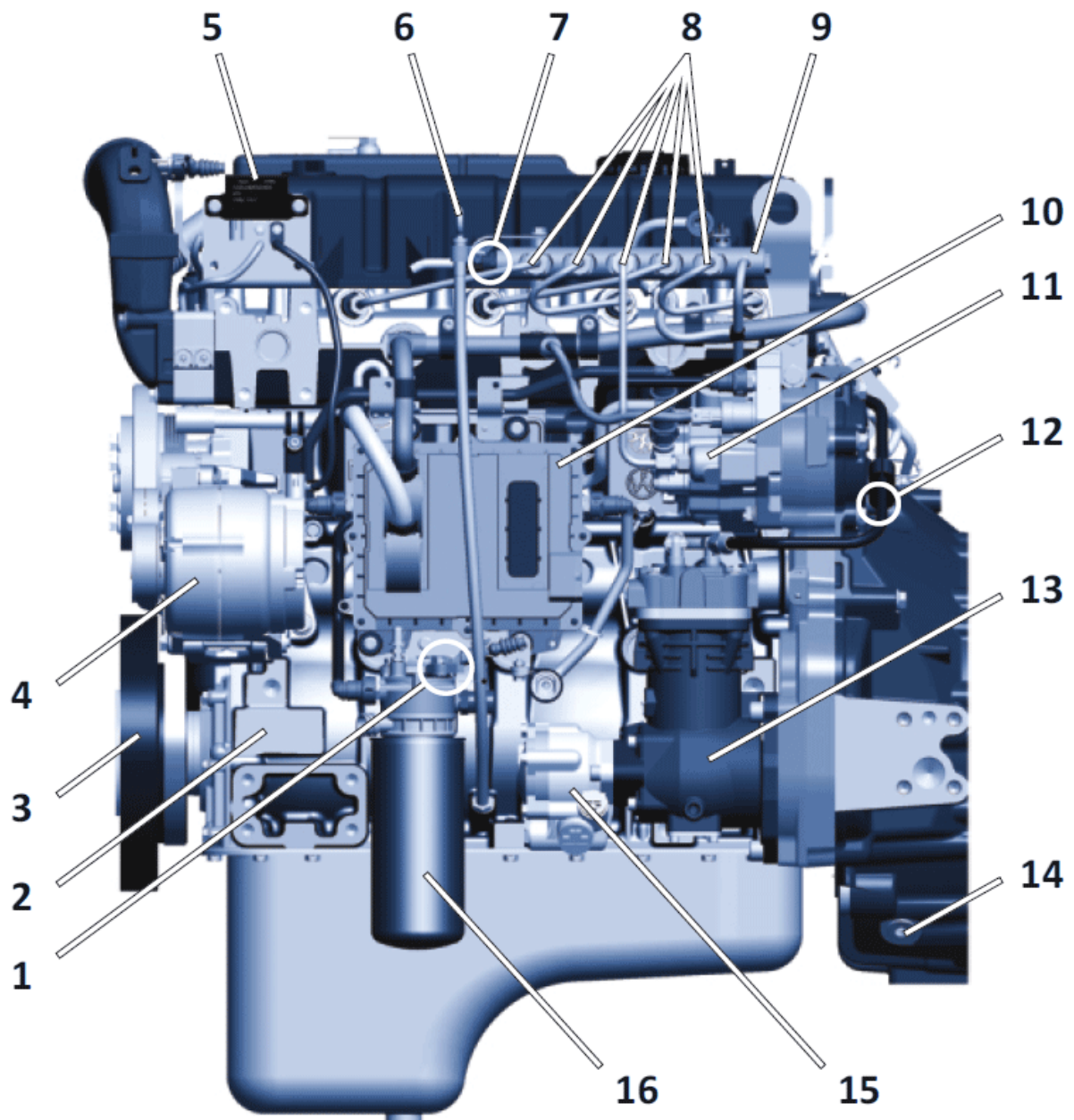
## 2.2 Конструкція двигуна ЯМЗ-5340

Двигун ЯМЗ-534 (рис. 2.2–2.4) має чотири циліндри, розташованих рядно-вертикально, з робочим об'ємом кожної камери згоряння  $1018 \text{ см}^3$ . Принцип роботи чотиритактний, порядок роботи циліндрів 1–3–4–2, вприскування безпосереднє, ступінь стиснення  $\epsilon = 17,5$ .



1 – стартер; 2 – датчик частоти обертання колінчастого вала;  
 3 – датчик тиску і температури масла; 4 – управління заслінкою рециркуляції відпрацьованих газів EGR; 5 – система вентиляції картера; 6 – турбокомпресор;  
 7 – датчик температури охолоджуючої рідини; 8 – система рециркуляція відпрацьованих газів EGR; 9 – датчик тиску і температури наддувочного повітря; 10 – пневмоклапан управління заслінкою EGR; 11 – фільтр масляний.

Рисунок 2.2 – Схема розташування вузлів двигуна ЯМЗ-534. Вид зліва [20]



1 – датчик тиску і температури палива; 2 – місце установки заводської таблички; 3 – гаситель крутильних коливань; 4 – генератор; 5 – реле передпускового підігрівача; 6 – показчик рівня масла; 7 – датчик тиску палива в рампі; 8 – паливні трубки високого тиску; 9 – рампа; 10 – електронний блок управління; 11 – насос паливний високого тиску; 12 – датчик частоти обертання розподільного вала; 13 – компресор пневмогальм; 14 – оглядового люк механізму провороту колінчастого вала; 15 – насос гідропідсилювача керма; 16 – фільтр тонкого очищення палива

Рисунок 2.3 – Схема розташування вузлів двигуна ЯМЗ-534. Вид справа [20]



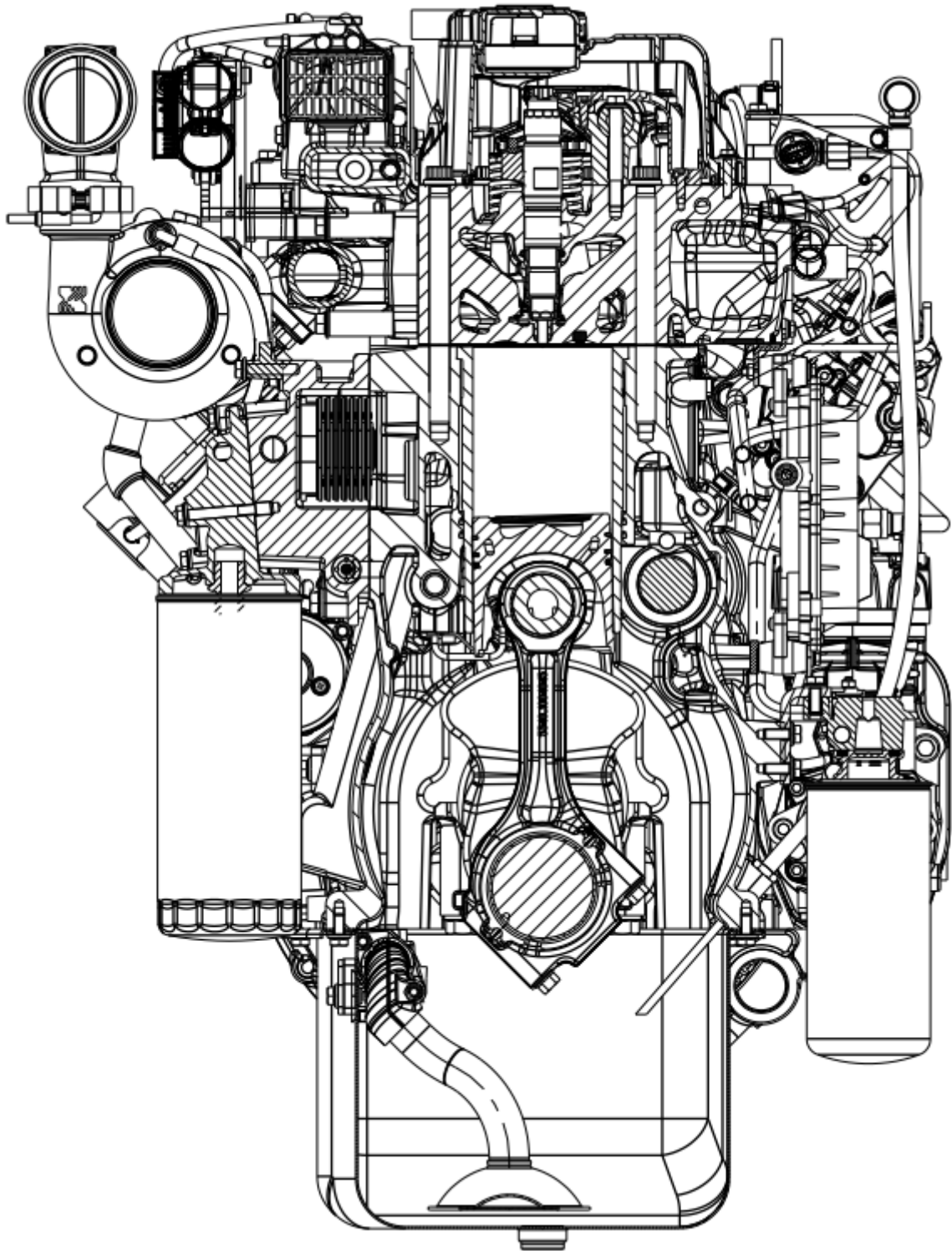


Рисунок 2.4 – Поперечний розріз двигуна ЯМЗ-534 [19]

Блок циліндрів литий з сірого чавуну. Циліндри розташовані в один ряд. Головка блоку циліндрів загальна для всіх циліндрів. Циліндро-поршнева група (ЦПГ) «мокрого типу» з чавунною гільзою. Поршень із силуміну (сплав алюмінію з кремнієм), має 3 канавки для поршневих кілець. Поршнева група

кріпиться до сталюого шатуна двухтаврового перетину, із спеціальною бронзовою вставкою, за допомогою пальця «плаваючого типу» з двома стопорними кільцями. Поршневий палець сталюий, пустотілий, з цементованою поверхнею. Інша сторона шатуна кріпиться за допомогою двох болтових з'єднань до шатунної шийки колінчастого валу через вкладиші (підшипники ковзання сталеві з бронзовим робочим шаром).

Колінчастий вал виготовлений методом кування, має п'ять опорних точок і противаги. Шийки колінчастого валу азотовані.

Механізм газорозподілу верхньоклапанний з нижнім розташуванням розподільчого валу і приводом клапанів через штовхачі, штанги, коромисла і траверси. Розподільчий вал виготовлений із конструкційної сталі, кулачки та опорні поверхні загартовані на високу твердість. Розподільчий вал має шестеренний привід.

Картер маховика відлитий окремо від блоку. Маховик сталевий з окремим зубчастим вінцем (використовується для стартерного пуску двигуна) [18, 20].

Шестеренний привід агрегатів розташований з боку маховика і забезпечує низький рівень крутильних коливань і шуму не більше 93 дБ(А).

Блок циліндрів, головка циліндрів, колінчастий вал, шатун, підшипники розраховані на тиск згоряння 21 МПа.

Двигун ЯМЗ-534 має водяну систему охолодження і масляну систему змащення змішаного типу (під тиском і методом розбризкування), водяний і масляний радіатор встановлені окремо від двигуна. Системи охолодження і мащення спроектовані з умови забезпечення 40 кВт/л і мають високий потенціал подальшого форсування [20]. Моторне масло SAE 15W-40, клас API не нижче CI-4 [19].

### 2.3 Системи керування та живлення двигуна

Система управління складається з мікропроцесорного електронного блоку управління EDC7UC31, пристрою комутації і датчиків [19, 20]:

- датчик частоти обертання;
- датчик фази;
- датчик тиску палива;
- датчик температури палива;
- датчик температури наддувочного повітря;
- датчик тиску наддувочного повітря;
- датчик температури охолоджуючої рідини;
- датчик тиску масла.

Система паливоподачі акумуляторного типу (ECRS) виробництва фірми Robert Bosch. Система забезпечує тиск впорскування 180 МПа, включає в себе [19, 20]:

- трьохплунжерний насос високого тиску блочного типу з шестеренчастим приводом і модулем дозування;
- паливопровід-накопичувач (рампа) трубчатого типу, з вбудованим датчиком тиску палива;
- форсунки закритого типу, з багатоструйним розпилюванням, з вбудованим швидкохідним електромагнітним клапаном;
- фільтр-відстійник з вбудованим ручним паливопідкачуючим насосом, вологовідділителем, змінним фільтруючим елементом;
- фільтр тонкої очистки палива повнопоточний, зі змінним фільтром.

Система подачі повітря двигуна складається з воздухоочисника, турбокомпресора, охолоджувача наддувочного повітря типу «повітря-повітря», системи рециркуляції відпрацьованих газів EGR, замкнутої системи вентиляції картера двигуна. Турбокомпресор BorgWarner S200G з радіальною відцентровою турбіною і відцентровим компресором, оснащений перепускним

клапаном.

Температура стиснутого повітря після турбокомпресора може сягати 170...180 °С. Охолоджувач наддувочного повітря служить для зниження температури повітря до величини не більше 60 °С і збільшення його щільності.

В якості палива для двигуна ЯМЗ-5340 рекомендується дизельне паливо виду II, III згідно ГОСТ Р 52368-2005 [21] зі зниженим вмістом сірки не більше 50 мг/кг – відповідає дизельному паливу Євро-4 згідно ДСТУ 7688:2015 [5].

Для досягнення екологічного рівня Євро-4 застосована система EGR і каталітичний нейтралізатор зі змінним фільтром. Завдяки системі EGR в циліндри повертається до 20 % відпрацьованих газів. Гази охолоджуються в радіаторі відпрацьованих газів до температури 100...240 °С. Закрита система вентиляції картерних газів інтегрована в кришці головки циліндрів. Не потребує обслуговування [19].

#### **2.4 Основні положення методик дослідження**

Для дослідження впливу біодизельних паливах різного складу та біодобавок до ДП на ефективність дизельного ДВЗ в роботі використано розрахункову методику. В її основі лежить тепловий розрахунок термодинамічного циклу ДВЗ, заснований на фізико-математичній моделі другого рівня [25, 26]. У програмі процеси впуску та випуску подано у спрощеному вигляді, проте це не стосується процесів стиснення та розширення, які досліджуються в даній роботі, тому це є прийнятним.

Розрахунок виконується із використанням персонального комп'ютера, у програмі Engine Calculation. У віконному режимі (див. рис 2.5) до програми вводиться ряд даних, в тому числі щодо обраного типу палива (див. рис 2.6), результатом розрахунків є протокол зміни кута ПКВ, об'єму, тиску, температури, маси робочого тіла в циліндрі, а також індикаторних показників

від одного циліндра. За індикаторними показниками одного циліндра за допомогою відомих формул з теорії ДВЗ [25] можна зйти ефективні показники всього двигуна.

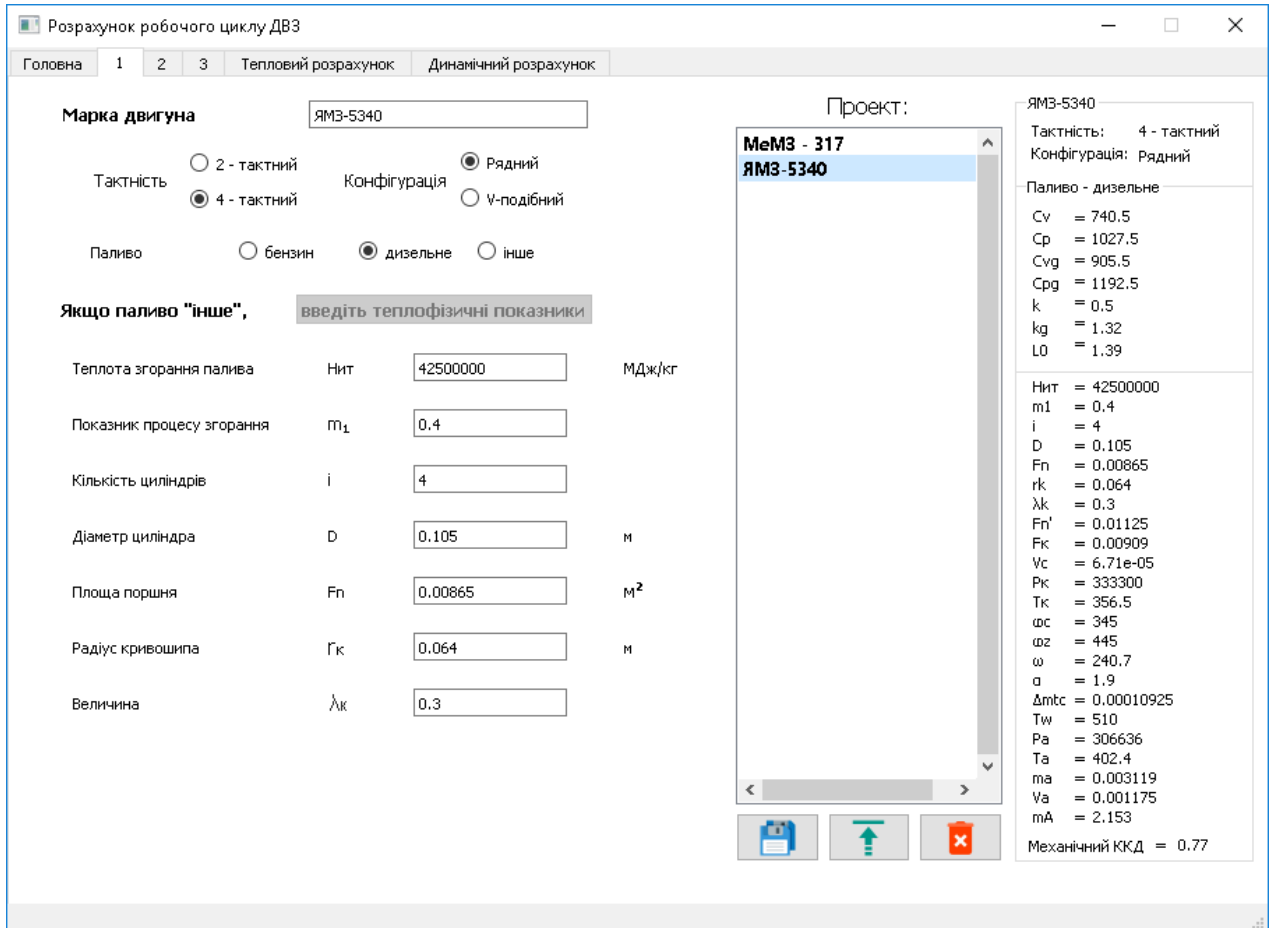


Рисунок 2.5 – Вікно комп'ютерної програми Engine Calculation

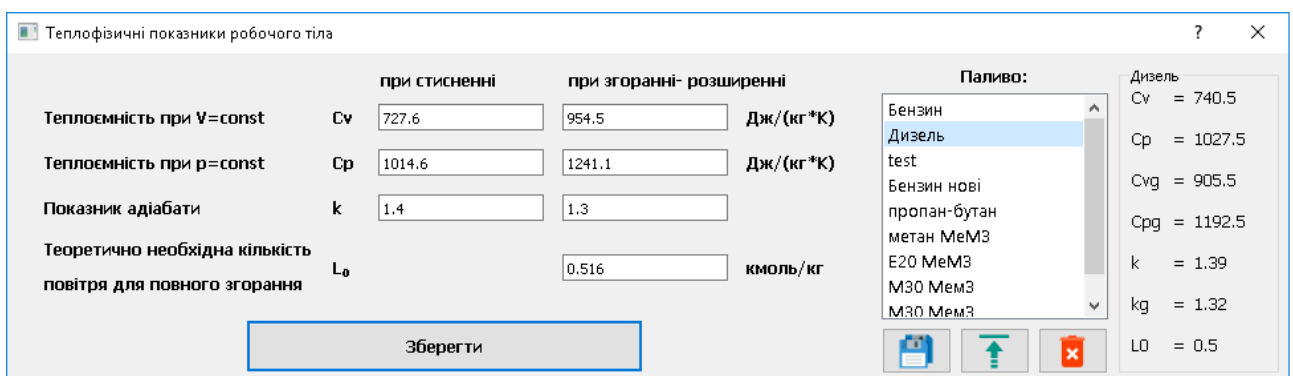


Рисунок 2.6 – Вікно вибору характеристик палива комп'ютерної програми Engine Calculation

В програмі Engine Calculation для різних типів ДВЗ можна вибрати з кількох видів палива або задавати фізик-хімічні показники для бажаного палива. Проте для біопалив не представлено жодних величин, тому їх необхідно знайти.

Результати обчислень теплових розрахунків в роботі представлені у вигляді протоколів, таблиць, порівняльних графіків. В останньому випадку для знаходження математичних функцій використовуються елементи регресійного аналізу. Використовуються стандартні методики [35–37].

## **2.5 Висновки за розділом**

1. Відповідно до теми роботи «Визначення ефективності дизельного ДВЗ, що працює на біодизельних паливах різного складу» за об'єкт дослідження обрано сучасний дизельний двигун ЯМЗ-5340, розглянуто його характеристики та особливості конструкції.

2. Розкрито основні положення методики, за допомогою якої можна дослідити питання впливу палива на ефективність дизеля.

### 3 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ЯМЗ-5340 НА НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ

#### 3.1 Підготовка даних для розрахунку

Тепловий розрахунок двигуна виконуємо за методикою, описаною у розділі 2.4 [25, 26]. Початкові дані для розрахунку отримано з розділів 2.1–2.3. Спочатку виконуємо попередні розрахунки, щоб перевірити основні розміри циліндра, необхідні при використанні прийнятої ФММ.

