І. Г. Грабар, Р. В. Колодницька, В. Г. Семенов

Біопалива на основі олій для дизельних двигунів

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ЖИТОМИРСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

І.Г. Грабар, Р.В. Колодницька, В.Г. Семенов

БІОПАЛИВА НА ОСНОВІ ОЛІЙ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Монографія

Друкується за рішенням
Вченої ради ЖДТУ
(протокол № 11 від 29 червня 2011 р.)

ЖДТУ
2011

УДК 621.43.04
Г75

Рецензенти: Заслужений діяч науки і техніки України, д.т.н., проф. Лось Л.В. (Національний агроекологічний університет, м. Житомир), д.ф.-м.н., проф. Москвін П.П. (Житомирський державний технологічний університет), к.с-г.н., доцент Дідух М.І. (Національний агроекологічний університет, м. Житомир).

Грабар І.Г., Колодницька Р.В., Семенов В.Г.

Г75 Біопалива на основі олій для дизельних двигунів : монографія. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – 152 с. : іл.

ISBN 978-966-683-302-3

У монографії викладено основні теоретичні положення з питань використання біопалива на основі олій для дизельних двигунів автомобілів та сільськогосподарської техніки. Розглянуто види біопалив з олій та їх фізико-хімічні властивості. Наведено методики отримання біопалив з олій. Узагальнено досвід ряду країн, в яких біопалива виробляються у промислових масштабах та широко використовуються в транспортних засобах та сільськогосподарській техніці.

Для викладачів, студентів та аспірантів транспортних спеціальностей вищих навчальних закладів, а також для фахівців науково-дослідних і проектно-конструкторських організацій транспортного та сільськогосподарського машинобудування.

УДК 621.43.04

© І.Г. Грабар, 2011
© Р.В. Колодницька, 2011
© В.Г. Семенов, 2011

ISBN 978-966-683-302-3

ЗМІСТ

	стор.
ВІД АВТОРІВ	6
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ВИДИ БІОПАЛИВ НА ОСНОВІ ОЛІЙ ТА ЇХ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	11
1.1. Загальна характеристика фізико-хімічних властивостей традиційних палив	11
1.2. Загальна характеристика альтернативних палив	14
1.3. Технології виготовлення ріпакової олії та її метилових ефірів	19
1.4. Непаливне використання ріпакової олії та її метилових ефірів	21
1.5. Дослідження альтернативних паливних сумішей на основі ріпакової олії та дизельного палива	25
1.5.1. Альтернативні паливні композиції на основі ріпакової олії, її етилових ефірів та дизельного палива	25
1.5.2. Методика розрахунку жирно-кислотного складу технічної ріпакової олії	27
1.5.3. Методика визначення молярної маси та нижчої теплоти згорання олії	29
1.5.4. Розрахунок матеріального балансу реакції переетерифікації триацилгліцеринів ріпакової олії етиловим спиртом	32
1.5.5. Приклад розрахунку фізико-хімічних властивостей етилових ефірів олій	34
1.6. Визначення хімічного складу альтернативних палив рослинного походження методом газорідинної хроматографії	35
1.7. Фракційна розгонка метилових ефірів жирних кислот олій при атмосферному тиску	43
1.8. Визначення вищої теплоти згоряння альтернативних палив рослинного походження калориметричним методом при постійному об'ємі	46
1.9. Визначення фізичних властивостей альтернативних бінарних палив на основі біодизеля та газового конденсату	54

1.10 Відпрацьований фритюрний жир – вихідний продукт одержання альтернативного палива для дизельних двигунів 57

РОЗДІЛ 2. ВІДМІННОСТІ У ПРОЦЕСАХ РОЗПИЛЮВАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ТА БІОПАЛИВ 62

2.1. Вплив фізичних характеристик альтернативного біопалива на його розпилювання 62

2.2 Аналітичне визначення фізичних характеристик сумішей палив на основі біодизеля 65

2.3. Аналіз параметрів розпилювання альтернативних палив порівняно з дизельним паливом 68

2.4. Моделювання розпилювання дизельного палива та аналіз застосування моделей для дизельного палива до альтернативних палив 75

2.5. Можливість використання чистих олій як палива та моделювання діаметрів крапель при розпилюванні 82

2.6. Вплив в'язкості біопалив на параметри впорскування та витрату палива 88

2.7. Розпилювання двохкомпонентної суміші (олія + диметиловий ефір) 93

98

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ДИЗЕЛІВ НА НАФТОВИХ ПАЛИВАХ ТА БІОПАЛИВАХ

3.1. Проведення стендових випробовувань біопалив 98

3.2. Обробка результатів експериментальних досліджень 100

3.3. Аналітичне дослідження роботи дизельного двигуна СМД-31 при використанні метилових ефірів ріпакової олії як палива 102

3.4. Аналіз показників роботи дизелів на нафтових та альтернативних паливах рослинного походження 105

РОЗДІЛ 4. ТОКСИЧНІСТЬ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ 119
4.1. Емісія токсичних компонентів відпрацьованих газів дизельних двигунів при їх роботі на біопаливах рослинного походження 119
4.2. Дослідження димності відпрацьованих газів автомобіля для біопалив на основі олій 123
4.3. Зниження викидів поліциклічних ароматичних вуглеводнів шляхом використання біодизельного палива 129
4.4. Висновки до розділу 4 134
ЗАКЛЮЧЕННЯ 138
ЛІТЕРАТУРА 139

ВІД АВТОРІВ

У монографії викладено основні теоретичні положення з питань використання біопалива на основі олій для дизельних двигунів. Розглянуто види біопалив з олій та їх фізико-хімічні властивості. Наведено методики отримання біопалив з олій. Узагальнено досвід ряду країн, в яких біопалива виробляються у промислових масштабах та широко використовуються в транспортних засобах та сільськогосподарській техніці. Книга призначена для викладачів, студентів та аспірантів транспортних спеціальностей вищих навчальних закладів, а також для фахівців науково-дослідних та проектно-конструкторських організацій транспортного та сільськогосподарського машинобудування. Ми будемо вдячні всім, хто надішле свої коментарі за адресою grabar@mail.ru, ruslanakol@yahoo.com, semenovv11@gmail.com.

ВСТУП

Однією із найважливіших проблем сучасності є раціональне використання паливних ресурсів. І справа не тільки в тому, що запаси нафтових палив можуть вичерпатися. Парадоксально, що самий безпечний для людини із викидів автомобіля газ – вуглекислий газ (CO_2) стає небезпечним для планети в цілому. Саме цей газ, який не встигає поглинатися рослинним світом, накопичується в атмосфері планети і може спричиняти катастрофічні зміни у кліматі. Однією з альтернатив для дизельних двигунів є використання палив, які виготовляються із рослин, що за час росту поглинають вуглекислий газ, і таким чином покращують баланс CO_2 на планеті. Біопаливо, як біоетанол, так і біодизельне паливо, може вирішити цю проблему, замінивши близько 20% світового виробництва до 2020 року [3, 4, 20].