Виконуємо оцінку очікуваної величини середнього ефективного тиску  $p_e = 1,65$  МПа залежно від тиску наддуву  $p_k$ , температури наддувочного повітря  $T_k$  і типу двигуна. Далі розраховуємо робочий об'єм одного циліндра

$$V_h = \frac{N_e}{i \cdot p_e} \cdot \frac{\tau}{n}, \quad (3.1)$$

$$V_h = \frac{140 \cdot 10^3}{4 \cdot 1,65 \cdot 10^6} \cdot \frac{2 \cdot 60}{2300} = 1,1067 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Діаметр циліндра

$$D = \sqrt[3]{\frac{4V_h}{\pi \cdot \frac{S}{D}}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,0011067}{3,14 \cdot 1,219}} = 0,105 \text{ м}. \quad (3.2)$$

Величину  $S/D = 1,219$  визначено з даних двигуна ЯМЗ-5340.

У двигуна ЯМЗ-5340  $D = 0,105 \text{ м} = 105 \text{ мм}$ .

Хід поршня

$$S = D \cdot \frac{S}{D} = 0,105 \cdot 1,219 = 0,128 \text{ м}. \quad (3.3)$$

У двигуна ЯМЗ-5340  $S = 0,128 \text{ м} = 128 \text{ мм}$ .

Радіус кривошипа

$$r_k = \frac{S}{2} = \frac{0,128}{2} = 0,064 \text{ м}. \quad (3.4)$$

Уточнюємо робочий об'єм циліндра

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} S, \quad (3.5)$$

$$V_h = \frac{3.14 \cdot 0,105^2}{4} 0,128 = 1,1078 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Розраховуємо літраж двигуна

$$V_h = i \cdot V_h = 4 \cdot 1,1078 \cdot 10^{-3} = 0,00443 \text{ м}^3 = 4,43 \text{ л}. \quad (3.6)$$

Далі розраховуємо усі величини, які являються початковими при використанні ФММ, заносимо їх до таблиці 3.1.

Тактність – 4-тактний.

Паливо – дизельне.

1. Теплота згорання палива  $H_{uT} = 42,5 \text{ МДж/кг}$ .

2. Показник процесу згорання вибирають на основі рекомендацій за емпіричними даними для дизельних ДВЗ  $m_1 = -0,3 \dots +0,7$ . Приймається  $m_1 = 0,4$ .

3. Кількість циліндрів: 4.

4. Компоновка циліндрів: рядний.

5. Діаметр циліндра  $D = 0,105 \text{ м}$ .

6. Площа поршня є площею плоскої поверхні поршня, перпендикулярної осі циліндра, вона дорівнює



$$F_{\pi} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{3.14}{4} 0.105^2 = 8,65 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (3.7)$$

7. Радіус кривошипа  $r_k = 0,064$  м.

8. Відношення радіусу кривошипа до довжини шатуна  $\lambda_k = \frac{r_k}{L_{\text{ш}}}$  є конструктивним параметром, що характеризує геометрію кривошипно-шатунового механізму. Величину  $\lambda_k$  вибирають за практичними рекомендаціями – для автотракторних ДВЗ  $\lambda_k = 0,25 \dots 0,32$  [25]. За рисунком 2.3 приймаємо  $\lambda_k = 0,3$ .

Тоді довжина шатуна

$$L_{\text{ш}} = \frac{r_k}{\lambda_k} = \frac{0,064}{0,3} = 0,213 \text{ м}. \quad (3.8)$$

9. Площа теплообміну поршня  $F_{\pi}'$  залежить від конфігурації днища. Оскільки днище дизельних ДВЗ має складну конфігурацію, то  $F_{\pi}' = (1,0 \dots 1,5) \cdot F_{\pi}$  [25]. З оглядом на конструкцію камери згорання двигуна ЯМЗ-5340 приймаємо:

$$F_{\pi}' = 1,3 \cdot F_{\pi} = 1,33 \cdot 0,00865 = 11,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (3.9)$$

10. Площа теплообміну кришки  $F_k$  залежить від конструкції камери стиснення. У дизельних ДВЗ має місце співвідношення  $F_k = (1,0 \dots 1,5) \cdot F_{\pi}$  [25]. З оглядом на конструкцію камери згорання двигуна ЯМЗ-5340 приймаємо:

$$F_k = 1,05 \cdot F_{\pi} = 1,05 \cdot 0,00865 = 9,09 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (3.10)$$

11. Об'єм камери стиснення розраховуємо за співвідношенням

$$V_c = \frac{\pi}{2} D^2 \cdot r_k \cdot \frac{1}{\varepsilon - 1}, \quad (3.11)$$

$$V_c = \frac{3.14}{2} 0.105^2 \cdot 0.064 \cdot \frac{1}{17.5 - 1} = 67,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

12. Двигун оснащено турбокомпресором, ступінь підвищення тиску в компресорі  $\pi_k = 3,3$ , тоді тиск наддуву

$$p_k = p_o \cdot \pi_k = 101 \cdot 3,1 = 313,1 \text{ кПа}. \quad (3.12)$$

13. Температура повітря на вході в двигун залежить від тиску наддуву і охолодження наддуву повітря. Спочатку розраховуємо температуру на виході з компресора:

$$T'_k = T_o \left( 1 + \frac{\pi_k^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1}{\eta_{\text{к ад}}} \right) = 293 \left( 1 + \frac{3,1^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1}{0,75} \right) = 442,1 \text{ К}, \quad (3.13)$$

де  $\kappa = 1,40$  – показник адіабати для повітря;

$\eta_{\text{к ад}}$  – адіабатний ККД компресора, який залежить від типу і розмірів компресора. Для турбокомпресора BorgWarner S200G  $\eta_{\text{к ад}} = 0,75$  [23].

При високих значеннях  $\pi_k$  (особливо при  $\pi_k > 2$ ) після компресора встановлюють охолоджувач, в якому знижується температура наддувочного повітря, при цьому температура на вході ДВЗ:

$$T_k = T_o + \sigma(T'_k - T_o) = 293 + 0,4 \cdot (442,1 - 293) = 352,6 \text{ К}, \quad (3.14)$$

де  $\sigma$  – ступінь охолодження в охолоджувачі, величина  $\sigma$  залежить від конструкції і розмірів охолоджувача. Приймаємо  $\sigma = 0,4$ .

14. Кут початку згорання  $\varphi_c$  у дизельних ДВЗ залежить від кута випередження впорскування  $\Delta\varphi_{\text{оп}}$  і періоду затримки займання палива  $\Delta\varphi_i$

$$\varphi_c = 360 - \Delta\varphi_{оп} + \Delta\varphi_i = 360 - 17 + 10 = 353^\circ \text{ п.к.в.}, \quad (3.15)$$

де  $\Delta\varphi_{оп} = 10...25^\circ$  – величина, яка залежить від швидкохідності двигуна, розмірів і типу камери згорання [25];

$\Delta\varphi_i = 8...12^\circ$  – величина, яка залежить в основному від сорту палива (цетанового числа) і умов в циліндрі в кінці стиснення ( $p_c, T_c$ ).

15. Кут кінця згорання пов'язаний з кутовою тривалістю згорання  $\Delta\varphi_{сг}$ , яка визначається в залежності від типу двигуна

$$\varphi_z = \varphi_c + \Delta\varphi_{сг} = 353 + 90 = 443^\circ \text{ п.к.в.}, \quad (3.16)$$

де  $\Delta\varphi_{сг} = 60...100^\circ$  – для дизельних ДВЗ [25].

16. Кутова швидкість обертання кривошипа  $\omega$  визначається від частоти обертання колінчатого валу  $n, \text{ с}^{-1}$ :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2300}{60} = 219,8 \text{ с}^{-1}. \quad (3.17)$$

17. Коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$  на номінальному режимі:  $\alpha = 1,9$ .

18. Циклова подача палива знаходиться в залежності від циклового масового заряду повітря, кий знаходимо за формулою

$$\Delta m_{вц} = V_h \cdot \rho_k \cdot \eta_v = 0.0011078 \cdot 3,094 \cdot 0.874 = 2,996 \cdot 10^{-3} \text{ кг/цикл}, \quad (3.18)$$

де щільність заряду на вході в циліндр визначається за формулою

$$\rho_k = \frac{p_k}{RT_k} = \frac{313100}{287 \cdot 352,6} = 3,094 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \quad (3.19)$$

коефіцієнт наповнення дорівнює

$$\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{p_k - \Delta p_{\text{вп}}}{p_k} \cdot \frac{T_k}{T_k + \Delta T + \gamma T_r}, \quad (3.20)$$

$$\eta_v = \frac{17,5}{17,5 - 1} \cdot \frac{313100 - 25048}{25048} \cdot \frac{352,6}{352,6 + 20 + 0,03 \cdot 700} = 0,874.$$

де  $\Delta p_{\text{вп}} = (0,05 \dots 0,15) \cdot p_k$  – втрата тиску на впуску [25]

$$\Delta p_{\text{вп}} = 0,08 \cdot p_k = 0,08 \cdot 313100 = 25048 \text{ Па}, \quad (3.21)$$

$\Delta T$  – підігрів заряду на впуску, для дизельних ДВЗ  $\Delta T = 20 \dots 40$  К;

$\gamma$  – коефіцієнт залишкових газів, для дизельних ДВЗ  $\gamma = 0,02 \dots 0,06$ .

$T_r$  – температура залишкових газів, для дизельних двигунів  $T_r = 700 \dots 900$  К.

Циклова масова подача палива

$$\Delta m_{\text{тц}} = \frac{\Delta m_{\text{вц}}}{\alpha \cdot \ell_o} = \frac{0,002996}{1,9 \cdot 14,45} = 109,12 \cdot 10^{-6} \text{ кг/цикл}. \quad (3.22)$$

19. Середня температура стінок  $T_w$  залежить від типу двигуна, рівня форсування, режиму роботи, матеріалів основних деталей (поршня, кришки, клапанів, циліндра). На номінальному режимі роботи приймають:

– для деталей із сталі та чавуну  $T_w = 550 \dots 650$  К,

– для деталей з алюмінієвих сплавів  $T_w = 420 \dots 470$  К.

Більші значення відносяться до форсованих ДВЗ з наддувом при малих величинах коефіцієнта надлишку повітря.

Оскільки у двигуна ЯМЗ-5340 стінки циліндра – чавун, а головка циліндра та поршень з алюмінієвого сплаву, приймаємо  $T_w = 510$  К.

20. Початковий тиск дорівнює

$$p_a = p_k - \Delta p_{\text{вп}} = 313100 - 25048 = 288052 \text{ Па.} \quad (3.23)$$

21. Початкова температура оцінюється за формулою

$$T_a = \frac{1}{1 + \gamma} (T_k + \Delta T_{\text{вп}} + \gamma T_r), \quad (3.24)$$

$$T_a = \frac{1}{1 + 0,03} (352,6 + 20 + 0,03 \cdot 700) = 382,2 \text{ К.}$$

22. Початкова маса робочого тіла в циліндрі дорівнює сумі масових кількостей свіжого заряду і залишкових газів, отже:

$$m_a = (1 + \gamma) \cdot \Delta m_{\text{вц}} = (1 + 0,03) \cdot 0,002996 = 3,086 \cdot 10^{-3} \text{ кг/цикл.} \quad (3.25)$$

23. Початковий об'єм циліндра

$$V_a = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot V_h = \frac{17,5}{17,5 - 1} \cdot 0,0011067 = 1,175 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3. \quad (3.26)$$

Початкові параметри повинні задовольняти рівнянню стану, яке в даному випадку є контрольним:

$$\begin{aligned} P_a V_a &= R m_a T_a, & (3.27) \\ 288052 \cdot 1,175 \cdot 10^{-3} &= 287 \cdot 3,086 \cdot 10^{-3} \cdot 382,2, \\ 360,2973 &= 360,2096. \end{aligned}$$

Розраховуємо похибку для лівої та правої частин рівняння

$$\left| \frac{360,2973 - 360,2096}{360,2096} \right| = 0,01 \%$$

Похибка цього рівняння складає 0,01 % – розрахунок виконано вірно.

24. Для виконання динамічного розрахунку необхідно знати маси частин, що поступально рухаються і обертаються.

Приведена маса частин, що поступально рухаються, включає масу поршневого комплексу (поршня, пальця, кілець) і частину маси шатуна, віднесеної до осі поршневого пальця:

$$m_A = [m'_п + (0,2 \dots 0,3) \cdot m'_ш] \cdot F_п, \quad (3.28)$$

$$m_A = [175 + 0,25 \cdot 295] \cdot 0,00865 = 2,153 \text{ кг},$$

де коефіцієнт 0,25 представляє частину маси шатуна, віднесеної до осі поршневого пальця.

Величини  $m'_п$  і  $m'_ш$  в правій частині формули визначають на основі даних маси поршневої та шатунної групи двигуна ЯМЗ-5340.

Х. Розрахунковий крок рівний  $\Delta\varphi = 1^\circ$ .

Результати розрахунків за пунктами 1–24 заносимо до таблиці 3.1

### **3.2 Розрахунок в програмі Engine Calculation та визначення ефективних показників двигуна**

Числові дані з таблиці 3.1 заносимо до комп'ютерної програми Engine Calculation.

Результати теплового розрахунку отримано з програми у вигляді протоколу-таблиці з розрахунковим кроком  $\Delta\varphi = 1^\circ$ . Для скорочення запису протокол теплового розрахунку подано з кроком  $\Delta\varphi = 10^\circ$  (додаток А, протокол № 1).



Таблиця 3.1 – Початкові дані для розрахунку робочого циклу двигуна ЯМЗ-5340 до програми Engine Calculation

Найменування величини	Численні величини	Позначення і одиниці виміру
	Номинальний режим	
Тактність	4-тактний	
Паливо	дизельне	
1. Теплота згорання палива	42,5	$H_{\text{ит}}$ , МДж/кг
2. Показник процесу згорання	0,4	$m_1$
Конструктивні дані		
3. Кількість циліндрів	4	$i$
4. Рядний; V-подібний	рядний	–
5. Діаметр циліндра	0.105	$D$ , м
6. Площа поршня	$8,65 \cdot 10^{-3}$	$F_{\text{п}}$ , м <sup>2</sup>
7. Радіус кривошипа	0.064	$r_{\text{к}}$ , м
8. Відношення $\lambda_{\text{к}} = \frac{r_{\text{к}}}{L_{\text{ш}}}$	0,3	$\lambda_{\text{к}}$
9. Площа теплообміну поршня	$11,25 \cdot 10^{-3}$	$F_{\text{п}}'$ , м <sup>2</sup>
10. Площа теплообміну кришки	$9,09 \cdot 10^{-3}$	$F_{\text{к}}$ , м <sup>2</sup>
11. Об'єм камери стиснення	$67,1 \cdot 10^{-6}$	$V_{\text{с}}$ , м <sup>3</sup>
Наддув		
12. Тиск наддуву	313100	$p_{\text{к}}$ , Па
13. Температура повітря	352,6	$T_{\text{к}}$ , К
Регульовальні дані		
14. Кут початку згорання	353	$\varphi_{\text{с}}$ , град. ПКВ
15. Кут кінця згорання	443	$\varphi_{\text{з}}$ , град. ПКВ
Режимні дані		
16. Кутова швидкість валу	240,7	$\omega$ , рад/с
17. Коефіцієнт надлишку повітря	1,9	$\alpha$
18. Циклова подача палива	$109,12 \cdot 10^{-6}$	$\Delta m_{\text{тц}}$ , кг/цикл
19. Середня температура стінок	510	$T_{\text{w}}$ , К
Початкові умови		
20. Тиск	288052	$p_{\text{а}}$ , Па
21. Температура	382,2	$T_{\text{а}}$ , К
22. Маса робочого тіла	$3,086 \cdot 10^{-3}$	$m_{\text{а}}$ , кг/цикл
23. Об'єм робочої порожнини	$1,175 \cdot 10^{-3}$	$V_{\text{а}}$ , м <sup>3</sup>
Дані до динамічного розрахунку		
24. Маса поступально рухомих частин (приведена)	2,153	$m_{\text{А}}$ , кг
Розрахунковий крок	1	$\Delta \varphi$ , град. ПКВ

Виконав студент групи Т-410м

І. В. Новосильцев

Керівник д.т.н., професор

Г. І. Слинко



Протокол теплового розрахунку містить запис параметрів робочого тіла (тиску  $p$ , температури  $T$ , маси  $m$ , об'єму  $V$ ) при різних кутах повороту кривошипа колінчатого валу (п.к.в.)  $\varphi$ . Розрахунковий діапазон зміни кута повороту кривошипа  $\varphi = 180 \dots 540^\circ$  ПКВ, що відповідає умовам ФММ моделі другої модифікації для чотиритактного ДВЗ.

У кінці протоколу наведені основні циклові і питомі показники:

- індикаторна циклова робота  $L_i = 2347,0$  Дж/цикл;
- середній індикаторний тиск  $p_i = 2,12$  МПа;
- індикаторний ККД  $\eta_i = 0,5061$ ;
- індикаторна питома витрата палива  $g_i = 0,1674$  кг/(кВт·год).

Контрольною величиною для оцінки результатів розрахунку є ефективна потужність двигуна, яка розраховується за формулою:

$$N_e = i \cdot L_i \cdot \frac{n}{\tau} \cdot \eta_m = 4 \cdot 2347 \cdot \frac{2300}{2 \cdot 60} \cdot 0,78 = 140,35 \text{ кВт}, \quad (3.29)$$

де  $\eta_m$  – механічний ККД двигуна, який враховує вплив механічних втрат.

Ефективна питома витрата палива

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} = \frac{0,1674}{0,78} = 0,2146 \text{ кг/(кВт·год)}. \quad (3.30)$$

Середній ефективний тиск:

$$p_e = p_i \cdot \eta_m = 2,12 \cdot 0,78 = 1,654 \text{ МПа}. \quad (3.31)$$

Ефективний ККД

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = 0,5061 \cdot 0,78 = 0,395. \quad (3.32)$$

Годинна витрата палива

$$G_T = g_e \cdot N_e = 0,2146 \cdot 140,352 = 30,12 \text{ кг/год.} \quad (3.33)$$

Розраховуємо похибки розрахунків порівняно з даними заводу-виробника (див. розділи 2.1–2.3):

– за ефективною потужністю	$\left  \frac{140,35 - 140}{140} \right  = 0,3 \%$ ;
– за ефективною питомою витратою палива	$\left  \frac{0,2146 - 0,2135}{0,2135} \right  = 0,5 \%$ ;
– за середнім ефективним тиском	$\left  \frac{1,654 - 1,65}{1,65} \right  = 0,2 \%$ ;
– за годинною витратою палива	$\left  \frac{30,12 - 31}{31} \right  = 2,8 \%$ .

Оскільки найбільша похибка розрахованих ефективних показників складає 2,8 %, робимо висновок, що тепловий розрахунок двигуна ЯМЗ-5340 виконано вірно.

### 3.3 Висновки за розділом

1. За даними протоколу теплового розрахунку побудовано згорнуті індикаторні діаграми для номінального режиму двигуна ЯМЗ-5340 (див. рис. 3.1, рис. 3.2).

2. Основними параметрами, які характеризують механічну і термічну напруженість деталей двигуна є тиск і температура робочого тіла. З даних протоколу А та з рисунків 3.1, 3.2 визначаємо найбільші (екстремальні) значення величин:

P, МПа

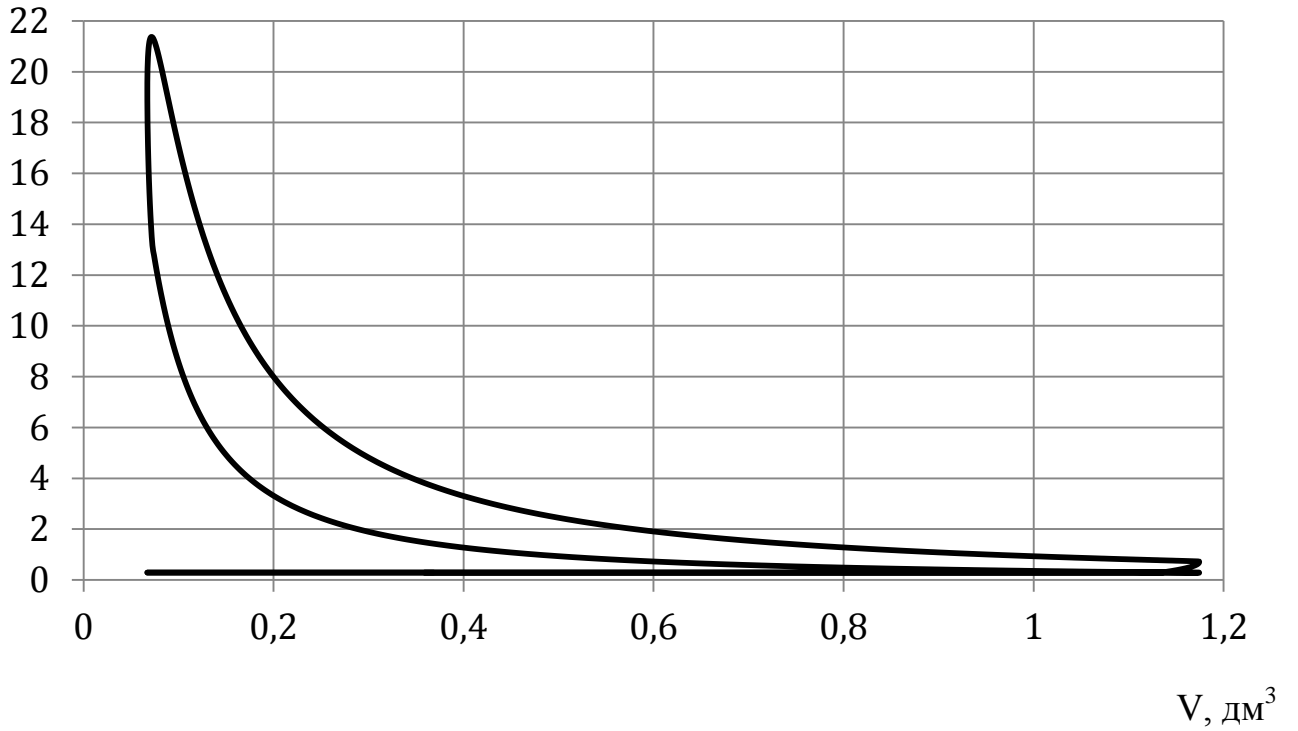


Рисунок 3.1 – Індикаторна діаграма тиску двигуна ЯМЗ-5340  
(показана для  $\varphi = 0 \dots 720^\circ$  ПКВ)