Україна належить до енергодефіцитних країн, оскільки свої потреби в паливноенергетичних ресурсах покриває лише на 53 % за рахунок внутрішніх ресурсів, імпортуючи 75 % необхідного природного газу і 85 % сирої нафти і нафтопродуктів [68]. За «Програмою розвитку виробництва біодизельного палива на період до 2010 року» Україна мала виробляти і споживати в 2010 р. понад 520 тис. тонн біодизельного палива, що потребуватиме майже 1,7–1,8 млн. тонн валового збору насіння

ріпаку. За його врожайності в середньому 20 ц/га необхідно засіяти цією культурою 0,85–0,9 млн. га ріллі приблизно 3 % (33,8 млн. га) орних земель країни. Заміна частини дизельного палива (1870 тис. т/рік), що нині споживає агропромисловий комплекс України, на біодизельне забезпечить сільськогосподарську техніку бінарним паливом раціонального складу: 30 % біодизельного + 70 % дизельного [68]. Але, на жаль, в країні з енергетичним потенціалом використання біомаси близько 30 млн. тонн умовного палива в рік, бурого вугілля 15 млн. тонн у рік і торфу 2 млн. у рік не дуже багато зусиль зроблено для розвитку біопалива. В той же час ціни на паливо весь час зростають [7].

Згідно з [7] наша держава планувала розвиток біодизельного палива, маючи приклад Бразилії у розвитку етанольної галузі. Велику роль відіграє той факт, що Україна займає керуюче положення на світовому олійному ринку. Як було відмічено у [7], в Україні (2008 рік) побудовано близько десяти крупних підприємств з виробництва біодизельного палива, а сама країна ввійшла в трійку найкрупніших виробників ріпаку у світі. В 2007 році Україна посіла третє місце в Європі за площами вирощування ріпаку після Франції та Німеччини та шосте місце у світі. Про це свідчить порівняльний аналіз динаміки посівних площ під ріпаком, проведений Асоціацією "Український клуб аграрного бізнесу". Так, в 2007 році посівні площі під ріпаком у Франції становили 1601 тис. га, Німеччині – 1546,4 тис. га, в той же час в Україні – 802,7 тис. га. Під врожай 2008 року в Україні озимим ріпаком було засіяно 1533,4 тис. га, що на 87,4 % більше даних попереднього року. У 2009 році планувалося, що під ярий ріпак буде засіяно близько 155 тис. га. (при загальних площах під ріпаком 1,7 млн. га.) При середньорічній врожайності 13,1 ц., валовий збір очікувався на рівні близько 2300 тис. т. (було зібрано 3,1млн. т.)

З 1 березня 2010 року в Україні діє національний стандарт ДСТУ 6081:2009 «Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні умови». Цей стандарт гармонізовано з Європейським стандартом EN 14214:2003 «Паливо для автомобілів. Метилові ефіри жирних кислот для дизельних двигунів. Вимоги й методи аналізу». Стандарт ДСТУ 4840:2007 передбачає сертифікацію дизельного палива з 5-відсотковою домішкою (В5) ефірів метилових жирних

кислот (ЕМЖК). З 1 липня 2011 року в Україні починає діяти ДСТУ 7178:2010 «Паливо альтернативне. ЕСТЕРИ ЕТИЛОВІ ЖИРНИХ КИСЛОТ ОЛІЙ ТА ЖИРІВ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ. Технічні вимоги та методи контролювання». Сировиною для виробництва ЕМЖК є олія соняшникова ДСТУ 4492, олія соєва ДСТУ 4534:2006, олія ріпакова ДСТУ 46.072:2005 і жир тваринний кормовий ГОСТ 17483 [63].

В Україні, за даними Міністерства аграрної політики, нині побудовано 42 біодизельні установки й заводи, які за повного завантаження можуть виробляти як мінімум 500 тис. тонн біодизельного палива на рік (тільки в м. Калуші Івано-Франківської області побудовано завод на 170 тис. тонн). У фермерських господарствах України виробляється від 50 до 70 тис. тонн біодизеля на рік. Одержану при виробництві біодизеля G-фазу (гліцеринову фазу), а це 10 % від вихідної олії (тваринного жиру), фермери спалюють у спеціалізованих котлах, використовуючи тепло для виробничих потреб [63].

До вітчизняних виробників біодизельних заводів можна віднести полтавський завод «Укрбудмаш», який виробляє біодизельні установки потужністю від 1 до 14 $м^3$/год (від 8 до 90 тис. тонн біодизеля на рік). Нині один із таких заводів змонтований в Іспанії, демонструвалися ці установки в США, Сінгапурі й інших країнах. Виробництво біодизельних установок європейської якості налагоджено в Дніпропетровську (ТОВ «БіодизельДніпро»), Краматорську (НВП «Спеціальні технології»), Києві (НВО «Тренд»), Донецьку (ТОВ «Техносоюз»).

В 2009 році у Мадріді компанія «Спеціальні технології», Краматорськ, Україна одержала престижну міжнародну нагороду «За комерційний успіх» і «Високу якість продукції» за високий рівень обладнання для випуску біодизельного палива [6].

Деякі історичні аспекти. Сучасний розвиток біодизеля почався в 1982 р. у Австрії. Першим типом біодизельного палива, що був впроваджений комерційно в 1998 р., був RME (ріпаковий метиловий ефір). За останні роки біодизель знайшов своє застосування в багатьох країнах світу. У 2008 році Європейська Біодизельна Рада (European Biodiesel board) відмітила, що в Євросоюзі вже повністю функціонують 185 біодизельних заводів і ще 58 будуються, щоб виконати 10 % частку для біопалива, що заплановано у більшості європейських країн у 2010 році.

Німеччина випускає кожного року до 2 млн. тонн біодизеля, і ще у 2008 році країна досягла планів 2010 року.

Автор [63] вважає, що в Німеччині спостерігається надвиробництво біодизельних заводів при обмежених посівних площах під ріпак (близько 12–14%). Виробники біодизеля мали великі дотації й субсидії від держави, нульові податкові ставки. За загального зростання виробництва біодизеля в Європі (до 7,5 млн. тонн, 2009 рік; 6 млн. тонн, 2008 рік) виробництво в Німеччині скорочується за рахунок жорсткості податкової політики. Таким чином, на нашу країну, уряд і чиновників вищого рангу йде постійний тиск із боку країн – виробників біодизельних установок і заводів [63].

Великобританія прийняла закон про обов'язкову 2,5 % долю біопалива у 2008 році, ця частка має збільшиться до 5 % у 2010 році. У Великобританії (близько Newcastle) побудований новітній біодизельний завод потужністю 250 тис. тонн. Британська нафтова компанія British Petroleum, незважаючи на звинувачення біопаливної індустрії у наближенні світового голоду, заявила, що має план у найближчі роки інвестувати у галузь близько $560 млн. [5]. Провідні фірми світу вже випускають трактори, автобуси та персональні автомобілі, які надійно працюють на біодизелі (табл. В.1) [110].

Таблиця В.1

Моделі персональних автомобілів, де можна гарантовано застосовувати біодизельне пальне

Фірма-виробник автомобіля	Автомобіль
AUDI	всі моделі TDI з 1996 р.
BMW	525 tds.1997 р. і 3+ 5 з 2001 р.
Mercedes-Benz	серії С і Е 220, С 200 і 220 CDI
Nissan	Primera з 2001 р.
Seat	всі моделі TDI з 1996 р.
Skoda	всі моделі TDI з 1996 р.
Volkswagen	всі моделі TDI з 1996 р.
Volvo	моделі S80- D, S70 - TDI, V70 – TDI

Хоча європейські вчені, наприклад [110], говорять про надійність роботи багатьох автомобілів на біодизельному паливі, але проблеми з розпилюваням біодизельного палива все ще

існують, про що відмічають провідні спеціалісти таких компаній, як Делфі та Бош, що займаються випуском апаратури для розпилювання. Тому у монографії окрема увага приділяється питанню розпилювання біопалива.