T, К

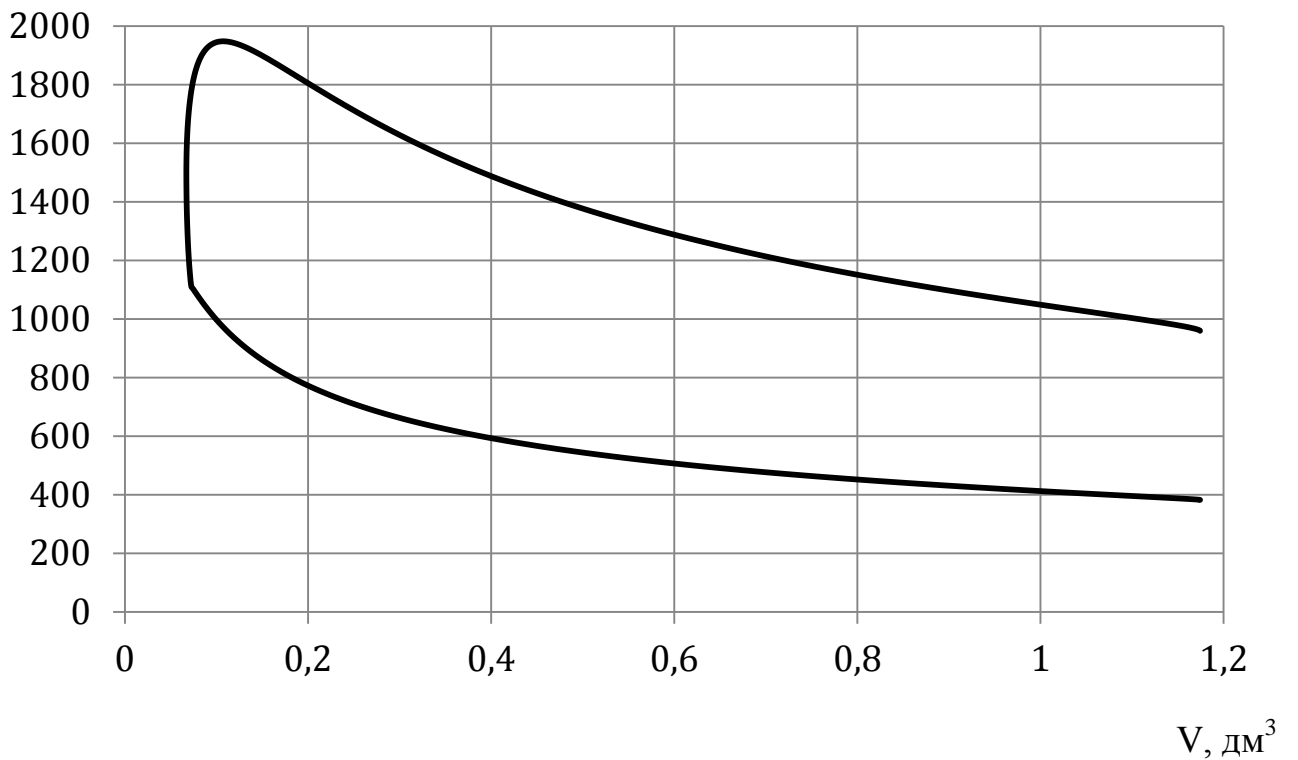


Рисунок 3.2 – Індикаторна діаграма температури двигуна ЯМЗ-5340  
(показана для  $\varphi = 180 \dots 540^\circ$  ПКВ)

– максимальний тиск  $p_{\max} = 21,366$  МПа (при  $367^{\circ}$  п.к.в.)

– максимальна температура  $T_{\max} = 1948,1$  К (при  $380^{\circ}$  п.к.в.).

3. Проведені перевірки ефективних показників вказують на те, що тепловий розрахунок дизельного двигуна ЯМЗ-5340 виконано вірно. Отримані значення максимальних температури та тиску  $T_{\max}$ ,  $p_{\max}$  відповідають вимогам [19, 25].

## **4 ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ РІЗНОГО СКЛАДУ ДЛЯ РІЗНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

### **4.1 Визначення властивостей біодизелів МЕРО різного кислотного складу**

З аналізу літератури (розділ 1 роботи) відомо, що для виготовлення біодизельного палива можуть використовуватись різні види сировини. Залежно від сорту сировини, умов його обробки, технологічного процесу отримане паливо має різний склад. Оскільки в Україні переважно виробляється біодизельне паливо та біодобавки типу МЕРО – з ріпаку, то зосередимось на ньому. Навіть біопаливо, отримане з одного виду сировини, але різних сортів ріпаку, має різний склад. З роботи [28], відомо, що в ріпакових маслах вміст олеїнової кислоти може складати від 8 % до 60 %, лінолевої кислоти – від 11 % до 23 %, ерукової кислоти – від 2 % до 60 %.

Таким чином, необхідно вирішити задачу визначення фізико-хімічних властивостей біодизельного палива різного кислотного складу.

В таблиці 4.1 наведено склад шести зразків біодизельного палива. В індивідуальних комірках в таблиці показано концентрації окремих кислот (з літературних джерел), а в поєднаних кількох комірках – розрахований залишок невідомого складу.

З таблиці 4.1 видно, що зразки біопалив № 1–5 близькі за складом, а зразок № 6 відрізняється підвищеним вмістом ерукової кислоти (32,5 %). Очевидно, що зразки біопалива № 1–5 і біопалива № 6 можуть мати відмінності у фізико-хімічних властивостях, що впливатиме на ефективні показники дизельного ДВЗ.

Визначаємо усереднений склад біопалива № 1–5 і біопалива № 6 (таблиця 4.2). Через брак інформації щодо кількості маловагомих компонентів (сумарно до 2,3 %), вважаємо, що вони містяться в рівній кількості – на загальний результат це вплине вкрай незначно.

Таблиця 4.1 – Жирнокислотний склад біодизельного палива з ріпакового масла, % мас. [27, 29–33]

Метилловий естер кислоти	Зразок біоплива					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
олеїнової	64,40	59,8	59,8	62,0	59,53	25,3
лінолевої	22,30	20,6	21,3	20,0	21,36	19,1
лінелеїнової	8,23	11,1	9,6	9,0	9,27	9,2
пальмітинової	3,49	4,4	4,8	4,0	4,77	3,9
стеаринової	0,85	1,8	2,0	1,0	1,90	1,5
ерукової	0,73	2,3	0,7	2,0	0,15	32,5
гадолеїнової			1,4	1,0	1,35	6,4
пальметолеїнової			0,3	1,0	0,29	1,4
мірїстінової			0,06			
маргарїнової			0,10			
арахінової			0,97			
лігноцеринової			0,13			
нервононової			0,12			
бегоневої			0		0,7	

Таблиця 4.2 – Жирнокислотний склад біодизельного палива з ріпакового масла (усереднені значення), % мас.

Метилловий естер кислоти	Зразок біоплива	
	№ 1–5	№ 6
1	2	3
олеїнової	60,60	25,30
лінолевої	20,94	19,10
лінелеїнової	9,36	9,20
пальмітинової	4,26	3,90
стеаринової	1,50	1,50

Продовження таблиці 4.2

1	2	3
ерукової	0,94	32,50
гадолеїнової	1,24	6,40
пальметолеїнової	0,30	0,25
мірістінової	0,11	0,23
маргаринової	0,12	0,23
арахінової	0,29	0,23
лігноцеринової	0,12	0,23
нервононової	0,12	0,23
бегоневої	0,10	0,70
Всього	100,00	100,00

Таблиця 4.3 – Склад і властивості жирних кислот [27]

Кислота	$m_r$ , кг/кмоль	$H_u$ , МДж/кг	C	H	O
олеїнова	282,467	37,3	0,766	0,121	0,113
лінолева	280,451	36,8	0,771	0,115	0,114
лінелеїнова	278,435	36,4	0,776	0,109	0,115
пальмітинова	256,429	37,1	0,749	0,126	0,125
стеаринова	284,483	37,3	0,766	0,121	0,113
ерукова	338,574	38,4	0,780	0,125	0,095
гадолеїнова	310,521	37,9	0,774	0,123	0,103
пальметолеїнова	254,413	36,6	0,755	0,119	0,126
мірістінова	228,375	36,3	0,736	0,124	0,140
маргарінова	270,456	37,5	0,755	0,127	0,118
арахінова	312,536	38,3	0,769	0,129	0,102
лігноцеринова	368,644	39,1	0,782	0,131	0,087
нервононова	366,628	38,9	0,786	0,127	0,087
бегонева	340,590	38,6	0,776	0,130	0,094

Знаючи компонентний (жирнокислотний) склад біопалива (таблиця 4.2) та властивості компонентів (таблиця 4.3), визначаємо властивості зразків біопалива № 1–5 (з низьким вмістом ерукової кислоти) і біопалива № 6 (з високим вмістом ерукової кислоти), отриманих з ріпаку, та порівнюємо з властивостями дизельного палива (таблиця 4.4) за наступними показниками:

- нижча теплота згорання  $H_u$ , МДж/кг;
- молекулярна маса  $m_T$ ;
- елементарний склад (С, Н, О).

Отримані розрахунковим способом дані відповідають літературним джерелам (див. розділ 1).

Таблиця 4.4 – Порівняльна таблиця складу і властивостей біопалив та дизельного палива

Кислота	$m_T$ , кг/кмоль	$H_u$ , МДж/кг	С	Н	О
Біодизель зразки №1–5 (середнє значення)	281,66	37,13	0,767	0,119	0,114
Біодизель зразок № 6	301,40	37,53	0,772	0,121	0,107
Дизельне паливо [34]	180...200	42,5	0,870	0,126	0,004

Проаналізувавши таблицю 4.4, можна зробити наступні висновки щодо відмінності складу та властивостей біодизеля порівняно з дизельним паливом:

- нижча теплота згорання менше на 11,7...12,6 %;
- молекулярна маса більше на 40,8...67,4 %;
- вміст вуглецю менше на 9,8...10,3 %;
- вміст водню менше на 0,5...0,7 %;
- вміст кисню більше на 10,3...11,0 %.

Знижена теплота згорання біодизельних палив (у порівняння з ДП) визначається відмінністю їх складу. Найбільший вплив на теплоту згорання має



водень Н, в меншій мірі – вуглець С. Зростання частки кисню О в біопаливах зменшує  $H_u$ , оскільки кисень – не паливо, а окиснювач.

Молекулярна маса палива не пов'язана з теплотою згорання. Величина  $m_T$  впливає на теоретично необхідну кількість повітря для згорання 1 кг палива [34]:

$$l_o = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} C + 8H - O \right), \text{ кг/кг}; \quad (4.1)$$

$$L_o = \frac{1}{0,21} \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O}{32} \right), \text{ кмоль/кг}. \quad (4.2)$$

Розраховуємо величини  $l_o$  і  $L_o$ :

– для дизельного палива

$$l_o = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} 0,87 + 8 \cdot 0,126 - 0,004 \right) = 14,452 \text{ кг/кг},$$

$$L_o = \frac{1}{0,21} \left( \frac{0,87}{12} + \frac{0,126}{4} - \frac{0,004}{32} \right) = 0,495 \text{ кмоль/кг};$$

– для біодизеля з низьким вмістом ерукової кислоти (БДнЕ)

$$l_o = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} 0,767 + 8 \cdot 0,119 - 0,114 \right) = 12,536 \text{ кг/кг},$$

$$L_o = \frac{1}{0,21} \left( \frac{0,767}{12} + \frac{0,119}{4} - \frac{0,114}{32} \right) = 0,429 \text{ кмоль/кг};$$

– для біодизеля з високим вмістом ерукової кислоти (БДвЕ)

$$l_o = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} 0,772 + 8 \cdot 0,121 - 0,107 \right) = 12,694 \text{ кг/кг},$$

$$L_o = \frac{1}{0,21} \left( \frac{0,772}{12} + \frac{0,121}{4} - \frac{0,107}{32} \right) = 0,434 \text{ кмоль/кг.}$$

Таким чином, встановлено, що для біодизелів МЕРО кількість повітря, необхідна для спалювання 1 кг палива, зменшена (порівняно з ДП) на величину 1,76...1,92 кг/кг.

## 4.2 Висновки за розділом

1. В розділі визначено фізико-хімічні властивості біодизеля виготовленого з ріпаку з низьким та високим вмістом ерукової кислоти. Біодизель першого з цих типів більш поширений в країнах Європи; в Україні в продажу і, відповідно, в експлуатації, є біодизель обох типів. З точки зору енергоємності (за величиною  $H_u$ ) більш вигідний біодизель з високим вмістом ерукової кислоти. За величинами теоретично необхідної кількості повітря для згорання 1 кг палива ( $l_o$  і  $L_o$ ), навпаки, більш вигідний біодизель з низьким вмістом ерукової кислоти, оскільки для його згорання необхідна менша кількість повітря. Оскільки в дизельних ДВЗ кількість повітря, що поступає до циліндрів, є обмеженою величиною, паливо з меншими значеннями  $l_o$  і  $L_o$  дозволяє збільшити циклову подачу палива.

2. Для встановлення оптимального складу сумішевого палива (ДП, біодизель та їх пропорції) для дизельного ДВЗ необхідно провести ряд теплових розрахунків.

## 5 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА ЯМЗ-5340 ПРИ РОБОТІ НА БІОДИЗЕЛІ РІЗНОГО СКЛАДУ ЗА РІЗНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

### 5.1 Підготовка даних

В розділі 3 роботи виконано тепловий розрахунок дизельного двигуна ЯМЗ-5340, визначено його індикаторні та ефективні показники, побудовані індикаторні діаграми тиску та температури. В розділі 4 роботи визначено фізико-хімічні властивості біодизельного палива МЕРО двох типів: з низьким та з високим вмістом ерукової кислоти (введемо позначення БДнЕ та БДвЕ).

З метою проведення теплового розрахунку двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на біодизелі визначено ряд величин (відповідно до методики теплового розрахунку), які відрізняються від значень при роботі двигуна на ДП (див. табл. 5.1):

- заносимо до таблиці аналітично визначені значення  $H_u$ ,  $L_o$ ,  $l_o$ ;
- перераховуємо значення  $\Delta m_{тц}$ .

При виконанні теплового розрахунку двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на біодизелі вважаємо, що його розмірність ( $D$ ,  $S$ ,  $r_k$ ,  $\epsilon$  тощо) та налаштування ( $\Delta\phi_{оп}$ ,  $\alpha$ ,  $\pi_k$  тощо) не змінювались порівняно з роботою на дизельному паливі.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані до теплового розрахунку

Величина	Значення		
	ДП	БДвЕ	БДнЕ
$H_u$ , МДж/кг	42,5	37,53	37,13
$L_o$ , кмоль/кг	0,5	0,434	0,429
$l_o$ , кг/кг	14,45	12,694	12,536
$\Delta m_{тц}$ , кг/цикл	$109,12 \cdot 10^{-6}$	$124,21 \cdot 10^{-6}$	$125,78 \cdot 10^{-6}$

З таблиці 5.1 випливає, що для забезпечення незмінного значення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  необхідно збільшувати величину паливоподачі двигуна, а саме циклову подачу палива (кількість палива, що впорскується за 1 цикл двигуна)  $\Delta m_{\text{ци}}$ :

- для біопалива БДвЕ – на 13,83 %;
- для біопалива БДнЕ – на 15,27 %.

Вказане зростання паливоподачі забезпечується збільшенням часу впорскування (найбільш доцільно) або збільшенням тиску в системі живлення (вимагає модернізації двигуна).

## 5.2 Результати теплового розрахунку при використанні палив БДвЕ і БДнЕ

За методикою теплового розрахунку (див. розділ 2.4) виконуємо теплові розрахунки двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на паливах БДвЕ і БДнЕ. В результаті теплового розрахунку отримано протоколи № 2, 3 (додаток А). До таблиці 5.2 заносимо індикаторні показники двигуна: індикаторна циклова робота  $L_i$ , середній індикаторний тиск  $p_i$ , індикаторний ККД  $\eta_i$ , індикаторна питома витрата палива  $g_i$ , а також значення максимальних тиску та температури в циліндрі ( $p_{\text{max}}$ ,  $T_{\text{max}}$  відповідно).

За допомогою формул 3.29–3.32 розраховуємо ефективні показники двигуна ЯМЗ-5340 (див. табл. 5.3). Складено порівняльні діаграми ефективної потужності  $N_e$ , питомої ефективної витрати палива  $g_e$  та ефективного ККД  $\eta_e$  – рисунок 5.1.

З таблиці 5.2 та рисунку 5.1 можна зробити наступні висновки. При збереженні незмінним співвідношення паливо/повітря (коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ ) двигуна ЯМЗ-5340, що працює на біопаливах БДвЕ та БДнЕ (на номінальному режимі):

Таблиця 5.2 – Індикаторні показники двигуна ЯМЗ-5340 (номінальний режим)

Величина	Значення		
	ДП	БДВЕ	БДнЕ
$L_i$ , Дж/цикл	2347,0	2362,4	2366,8
$p_i$ , МПа	2,120	2,134	2,138
$\eta_i$	0,5061	0,5068	0,5068
$g_i$ , кг/(кВт·год)	0,1674	0,1893	0,1913
$p_{\max}$ , МПа	21,366 (при 367 ° п.к.в.)	21,411 (при 366 ° п.к.в.)	21,427 (при 366 ° п.к.в.)
$T_{\max}$ , К	1948,1 (при 380 ° п.к.в.)	1947,3 (при 379 ° п.к.в.)	1948,6 (при 379 ° п.к.в.)

Таблиця 5.3 – Ефективні показники двигуна ЯМЗ-5340 (номінальний режим)

Величина	Значення		
	ДП	БДВЕ	БДнЕ
$N_e$ , кВт	140,35	141,27	141,53
$g_e$ , кг/(кВт·год)	0,2146	0,2427	0,2453
$p_e$ , МПа	1,654	1,665	1,668
$\eta_e$	0,395	0,395	0,395
$G_T$ , кг/год	30,12	34,29	34,71

– середній ефективний тиск  $i$ , відповідно, ефективна потужність зростають на 0,7...0,8 %;

– питома ефективна витрата палива зростає на 13,1 % (БДВЕ) та 14,3 % (БДнЕ);

– годинна витрата палива зростає на 13,8 % (БДВЕ) та 15,2 % (БДнЕ);

– ефективний ККД незмінний  $\eta_e = 0,395$ .

У біодизеля БДнЕ потужність на  $\sim 0,1\%$  вища, а витрата палива на  $1,2\dots 1,4\%$  більша у порівнянні з БДвЕ.

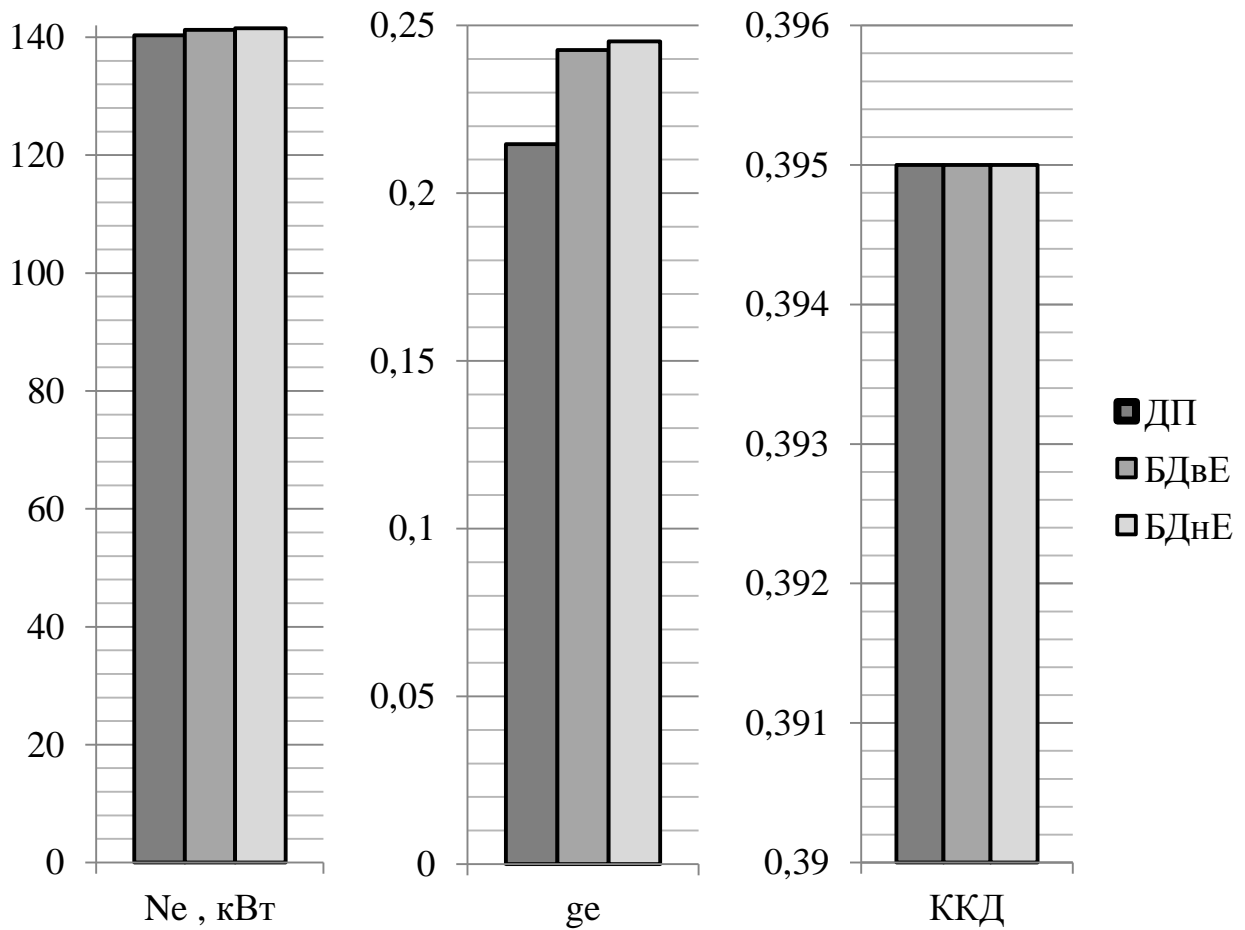


Рисунок 5.1 – Порівняльні діаграми ефективної потужності  $N_e$ , питомої ефективної витрати палива  $g_e$  та ефективного ККД  $\eta_e$  двигуна ЯМЗ-5340 на різних видах палива (номінальний режим)

Максимальна температура  $T_{\max}$  та тиск  $p_{\max}$  протягом робочого циклу залишаються практично незмінними (максимальна різниця складає  $1,3\text{ K}$  та  $61\text{ кПа}$  відповідно), що вказує на те, що двигун на біопаливах не підвергається збільшеним тепловим або динамічним навантаженням.