Властивості біопалива у великій мірі залежать від складу олії, з якої вони виготовляються, що в свою чергу залежить від виду олійної рослини. Деякі сорти рослин можуть давати урожай близько 2,9 тонн олії/ га. В останні роки для виробництва біодизеля почали використовувати соняшникову олію –13 %, соєву – 1 %, пальмову 1 %, та ін. –1 %. 135 ресторанів McDonalds в Австрії збирають декілька тонн олії, що залишається після смаження, яка потім переробляється в Fatty-acid-methyl-ester (FAME). На цьому паливі, наприклад, працюють більшість автобусів у місті Грац [110].

20 % біодизеля (B-20) прийнято Міністерством Енергії (Department of Energy) як альтернативне паливо в Америці і задекларовано 2 програмами (CAAA 90 і EPACT 92), особливо при використанні у водному транспорті. Національна Лабораторія Поновлюваної Енергії США дослідила, що раковий потенціал відпрацьованих газів для біодизеля на 90–94% менший, ніж нафтових дизелів. Біодизель – це єдине альтернативне паливо, яке не тільки пройшло EPA Tier 1 Helth Efects Testing, але й дозволяє не модифікувати дизельний двигун. Це пальне забезпечує зменшення викидів SO_2 на 100%, значне зниження CO та сажі. Викликає невелике зниження або підвищення окислів азоту в залежності від виду двигуна [122].

Порівняно з „американським" біодизельним паливом, що виробляється в основному з соєвої олії, „український біодизель" виготовляється, як правило, з ріпакової олії [8, 9, 16, 17, 70, 76]. Ріпак – традиційна культура, яка вирощувалася на Україні з давніх часів [8]. До того ж вибір ріпакової олії для біодизеля базувався ще й на національній ідеї очищення забруднених земель від радіації. Тому ріпак, який добре витягує радіацію з землі, що не переходить у олію, а накопичується у стеблах, спроможний на думку деяких дослідників, [8, 101] вирішити дві важливі проблеми, як з паливом, так і з очищенням забруднених земель. Ці дослідження продовжуються до цього часу сумісними зусиллями українських та японських дослідників.

РОЗДІЛ 1. ВИДИ БІОПАЛИВ НА ОСНОВІ ОЛІЙ ТА ЇХ ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1. Загальна характеристика фізико-хімічних властивостей традиційних палив

Основними видами моторних палив, що застосовуються на автомобільному транспорті, є бензин та дизельне паливо. Протягом останніх років проводяться дослідження щодо покращення енергетичного забезпечення автомобільного транспорту в напрямку пошуку шляхів підвищення виходу світлих нафтопродуктів за рахунок поглиблення переробки нафти та покращення якості палива. В табл. 1.1 та 1.2 наведено вимоги до фізико-хімічних показників європейських та вітчизняних дизельних палив та бензинів.

Таблиця 1.1

Показники	Європейські дизельні палива		
	еталонне, RF-03-A-84	стандартні	фактичної якості
1	2	3	4
Густина, при 15 °С, кг/м^3	835–845	800–870	805–857
В'язкість, мм^2/с при 20 °С при 40 °С	 3,95–5,6 2,5–3,5	 – 1,5–4,5	 до 5,85 до 3,8
Вміст сірки, % (мас.)	не більше 0,3	0,05–0,3	0,005–0,22
Цетанове число	49–53	45–55	45,5–56,5
Цетановий індекс	не нормується	45–46	48,9–53,4
Температура помутніння, °С	не нормується	–1…– 22	0…–33
Гранична температура фільтрованості, °С	не більше –5	–5…– 32	–8…–40
Температура спалаху, °С	не менше 53	–	–

Закінчення табл. 1.1

1	2	3	4
Фракційний склад, °С 50 % 90 %	не менше 245 320–340	не більше 280 не більше 355	 232–283 268–346
Загальна корозія, бали	не більше 1	не нормується	–
Вміст, % (мас.) попіл вода	 не більше 0,01 не більше 0,05	 те ж	 – –
Коксуємість 10%-го залишку, % (мас.)	не більше 0,2	те ж	-
Число нейтралізації (кислотне число), мгКОН/г	не більше 0,2	те ж	-
Окислювальна стабільність,мг/100мл	не більше 2,5	те ж	-

Таблиця 1.2

№ з/п	Показник	ДСТУ 3868-99	
		Л	З
1	2	3	4
1	Цетанове число, не менше	45	45
2	Фракційний склад: 50 % перегонки при температурі, °С, не вище 96 % перегонки при температурі, °С, не вище	280 370	280 370
3	Кінематична в'язкість при температурі 20 °С, $мм^2/с$	3,0–6,0	1,8–6,0

Закінчення табл. 1.2

1	2	3	4
4	Температура застигання, °С, не вище	–10	–25
5	Температура спалаху в закритому тиглі, °С, не нижче для тепловозних та суднових дизелів та газових турбін для дизелів загального призначення	 62 40	 40 36
6	Масова доля сірки, %, не більше вид I вид II вид III вид IV	 0,05 0,1 0,2 0,5	 0,05 0,1 0,2 0,5
7	Масова доля меркаптанової сірки, %, не більше	0,01	0,01
8	Вміст сірководню	Відсутній	Відсутній
9	Випробування на мідній пластинці	Витримує	Витримує
10	Концентрація фактичних смол, мг на 100 см^3 палива, не більше	40	30
11	Кислотність, мг КОН на 100 см^3 палива, не більше	5	5
12	Йодне число, г йоду на 100 г палива, не більше	6	6
13	Зольність, %, не більше	0,01	0,01
14	Коксуємість 10 %-го залишку, %, не більше	0,30	0,30
15	Коефіцієнт фільтрованості, не більше	3	3
16	Вміст механічних домішок	Відсутні	Відсутні
17	Вміст води	Відсутня	Відсутня
18	Густина при температурі 20 °С, кг/м^3, не більше	860	840
19	Гранична температура фільтрованості, °С, не вище	–5	–15

Детальний аналіз фізико-хімічних показників і вимог до вуглеводневих палив показує, що в тій чи іншій мірі вони можуть бути замінені альтернативними видами палив.

1.2. Загальна характеристика альтернативних палив

В [1] наведено фізико-хімічні та експлуатаційні властивості альтернативних палив в порівняно з традиційними нафтовими. Аналіз даних показує, що альтернативні палива можна класифікувати за наступними ознаками:

– за складом – вуглеводно-кислотні (спирти), ефіри (естери), водневі палива з добавками;

– за агрегатним станом – рідкі, газоподібні, тверді;

– за кількістю (часткою) використання (як основи, як добавки);

– за джерелом сировини (із вугілля, торфу, сланців, біомаси, горючого газу, електроенергії тощо).

Коротко зупинимося на сучасному стані виробництва синтетичних рідких палив (РСП), як найближчих, з точки зору агрегатного стану, замінників нафтових палив [3]. Принципові технологічні схеми виробництва РСП із твердої сировини: піроліз, пряма гідрогенізація, непряма гідрогенізація. Основними видами сировини для отримання РСП є: природній, нафтовий (попутній) газ, газовий конденсат; кам'яне та буре вугілля; природні бітуми і бітумінозні породи (сланці, нафтові піски); вторинні ресурси (коксовий, феросплавний, доменні гази), промислові та побутові відходи.

За фізико-хімічними та моторними властивостями РСП можна умовно розділити на три групи:

- РСП на нафтовій основі з синтетичними добавками (спиртобензинові та бензини з добавками метил-третбутилового ефіру - МТБЕ);
- РСП, близькі до нафтових палив;
- спиртові РСП.

Робота двигуна на природному газі (метані) знижує техніко-економічні показники: запас ходу зменшується на 10-12%, вантажопідйомність – на 5–10%. Наступним замінником моторного палива вважаються синтетичні спирти – етанол та метанол. До недоліків метанолу варто віднести високу токсичність, зменшену теплоту згоряння та приблизно на 20 %

втрату потужності двигуна. Метанол рекомендують як 5–15% добавку до бензинів. В США, наприклад, заправка автомобілів газохолом (бензин та етанол у співвідношенні 9:1) впроваджена з початку 80-х років.

Можливості використання МТБЕ справедливо розглядати як один із перспективних напрямків розширення високооктанових неетильованих бензинів. До переваг МТБЕ можна віднести наявність і доступність сировини – вугілля та біомаси. До недоліків – токсичність та погіршення техніко-економічних показників в порівняно з бензинами.

Використання газових конденсатів обмежено наступними недоліками:

– шкідлива дія на центральну нервову систему;

– небезпека іскроутворення;

– зниження потужності двигуна до 20%;

– підвищені питомі ефективні витрати палива.

Водень – ще один, можливо, найперспективніший замінник бензину та дизельного палива. Але на даний час, обережний оптимізм стримується наступними недоліками:

– підвищена вибухонебезпечність;

– особливі умови зберігання;

– недосконалі технології електролізу води (висока вартість отримання водню);

– висока проникненість атомів водню в більшість металів та підвищення їх крихкості.

Серед переваг можна відмітити:

– практично необмежена сировинна база (вода);

– при згорянні не виділяється двоокис вуглецю;

– приблизно втричі (в порівнянні з бензином) більша теплота згоряння;

– разом з сонячною енергетикою (сонячні батареї – електрична енергія – гідроліз води – виділення водню – згоряння водню в двигунах – вода – ...) – єдиний із відомих на сьогодні (крім ядерної енергетики) шлях до абсолютно чистої та екологічно безпечної енергетики.

Останнім часом багато уваги приділяється електромобілю, застосування якого має на нашу думку наступні недоліки:

– обмежений запас ходу;

– підвищені експлуатаційні витрати;

– висока первинна вартість.

Властивості деяких альтернативних палив порівняно з традиційними паливами показані в таблицях 1.3 та 1.3, а.

Таблиця 1.3

Показник	Нафтове пальне		Метанол	Етанол	Скраплений нафтовий газ
	бензини	дизельне паливо			
1	2	3	4	5	6
Густина, кг/м^3	710-760	820-870	795	790	542
Температура, °С:					
кипіння	35-195	180-360	64,7	78,0	-42
застигання	-60-80	-10-60	-97,8	-114,6	-187
Тиск насичених парів при 38 °С, кПа	65-92	0,3-0,35	12,6	17,0	160
Теплота випаровування, кДж/кг	289-306	210-250	1173	920	412
Стехіометричний коефіцієнт, кг/кг	14,5-15,0	14,1-14,3	6,51	9,06	15,2
Температура горіння, К	2336	2289	2185	2235	2149
Енергоємність, МДж/кг	44,0	43,43-43,51	19,98	26,9	46,0
Енергогустина, МДж/л	32,56	36,55	15,88	21,25	24,93
Теплота згоряння стехіометричної суміші:					
кДж/кг	2782-2811	2715-2790	2660	2674	2840
кДж/м^3	3524-3553	3405-3418	3632	3685	3520

Закінчення табл. 1.3

1	2	3	4	5	6
Границі стійкої роботи двигуна за α	0,7-1,1	0,9-5,0	0,7-1,4	0,7-1,25	0,7-1,2
Октанове число: моторний метод, дослідницький метод	66-85 75-95	- -	88-94 102-111	92 108	90-94 93-113
Цетанове число	8-14	45-55	3	8	18-22
Пожежо- та вибухонебезпечність				Середня	
ГДК$_{раз.}$, мг/м^3	100	300	5	1000	1800
Умови зберігання на автомобілі (тиск, температура)		Нормальні			1,6 МПа

Таблиця 1.3, а

Показник	Природний газ		Водень		Аміак (рідкий)	Ацетилен (газоподібний)
	газоподібний	рідкий	газоподібний	рідкий		
7	8	9	10	11	12	13
Густина, кг/м^3	0,71	420	0,09	71	680	1,173
Температура, °С:						
кипіння	-162		-252,76		-33	-83,8
загустіння	-182		-259,2		-78	-
Теплота випаровування, кДж/кг	511		-		1370	-

Закінчення табл. 1.3, а

7	8	9	10	11	12	13
Стехіометричний коефіцієнт, кг/кг	16,8-17,4		34,8		6,15	13,14
Температура горіння, К	2065		2449		1956	2610
Енергоємність, МДж/кг	48,94-50,15		120		18,65	47,82
Енергогустина, МДж/л	(33,27--34,1)*	20,92	10,8*	8,52	12,68	56,05*
Теплота згоряння стехіометричної суміші:						
кДж/кг	2740-2749	3381		2605		3320
кДж/м^3	3121-3126	2992		2874		3830
Границі стійкої роботи двигуна за α	0,7-1,3	0,6-5,0		0,9-1,2		1,3-2,5
Октанове число: моторний метод, дослідницький метод	100-105 110-115	30-40 45-90		110 130		
Пожежо- і вибухонебезпечність			Висока		Низька	Висока
ГДК$_{р.з.}$, мг/м^3	–	–		–	20	–
Умови зберігання на автомобілі (тиск МПа, температура °С)	20-40	-165	20-40	-225	0,6-0,7	1,5-2,5**

* В МДж/м^3

** При наявності пасиваторів.

Наведений короткий огляд альтернативних енергоносіїв дозволяє зробити висновок, що, незважаючи на суттєві позитивні сторони, вказані енергоносії мають ряд суттєвих недоліків, що обмежує їх широке розповсюдження та використання.

1.3. Технології виготовлення ріпакової олії та її метилових ефірів

Один із ефективних шляхів пошуку альтернативи в забезпеченні людства енергоносіями, що зможуть запобігти енергетичній і екологічній кризі, є агропромислове виробництво. Серед визначних тенденцій розвитку цивілізації – поступове перетворення сільського господарства з вагомого споживача паливних ресурсів у їх ефективного виробника.

З 90-х років XX століття в Європі постійно зростають площі посіву ріпаку. Багатообіцяючим є використання ріпакової олії в нехарчовій, так званій "non-food" області. Розглянемо цю проблему на прикладі регіональної програми забезпечення перспективними біовуглецевими паливними сумішами на основі ріпакової олії із відновлюваних джерел.

Ще Рудольф Дизель, отримуючи свій патент, стверджував, що його двигун може працювати на олії. І дійсно, в багатьох країнах Європи у 80–90 роки XX століття почали використовувати олії як паливо для дизельних двигунів.

Особливістю олій (соняшникової, ріпакової, лляної) є підвищена в'язкість та густина, а високий вміст (8–10 %) кисню дещо знижує теплоту згоряння. Спроба заливати в тракторні баки ріпакову олію замість дизельного палива призводить до підвищеного відкладання вуглецевих утворень на поверхні камери згорання вже через 100–200 годин роботи дизеля. Для їх випалювання фірма „Volkswagen", наприклад, на автомобілі „Golf" встановила двигун „Ельсбетт" інженера Людвіга Ельсбетт. Це дозволило знизити витрати палива на 100 км шляху з 4,5 до 3,5 літрів (при швидкості 90км/год) та понизити токсичність відпрацьованих газів.