### 5.3 Взаємозв'язок виду палива та коефіцієнта надлишку повітря дизельного двигуна

В розділі 5.2 наведено результати теплових розрахунках двигуна ЯМЗ-5340, із збереженням коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  незмінним, для збереження екологічних показників. Проте в практичних ситуаціях використання біопалив, зокрема, МЕРО, замість дизельного палива буде, навпаки, супроводжуватись зміною  $\alpha$  при збереженні величини циклової подачі палива  $\Delta m_{\text{тц}}$ .

Вважаючи, що  $\Delta m_{\text{тц}}$  – величина незмінна при будь-якому виді палива, за формулою

$$\Delta m_{\text{тц}} = \frac{\Delta m_{\text{вц}}}{\alpha \cdot \ell_o} = \text{const.} \quad (5.1)$$

де  $\Delta m_{\text{вц}}$  – циклового масового заряду повітря,

визначимо фактичне значення  $\alpha$ . За основу розрахунку приймаємо відомі величини для двигуна, що працює на дизелі (див. розділ 3.1):  $\alpha = 1,90$ ;  $\Delta m_{\text{тц}} = 109,12 \cdot 10^{-6}$  кг/цикл;  $\Delta m_{\text{вц}} = 2,996 \cdot 10^{-3}$  кг/цикл.

Тоді

$$\alpha = \frac{\Delta m_{\text{вц}}}{\Delta m_{\text{тц}} \cdot \ell_o}, \quad (5.2)$$

Розраховуємо величину коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  для біодизельного палива МЕРО:

– БДвЕ

$$\alpha = \frac{2,996 \cdot 10^{-3}}{109,12 \cdot 10^{-6} \cdot 12,694} = 2,163;$$

– БДнЕ

$$\alpha = \frac{2,996 \cdot 10^{-3}}{109,12 \cdot 10^{-6} \cdot 12,536} = 2,190.$$

Таким чином, встановлено реальні значення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  при заміні дизельного палива на біодизельне паливо МЕРО різного складу (БДвЕ і БДнЕ) за відсутності коригування часу/тривалості впорскування палива.

#### **5.4 Вплив температури та тиску повітря на впуску на потужність та економічність двигуна ЯМЗ-5340, що працює на різних видах палива**

Відповідно до паспортних технічних характеристик (див. табл. 2.1), двигун ЯМЗ-5340 може експлуатуватись за наступних умов навколишнього середовища: від  $-60$  °С до  $+50$  °С, до 4500 м над рівнем моря. З теорії ДВЗ відомо [39, 40], що зміна атмосферних температури та тиску впливає на техніко-економічні показники двигуна. Приймаючи до уваги заміну дизельного палива для двигуна ЯМЗ-5340 на біопалива різного кислотного складу, та зміну  $T_0$  і  $p_0$ , поставлена задача визначити вплив перерахованих факторів на потужність та економічність двигуна на номінальному режимі роботи. Приймаємо, що в Україні можливі наступні умови: температура  $t_0$  від  $-35$  °С до  $+40$  °С [41], тиск  $p_0$  від 101 кПа до 89,9 кПа (найвища дорога державного значення в Україні знаходиться висоті до 732 м над рівнем моря) [42].

Прийняті в якості вихідних даних температури  $T_0$  і тиск  $p_0$  заносимо до таблиць 5.4, 5.5.

Таблиця 5.4 – Атмосферна температура  $T_0$ , прийнята для розрахунку

$t_0$ , °С	-30	-20	0	20	30	40
$T_0$ , К	243	253	273	293	303	313



Таблиця 5.5 – Атмосферний тиск  $p_o$ , та відповідна висота над рівнем моря, прийняті для розрахунку [43]

Н, км	0	500	1000
$p_o$ , кПа	101	95,5	89,9

#### 5.4.1 Результати та аналіз теплового розрахунку

За методикою (див. розділи 2.4, 3.1) виконуємо теплові розрахунки двигуна ЯМЗ-5340, що працює а дизельному палива, та на БДнЕ (біодизельне паливо МЕРО з низьким вмістом ерукової кислоти). Оскільки змінювались вихідні дані (температура  $T_o$ , тиск  $p_o$ ), в ході розрахунку зазнали зміни наступні величини:

- температура наддувочного повітря на вході до ДВЗ  $T_k$ ;
- щільність заряду на вході в циліндр  $\rho_k$ ;
- коефіцієнт наповнення  $\eta_v$ ;
- втрата тиску на впуску  $\Delta p_{вп}$ ;
- циклова масова подача повітря  $\Delta m_{вц}$ ;
- циклова масова подача палива  $\Delta m_{тц}$ ;
- початковий тиск  $p_a$ ;
- початкова температура циклу  $T_a$ .

Результати розрахунків, отримані з комп'ютерної програми Engine Calculation, наведені в таблиці 5.6 у вигляді індикаторних показників двигуна ЯМЗ-5340.

За допомогою формул 3.29–3.32 розраховуємо ефективні показники двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на різних паливах на номінальному режимі (див. табл. 5.7). Складено порівняльні діаграми ефективної потужності  $N_e$ , питомої ефективної витрати палива  $g_e$  та ефективного ККД  $\eta_e$  при різних станах атмосферного повітря та тиску – рисунки 5.2–5.4.

Таблиця 5.6 – Індикаторні показники двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на дизельному паливі (ДП) та біодизелі БДнЕ (номінальний режим)

паливо	$p_o$ , кПа	Атмосферна температура $t_o$ , °C					
		-30	-20	0	20	30	40
Індикаторна циклова робота $L_i$ , Дж/цикл							
ДП	101	2852,2	2738,1	2530,6	2347,0	2262,5	2182,8
	95,5	2698,5	2590,7	2394,6	2220,9	2141,1	2065,8
	89,9	2541,8	2440,4	2255,8	2092,3	2017,3	1946,4
БДнЕ	101	2874,9	2760,2	2551,6	2366,7	2282,3	2201,6
	95,5	2720,2	2611,7	2414,4	2239,7	2159,4	2083,4
	89,9	2562,3	2460,1	2274,3	2109,9	2034,4	1963,0
Середній індикаторний тиск $p_i$ , МПа							
ДП	101	2,576	2,473	2,286	2,120	2,043	1,971
	95,5	2,437	2,340	2,163	2,006	1,934	1,866
	89,9	2,296	2,204	2,037	1,890	1,822	1,758
БДнЕ	101	2,597	2,493	2,305	2,138	2,061	1,988
	95,5	2,457	2,359	2,181	2,023	1,950	1,882
	89,9	2,314	2,222	2,054	1,906	1,837	1,773
Індикаторний ККД $\eta_i$							
ДП	101	0,5210	0,5182	0,5123	0,5061	0,5028	0,4995
	95,5	0,5213	0,5186	0,5127	0,5065	0,5032	0,4999
	89,9	0,5217	0,5189	0,5131	0,5069	0,5037	0,5004
БДнЕ	101	0,5215	0,5188	0,5130	0,5068	0,5037	0,5002
	95,5	0,5219	0,5191	0,5134	0,5072	0,5040	0,5007
	89,9	0,5222	0,5194	0,5137	0,5076	0,5044	0,5011
Індикаторна питома витрата палива $g_i$ , кг/(кВт·год)							
ДП	101	0,1626	0,1635	0,1653	0,1674	0,1685	0,1696
	95,5	0,1625	0,1633	0,1652	0,1672	0,1683	0,1694
	89,9	0,1624	0,1632	0,1651	0,1671	0,1682	0,1693
БДнЕ	101	0,1859	0,1869	0,1890	0,1913	0,1925	0,1938
	95,5	0,1858	0,1868	0,1889	0,1912	0,1924	0,1936
	89,9	0,1857	0,1867	0,1887	0,1910	0,1922	0,1935

Таблиця 5.7 – Ефективні показники двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на дизельному паливі та біодизелі БДнЕ (номінальний режим)

паливо	$p_o$ , кПа	Атмосферна температура $t_o$ , °С					
		-30	-20	0	20	30	40
Ефективна потужність $N_e$ , кВт							
ДП	101	170,56	163,74	151,33	140,35	135,30	130,53
	95,5	161,37	154,92	143,20	132,81	128,04	123,53
	89,9	152,00	145,94	134,90	125,12	120,63	116,39
БДнЕ	101	171,92	165,06	152,59	141,53	136,48	131,65
	95,5	162,67	156,18	144,38	133,94	129,13	124,59
	89,9	153,23	147,11	136,01	126,17	121,66	117,39
Ефективний ККД $\eta_e$							
ДП	101	0,4064	0,4042	0,3996	0,3947	0,3922	0,3896
	95,5	0,4066	0,4045	0,3999	0,3951	0,3925	0,3899
	89,9	0,4069	0,4047	0,4002	0,3954	0,3929	0,3903
БДнЕ	101	0,4068	0,4046	0,4001	0,3953	0,3929	0,3902
	95,5	0,4070	0,4049	0,4004	0,3956	0,3931	0,3905
	89,9	0,4073	0,4052	0,4007	0,3959	0,3934	0,3909
Ефективна питома витрата палива $g_e$ , кг/(кВт·год)							
ДП	101	0,2084	0,2096	0,2120	0,2146	0,2160	0,2174
	95,5	0,2083	0,2094	0,2118	0,2144	0,2158	0,2172
	89,9	0,2082	0,2093	0,2117	0,2142	0,2156	0,2170
БДнЕ	101	0,2384	0,2396	0,2423	0,2453	0,2468	0,2485
	95,5	0,2382	0,2395	0,2421	0,2451	0,2466	0,2483
	89,9	0,2381	0,2393	0,2420	0,2449	0,2464	0,2481

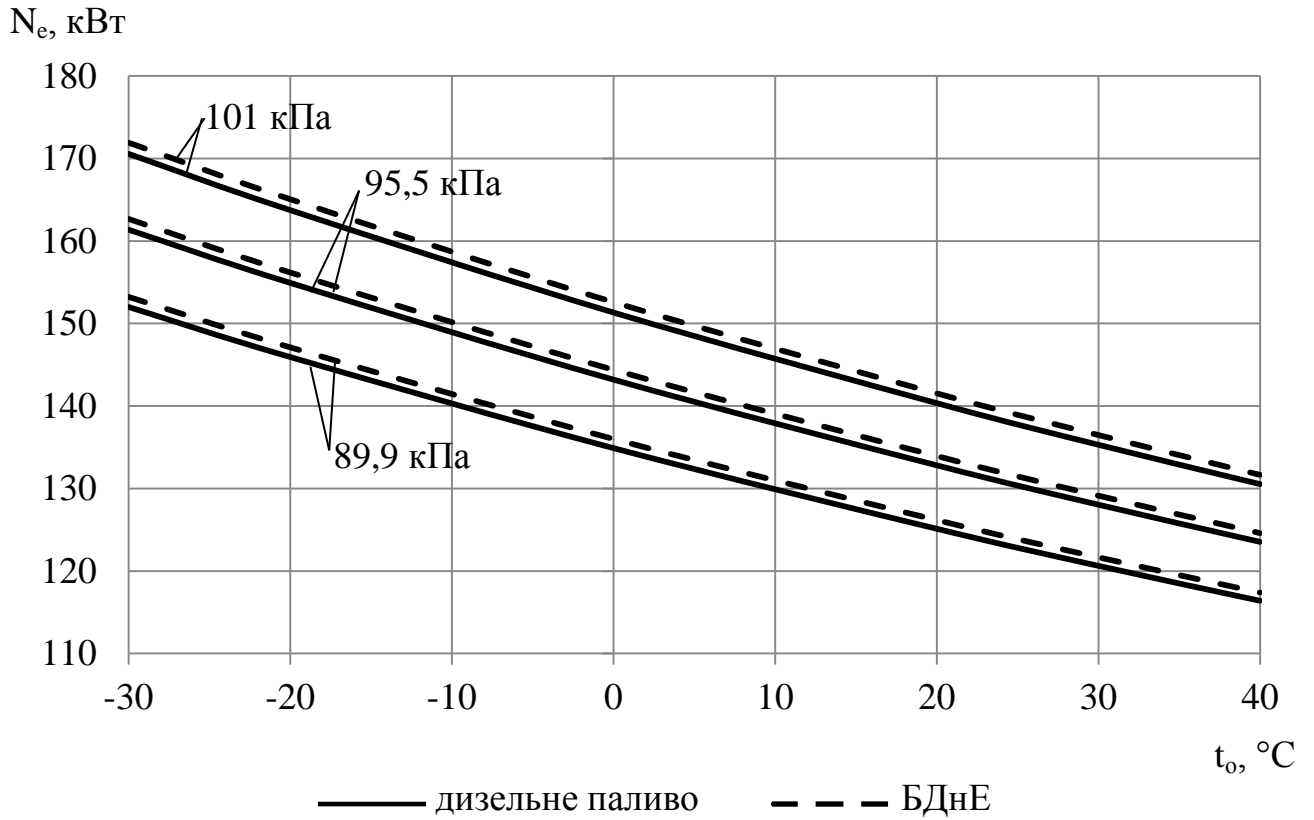


Рисунок 5.2 – Діаграми ефективної потужності  $N_e$  двигуна ЯМЗ-5340 на різних видах палива при різних  $t_o$ ,  $p_o$  (номінальний режим)

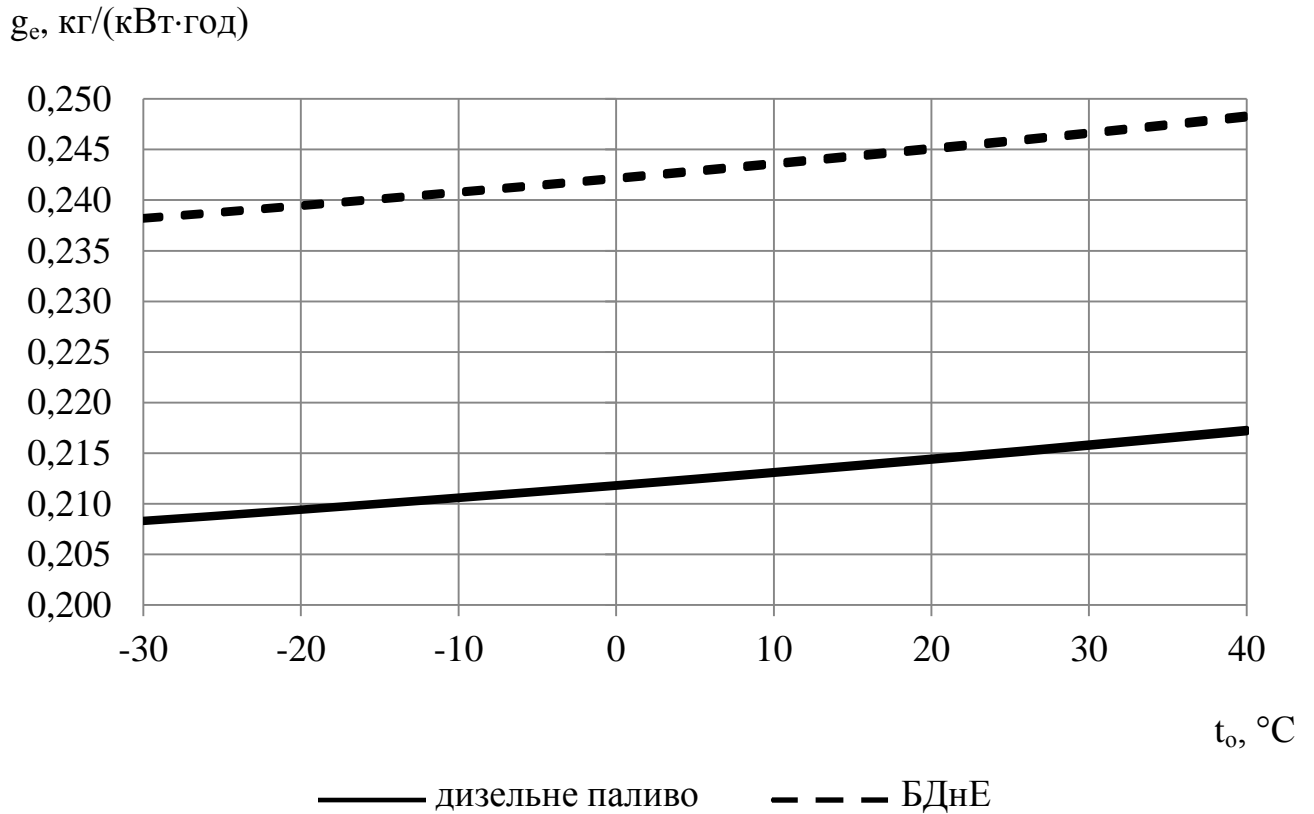


Рисунок 5.3 – Діаграми питомої ефективної витрати палива  $g_e$  двигуна ЯМЗ-5340 на різних видах палива при різних  $t_o$ ,  $p_o$  (номінальний режим)

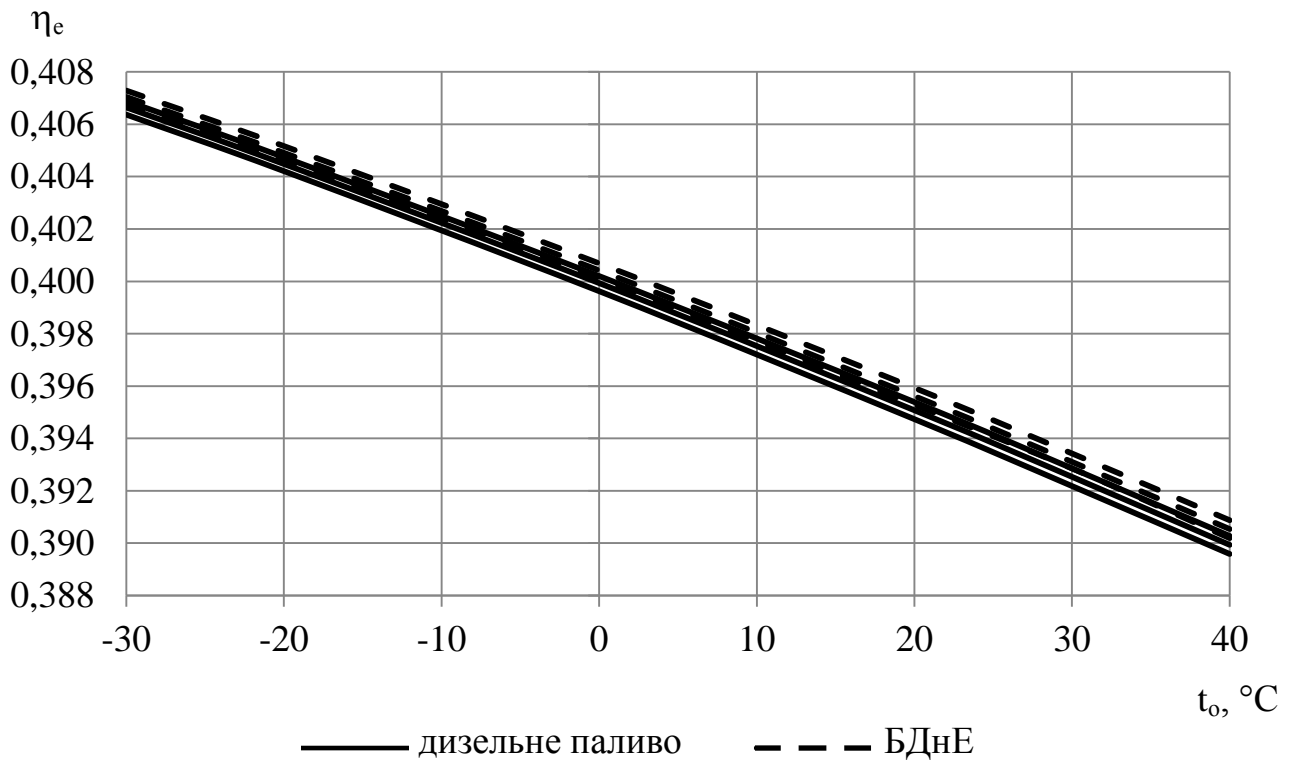


Рисунок 5.4 – Діаграми ефективного ККД  $\eta_e$  двигуна ЯМЗ-5340 на різних видах палива при різних  $t_0, p_0$  (номінальний режим)

З аналізу графіків (рис. 5.2–5.4) можна зробити наступні висновки:

1. Ефективна потужність двигуна ЯМЗ-5340 суттєво залежить від температури та тиску навколишнього повітря. При зменшенні температури на кожні  $10\text{ }^\circ\text{C}$  (або  $10\text{ K}$ ) потужність зростає на  $N_e = 5,09\dots 5,75\text{ кВт}$  – в середньому на  $4,1\%$ . Це пояснюється зростанням густини повітря  $\rho_k$ , що призводить до збільшення масової циклової подачі повітря  $\Delta m_{\text{вц}}$ .

2. З тієї ж причини зменшення тиску атмосферного повітря (при збільшенні висоти над рівнем моря) призводить до падіння потужності. Підвищення висоти на кожні  $500\text{ м}$  викликає зменшення на  $N_e = 7,07\dots 9,28\text{ кВт}$  – в середньому на  $5,4\%$ .

3. При зменшенні температури на кожні  $10\text{ }^\circ\text{C}$  питома ефективна витрата палива зменшується на  $g_e = 2,3\dots 2,4\text{ г/(кВт}\cdot\text{год)}$  – в середньому на  $0,6\%$ .

4. Зміна тиску атмосферного повітря не має значущого впливу на величину питомої ефективної витрати палива  $g_e$ .

5. Закономірно, що при менших температурах із розглянутого діапазону більша потужність та менша витрата палива двигуна ЯМЗ-5340 комплексно представлено більшими значеннями ефективного ККД. При зменшенні температури на кожні 10 °С ефективний ККД зростає в середньому на  $\eta_e = 0,6 \%$ .

6. Підвищення висоти на кожні 500 м викликає незначне зменшення ефективного ККД  $\eta_e$  – в середньому на 0,07 %.

Для більш зручної, з точки зору практичного використання, оцінки економічності двигуна ЯМЗ-5340 на номінальному режимі визначимо годинну витрату палива  $G_T$  (рисунок 5.5). Цифрові дані занесено до таблиці 5.8.

$G_T$ , кг/год

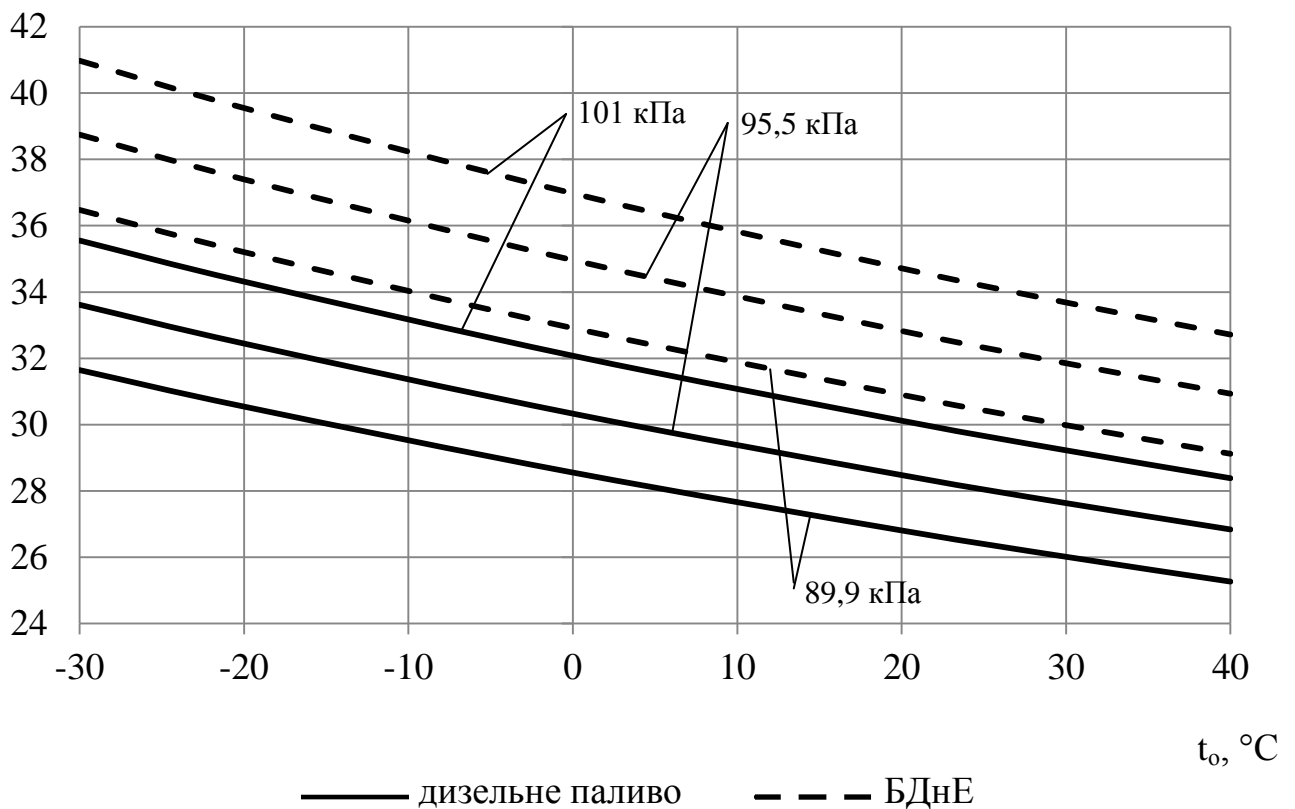


Рисунок 5.5 – Діаграми годинної витрати палива  $G_T$  двигуна ЯМЗ-5340 на різних видах палива при різних  $t_o$ ,  $p_o$  (номінальний режим)

Таблиця 5.8 – Годинна витрата палива двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на дизельному паливі та біодизелі БДнЕ

паливо	$p_o$ , кПа	Атмосферна температура $t_o$ , °C					
		-30	-20	0	20	30	40
ДП	101	35,553	34,313	32,077	30,117	29,223	28,381
	95,5	33,614	32,444	30,33	28,475	27,63	26,836
	89,9	31,643	30,542	28,552	26,805	26,01	25,262
БДнЕ	101	40,978	39,551	36,976	34,715	33,683	32,714
	95,5	38,748	37,398	34,961	32,825	31,85	30,931
	89,9	36,476	35,204	32,91	30,898	29,982	29,118

При зменшенні температури атмосферного повітря густина його зростає, тому збільшується масове наповнення циліндрів як повітрям  $\Delta m_{\text{вц}}$ , так і паливом  $\Delta m_{\text{тц}}$ . Величина питомої ефективної витрати палива  $g_e$ , як вже було сказано в поясненні до рисунку 5.3, в середньому зменшується на 0,6 % (на кожні 10 °C). В той же час ефективна потужність  $N_e$  зростає на 4,1 %. Величина годинної витрати палива  $G_T$ , відповідно до формули 3.33, є результуючою добутку  $g_e$  і  $N_e$ . Тому з рисунку 5.5 закономірно випливає, що на кожні 10 °C зниження  $t_o$  величина  $G_T$  зростає на 3,4 %.

Оскільки при зменшенні тиску  $p_o$  масове наповнення циліндрів зменшується, то і величина  $G_T$  зменшується в середньому на 5,5 % (на кожні +500 м висоти).

#### 5.4.2 Визначення математичних функцій залежності величин $N_e$ , $g_e$ , $G_T$ від навколишніх температури та тиску

У попередньому розділі отримано значення ефективної потужності  $N_e$ , питомої ефективної витрати палива  $g_e$ , ефективного ККД  $\eta_e$ , годинної витрати

палива  $G_T$  двигуна ЯМЗ-5340 при різних станах навколишнього середовища (рисунки 5.2–5.5). Для зручності роботи з цими даними виконуємо їх апроксимацію, отримуємо квадратичні рівняння.

З огляду на характер графіку ефективної потужності  $N_e$  (рис. 5.2), можна виконати апроксимацію знаходженням квадратичної регресії за стандартною методикою [35–37]. Складаємо таблицю початкових даних (табл. 5.9) для ефективної потужності двигуна ЯМЗ-5340, що працює на біодизелі БДнЕ, при  $p_o = 101$  кПа. Для переходу від фізичного до математичного вигляду присвоюємо:  $t_o = x_i$ ,  $N_e = y_i$ .

Таблиця 5.9 – Таблиця початкових даних

$i$	$t_o = x_i$	$N_e = y_i$
1	-30	171,92
2	-20	165,06
3	0	152,59
4	20	141,53
5	30	136,48
6	40	131,65

Складаємо таблицю допоміжних величин (табл. 5.10).

Знаходимо коефіцієнти  $a$ ,  $b$ ,  $c$  рівняння квадратичної регресії  $\hat{y} = ax^2 + bx + c$  з системи рівнянь:

$$\begin{cases} a \sum x_i^2 + b \sum x_i + nc = \sum y_i, \\ a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i = \sum x_i y_i, \\ a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2 = \sum x_i^2 y_i. \end{cases} \quad (5.3)$$



Таблиця 5.10 – Таблиця допоміжних величин для знаходження квадратичної функції

i	$x_i$	$y_i$	$x_i^2$	$x_i^3$	$x_i^4$	$x_i \cdot y_i$	$x_i^2 \cdot y_i$
1	-30	171,92	900	-27000	810000	-5157,6	154728
2	-20	165,06	400	-8000	160000	-3301,2	66024
3	0	152,59	0	0	0	0	0
4	20	141,53	400	8000	160000	2830,6	56612
5	30	136,48	900	27000	810000	4094,4	122832
6	40	131,65	1600	64000	2560000	5266	210640
$\Sigma$	40	899,23	4200	64000	4500000	3732,2	610836

Після підстановки отримуємо:

$$\begin{cases} 4200a + 40b + 6c = 899,23, \\ 64000a + 4200b + 40c = 3732,2, \\ 4500000a + 64000b + 4200c = 640836. \end{cases}$$

Вирішуємо цю систему лінійних рівнянь методом Крамера:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 4200 & 40 & 6 \\ 64000 & 4200 & 40 \\ 4500000 & 64000 & 4200 \end{vmatrix} = -29040000000,$$

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} 899,23 & 40 & 6 \\ 3732,2 & 4200 & 40 \\ 610836 & 64000 & 4200 \end{vmatrix} = 49186000 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a = \frac{\Delta_a}{\Delta} = \frac{-49186000}{-29040000000} = 0,0017; \quad (5.4)$$

$$\Delta b = \begin{vmatrix} 4200 & 899,23 & 6 \\ 64000 & 3732,2 & 40 \\ 4500000 & 610836 & 4200 \end{vmatrix} = 17155560000 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow b = \frac{\Delta b}{\Delta} = \frac{17155560000}{-29040000000} = -0.5908; \quad (5.5)$$

$$\Delta c = \begin{vmatrix} 4200 & 40 & 899,23 \\ 64000 & 4200 & 3732,2 \\ 4500000 & 64000 & 610836 \end{vmatrix} = -4432213400000 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow c = \frac{\Delta c}{\Delta} = \frac{-4432213400000}{-29040000000} = 152,6244; \quad (5.6)$$

Тоді шукане рівняння квадратичної регресії отримає вигляд

$$\hat{y} = 0,0017 \cdot x^2 - 0,590x + 152,6244. \quad (5.7)$$

Виконуємо побудову графіка рівняння регресії – рисунок 5.6.

у (N<sub>e</sub>, кВт)

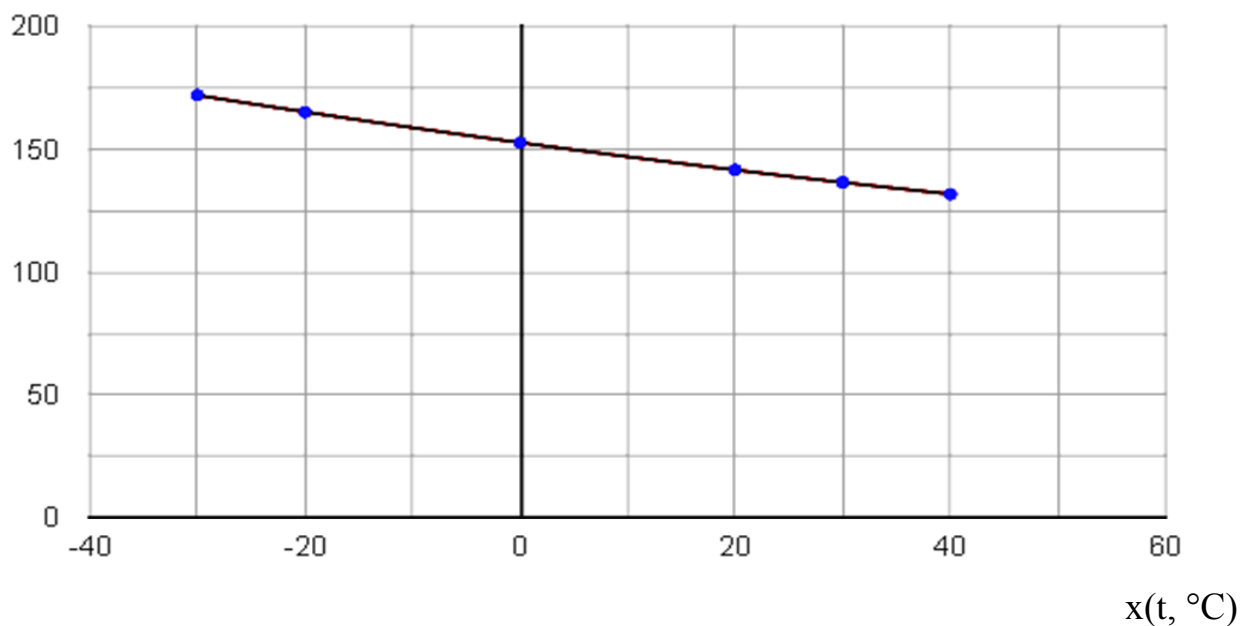


Рисунок 5.6 – Побудова графіка рівняння регресії

$$\hat{y} = 0,0017 \cdot x^2 - 0,5908x + 152,6244$$

Для оцінки значимості параметрів регресії і кореляції:

– знаходимо середнє значення  $y$ :

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum y_i = \frac{899,23}{6} = 149,8717; \quad (5.8)$$

– складаємо таблицю допоміжних величин (табл. 5.11), де  $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$ ;

$$\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}; \quad A_i = \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|.$$

Таблиця 5.11 – Таблиця допоміжних величин

i	$x_i$	$y_i$	$\hat{y}_i$	$y_i - \bar{y}$	$(y_i - \bar{y})^2$	$\varepsilon_i$	$\varepsilon_i^2$	$A_i$	$\Delta\varepsilon_i$	$(\Delta\varepsilon_i)^2$
1	-30	171,92	171,8715	22,0483	486,1290	0,0485	0,0024	0,0003	—	—
2	-20	165,06	165,1170	15,1883	230,6855	-0,0570	0,0033	0,0003	-0,1056	0,0111
3	0	152,59	152,6244	2,7183	7,3893	-0,0344	0,0012	0,0002	0,0226	0,0005
4	20	141,53	141,4868	-8,3417	69,5834	0,0432	0,0019	0,0003	0,0776	0,0060
5	30	136,48	136,4261	-13,3917	179,3367	0,0539	0,0029	0,0004	0,0107	0,0001
6	40	131,65	131,7042	-18,2217	332,0291	-0,0542	0,0029	0,0004	-0,1081	0,0117
$\Sigma$	90	899,23	899,2300	39,9549	1305,1531	0,1456	0,0145	0,002	0,1109	0,0295

Знаходимо індекс кореляції:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}} = \sqrt{1 - \frac{0,0145}{1305,1531}} = 0,999994. \quad (5.9)$$

Знаходимо індекс детермінації:

$$R^2 = 1^2 = 1. \quad (5.10)$$

Знаходимо середню похибку апроксимації

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% = \frac{0,002}{6} \cdot 100\% = 0,0327 \%. \quad (5.11)$$

Визначаємо F-критерій Фішера:

– критичний (табличний)

$$F_{\text{табл}} = F(\alpha; k_1; k_2), \quad (5.12)$$

$$F_{\text{табл}} = F(0,05; 2; 3) = 9,5521,$$

де  $k_1 = m = 2$ ;

$k_2 = n - m - 1 = 6 - 2 - 1 = 3$ ;

$\alpha = 0,05$ ;

$m$  – число параметрів при перемінних рівняння регресії;

– фактичний

$$F_{\text{факт}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{k_2}{k_1} = \frac{1}{1 - 0,999994} \cdot \frac{3}{2} = 135030,3702. \quad (5.13)$$

Так як  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$ , можна стверджувати, що отримане рівняння регресії  $\hat{y} = 0,0017 \cdot x^2 - 0,5908x + 152,6244$  адекватне.

Таким же чином для двигуна ЯМЗ-5340, що працює на біопаливі БДнЕ, знаходимо квадратичні рівняння, що описують залежність витрати палива від навколишньої температури. Підставивши фізичний зміст величин  $t_o = x_i$ ,  $N_e = y_i$ , отримуємо:

– при  $p_o = 101$  кПа:

$$N_e = 0,0017 \cdot t_o^2 - 0,5908 \cdot t_o + 152,6244,$$

$$g_e = 3 \cdot 10^{-7} \cdot t_o^2 + 0,0001 \cdot t_o + 0,2423,$$

$$G_T = 0,0004 \cdot t_o^2 - 0,1215 \cdot t_o + 36,983;$$

– при  $p_o = 95,5$  кПа (500 м над рівнем моря)

$$N_e = 0,0016 \cdot t_o^2 - 0,5588 \cdot t_o + 144,42,$$

$$g_e = 3 \cdot 10^{-7} \cdot t_o^2 + 0,0001 \cdot t_o + 0,2421,$$

$$G_T = 0,0004 \cdot t_o^2 - 0,1159 \cdot t_o + 34,969;$$

– при  $p_o = 89,9$  кПа (1000 м над рівнем моря)

$$N_e = 0,0015 \cdot t_o^2 - 0,5259 \cdot t_o + 136,04,$$

$$g_e = 3 \cdot 10^{-7} \cdot t_o^2 + 0,0001 \cdot t_o + 0,242,$$

$$G_T = 0,0003 \cdot t_o^2 - 0,1082 \cdot t_o + 32,917.$$

Знайдені квадратичні рівняння можуть бути використані для визначення зміни ефективних потужності та витрати палива при експлуатації 4-тактних дизельних ДВЗ за тиску та температури атмосферного повітря, притаманних різним регіонам України.

## 5.5 Висновки за розділом

1. Визначено фізико-хімічні властивості біодизеля виготовленого з ріпаку з низьким та високим вмістом ерукової кислоти. З точки зору енергоємності (за величиною  $H_u$ ) більш вигідний біодизель з високим вмістом ерукової кислоти. За величинами теоретично необхідної кількості повітря для згорання 1 кг палива ( $l_o$  і  $L_o$ ), навпаки, більш вигідний біодизель з низьким вмістом ерукової кислоти, оскільки для його згорання необхідна менша кількість повітря. Оскільки в дизельних ДВЗ кількість повітря, що поступає до циліндрів, є обмеженою величиною, паливо з меншими значеннями  $l_o$  і  $L_o$  дозволяє збільшити циклову подачу палива.

2. За результатами теплового розрахунку встановлено, що при збереженні незмінним співвідношення паливо/повітря (коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ ) двигуна ЯМЗ-5340, що працює на біопаливах БДвЕ та БДнЕ: середній ефективний тиск  $i$ , відповідно, ефективна потужність зростають на

0,7...0,8 %; питома ефективна витрата палива зростає на 13,1 % (БДвЕ) та 14,3 % (БДнЕ); годинна витрата палива зростає на 13,8 % (БДвЕ) та 15,2 % (БДнЕ); ефективний ККД практично незмінний та дорівнює  $\eta_e = 0,395$ .

3. Отримані результати пояснюються тим, що в циліндри дизеля поступає незмінна кількість повітря, а регулювання здійснюється кількістю впорскуваного палива. Оскільки у біодизельних палив менші величини  $L_o$ ,  $l_o$  (порівняно з ДП), для забезпечення незмінної величини  $\alpha$  збільшується циклова подача палива. Величину коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  на сучасних ДВЗ бажано не змінювати з точки зору дотримання екологічних нормативів «Євро».

4. На ДВЗ з механічним регулюванням циклової подачі палива при переході від ДП на біодизельне паливо якщо циклову подачу палива залишити незмінною, то потужність зменшиться на 13...15 %.

5. Розраховані в роботі значення величин  $N_u$ ,  $l_o$  і  $L_o$  для біодизеля МЕРО двох типів (з високим та низьким вмістом ерукової кислоти) можна використовувати при розрахунках інших ДВЗ із запалюванням від стиснення.

6. При зменшенні температури атмосферного повітря густина його зростає, тому збільшується масове наповнення циліндрів як повітрям, так і паливом. При зменшенні температури на кожні 10 °С: величина питомої ефективної витрати палива  $g_e$  в середньому зменшується на 0,6 %, ефективна потужність  $N_e$  зростає на 4,1 %, годинна витрати палива  $G_T$  зростає на 3,4 %.

7. Підвищення висоти на кожні 500 м викликає зменшення  $N_e = 7,07...9,28$  кВт – в середньому на 5,4 %, значущого впливу на величину питомої ефективної витрати палива  $g_e$  не виявлено, величина  $G_T$  зменшується в середньому на 5,5 %.

8. Доцільність переходу від дизельного палива до біодизельного палива МЕРО має визначатись вартістю палива, а також необхідністю роботи двигуна в зимовий період.

## **6 ОХОРОНА ПРАЦІ І БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ**

Відповідно до теми дослідження «Визначення ефективності дизельного ДВЗ, що працює на біодизельних паливах різного складу» проведено аналіз потенційних небезпек, що можуть мати місце при випробуванні дизельного ДВЗ, що працює на різних видах палива.

### **6.1 Аналіз потенційних небезпек**

1) Недоліки в організації робочого місця дослідника в приміщенні дослідницької лабораторії, які можуть призвести до зниження працездатності та в подальшому до захворювань опорно-рухового апарату.

2) Можливість ураження електричним струмом внаслідок порушення правил з електробезпеки, що може призвести до травм або до летального наслідку.

3) Небезпеки, які пов'язані з можливістю механічного травмування частин тіла при налагоджуванні дослідницького обладнання з використанням слюсарного інструменту внаслідок відсутності навичок, порушень правил роботи з інструментом, порушень інструкцій з техніки безпеки.

4) Відсутність або не використання індивідуальних засобів захисту, що може призвести до термічних опіків при непередбаченому контакті з нагрітими частинами двигуна, хімічних опіків та подразнення шкіри при контакті з паливом.

5) Можливість загорянь при проведенні дослідницьких робіт в наслідок порушень правил пожежної безпеки, загоряння ганчірок для протирання, порушень плану проведення експериментів, в яких використовуються

легкозаймисті матеріали (палива), що може призвести до пожежі та гострих отруєнь продуктами горіння.

6) Небезпеки, які пов'язані з використанням персонального комп'ютера (ПК) при обробці отриманих результатів, зокрема, негативний вплив ПК, локальне стомлення; загальна втома; електромагнітне випромінювання; електростатичні поля.