Ще в 1988 році Державний комітет науки і техніки СРСР фінансував закупку ліцензії на виробництво та продаж дизельних двигунів з безпосереднім впорскуванням конструкції Ельсбетт. Однак подальші політичні події, розвал СРСР та відсутність

фінансування не дозволили здійснити ідею створення вітчизняного біопалива, котрий би працював на оліях чи їх похідних.

На даний час найближчим з біопалив до дизельного палива є суміш метилових ефірів жирних кислот ріпакової олії (МЕРО) [46, 56, 72]. Згідно з ДСТУ6081:2009 „Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот і жирів для дизельних двигунів" [26] температура спалаху такого біопалива у закритому тиглі повинна перевищувати 120 °С, а масова частка залишкового метанолу у метилових ефірах має бути меншою, ніж 0,2 % .

З насіння ріпаку (технічні сорти з високим вмістом ерукової кислоти 40–60 %) з 1 га посіву при врожайності 30 ц/га добувають близько 1 т олії. Після цього олію перетерифікують метиловим спиртом, що дозволяє отримати близько 1000 кг МЕРО (біодизельне паливо). Таке виробництво (для власних потреб сільгосппідприємства) є рентабельним. І ще: у зв'язку з наростанням дефіциту рідких палив нафтового походження та подальшим зростанням жорстких вимог до викидів двигунів, концепція біодизеля є однією з найкращих альтернатив. Хоча б частковий перехід на біопаливо веде до децентралізації принаймні частини паливно-енергетичного комплексу, демонополізацію виробництва палива та створення нових робочих місць в агропромисловому комплексі.

Технологія виробництва біопалива гарно вписується в систему технологій агропромислового комплексу, забезпечуючи енергетику сільськогосподарського виробництва та підтримуючи родючість орного клину (після збирання ріпаку на кожному гектарі залишається 65 кг азоту, 60 кг калію, 34 кг фосфорних добрив), а також покращує показники виробництва кормів.

Для умов України оптимальною може бути ферма з посівною площею 40–50 га, п'ята частина якої відводиться під ріпак. Це дозволить фермеру щорічно отримувати 7–9 тисяч літрів біодизеля та 15–17 тонн чудових кормів для тваринництва – відгодівлі свиней та корів.

Наприклад, в аналогічних умовах Чехії посівні площі в 1999 році налічували 250 тис. га, що лише 6 % від загальних посівних площ. Середня урожайність складала 28–30 ц/га. Третина насіння ріпаку була перероблена на МЕРО. Це дало 85 тис. т. біодизеля, що дозволило забезпечити 10 % потреб в дизельному паливі сільського господарства Чехії.

Беручи до уваги тенденції зростання екологічних вимог (при згорянні біодизеля на 23 % зменшується димність відпрацьованих газів, зменшується вміст твердого вуглецю, окисів вуглецю і СН відповідно на 20 %, 7,2 % та 1,9 %), можна стверджувати, що вказаний напрямок розвитку забезпечення енергоносіями має величезні перспективи. Ряд країн, і в першу чергу, США, Франція, та Швеція прийняли відповідні рішення на державному рівні. При цьому виробництво біопалива стимулюється зниженням до 5 % чи повним звільненням від податку на додану вартість.

Більш детальну інформацію щодо технології вироблення ріпакової олії та способів отримання метилових ефірів жирних кислот можна знайти у роботі [20, 54].

1.4. Непаливне використання ріпакової олії та її метилових ефірів

Аналіз вітчизняних публікацій показує, що ріпакову олію (РО) та МЕРО можна використовувати як мастила та детергенти (миючі присадки) до масел.

У табл. 1.4. наведені основні фізико-хімічні та трибологічні властивості рафінаду ріпакової олії.

Таблиця 1.4

Густина ρ_{15°, кг/м^3	Кінематична в'язкість, мм^2/с		Температура спалах.	Температура помутн.	Температура затвердіння	Кислотне число, мгКОН/г	Коксуємість, %
919	ν_{40° −36,0	ν_{100° 8, 19	318	-9	-20	0,3	0,4

Зольність, %	Колір ASTM	Заломлення	Анілін. точка °С	Вміст сірки, мг/кг	Йодне число, г/100г	Оливові заїдання	
						навантаження заїдання, Н	навантаження зварювання, Н
0,001	2,0	1,4737	95	21	100-130	1300	1000

Наведені дані для РО кращі за відповідні дані для соняшникової та ріцинової олій. Температура застигання РО зменшується додаванням депресорних присадок % (мас) –20°С – 0%; –32°С –0,1%; –34°С – 0,5%. Експериментальні дослідження РО як мастила показали, що кращі властивості мають олії, отримані з високоолеїнових та високоерукових сортів ріпаку. Більш стабільні властивості мащення мають метилові ефіри РО внаслідок видалення з молекул агліцеринів жирних кислот олії гліцерину.

Дуже важливою властивістю рослинних олив є їх нетоксичність та повне біологічне розкладання при витіканні на грунт чи у воду. Наприклад, для МЕРО цей показник складає 98 % за 21 день – згідно з тесту СЕС L-33-A-93.

Можливості комплексного використання ріпаку показані на рис. 1.1.

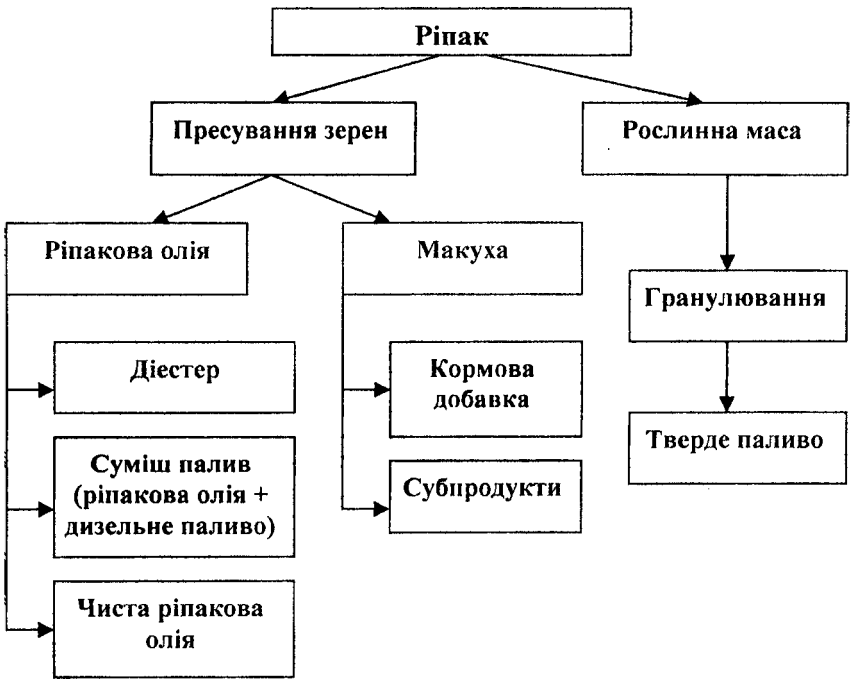


Рис. 1.1. Комплексне використання ріпаку [20]

Крім цього, використання рослинних олій відповідає загальній екологічній тенденції зменшення використання нафти та заміни її відновлюваними видами сировини. На рис. 1.2 показані принципові технологічні схеми виробництва синтетичного рідкого палива із твердої сировини.