7) Підвищені нервово-психічні навантаження, які пов'язані з високою інтенсивністю праці, що може призвести до психоемоційних перенавантажень або стресів.

8) Незадовільні параметри повітряного середовища в приміщенні дослідницької лабораторії внаслідок нагріву повітря від двигуна.

9) Можливість отруєння відпрацьованими газами двигуна, що знаходиться в лабораторії, що може призвести до гострих отруєнь.

10) Незадовільний рівень освітлення приміщення дослідницької лабораторії прискорює втомлюваність персоналу і може призвести до механічних травм.

11) Небезпеки, які пов'язані з умовами праці у період надзвичайної ситуації в Україні.

## **6.2 Заходи по забезпеченню безпеки**

Заходи з електробезпеки забезпечується, як організаційними, так і технічними заходами. До організаційних відносяться: до роботи допускаються особи, не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, пройшли навчання і перевірку знань з електробезпеки та згідно ДНАОП 1.1.10-1.01-97 «Правила безпечної експлуатації електроустановок» отримали певну групу з електробезпеки.



Електрообладнання в дослідницькій лабораторії повинно відповідати вимогам НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» та іншим діючим нормативним актам. Експлуатацію і ремонт електроустановок повинен здійснювати спеціально підготовлений персонал.

Технічні заходи: подача електроенергії може здійснюватися по шинопроводом і по кабельних лініях. Розташування струмоведучих частин на недоступній висоті. Висота розташування визначається значенням напруги: при нарузі до 1000 В – не менше 3,5 м. Опір ізоляції електричних дротів повинен бути не менше 0,5 МОм. Одним з найбільш ефективних захисних заходів є подвійна електроізоляція згідно НПАОП 40.1-1.07-01 «Правила експлуатації електрозахисних засобів».

В дослідницькій лабораторії передбачено використання індивідуальних та групових засобів захисту до яких відносять:

- захисні фартухи згідно НПАОП 0.00-4.26-96 «Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту» для захисту від потрапляння палива та масла на одяг;

При роботі з ручним інструментом необхідно дотримуватись наступних правил техніки безпеки:

- на поверхні ручного інструменту не повинно бути ніяких мастильних забруднень;
- користуватися допоміжним пристроєм для збільшення моменту обертання гайкового ключа заборонено. Якщо потрібно збільшити зусилля, використовуйте більш потужний інструмент.;
- при роботі застосовується тільки той інструмент, який призначений для виконання операції.;
- використовувати несправний та зношений інструмент заборонено;
- при роботі з інструментом необхідне виконання НПАОП 0.00-1.30-01 «Правила безпечної роботи з інструментом та пристроями».

Також, в якості заходів захисту від механічних ушкоджень обов'язковим є проведення інструктажів та дотримання правил з техніки безпеки під час роботи.

### **6.3 Заходи з виробничої санітарії та гігієни праці**

Для мінімізації негативного впливу шуму передбачено використання індивідуальних і колективних засобів захисту.

До колективних відносять: шумопоглинальні екрани, згідно з ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ «Средства и методы защиты от шума. Классификация»; та винос шумо-генеруючого обладнання в окреме приміщення, згідно ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ «Шум. Общие требования безопасности». У приміщеннях, де роботи виконують на обчислювальних машинах, при обмуровуванні стін і стелі використовують звукопоглинаючі матеріали - перфоровані конструкції, акустичну штукатурку та ін.

До індивідуальних засобів захисту від шуму належать: навушники (ВЦНІОТ-2); протишумові вкладиші (ФПОШ Беруши"); шумозаглушувальні шоломи (ШШЗ-65, ШШЛ-65, ВЦНІИОТ-2М); шоломофони і протишумні костюми.

Одна з головних умов підвищення працездатності – правильно організоване робоче місце. Робоче місце дослідника – це сукупність усього того, що використовується в роботі, тобто меблі, організаційно-технічні засоби. Технічними засобами, якими найчастіше користується дослідник, є персональний комп'ютер. Робоче місце в дослідницькій лабораторії організується відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», зареєстрованих у МЮ України 06.05.2014 р. № 472/25249).

Параметри мікроклімату приміщення лабораторії з двигуном для проведення досліджень встановлюють згідно ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [47] в залежності від категорії робіт за важкістю. Для забезпечення цих параметрів передбачають системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря у відповідності ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [48]. Заходи забезпечення належної чистоти повітря здійснюють згідно вимог ГОСТ 12.1.005-88 «ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». Використовують технологічні заходи і спеціальні методи і засоби нормалізації повітря робочої зони. Передбачають засоби контролю мікроклімату та чистоти повітря робочої зони. Оптимальними параметрами температури у робочих приміщеннях дослідників (група Іа) є 19...21 °С, допустимими 18...22 °С, відносна вологість повітря 55...62 %.

Для забезпечення необхідного рівня освітлення в лабораторії з двигуном слід дотримуватися вимог ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» [49] з урахуванням розряду зорової роботи (VII розряд, освітленість >200 лк).

Для забезпечення рівномірного постійного освітлення робочих місць часто використовують штучне освітлення. Як джерела штучного освітлення застосовують електричні лампи розжарювання, люмінесцентні або світлодіодні лампи. Освітлення має бути достатнім і не мигтіти, забезпечувати захист очей від прямого потрапляння світлових променів. Не повинно бути різких переходів від світла до тіні. Досить, якщо стіл 1,5 м завдовжки освітлюється однією настільною лампою розжарювання потужністю 60 Вт, розташованою над ним на висоті 35 см.

Для попередження отруєнь шкідливими речовинами передбачено:

- гофрована труба, під'єднана до випускної труби двигуна, яка виходить на вулицю;
- місцева витяжна вентиляція згідно ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування», яка забезпечує вловлювання шкідливих

виділень (газів, парів, пилу) біля двигуна – для видалення прориву газів, картерних газів тощо.

Оцінку умов напруженості праці за бальною шкалою розглядаємо на прикладі оцінки факторів, які впливають на дослідника лабораторії з ПК. Попередньо проводимо заміри в лабораторії з ПК та вносимо їх в таблицю 6.1.

Відповідно до додатка А [54], за витратами енергії, визначаємо категорію робіт для дослідника лабораторії обладнаної ПК. Умови праці, за витратами енергії, не перевищують 175 Вт (121...150 ккал/год.) та повинні відповідати легким фізичним роботам – категорії Іб.

З додатків, відповідно до категорії робіт Іб, розряду зорових робіт А-2 та виявлених показників умов та напруженості праці, визначаємо ГДК (ГДР) виявлених факторів і показників та вносимо їх значення до таблиці 6.1.

Для окремих факторів і показників згідно вимог «Гігієнічної класифікації праці», визначаємо розрахункові коефіцієнти  $X_{\text{визн}}$  та вносимо їх значення до таблиці 6.1:

– для гігієнічної оцінки мікроклімату використовуємо ТНС - індекс, додаток Б [54]. Розрахунковий коефіцієнт  $X_{\text{визн}}$  при оцінці мікроклімату визначаємо в балах, за формулою:

$$X_{\text{визн}} = \frac{3 \cdot t_2}{T} = \frac{3 \cdot 7}{7} = 3; \quad (6.1)$$

де  $t_2$  - час дії фактора на відповідному ступені 3 класу, год.;

$T$  - тривалість робочої зміни, год.;

– для показників важкості та напруженості праці розрахункові коефіцієнти визначаються за основними та допоміжними показниками, що є характерними для конкретного робочого місця:

а) Загальні енергозатрати організму,  $K_{\text{знач}} = 1,0$

Таблиця 6.1 – Результати оцінювання за бальною шкалою

Фактор (показник)	Виміряні показники $P_{\text{вим}}$	Час дії год.	ГДК, ГДР, показники, $P_{\text{доп}}$	$X_{\text{визн}}$ , бали	Клас умов праці	$X_i$ , бали
1	2	3	4	5	6	7
Мікроклімат за ТНС-індексом, t, °C	27,2	7	22,9-25,8	3	3,3	3
Освітленість приміщення E, лк	350	7	400	—	3,1	1
Розряд і підрозряд зорових робіт, $Z_{\text{ор}}$	A-2	—	—	—	—	—
Рівень шуму L, дБА	111	4	50	—	3.3	1,5
Загальні енергозатрати організму, Вт	210	7	290	0,634	3.2	3
Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну), при локальному	60500	7	40000	1,323		
Тривалість зосередження уваги (в % від часу зміни)	75	7	75	0,875		
Тривалість робочого дня, год.	7	7	8	0,115		

$$X_{\text{визн}} = \frac{P_{\text{вим}} \cdot T \cdot K_{\text{знач}}}{8 \cdot P_{\text{доп}}}, \quad (6.2)$$

$$X_{\text{визн}} = \frac{210 \cdot 7 \cdot 1,0}{8 \cdot 290} = 0,634,$$

де  $P_{\text{вим}}$  – виміряні показники важкості та напруженості праці;

$T$  – час дії показника важкості та напруженості праці;

$K_{\text{знач}}$  – коефіцієнт значимості показника, для основних показників  $K_{\text{знач}} = 1,0$ , для допоміжних  $K_{\text{знач}} = 0,15$ ;

$8$  – тривалість робочої зміни, год.;

$P_{\text{доп}}$  – допустимі рівні показників важкості та напруженості праці.

б) Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну), при локальному навантаженні (за участю м'язів кистей та пальців рук),  $K_{\text{знач}} = 1,0$ :

$$X_{\text{визн}} = \frac{60500 \cdot 7 \cdot 1,0}{8 \cdot 40000} = 1,323;$$

в) Тривалість зосередження уваги (% від часу зміни),  $K_{\text{знач}} = 1,0$ :

$$X_{\text{визн}} = \frac{75 \cdot 7 \cdot 1,0}{8 \cdot 75} = 0,875;$$

г) Тривалість робочого дня (зміни),  $K_{\text{знач}} = 0,15$ :

$$X_{\text{визн}} = \frac{7 \cdot 7 \cdot 0,15}{8 \cdot 8} = 0,115;$$

Клас і ступінь важкості та напруженості праці визначаємо як суму розрахованих балів усіх показників  $X_{\text{визн}}$  за формулою:

$$X_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n X_i = 0,634 + 1,323 + 0,875 + 0,115 = 2,947; \quad (6.3)$$

З таблиці 7.3 [54] за значенням суми розрахованих балів показників  $X_{\text{сум}} = 2,947$  – 3 клас, 2 ступінь (3.2);

Визначаємо клас та ступінь шкідливості умов праці для кожного з

виявлених факторів і показників та вносимо їх значення до стовпчика 6 таблиці 6.1:

– для мікроклімату, відповідно до значення розрахункового коефіцієнта  $X_{\text{визн}} = 3$ , з таблиці 7.2 [54] – 3 клас, 3 ступінь (3.3);

– при оцінці освітленості робочої зони приміщення, клас та ступінь шкідливості умов праці визначаємо у відповідності до  $\Pi_{\text{вим}} = 350$  лк, за додатками Г та табл. Г.1 [54] – 3 клас, 1 ступінь (3.1);

– для гігієнічної оцінки рівня шуму, клас та ступінь шкідливості умов праці визначаємо у відповідності до виміряного значення рівня шуму  $\Pi_{\text{вим}} = 111$  дБА, за додатками Д та табл. Д.1 [54] – 3 клас, 3 ступінь (3.3).

Оскільки загальна гігієнічна оцінка умов праці за ступенем шкідливості та небезпечності, з урахуванням комбінованої та сумісної дії виробничих факторів, встановлюється за найбільш високим класом та ступенем шкідливості окремих факторів і показників, тому в результаті досліджень, відповідно до розрахунків, встановлено, що умови праці на робочому місці інженера-дослідника центральній заводській лабораторії обладнаної ПК належать до 3 класу, 3 ступеню.

Оскільки при гігієнічній оцінці виявлена наявність шкідливих та особливо шкідливих, важких та особливо важких умов праці, проводимо дослідження фактичного стану умов праці, з метою визначення розмірів доплат за ступені шкідливості факторів виробничого середовища та показників важкості та напруженості праці за бальною шкалою, та вносимо їх значення до стовпчика 7 таблиці 6.1:

– для оцінки впливу мікроклімату, виходимо з того що він відповідає 3 класу, 3 ступеню умов праці, а час його дії уже врахований, тому  $X_{\text{ст}} = X_i = 3$ ;

– при оцінці впливу освітленості, виходимо з того що вона відповідає 3 класу, 1 ступеню умов праці та діє протягом 8 годин, тому  $X_{\text{ст}} = X_i = 1$ ;

– для оцінки впливу шуму, виходимо з того, що його рівень відповідає 3 класу, 3 ступеню умов праці та діє протягом 4 годин, тому значення  $X_i$  визначаємо за формулою:

$$X_i = X_i \cdot \frac{T}{8} = 3 \cdot \frac{4}{8} = 1,5; \quad (6.4)$$

– для оцінки впливу важкості та напруженості праці, виходимо з того що вони відповідають 3 класу, 3 ступеню умов праці, а час їх дії уже врахований, тому –  $X_{ст} = X_i = 3$ ;

Для визначення конкретного розміру доплати, умови праці оцінюємо по сумі значень  $X_i$ , за формулою:

$$X_{факт} = \sum_{i=1}^n X_i = 3+1+1,5+3 = 8,5; \quad (6.5)$$

8. Розмір доплати за умовами праці визначаємо в залежності від їх фактичного стану –  $X_{факт} = 8,5$ , на підставі Типового положення «Про оцінку умов праці на робочих місцях і порядок застосування галузевих переліків робіт, на яких можуть установлюватися доплати робітникам за умови праці», з таблиці 7.4 [54]. Розмір доплати до тарифної ставки (окладу) – 20 %.

## **6.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях**

### **6.4.1 Заходи з пожежної безпеки**

Комплекс протипожежних заходів для приміщення дослідницької лабораторії обладнаного розроблені згідно вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [50].

Виходячи з аналізу речовин та матеріалів, які використовуються при роботі у приміщення дослідницької лабораторії обладнаному персональним комп'ютером з відеодисплейним терміналом (ПК з ВДТ):

– згідно ДСТУ EN 2:2014 «Класифікація пожеж» (EN 2:1992,



EN2:1992/A1:2004, IDT) [51] у приміщенні дослідницької лабораторії обладнаному ПК з ВДТ можлива пожежа класів – А та Е;

– відповідно до вимог ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою», воно належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки – простір у приміщенні, у якому перебувають тверді горючі речовини та матеріали.

Оскільки приміщення дослідницької лабораторії обладнане ПК з ВДТ належить до категорії «Д» з пожежної небезпеки, тому відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги» воно має II ступінь вогнегасників.

Оскільки приміщення дослідницької лабораторії, що обладнане ПК з ВДТ має площу 39 м<sup>2</sup>, тому відповідно по вимог «Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників», зареєстрованих в МЮУ 23.02.2018 р. за № 225/31677 [53] для гасіння електроустановок, що знаходяться під напругою, передбачені вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-3,5 у кількості 2 штук. Додатково, на кожному поверсі будівлі, в якій розміщене приміщення обладнане ПК з ВДТ, передбачене два переносних порошкових вогнегасника – ВП-5. Відстань між вогнегасниками та місцями можливих загорянь не перевищує 10 м.

#### **6.4.2 Заходи з цивільного захисту**

У разі загорання проводки, спробувати загасити вогнище вогню за допомогою вогнегасників, та звернутися до Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Якщо пожежу не вдалося загасити вогнегасником, виникає можливість розповсюдження пожежі по приміщенню.

З цивільного захисту відомо, що в умовах надзвичайних ситуацій найголовніше знати свої дії і чітко їх наслідувати. Для цього необхідне

регулярне проведення інструктажів по пожежній безпеці відповідно до НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Для ефективнішого управління персоналом проводити навчання по пожежній безпеці. При пожежі дзвонити в пожежну службу і включити сигнал тривоги. Відключити усі електроприлади за допомогою автоматів на щитку.

У випадках неможливості загасити пожежу, слід прикрити ніс і рот тканиною, бажано вологою, і повзучи пробиратися поряд із стінкою до виходу.

Якщо спалахнув одяг, потрібно лягти на підлогу (землю) і, перекочуючись, збити вогонь або накинути на себе пальто, плащ і щільно притиснути, щоб припинити приплив повітря до вогню.

Необхідно триматися чимдалі від вікон, дзеркал, світильників, уважно стежити, щоб не впала на голову штукатурка.

Коли приїдуть пожежники, якомога більше розповісти про причину пожежі, описати матеріали, що горять, надати усю інформацію про пожежу.

У разі спалаху випробувального стенду з двигуном внутрішнього згорання, спробувати загасити вогонь за допомогою вогнегасників порошкового типу.

## **6.5 Висновки за розділом**

Розроблені заходи дозволяють безпечно проводити дослідження ефективності дизельного ДВЗ, що працює на біодизельних паливах різного складу в умовах лабораторії, оснащеної випробувальним стендом з вимірювальним обладнанням, а також робочим місцем з персональним комп'ютером для обробки отриманих даних.

## 7 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Економічний ефект від експлуатації двигуна на різних видах палива (дизельне паливо та біодизель БДнЕ і БДвЕ) визначається двома способами:

- зіставлення його техніко-економічних показників.
- розрахунок експлуатаційних витрат.

За отриманими результатами необхідно зробити висновок про перспективність заміни палива.

### 7.1 Оцінка технічного рівня двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на різних паливах

Аналізуються технічна характеристика двигуна. Важливим моментом при проведенні порівняльного аналізу є встановлення технічного рівня ДВЗ. Проведемо порівняльний аналіз за допомогою встановлення технічного рівня ДВЗ. Технічний рівень доцільно оцінювати за допомогою коефіцієнта технічного рівня ( $K_{тр}$ ), що розраховується бальним методом за основними технічними параметрами двигуна, які мають кількісну оцінку [55].

Оскільки двигуна ЯМЗ-5340 використовуються на комерційному транспорті, вартість палива визначається за оптовими цінами:

- дизельне паливо 21 грн/л = 32,1 грн/кг [56];
- біодизель (БДнЕ і БДвЕ) 17,5 грн/л = 15,4 грн/кг [57].

Коефіцієнт технічного рівня розраховано у наступній послідовності. Логічним шляхом встановлено ступінь важливості порівнюваних параметрів ( $k_{ваг}$ ). Встановлена ступінь важливості параметрів здійснена за даними переддипломної практики. Сума всіх  $k_{ваг}$  дорівнює 1,0 та наведена в таблиці 7.1.

Надалі обрана п'ятибальна шкала оцінювання. Здійснено оцінку та проставлено бали за кожним обраним для порівняння показником технічного рівня ДВЗ.

Коригуються встановлені бали на коефіцієнт питомої ваги за формулою:

$$Q^m_i = B^m_i \cdot k_{\text{вар.}i} , \quad (7.1)$$

Сумарна бальна оцінку кожного з порівнюваних варіантів встановлено за формулою:

$$Q^m_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i , \quad (7.2)$$

$$Q_{\Sigma(\text{ДП})} = 1 + 0 + 0,25 + 0,25 + 0,25 + 1 + 1,2 + 0,25 = 4,2;$$

$$Q_{\Sigma(\text{БДвЕ})} = 1 + 0 + 0,25 + 0,25 + 0,2 + 0,8 + 2 + 0,25 = 4,75;$$

$$Q_{\Sigma(\text{БДнЕ})} = 1 + 0 + 0,25 + 0,25 + 0,2 + 0,8 + 2 + 0,25 = 4,75.$$

Результати розрахунків представлено в таблиці 7.1.

Коефіцієнт технічного рівня визначено за формулою:

$$K_{\text{тр}} = Q^{\text{БД}}_{\Sigma} / Q^{\text{ДП}}_{\Sigma} , \quad (7.3)$$

$$K_{\text{тр}(\text{БДвЕ})} = 4,75/4,2 = 1,131,$$

$$K_{\text{тр}(\text{БДнЕ})} = 4,75/4,2 = 1,131,$$

де  $Q^{\text{баз}}_{\Sigma}$ ,  $Q^{\text{пр}}_{\Sigma}$  – сумарна бальна оцінка технічного рівня відповідно ДВЗ базового (працює на ДП) та працюючого на певному виді біодизеля.

Оскільки коефіцієнт технічного рівня для двигуна ЯМЗ-5340  $K_{\text{тр}} > 1$ , робимо висновок, що перехід з дизельного палива на біодизель є доцільним.

Таблиця 7.1 – Оцінка технічного рівня ДВЗ

Показники	Питома вага показника, $k_{ваг}$	ДП			БДВЕ			БДнЕ		
		Величина	Бальна оцінка $B_i$	Оцінка з урахуванням $k_{ваг}, Q_i$	Величина	Бальна оцінка $B_i$	Оцінка з урахуванням $k_{ваг}, Q_i$	Величина	Бальна оцінка $B_i$	Оцінка з урахуванням $k_{ваг}, Q_i$
Максимальна потужність $N_e$ , кВт	0,2	140,35	5	1	141,27	5	1	141,53	5	1
Ступінь стиснення $\epsilon$	0	17,5	5	0	17,5	5	0	17,5	5	0
Маса, кг	0,05	480	5	0,25	480	5	0,25	480	5	0,25
Частота обертання колінчатого валу $n$ , $хв^{-1}$	0,05	2300	5	0,25	2300	5	0,25	2300	5	0,25
Питома витрата палива на номінальному режимі $g_e$ , г/(кВт·год)	0,05	214,6	5	0,25	242,7	4	0,2	245,3	4	0,2
Годинна витрата палива $G_T$ , кг/год	0,2	30,12	5	1	34,29	4	0,8	34,71	4	0,8
Вартість палива, грн/кг	0,4	32,1	3	1,2	15,4	5	2	15,4	5	2
Ресурс між ТО, тис. км	0,05	10	5	0,25	9	5	0,25	9	5	0,25
Разом	1,0		38	$Q\Sigma = 4,2$		38	$Q\Sigma = 4,75$		38	$Q\Sigma = 4,75$

## 7.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Склад експлуатаційних витрат визначається умовами використання двигуна. Для двигунів внутрішнього згорання експлуатаційні витрати складаються з витрат на забезпечення їх функціонування в умовах експлуатації, які дуже різноманітні. Вони складаються з витрат на змащення, регулювання, наладку двигуна, витрати на проведення всіх видів ремонтів (капітального, поточного, малого), витрат на технічні огляди та заміну матеріалів за весь строк експлуатації.