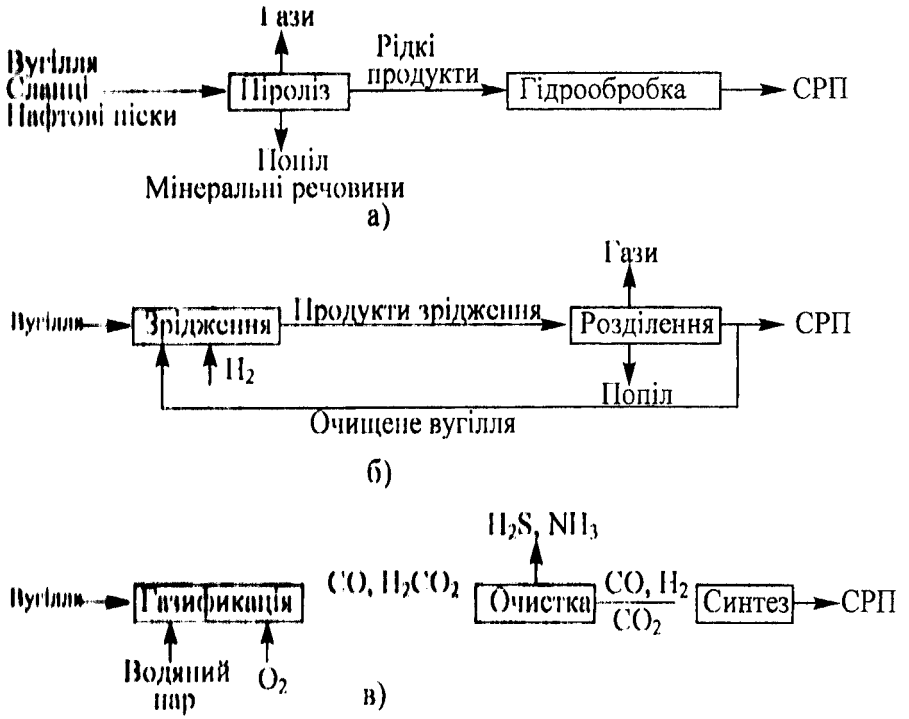
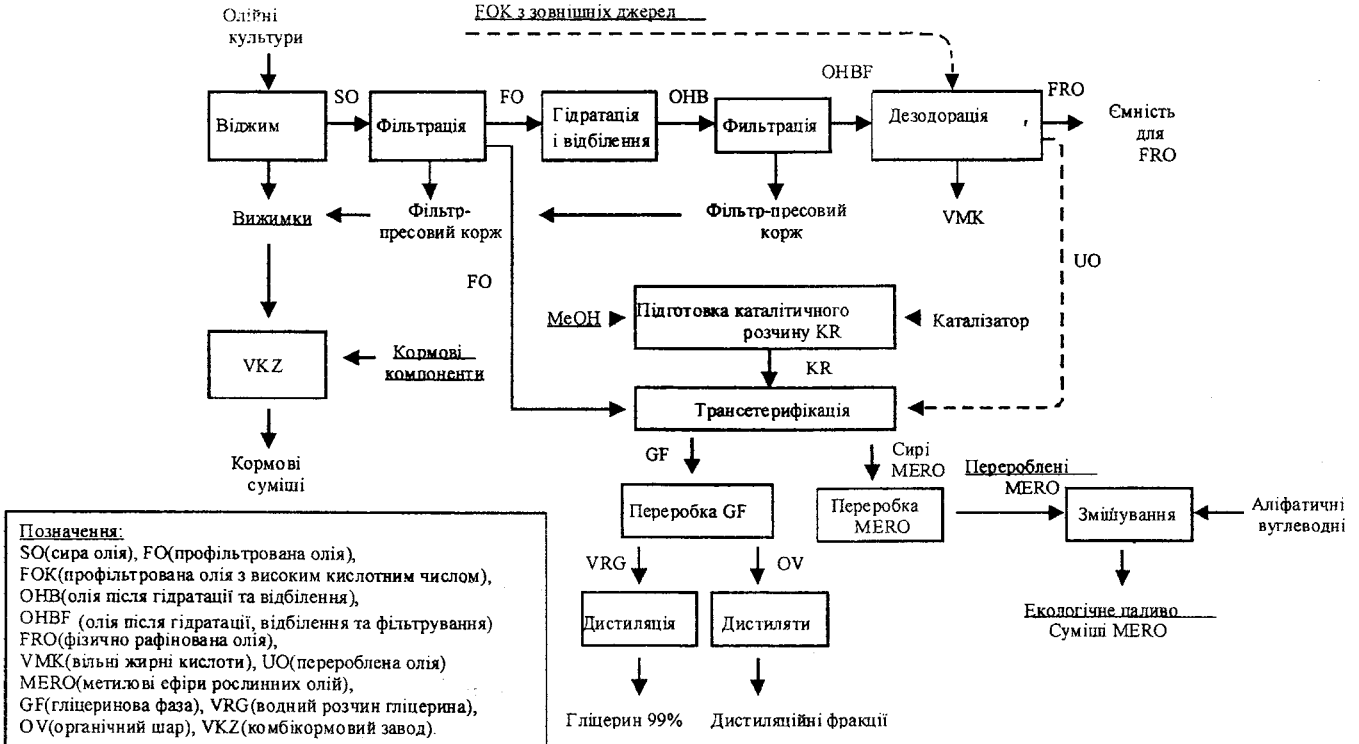


Рис. 1.2. Принципові технологічні схеми виробництва синтетичного рідкого палива із твердої сировини:
а) піроліз; б) пряма гідрогенізація; в) непряма гідрогенізація

На рис. 1.3 показана схема комбінованого виробництва харчової олії та екологічного палива.



Позначення:
SO(сира олія), FO(профільтрована олія),
FOK(профільтрована олія з високим кислотним числом),
OHB(олія після гідратації та відбілення),
OHBF (олія після гідратації, відбілення та фільтрування)
FRO(фізично рафінована олія),
VMK(вільні жирні кислоти), UO(перероблена олія)
MERO(метилові ефіри рослинних олій),
GF(гліцеринова фаза), VRG(водний розчин гліцерина),
OV(органічний шар), VKZ(комбікормовий завод).

Рис. 1.3. Схема комбінованого виробництва харчової олії та екологічного палива.

1.5. Дослідження альтернативних паливних сумішей на основі ріпакової олії та дизельного палива

У цьому параграфі описані дослідження, які проводились для двох видів біопалив: ріпакової олії та етилового ефіра ріпакової олії, який одержується шляхом додавання до олії етилового спирту C_2H_5OH, на відміну від метилового ефіру, для одержання якого використовують метиловий спирт CH_3OH.

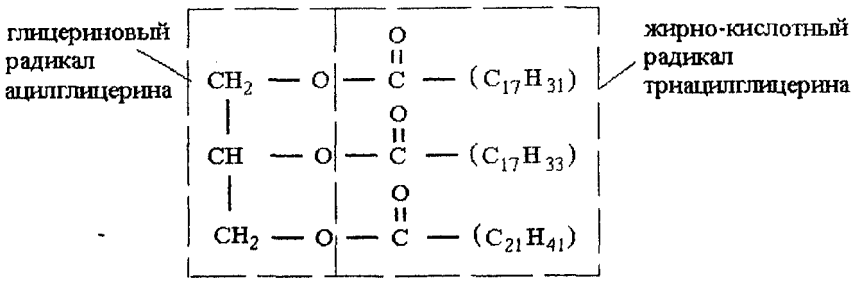
Нижче наведені методики для розрахунку жирнокислотного складу, молекулярної маси, відносних часток елементів (С, Н, О), а також нижчої теплоти згоряння для вищевказаних біопалив [20].

1.5.1. Альтернативні паливні композиції на основі ріпакової олії, її етилових ефірів та дизельного палива

Для експериментальних досліджень, використовувалась ріпакова олія з високим вмістом ерукової кислоти, рафінована на Ніжинському маслоекстракційному заводі, що мала наступні характеристики:

1. Радіологічний контроль – дозволяється реалізація та транспортування.
2. Вид – рафінована технічна.
3. Прозорість – прозора.
4. Запах та смак – властиві ріпаковій олії.
5. Кольористе число, мг йоду – 20
6. Кислотне число, мг КОН/г – 0,4
7. Масова частина фосфоровмісних речовин – відсутня
8. Масова частина вологи та легких речовин, 0,12 %
9. Відстій по масі, % – відсутній
10. Мило (якісна проба) – відсутнє
11. Йодне число гJ/100г – 98
12. Ерукової кислоти – > 5 %
13. Відповідність стандарту – ГОСТ 8988.

Як відомо, олії є сумішшю моно-, ді- та триацілгліцеринів. Наведемо структурну формулу одного із триацілгліцеринів, що входять до складу ріпакової олії.



У даному випадку триацилгліцерин має у своєму складі по одному радикалу молекул лінолевої, олеїнової та ерукової кислот, зв'язаних молекулою гліцерину. Замість вказаних жирних кислот до складу ацилгліцеринів можуть входити інші жирні кислоти в інших наборах та розміщеннях.

Велике різноманіття в будові молекул ацигліцеринів різних олій суттєво впливає на їх фізичні та хімічні властивості. Тому визначення жирно-кислотного складу (ЖКС) ріпакової олії має суттєве значення.

В табл. 1. 5 показана залежність в'язкості ріпакової олії рафінованої (РОР) від температури, а в табл. 1.6 наведені її фізичні властивості.

Таблиця 1.5

Температура олії, °С	20	30	40	50	60	70	80	90	98
В'язкість олії ν, мм^2/с	88,62	58,45	40,47	29,59	21,92	17,51	13,66	11,01	9,65

Таблиця 1.6

Показник	Ріпакова олія	Відповідає стандарту ГОСТ
Температура спалахування в закритому тиглі , °С	198	6356
Кислотність, мг КОН/г	0,08	5985
Зольність, %	0,024	1461
Вміст механічних домішок , %	0,13	6370
Вміст водорозчинних кислот і лугів, %	відсутні	6307
Густина при 20 °С, кг/м^3	916	3900

1.5.2. Методика розрахунку жирно-кислотного складу технічної ріпакової олії рафінованої

Жирно-кислотний склад РОР визначали на основі ДСТУ ISO 5508-2001 «Жири тваринні і рослинні та олії. Аналіз методом газової хроматографії метилових сфірів жирних кислот».

Спочатку проводили метилування (етилування) проби олії, котру попередньо гарно перемішували. В скляну пробірку з допомогою піпетки впорскували 2...3 краплі олії, розчиняли їх в 1,9 см^3 гексана. В розчин вводили 0,1 см^3 розчину метилата натрію в метанолі (етилата натрію в етанолі) концентрації 2 моль/дм^3. Після інтенсивного перемішування протягом 2 хвилин реакційну суміш відстоювали 5 хвилин та фільтрували через паперовий фільтр. Після цього розчин вважався готовий до аналізу.

На хроматографі встановлюють наступні умови аналізу олій, що не мають низькомолярних кислот:

–температура термостата колонок – 180...190 °С;

–температура випарника – 250 °С;

–температура печі детекторів – 200 °С;

–швидкість потоку газу-носія (азот, аргон, гелій, водень) – 30…40 $см^3$/хв;

– об'єм проби – близько 1 $мм^3$ розчину метилових (етилових) ефірів кислот в гексані.

Відносні об'єми утримування метилових (етилових) ефірів жирних кислот ($V_{т\ відн}$), що визначають порядок виділення їх із хроматографічної колонки, а також позначення кислот, що входять до складу метилових (етилових) ефірів жирних кислот олій, наведені нижче:

Таблиця 1.7

Метилові (етилові) ефіри кислот		$V_{т\ відн}$
С 14:0	Тетрадеканова (міристинова)	0,3
С 15:0	Пентадеканова	0,4
С 16:0	Гексадеканова (пальмітинова)	0,5
С 16:1	Гексадеценова (пальмітинолеїнова)	0,6
С 17:0	Гептадеканова (маргаринова)	0,7
С 17:1	Гептадеценова (маргаринолеїнова)	0,8
С 18:0	Октадеканова (стеаринова)	1,0
С 18:1	Октадеценова (олеїнова)	1,1
С 18:2	Октадекадієнова (лінолева)	1,3…1,4
С 18:3	Октадекатрієнова (ліноленова)	1,7…1,8
С 20:0	Ейкозанова (арахінова)	1,9
С 20:1	Ейкозенова (гондеїнова)	2,1
С 20:2	Ейкозадієнова	2,5…2,6
С 22:0	Докозанова (бегенова)	3,6
С 22:1	Докозенова (ерукова)	3,9
С 22:2	Докозадієнова	4,8
С 24:0	Тетракозанова (лігноцеринова)	7,2
С 24:1	Тетракозенова (нервонова)	7,7

Розрахунок складу метилових (етилових) ефірів жирних кислот олії проводили методом внутрішньої нормалізації.

Площу піка компоненту, мм^2, визначали за формулою:

$$S_i = h_i a_i, \quad (1.1)$$

де h_i – висота піка, мм;

a_i – ширина, виміряна на половині висоти, мм.

Суму площ всіх піків на хроматограмі ΣS_i приймали за 100 %. Масову долю кожної кислоти олії X_i визначали за формулою:

$$x_i = \frac{100 S_i}{\sum S_i}. \quad (1.2)$$

де S_i – площа піка метилового (етилового) ефіру;

ΣS_i – сума площ всіх піків на хроматограмі, мм^2.

Результати хроматографічного аналізу метилової проби рицинової олії наведено в табл. 1.8.

Таблиця 1.8

Жирна кислота		Вміст в олії, %
Пальмітинова	$C_{16}H_{32}O_2$	4,35
Стеаринова	$C_{18}H_{36}O_2$	1,625
Олеїнова	$C_{18}H_{34}O_2$	24,24
Вакценова	$C_{18}H_{34}O_2$	1,5
Лінолева	$C_{18}H_{32}O_2$	23,77
Ліноленова	$C_{18}H_{30}O_2$	9,25
Арахінова	$C_{20}H_{40}O_2$	0,595
Ерукова	$C_{22}H_{42}O_2$	25,26
Нервонова	$C_{24}H_{46}O_2$	0,955
Інші жирні кислоти		8,455

1.5.3. Методика визначення молярної маси та нижчої теплоти згорання олії

Оскільки жирні кислоти в олії знаходяться в складі триацилгліцеринів, то визначення їх молярної маси $M_т$ проводили за формулою [84]:

$$M_T = 3M_K + 38, \text{ кг/кмоль}, \qquad (1.3)$$

де $M_к$ – молярна маса середнього складу жирних кислот.