Таким чином, перелік експлуатаційних витрат складається з таких елементів:

- витрати на паливо;
- витрати на мастило;
- витрати на ремонт і на технічне обслуговування.

В якості розглянутого періоду прийнятий календарний рік, протягом якого середній пробіг вантажного автомобіля МАЗ на приміських перевезеннях становить 45 тис. км [58]. Середня швидкість автомобіля в приміських умовах руху складає 30 км/год [59]. Таким чином, річна витрата моторесурсу двигуном ЯМЗ-5340 складає  $45000/30 = 1500$  мотогодин.

Річні витрати на паливо ( $B_{\text{п}}$ ) визначаються за формулою:

$$B_{\text{п}} = N_e \cdot g_e \cdot T_3 \cdot C_{\text{п}}, \quad (7.4)$$

де  $N_e$  – ефективна потужність двигуна, кВт;

$g_e$  – питомі витрати палива, кг/(кВт·год);

$T_3$  – річна зайнятість двигуна, мото-годин;

$C_{\text{п}}$  – ціна 1 кг палива, грн.

Для двигуна на дизельному паливі:

$$V_{\text{п ДП}} = 140,35 \cdot 0,2146 \cdot 1500 \cdot 32,1 = 1450235,15 \text{ грн.}$$

Для двигуна на біодизелі БДвЕ:

$$V_{\text{п БДвЕ}} = 141,27 \cdot 0,2427 \cdot 1500 \cdot 15,4 = 792011,89 \text{ грн.}$$

Для двигуна на біодизелі БДнЕ:

$$V_{\text{п проект}} = 141,53 \cdot 0,2453 \cdot 1500 \cdot 15,4 = 801969,84 \text{ грн.}$$

Витрати на технічне обслуговування розраховуються за формулою:

$$V_{\text{го}} = (T_{\text{заг}} \cdot l) / T_{\text{експл.}}, \quad (7.5)$$

Для двигуна на дизельному паливі:

$$V_{\text{го ДП}} = (700 \cdot 150) / 22,2 = 4729,73 \text{ грн.}$$

Для двигуна на біодизелі БДвЕ і БДнЕ:

$$V_{\text{го БДвЕ}} = (850 \cdot 150) / 22,2 = 5743,24 \text{ грн.}$$

де  $l$  – вартість 1 нормо-години технічного обслуговування, грн.;

$T_{\text{заг}}$  – трудомісткість технічного обслуговування, в годинах, розраховано в табл. 7.2;

$T_{\text{експл}}$  – кількість років експлуатації, розраховано виходячи з ресурсу двигуна 1 млн км та річного пробігу 45 тис. км.  $T_{\text{експл}} = 1000000/45000 = 22,2$  роки.

На підставі наведених формул визначимо витрати на технічне обслуговування, при цьому вартість 1 нормо-години технічного обслуговування прийнята в розмірі 150 грн.

ТО-1 проводиться кожні 5 тис. км, ТО2 – кожні 20 тис. км. [60].

Результати розрахунків представлено в порівняльній таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Трудомісткість технічного обслуговування двигунів за період експлуатації до вичерпання призначеного ресурсу, при роботі на дизельному паливі та біодизелі

Види тех. обслуговування	Періодичність огляду, кількість		Трудомісткість t, годин		T <sub>заг</sub> , год.	
	ДП	БД	ДП	БД	ДП	БД
ТО1	200	200	2	2,5	400	500
ТО2	50	50	6	7	300	350
Разом	250	250	–	–	700	850

Таблиця 7.3 – Порівняння змінних статей експлуатаційних витрат

№	Вид експлуатаційних витрат	Сума витрат на рік (грн.)		
		ДП	БДВЕ	БДНЕ
1	Витрати на паливо	1 450 235,15	792 011,89	80 1969,84
2	Витрати на технічне обслуговування	4 729,73	5 743,24	5 743,24
	Разом змінних статей експлуатаційних витрат	1 454 964,88	797 755,13	807 713,08

Визначимо відносну зміну експлуатаційних витрат ( $\Delta V_{\text{експл.}}$ ) у порівнянні з відотною зміною ефективної потужності двигуна ( $\Delta E_{\text{П}}$ ) за допомогою формул (7.6), (7.7):

$$\Delta V_{\text{експл.}} = (\sum V_{\text{експл.БД}} - \sum V_{\text{експл.ДП}}) / \sum V_{\text{експл.ДП}} \cdot 100\%, \quad (7.6)$$

$$\Delta V_{\text{експл. БДВЕ}} = (797755,13 - 1454964,88) / 1454964,88 \cdot 100\% = -45,17\%,$$

$$\Delta V_{\text{експл. БДНЕ}} = (807713,08 - 1454964,88) / 1454964,88 \cdot 100\% = -44,49\%,$$



де  $\Delta V_{\text{експл.}}$  – відносна зміну експлуатаційних витрат, %;

$\Sigma V_{\text{експл.БД}}$  – річна сума експлуатаційних витрат двигуна на БД;

$\Sigma V_{\text{експл.ДП}}$  – річна сума експлуатаційних витрат двигуна на ДП;

$$\Delta EP = (EP_{\text{БД}} - EP_{\text{ДП}}) / EP_{\text{ДП}} \cdot 100, \% , \quad (7.7)$$

$$\Delta EP_{\text{БДвЕ}} = (141,27 - 140,35) / 140,35 \cdot 100\% = 0,66 \%,$$

$$\Delta EP_{\text{БДнЕ}} = (141,53 - 140,35) / 140,35 \cdot 100\% = 0,84 \%,$$

де  $\Delta EP$  – відносна зміна ефективної потужності двигуна, %;

$EP_{\text{БД}}$  – ефективна потужність двигуна на БД, кВт;

$EP_{\text{ДП}}$  – ефективна потужність двигуна на ДП, кВт.

Таким чином, споживач при збільшенні ефективності потужності двигуна на 0,66 % отримає зменшення витрат на 45,17 % при використанні палива БДвЕ (замість дизельного палива), або при збільшенні ефективної потужності двигуна на 0,84 % отримає зменшення витрат на 44,49 % при використанні палива БДнЕ.

### 7.3 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект створюється за рахунок зниження вартості палива. Для споживачів економічний ефект  $E_e$  від експлуатації двигуна на біопаливі розраховано за формулою:

$$E_e = (g_{e \text{ ДП}} - g_{e \text{ БД}}) \cdot \text{МТР} \cdot \text{Ц}_п, \quad (7.8)$$

$$E_{\text{БДвЕ}} = 0,2427 \cdot 33300 \cdot 15,4 - 0,2146 \cdot 33300 \cdot 32,1 = 104930,96 \text{ грн.},$$

$$E_{\text{БДнЕ}} = 0,2453 \cdot 33300 \cdot 15,4 - 0,2146 \cdot 33300 \cdot 32,1 = 103597,63 \text{ грн.},$$

де  $g_{e \text{ ДП}}$  – питома витрата дизельного палива, кг/кВт·год;

$g_{e \text{ БД}}$  – питома витрата біодизеля, кг/кВт·год;

$MTP = 33300$  – моторесурс, мотогодин;

$C_{\text{п}}$  – ціна 1 кг палива, грн.

Відносне змінення питомої ваги витрати палива  $\Delta g_e$  визначено за формулою:

$$\Delta g_e = (g_{e \text{ ДП}} - g_{e \text{ БД}}) / g_{e \text{ ДП}} \cdot 100, \% \quad (7.9)$$

$$\Delta g_{e \text{ БДвЕ}} = (0,2146 - 0,2427) / 0,2146 \cdot 100 = -13,09 \%,$$

$$\Delta g_{e \text{ БДнЕ}} = (0,2146 - 0,2453) / 0,2146 \cdot 100 = -14,31 \%,$$

де  $\Delta g_{e \text{ баз}}$  – відносна зміна питомої ваги витрати палива, %;

$g_{e \text{ баз}}$  – питома витрата палива базового двигуна; кг/кВт·год;

$g_{e \text{ пр}}$  – питома витрата палива нового двигуна; кг/кВт·год.

Таким чином, споживач при використанні палива БДвЕ збільшиться питома витрата палива на 13,09 %, але за рахунок меншої вартості палива отримано економічний ефект 104930,96 грн. за весь період експлуатації двигуна (22,2 роки).

При використанні палива БДнЕ збільшиться питома витрата палива на 14,31 %, але за рахунок меншої вартості палива отримано економічний ефект 103597,63 грн.

#### **7.4 Визначення витрат на проведення магістерської роботи**

Розраховуємо **витрати на матеріали** (табл. 7.4), які були використані при виконанні магістерської роботи

Таблиця 7.4 – Розрахунок витрат на матеріали

№ п/п	Матеріал	Одиниця виміру	Витрати матеріалу на тему	Ціна за одиницю виміру	Сума витрат, грн.
1	Папір А4	пачка	1	90,00	90,00
2	Настольний набір	набір	1	250	250,00
	Підсумок за винятком зворотних витрат	–	–	–	340,00
	Транспортно-заготівельні витрати	%	10	10	34,00
	Разом із транспортно-заготівельними витратами	–	–	–	374,00

**Витрати на силову енергію  $E_c$**  визначаємо за формулою:

$$E_c = \frac{P_y \cdot \Phi_{\text{еф}} \cdot K_v \cdot C_e}{\text{ККД}}, \quad (7.10)$$

$$E_{c \text{ ноутбук}} = \frac{0,5 \cdot 552 \cdot 0,8 \cdot 0,75}{0,9} = 184,00 \text{ грн.};$$

$$E_{c \text{ освітлення}} = \frac{0,01 \cdot 552 \cdot 0,8 \cdot 0,75}{0,9} = 3,68 \text{ грн.};$$

де  $P_y$  – установлена потужність енергетичних струмоприймачів устаткування, кВт;

$\Phi_{\text{еф}}$  – ефективний фонд часу роботи даного виду устаткування, годин.  
Приймаємо  $\Phi_{\text{еф}} = 552$  год із розрахунку 69 робочих днів на виконання магістерської роботи, по 8 годин кожного дня;

$K_v$  – коефіцієнт використання енергетичних установок по потужності і часу ( $K_v \approx 0,8 \dots 0,9$ );

$C_e$  – ціна 1 кВт·години електроенергії, грн/(кВт·год);

ККД = 0,8.....0,9.

Виконані розрахунки заносимо до таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Розрахунок вартості енергоресурсів

Устаткування	Вид енерго-ресурсів	П <sub>у</sub> , Вт	Ф <sub>еф</sub>	Ціна чи вартість, грн/кВт.год	Вартість енерго-ресурсів, грн.
Комп'ютерна техніка	електрична енергія	500	552	0,75	184,00
Освітлення	електрична енергія	10	552		3,68
Разом					187,68

### Розрахунок амортизації універсального устаткування

Суму амортизаційних відрахувань від балансової вартості універсального устаткування, апаратів і приладів, що відносяться до основних фондів, розраховується у відповідності із зайнятістю їх для даної роботи. Норму амортизації для комп'ютерної техніки приймаємо 50 %.

Результати розрахунку зводимо до таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Розрахунок суми амортизаційних відрахувань

Устаткування, прилади	Балансова вартість, грн.	Норма амортизації, %	Зайнятість устаткування, год	Річний ефективний фонд часу, год	Сума амортизації, грн.
Комп'ютер	14000	50	552	2085	1853,24
Wi-Fi роутер	555	50	552	8760	17,49
Принтер	4000	50	10	40	500
Разом					2370,73

### Розрахунок заробітної плати

У цю статтю включається заробітна плата всіх категорій працівників, що безпосередньо зайняті в процесі проведення всіх етапів робіт. Сума

заробітної плати розраховується на основі зайнятості виконавців по окремих етапах робіт і середньоденного заробітку для кожної категорії персоналу (див. календарний план виконання магістерської роботи). Студент-магістрант виконує магістерську роботу за 69 робочих днів. Керівник роботи працює протягом того ж часу, проте розподіляє свої обов'язки між 5 магістрантами, тому  $69/5 = 14$  днів. Згідно календарного плану, консультант з економіки витрачає на роботу 7 робочих днів, консультант з охорони праці 7 робочих днів, нормоконтролер – 3 робочі дні.

Розрахунок основної заробітної плати зводимо до таблиці 7.7.

За місячним окладом кожного виконавця роботи розраховуємо середньоденну зарплату із розрахунку, що в місяці 21 робочий день.

Таблиця 7.7 – Розрахунок основної і заробітної плати

Посада виконавця	К-ть, людей	Місячний оклад, грн.	Середньоденна зарплата, грн.	Зайнятість НДР, днів	Підсумкова сума основної зарплати, грн.
Студент	1	2400,00	114,29	69	7885,71
Керівник	1	9400,00	452,38	14	6333,33
Консультант з економіки	1	9400,00	452,38	7	3166,67
Консультант з охорони праці	1	7500,00	357,14	7	2500,00
Нормоконтролер	1	7200,00	342,86	3	1028,57
Підсумок	5	–	–	100	20914,29

Таким чином, основана заробітна плата  $ЗП_0 = 20914,29$  грн. До підсумкової суми основної зарплати робітників додається премія в розмірі 10 %:

$$ЗП_{д} = ЗП_{о} \cdot 0,1 \quad (7.11)$$

$$ЗП_{д} = 20914,29 \cdot 0,1 = 2091,43 \text{ грн.}$$

Таким чином, основна і додаткова зарплата складає

$$ЗП = ЗП_{о} + ЗП_{д}, \quad (7.12)$$

$$ЗП = 20914,29 + 2091,43 = 23005,72 \text{ грн.}$$

**Внески на соціальні заходи** визначаємо у процентному відношенні від суми основної і додаткової зарплати з урахуванням премій:

$$B_{сз} = \frac{(ЗП_{о} + ЗП_{д}) \cdot Y_{сз}}{100\%} \quad (7.13)$$

$$B_{сз} = \frac{(20914,29 + 2091,43) \cdot 22}{100} = 5061,26 \text{ грн.,}$$

де  $Y_{сз/стр}$  – питома вага внесків на соціальні заходи, визначається за даними діючого законодавства, %. Приймаємо 22%.

**Накладні витрати** розраховуємо у відсотках від основної заробітної плати виконавців (50 %).

$$B_{н} = ЗП_{о} \cdot 0,5, \quad (7.14)$$

$$B_{н} = 20914,29 \cdot 0,5 = 10457,14 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків витрат заносимо до таблиці 7.8.

Таблиця 7.8 – Кошторис витрат на виконання НДР

Витрати	Сума, грн.	Питома вага до підсумку, %
Матеріали за винятком зворотних відходів	374,00	0,90
Паливо й енергія з боку	187,68	0,45
Амортизація універсального устаткування	2370,73	5,72
Заробітна плата основна і додаткова	23005,72	55,49
Відрахування на соціальні заходи	5061,26	12,21
Накладні витрати	10457,14	25,22
Усього	41456,53	100

### 7.5 Висновки за розділом

Економічний ефект у споживача двигуна ЯМЗ-5340, що використовується на ватажному автомобілі МАЗ для приміських перевезень, за весь використаний моторесурс становитиме 104930,96 грн. (при використанні палива БДВЕ) або 103597,63 грн. (БДнЕ), що досягається за рахунок зниження вартості палива.

Витрати на виконання магістерської роботи складають 41456,53 грн, з яких 55,49 % – заробітна плата основна і додаткова, 12,21 % – відрахування на соціальні заходи, 25 % – накладні витрати тощо.

## ВИСНОВКИ

1. З аналізу літературних джерел, порівняння властивостей ДП та біодизелю визначено переваги, в тому числі екологічні, від використання, а також недоліки.

2. В якості об'єкта дослідження обрано сучасний дизельний двигун ЯМЗ-5340, розглянуто його характеристики та особливості конструкції. Розкрито основні положення методики теплового розрахунку, за допомогою якої можна дослідити питання впливу палива на ефективність дизеля.

3. З використанням комп'ютерної програми Engine Calculation виконано теплові розрахунки двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на біодизельному паливі з метилових естерів ріпакової олії (МЕРО) двох типів: з низьким та з високим вмістом ерукової кислоти (БДнЕ та БДвЕ). Визначено теплофізичні показники ( $H_u$ ,  $L_o$ ,  $l_o$ ) для палив БДнЕ та БДвЕ, які можуть використовуватись в комп'ютерній програмі Engine Calculation при розрахунках будь-яких дизельних ДВЗ.

4. Встановлено, що для забезпечення незмінного значення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha = 1,9$  необхідно збільшувати величину паливоподачі двигуна, а саме циклову подачу палива (кількість палива, що впорскується за 1 цикл двигуна)  $\Delta m_{ци}$ : для біопалива БДвЕ – на 13,83 %; для біопалива БДнЕ – на 15,27 %.

5. Визначено індикаторні та ефективні показники двигуна ЯМЗ-5340 при роботі на трьох видах палива (дизельне паливо, БДнЕ та БДвЕ) на номінальному режимі. При збереженні незмінним коефіцієнту надлишку повітря для біодизельних палив: ефективна потужність зростає на 0,7...0,8 %; питома ефективна витрата палива зростає на 13,1 % (БДвЕ) та 14,3 % (БДнЕ); годинна витрата палива зростає на 13,8 % (БДвЕ) та 15,2 % (БДнЕ). У біодизеля БДнЕ потужність на ~0,1 % вища, а витрата палива на 1,2...1,4 % більша у порівнянні з БДвЕ.



6. Максимальна температура  $T_{\max}$  та тиск  $p_{\max}$  протягом робочого циклу залишаються практично незмінними (максимальна різниця складає 1,3 К та 61 кПа відповідно), що вказує на те, що двигун на біопаливах не підвергається збільшеним тепловим або динамічним навантаженням.

7. Вважаючи, що циклова подача палива  $\Delta m_{\text{ци}}$  – величина незмінна при будь-якому виді палива, визначено реальні значення коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  при заміні дизельного палива на біодизельне паливо МЕРО за відсутності коригування часу/тривалості впорскування палива.

Для біодизельного палива: БДвЕ  $\alpha = 2,163$ , БДнЕ  $\alpha = 2,19$ .

8. Визначено вплив температури та тиску навколишнього середовища на ефективні показники двигуна на номінальному режимі.

При зменшенні температури атмосферного повітря густина його зростає, тому збільшується масове наповнення циліндрів як повітрям  $\Delta m_{\text{вц}}$ , так і паливом  $\Delta m_{\text{ци}}$ . Величина питомої ефективної витрати палива  $g_e$  в середньому зменшується на 0,6 % (на кожні 10 °С). В той же час ефективна потужність  $N_e$  зростає на 4,1 %. Величина годинної витрати палива  $G_T$ , зростає на 3,4 % на кожні 10 °С зниження  $T_o$ .

Зменшення тиску атмосферного повітря (при збільшенні висоти над рівнем моря) призводить до падіння потужності. Підвищення висоти на кожні 500 м викликає зменшення на  $N_e = 7,07 \dots 9,28$  кВт – в середньому на 5,4 %, значущого впливу на величину питомої ефективної витрати палива  $g_e$  немає, величина  $G_T$  зменшується в середньому на 5,5 %.

9. Знайдені апроксимаційні квадратичні рівняння можуть бути використані для визначення зміни ефективних потужності та витрати палива при експлуатації 4-тактних дизельних ДВЗ за тиску та температури атмосферного повітря, притаманних різним регіонам України.

10. Економічний ефект у споживача двигуна ЯМЗ-5340, що використовується на ватажному автомобілі МАЗ для приміських перевезень, за весь використаний моторесурс становитиме 104930,96 грн. (при використанні палива БДвЕ) або 103597,63 грн. (паливо БДнЕ), що досягається за рахунок

зниження вартості палива. Витрати на виконання магістерської роботи складають 41456,53 грн.

11. Визначено найбільш значимі небезпечні фактори при проведенні досліджень з дизельними та біодизельним паливами для ДВЗ. Після їх аналізу розроблено заходи по забезпеченню безпеки в дослідницькій лабораторії, заходи до забезпечення виробничої санітарії та гігієни праці, заходи з пожежної безпеки, заходи з безпеки у надзвичайних ситуаціях. Заміна дизельного палива на біодизельне є безпечним та не вимагає запровадження особливих умов охорони праці.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. **Долінський, А. А.** Продукування енергоносіїв з відновлювальної рослинної сировини [Текст] / А. А. Долінський, Л. Н. Грабов, В. І. Мерщій, А. І. Шматок // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 9. – 2008. – С. 44–50.
2. **Ткачук, В. В.** Дослідження експлуатаційних властивостей дизельного палива з додаванням біодобавок [Текст] / В. В. Ткачук // Товарознавчий вісник. – 2020. – Вип. 13. – С. 244–255.
3. **Демидов, И. Н.** О перспективах получения биодизельного горючего в Украине [Текст] / И. Н. Демидов, М. Ш. Садик // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные исследования в научных работах студентов. – Харьков : НТУ «ХПИ». – 2012. – № 39. – С. 108–116.
4. **Гафуров, Н. М.** Физико-химические характеристики биодизельного топлива в соответствии принятым стандартам [Текст] / Н. М. Гафуров, Р. Ф. Хисматуллин // Инновационная наука. – 2016. – № 5–2 (17). – С. 71–72.
5. ДСТУ 7688:2015. Паливо дизельне Євро. Технічні умови (ISO 6107-1:1996, IDT). [На заміну ДСТУ 4840:2007; чинний від 2015-05-28]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. – 16 с.
6. **Панкин, К. Е.** Сравнение жидких биотоплив с нефтяными топливами по эксплуатационным характеристикам [Текст] / К. Е. Панкин, Ю. В. Иванова, Р. И. Кузьмина, С. Н. Штыков // Химия и технология топлив и масел. – 2011. – № 2. – С. 23–25.
7. **Панкин, К. Е.** Сравнение жидких биотоплив с нефтяными топливами по экологическим характеристикам [Текст] / К. Е. Панкин, Ю. В. Иванова, Р. И. Кузьмина, С. Н. Штыков // Химия и технология топлив и масел. – 2011. – № 3. – С. 3–6.
8. **Гельфанд, Е. Д.** Технология биотоплив [Електронний ресурс] : учебное пособие для магистрантов, обучающихся по направлению 240700.68 «Биотехнология» : рукопись / Е. Д. Гельфанд. – Архангельск, 2012. – 60 с. –

Режим доступу: <https://narfu.ru/university/library/books/0782.pdf>

9. **Банников, Н. Г.** Характеристики сгорания метиловых эфиров жирных кислот в дизельном двигателе [Текст] / Н. Г. Банников // Проблемы машиностроения. – 2012. – Т. 15. – № 5–6. – С. 70–76.

10. Біодизель [Електронний ресурс] / Сайт «Вікіпедія». – 2021. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Біодизель>

11. **McCormick, R. L.** 2006 Biodiesel Handling and Use Guide. Third Edition [Електронний ресурс] / К. S. Tyson, R. L. McCormick. – DOE/GO-102006-2358. – September 2006. – U.S. Department of Energy. – 62 p. – Режим доступу: <https://web.archive.org/web/20061216051136/http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/nrbf/pdfs/40555.pdf>

12. **Семенов, В. Г.** Цивилизация без нефти: биодизельное топливо в топливно-энергетическом комплексе Украины [Текст] / В. Г. Семенов // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2007. – № 1. – С. 11–15.

13. **Семенов, В. Г.** Анализ показателей работы дизелей на нефтяных и альтернативных топливах растительного происхождения [Текст] / В. Г. Семенов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ»: Зб. наук. праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – № 3. – С. 177–197.

14. **Бугрик, О. В.** Розширення паливної бази дизелів транспортних засобів використанням дизельного біопалива з утилізованих відходів продовольчих жирів : автореф. дис. на здобуття наук. ступення к-та техн. наук: спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту / Бугрик Олексій Вікторович, НТУ. – Київ, 2021 – 20 с.

15. **Мироненко, В. Г.** Технології виробництва біодизеля [Текст] : курс лекцій для студ. сільськогосп. вищ. навч. закл. / В. Г. Мироненко, В. О. Дубровін, В. М. Поліщук, С. В. Драгнев. – К. : ХОЛТЕХ, 2009. – 100 с.

16. **Гафуров, Н. М.** Преимущества биодизельного топлива [Текст] / Н. М. Гафуров, Р. Ф. Хисматуллин // Инновационная наука. – 2016. – № 5. – С. 72–74.

17. **Гафуров, Н. М.** Факторы, влияющие на промышленное производство и применение биодизельного топлива [Текст] / Н. М. Гафуров, Р. Ф.

Хисматуллин // Инновационная наука. – 2016. – № 5. – С. 74–75.

18. Двигатели ЯМЗ-534 [Электронный ресурс]. – Сайт «Ярославские моторы». – Режим доступа : <https://www.yamz-dizel.ru/engines-yamz/534/>

19. Двигатели ЯМЗ-5340, ЯМЗ-5341, ЯМЗ-5342, ЯМЗ-5344, их модификации и комплектации. Экологический класс 4 и 5. Руководство по эксплуатации 5340.3902150 РЭ [Текст]. – Ярославль : ПАО «Автодизель» (ЯМЗ), 2018. – 280 с.

20. Характеристики двигателя ЯМЗ-5340 [Электронный ресурс]. – Сайт «Авто-Альянс». – Режим доступа : <http://www.yamzopt.ru/catalog/yamz/engines/euro-4/euro4-14t-5340.html>

21. ГОСТ Р 52368-2005 Топливо дизельное евро. Технические условия (ЕН 590:2004). [Чинний від 2006-07-01]. Изд. офиц. Москва : Стандартиформ, 2005. – 9 с.

22. **Шароглазов, Б. А.** Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания [Текст] : учеб. пособие по выполнению курсовой работы / Б. А. Шароглазов, А. В. Гофман. – Челябинск : Издцентр ЮУрГУ, 2014. – 30 с.

23. BorgWarner Performance Turbochargers 2017 Catalog [Электронный ресурс]. – BorgWarner Inc. – 2017. – 72 р. – Режим доступа : [https://www.turbozentrum.de/turbozentrum/pdf/borgwarner/bwts\\_performanceturbos\\_general\\_1880\\_2103.pdf](https://www.turbozentrum.de/turbozentrum/pdf/borgwarner/bwts_performanceturbos_general_1880_2103.pdf)

24. Инструкция по диагностике двигателей ЯМЗ-5340, ЯМЗ-536, их модификаций и комплектаций экологических классов 4 и 5. 5340.3902250 ИС [Текст]. – Ярославль : ПАО «Автодизель» (ЯМЗ), 2018. – 116 с.

25. Методичні вказівки до курсового проекту з дисципліни «Теорія ДВЗ» для студентів спеціальності 7(8).05050304 «Двигуни внутрішнього згорання» всіх форм навчання [Текст] / Укл.: Г. І. Слинько, Я. О. Єгоров. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 50 с.

26. **Егоров, Я. А.** Физико-математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания автотракторного типа [Текст] : Учеб. пособие /

Я. А. Егоров. – К.: УМК ВО, 1991. – 56 с.

27. **Марков, В. А.** Состав и теплота сгорания биотоплив, получаемых из растительных масел [Текст] / В. А. Марков, С. А. Нагорнов, С. Н. Девянин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». – 2012. – № 2. – С. 65–80.

28. **Марков, В. А.** Использование растительных масел и топлив на их основе в дизельных двигателях [Текст] / В. А. Марков, С. Н. Девянин, В. Г. Семенов, А. В. Шахов, В. В. Багров. – М. : ООО НИЦ «Инженер», 2011. – 536 с.

29. **Goering, C. E.** Fuel properties of eleven vegetable oils [Текст] / C. E. Goering, A. W. Schwab, M. J. Daugherty, E. H. Pryde, A. J. Heakin // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE). – 1982. – Vol. 25. No. 6. – P. 1472–1477, 1483.

30. **Peterson, C. L.** Vegetable Oil substitutes for diesel fuel [Текст] / C. L. Peterson, G. L. Wagner, D. L. Auld // Transactions of the ASAE. – 1983. – Vol. 26. No. 2. – P. 322–327, 332.

31. **Cossement, M.** Effect of erucic acid on the polymorphism of hydrogenated rapeseed oil [Текст] / M. Cossement, M. Michaux, G. Lognay et al. // Fett Wissenschaft Technologie. – 1990. – Jg. 92. No. 6. – S. 229–231.

32. **Warwel, S.** Transgene Olsaaten – Zuchtungsziele bei Raps aus chemisch-technischer Sicht [Текст] / S. Warwel // Fett Wissenschaft Technologie. – 1993. – Jg. 95. No. 9. – S. 329–333.

33. **DeMan, L.** Physical and chemical properties of hydrogenation high erucic rapeseed oil [Текст] / L. DeMan, H. S. Chen, Y. J. Yu et al. // Fett Wissenschaft Technologie. – 1995. – Jg. 97. Sonderausgabe No. 1. – S. 485–490.

34. Методичні вказівки до індивідуальних розрахунково-графічних робіт з теплового та динамічного розрахунків ДВЗ для студентів спеціальності 7(8).05050304 «Двигуни внутрішнього згорання» всіх форм навчання / Укл. Г. І. Слинко, Р. Ф. Сухонос – Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 30 с.

35. Регрессионный анализ [Электронный ресурс] // Сайт «Распознавание». – 2016. – Режим доступа: [http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Регрессионный\\_анализ](http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Регрессионный_анализ)

36. МНК и регрессионный анализ Онлайн + графики [Электронный ресурс] // Сайт «Математический форум Math Help Planet». – Режим доступа: <http://mathhelpplanet.com/static.php?p=onlayn-mnk-i-regressionniy-analiz>

37. **Демидович, Б. П.** Численные методы анализа. Приближение функций, Дифференциальные и интегральные [Текст] / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. / Под ред. Б. П. Демидовича. – М.: Наука, 1967. – 368 с.

38. Методичні вказівки до переддипломної практики, виконання та захисту кваліфікаційної роботи магістрів, що навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування», освітня програма «Двигуни внутрішнього згорання» [Текст] / Укл.: Г. І. Слинько, В. І. Кубіч, Р. Ф. Сухонос. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 38 с.

39. **Колчин, А. И.** Расчет автомобильных и тракторных двигателей [Текст] : Учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – 4-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2008 – 496 с.

40. **Дьяченко, В. Г.** Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст] : Учебник для вузов / В. Г. Дьяченко. – Пер. с укр. – Х.: ХНАДУ, 2009. – 500 с.

41. Климат Украины [Электронный ресурс] // Сайт «Википедия». – 2021. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Климат\\_Украины](https://ru.wikipedia.org/wiki/Климат_Украины)

42. На Закарпатье открыли самую высокогорную трассу Украины [Электронный ресурс] // Сайт «Информационное агентство ИНТЕРФАКС-УКРАИНА». – 2020. – Режим доступа: <https://interfax.com.ua/news/general/706657.html>

43. Doc. 7488/3. Руководство по стандартной атмосфере ИКАО [Текст] 3-е изд. – ИКАО, Montreal, Canada : International Civil Aviation Organization, 1993. – 305 с.

44. **Кубіч, В. І.** Особливості конструкції машин з двигунами внутрішнього згорання [Текст] : навч. посібник / В. І. Кубіч, Г. І. Слинько –

Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – 246 с.

45. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях» в магістерських дипломних роботах (проектах) зі спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування» за освітньою програмою (спеціалізацією) – «Двигуни внутрішнього згорання» для усіх форм навчання [Текст] / Укл. : М. І. Лазуткін – Запоріжжя: Каф. ОП і НС. НУ «Запорізька політехніка», 2020 – 34 с.

46. Правила улаштування електроустановок [Текст] : ПУЕ-2017. – На заміну ПУЕ-86 ; чинний з 2017-08-21. – К. : Міненерговугілля України, 2017. – 617 с. – (Правила)

47. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний від 1999-12-01. – К. : МОЗ України, 1999. – URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. – (Державні санітарні норми)

48. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Текст] : ДБН В.2.5-67:2013. – На заміну СНиП 2.04.05-91 ; крім розділу 5 та додатка 22. ; чинний від 2014-01-01. – К. : Мінрегіонбуд України, 2013. – 149 с. – (Державні будівельні норми України)

49. Природне і штучне освітлення. [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 133 с. – (Державні будівельні норми України)

50. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст] : НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30. – К. : МВС України, 2014. – 47 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки)

51. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT) [Текст] : ДСТУ EN 2:2014. – На заміну ГОСТ 27331-87; чинний з 01.01.2016 / Мінекономрозвитку України, 2014. – 7 с. (Державний Стандарт України)

52. Системи протипожежного захисту [Текст] : ДБН В.2.5-56:2014. – На заміну ДБН В.2.5-56:2010 ; СНиП 2.04.05-91 (розділи 5 та 22) ; чинний від 2015-07-01. – К. : Мінрегіон України, 2014. – 191 с. – (Державні будівельні норми)



53. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників [Текст] – На заміну НАПБ Б.03.001-2004 ; чинний від 2018-02-23. – К. : МВС України, 2018. – 23 с. – (Правила)

54. Методичні вказівки до лабораторного заняття «Дослідження шкідливих та небезпечних факторів виробничого середовища, важкості і напруженості праці» з дисципліни «Цивільний захист і охорона праці в галузі» : для студентів усіх спеціальностей та усіх форми навчання [Текст] / М.І. Лазуткін, М.О. Журавель : Запоріжжя: ЗНТУ. Каф. ОП і НС, 2018. – 44 с.

55. Методичні рекомендації щодо виконання економічного розділу дипломного проекту здобувачами вищої освіти технічних спеціальностей за освітнім ступенем «магістр» [Текст] / Каф. підприємництва, торгівлі та біржової діяльності. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – 12 с.

56. Цена топлива [Електронний ресурс] // Сайт «ОККО». – 2021. – Режим доступу: <https://www.okko.ua/ru/sale-fuel-gurt#GurtSmall>

57. Дизельное топливо био МЭЖК (FAME) — метиловые эфиры жирных кислот В100 [Електронний ресурс] // Сайт «ООО «Запорожский Биотопливный Завод». – 2021. – Режим доступу: <https://zaporozhskij-biotoplivnyj-zavod.uaprom.net/p2627184-dizelnoe-toplivo-bio.html>

58. Исследование автотранспортных средств в целях определения стоимости восстановительного ремонта и оценки (Методические рекомендации для судебных экспертов) [Електронний ресурс] // Сайт «Оценщик.ру». – 2015. – Режим доступу: <https://www.ocenchik.ru/docs/2778-srednegodovye-probegi-raschet-probega.html>

59. Эксперты назвали среднюю скорость движения автомобилей в Москве [Електронний ресурс] // Сайт «RNS». – 2018. – Режим доступу: <https://rns.online/transport/Eksperti-nazvali-srednyuyu-skorost-dvizheniya-avtomobilei-v-Moskve--2018-09-11/>

60. Периодичность технического обслуживания для автомобилей МАЗ [Електронний ресурс] // Сайт «Минский автомобильный завод». – Режим доступу: <https://maz-auto.info/normativno-technicheskaja-dokumentacija/periodichnost-technicheskogo-obsluzhivaniya-dlja-avtomobilej-maz/>

## ДОДАТОК А

## ПРОТОКОЛ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ № 1 (дизельне паливо)

$\varphi, ^\circ\text{П.К.В.}$	P, кПа	T, К	m, г	V, дм <sup>3</sup>
180	279,3	382,3	3,086	1,174
190	282,0	384,0	3,086	1,168
200	288,8	387,3	3,086	1,151
210	300,2	392,2	3,086	1,121
220	317,2	399,0	3,086	1,079
230	341,4	408,0	3,086	1,025
240	375,0	419,5	3,086	0,960
250	421,6	434,1	3,086	0,883
260	486,8	452,5	3,086	0,797
270	579,8	475,6	3,086	0,704
280	715,8	504,8	3,086	0,605
290	921,3	542,0	3,086	0,505
300	1245,3	589,6	3,086	0,406
310	1781,6	651,2	3,086	0,314
320	2718,1	731,6	3,086	0,231
330	4425,8	835,9	3,086	0,162
340	7498,3	963,2	3,086	0,110
350	11946,1	1086,3	3,086	0,078
360	19261,8	1496,6	3,106	0,067
370	20774,4	1856,4	3,140	0,078
380	15553,4	1947,8	3,165	0,110
390	10244,6	1877,5	3,180	0,162
400	6704,4	1746,8	3,188	0,231
410	4548,1	1607,3	3,192	0,314
420	3235,5	1480,3	3,194	0,406
430	2414,9	1372,5	3,194	0,505
440	1884,2	1283,8	3,194	0,605
450	1528,3	1211,1	3,195	0,704
460	1283,7	1152,6	3,195	0,797
470	1111,5	1105,6	3,195	0,883
480	987,9	1067,7	3,195	0,960
490	898,4	1037,2	3,195	1,025
500	833,5	1012,7	3,195	1,079
510	787,0	993,3	3,195	1,121
520	755,0	978,2	3,195	1,151
530	734,9	966,9	3,195	1,168
540	709,5	959,6	3,195	1,174

ЯМЗ-5340

Дата: 10.05.2021

 $L_i = 2346,985482$  Дж/цикл $P_i = 2119748,448643$  Па $\eta_i = 0,506078$  $g_i = 0,167377$  кг/(кВт\*год)

## ПРОТОКОЛ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ № 2 (ДПВЕ)

$\varphi, ^\circ\text{П.К.В.}$	P, кПа	T, К	m, г	V, дм <sup>3</sup>
180	279,3	382,3	3,086	1,174
190	282,0	384,0	3,086	1,168
200	288,8	387,3	3,086	1,151
210	300,2	392,2	3,086	1,121
220	317,2	399,0	3,086	1,079
230	341,4	408,0	3,086	1,025
240	374,9	419,5	3,086	0,960
250	421,5	434,0	3,086	0,883
260	486,8	452,4	3,086	0,797
270	579,8	475,6	3,086	0,704
280	715,7	504,8	3,086	0,605
290	921,2	541,9	3,086	0,505
300	1245,2	589,5	3,086	0,406
310	1781,5	651,2	3,086	0,314
320	2718,1	731,6	3,086	0,231
330	4426,0	835,9	3,086	0,162
340	7498,9	963,2	3,086	0,110
350	11947,2	1086,4	3,086	0,078
360	19288,9	1497,4	3,109	0,067
370	20825,0	1856,5	3,148	0,078
380	15600,5	1947,0	3,176	0,110
390	10279,9	1876,3	3,193	0,162
400	6729,8	1745,7	3,202	0,231
410	4566,7	1606,5	3,207	0,314
420	3249,6	1479,8	3,208	0,406
430	2426,0	1372,4	3,209	0,505
440	1893,3	1284,0	3,210	0,605
450	1536,0	1211,5	3,210	0,704
460	1290,4	1153,1	3,210	0,797
470	1117,4	1106,2	3,210	0,883
480	993,3	1068,4	3,210	0,960
490	903,3	1038,0	3,210	1,025
500	838,1	1013,6	3,210	1,079
510	791,4	994,2	3,210	1,121
520	759,2	979,1	3,210	1,151
530	739,0	967,7	3,210	1,168
540	713,5	960,4	3,210	1,174

ЯМЗ-5340

Дата: 07.06.2021

 $L_i = 2362,385247$  Дж/цикл $P_i = 2133657,195233$  Па $\eta_i = 0,506775$  $g_i = 0,189282$  кг/(кВт\*год)

## ПРОТОКОЛ ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ № 3 (ДПнЕ)

$\varphi, ^\circ\text{П.К.В.}$	P, кПа	T, К	m, г	V, дм <sup>3</sup>
180	279,3	382,3	3,086	1,174
190	282,0	384,0	3,086	1,168
200	288,8	387,3	3,086	1,151
210	300,2	392,2	3,086	1,121
220	317,2	399,0	3,086	1,079
230	341,4	408,0	3,086	1,025
240	374,9	419,5	3,086	0,960
250	421,5	434,0	3,086	0,883
260	486,8	452,4	3,086	0,797
270	579,8	475,6	3,086	0,704
280	715,7	504,8	3,086	0,605
290	921,2	541,9	3,086	0,505
300	1245,2	589,5	3,086	0,406
310	1781,5	651,2	3,086	0,314
320	2718,1	731,6	3,086	0,231
330	4426,0	835,9	3,086	0,162
340	7498,9	963,2	3,086	0,110
350	11947,3	1086,4	3,086	0,078
360	19298,0	1497,9	3,110	0,067
370	20842,2	1857,6	3,149	0,078
380	15616,0	1948,2	3,177	0,110
390	10291,0	1877,5	3,195	0,162
400	6737,4	1746,9	3,204	0,231
410	4572,0	1607,6	3,208	0,314
420	3253,4	1480,9	3,210	0,406
430	2428,9	1373,3	3,211	0,505
440	1895,5	1284,9	3,211	0,605
450	1537,8	1212,3	3,211	0,704
460	1291,9	1153,9	3,211	0,797
470	1118,7	1107,0	3,211	0,883
480	994,4	1069,2	3,211	0,960
490	904,4	1038,7	3,211	1,025
500	839,0	1014,3	3,211	1,079
510	792,3	994,8	3,211	1,121
520	760,1	979,7	3,211	1,151
530	739,9	968,4	3,211	1,168
540	714,3	961,1	3,211	1,174

ЯМЗ-5340

Дата:07.06.2021

 $L_i = 2366,759630$  Дж/цикл $P_i = 2137608,047602$  Па $\eta_i = 0,506778$  $g_i = 0,191320$  кг/(кВт\*год)

## ДОДАТОК Б

ПрАТ «Запорізький абразивний комбінат»  
Транспортний цех №19

### АКТ АПРОБАЦІЇ

29 листопада 2021 р.

м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

голова – ДРИГВАЛЬ Г. А., начальник транспортного цеху № 19;  
члени комісії:

- 1) СЛИНЬКО Г. І., завідувач кафедри «Двигуни внутрішнього згорання» Національного університету «Запорізька політехніка», д.т.н., професор;
- 2) НОВОСИЛЬЦЕВ І. В., механік плавильного цеху № 3.

Комісія провела роботу з апробації магістерської роботи НОВОСИЛЬЦЕВА І. В. «Визначення ефективності дизельного ДВЗ, що працює на біодизельних паливах різного складу», виконаної в НУ «Запорізька політехніка» в 2021 р. та представленої до захисту на кафедрі «Двигуни внутрішнього згорання».

Апробацією встановлено:

1. Підтверджено технічний ефект при використанні в дизельному двигуні Д-21 самохідного шасі Т-16 в якості палива:
  - біодизеля із низьким ( $\leq 2\%$ ) вмістом ерукової кислоти: зростання ефективної потужності на 0,8 %, зростання годинної витрати палива на 15,2 %.
  - біодизеля із високим ( $\geq 30\%$ ) вмістом ерукової кислоти: зростання ефективної потужності на 0,7 %, зростання годинної витрати палива на 13,8 %.
2. Підтверджено зростання ефективної потужності двигуна на 4 % при зменшенні температури атмосферного повітря на кожні 10 °С.
3. ПрАТ «Запорізький абразивний комбінат» взято до впровадження використання біодизеля із високим вмістом ерукової кислоти для заміни дизельного палива для двигунів внутрішнього згорання.

Складено в 4 прим.: 1-й прим. ПрАТ Запорізький абразивний комбінат  
2-й прим. в НДЧ НУ «Запорізька політехніка»  
3-й прим. кафедрі «ДВЗ» НУ «Запорізька політехніка»  
4-й прим. виконавцю

Голова комісії

Члени комісії

ДРИГВАЛЬ Г. А.

СЛИНЬКО Г. І.

НОВОСИЛЬЦЕВ І. В.



каб. УСРБ  
М. Б. Машарук