Знаючи молярні маси жирних кислот та їх долю в складі олії, можна визначити молярні маси кожного з елементів (С, Н і О), а також $M_к$ и $M_т$. Молярні маси: вуглецю С = 12,011 кг/кмоль; водню Н = 1,0079 кг/кмоль; кисню О = 15,9994 кг/кмоль. В результаті розрахунків молярна маса всіх атомів вуглецю в кислотах $C_Σ$ = 230,15 кг/кмоль, водню $H_Σ$ = 35,88 кг/кмоль та кисню $O_Σ$ ≅ 96,00 кг/кмоль. Молярна маса ріпакової олії рафінованої $M_т^{рм}$ = 932,33 кг/моль. Розділимо сумарні значення величин молярної маси всіх атомів С, Н і О, що входять до складу олії, на молярні маси С = 12,011; Н = 1,007 і О = 15,9994, отримаємо сумарну формулу високоерукової олії: $C_{60,5}H_{108,8}O_6$.

Для порівняння в [2] наведені дані для низькоерукової РО (С 22:1 – 0,6 %) – молярна маса 883 кг/моль, наближена сумарна формула $C_{57}H_{101,6}O_6$. Розділивши сумарні значення величин молярної маси всіх атомів С, Н и О, що входять до складу олії на молярну масу олії, отримаємо відносні частки відповідно вуглецю, водню і кисню: С = 0,779; Н = 0,118 та О = 0,103. Це дозволяє визначити стехіометричну кількість повітря в кілограмах та кмолях (L_0 [кг/кг] та M_0 [кмоль/кг]), теоретично необхідну для згоряння одного кілограма палива.

Визначення L_0 (M_0) і нижчої теплоти згоряння $Q_н$ ріпакової олії та її бінарних сумішей з ДП. Для визначення стехіометричної кількості повітря L_0 (M_0), теоретично необхідного для повного згоряння одного кілограма палива використаємо відомі залежності:

$$L_0 = \frac{2{,}67C + 8H - O}{0{,}232}, \text{ кг повітря/кг палива}; \qquad (1.4)$$

$$M_0 = \frac{C/12 + H/4 - O/32}{0{,}21}, \text{ кг моль/кг палива}. \qquad (1.5)$$

Нижчу теплоту згоряння РО можна розраховати за відомим співвідношенням Д.І. Менделеєва [64]:

$$Q_H = 34{,}013C + 125{,}6H - 10{,}9(O - S) - 2{,}512(9H + W). \qquad (1.6)$$

(МДж/кг)

де С, Н, О, S, W – масові частки в паливі відповідно вуглецю, водню, кисню, сірки та води.

В табл. 1.9 наведені дані теплоти згоряння (вищої $Q_в$ та нижчої $Q_н$) олій, жирних кислот та їх складних ефірів [64, 65].

Таблиця 1.9

Теплота згоряння (вища $Q_в$, нижча $Q_н$) олій, жирних кислот та їх сфірів

Біопаливо	Q_i	Теплота згоряння, МДж/кг	За (1.6)
Олії			
Рiпакова олія	$Q_в$	39,7; 40,0	
	$Q_н$	37,1; 36,7; 38,0; С = 0,775; Н = 0,116; 0 = 0,109	37,1
		36,0; 37,3; С = 0,77; Н = 0,12; 0 = 0,11	37,3
Соняшникова олія	$Q_в$	39,8; 39,7; 39,5; 39,4;С=0,776; Н = 0,115; 0= 0,109	39,65
	$Q_н$	36-38; 38,2; 37,0; С = 0,776; Н = 0,115; 0 = 0,109	37,05
Соєва олія	$Q_в$	39,45; С = 0,775; Н = 0,115; 0 = 0,110	39,6
	$Q_н$	36-39; С = 0,775; Н = 0,115; 0 = 0,110	37,0
Арахісова олія	$Q_в$	39,4; 39,6; С = 0,78; Н = 0,123; 0 = 0,097	40,9
	$Q_н$	37,0; С = 0,78; Н = 0,123; 0 = 0,097	38,1
Кукурудзяна олія	$Q_в$	39,4; С = 0,775; Н = 0,115; 0 = 0,110	
Бавовняна олія	$Q_в$	39,55; С = 0,771; Н = 0,117; 0 = 0,112	39,7
Пальмова олія	$Q_в$	С = 0,766; Н = 0,1195; 0 = 0,1145	39,8
Рiпакова олія $C_{60,8}H_{109,8}O_6$	$Q_в$	С = 0,779; Н = 0,118; 0 = 0,103	40,2
	$Q_н$	С = 0,779; Н = 0,118; 0 = 0,103	37,5
Жирні кислоти			
$C_{16}H_{32}O_2$	$Q_в$	39,12; С = 0,749; Н = 0,126; 0 = 0,125	39,94
$C_{18}H_{36}O_2$	$Q_в$	39,87; С = 0,760; Н = 0,128; 0 = 0,112	40,64
Складні ефіри жирних кислот			
Метилові ефіри рiпакової олії	$Q_н$	36,7; 36,8; 37,02; 36,1	
Метилові ефіри соєвої олії	$Q_н$	38,1	
Метилові ефіри $C_{20,2}H_{37,6}O_2$	$Q_н$	С = 0,776; Н = 0,1215; 0 = 0,1025	37,8
Етилові ефіри $C_{21,2}H_{39,6}O_2$	$Q_н$	С = 0,7795; Н = 0,1225; 0 = 0,0980	38,05

Для визначення величин L_0 (M_0) и $Q_н$ для бінарних сумішей РО+ДП застосуємо властивість адитивності цих величин. Знаючи густину ріпакової олії $\rho_{ро}$ та дизельного пального $\rho_{дп}$ та їх об'ємні долі ($v_{ро}$ и $v_{дп}$) в сумішах, визначаємо величини $L_{0\,см}$ і $Q_{н\,см}$ за співвідношеннями:

$$L_{0см} = \left(L_{0РО} v_{РО} \rho_{РО} + L_{0ДП} v_{ДП} \rho_{ДП}\right) / \rho_{см}, \text{ кг/кг;} \qquad (1.7)$$

$$Q_{нсм} = \left(Q_{нРР} v_{РО} \rho_{РО} + Q_{нДП} v_{ДП} \rho_{ДП}\right) / \rho_{см}, \text{МДж/кг,} \qquad (1.8)$$

де $\rho_{см} = \rho_{дп} \cdot v_{дп} + \rho_{ро} \cdot v_{ро}$, кг/м^3.

1.5.4. Розрахунок матеріального балансу реакції переетерифікації триацилгліцеринів ріпакової олії етиловим спиртом

Таблиця 1.10

Триацилгліцерини						етилові ефіри		
жирних кислот		+	$3C_2H_5OH$	=	3		+	$C_3H_5(OH)_3$
ріпакової олії								гліцерин
Молярна маса	932,33	+	3×46,07	=	3×326,16		+	92,09

Жирно-кислотний склад ріпакової олії рафінованої

Таблиця 1.11

Кислота		Формула	Молярна маса, кг/кмоль	Склад, %
1		2	3	4
C16:0	Пальмітинова (гексадеканова)	$C_{16}H_{32}O_2$	256,42	4,3481
C18:0	Стеаринова (октадеканова)	$C_{18}H_{36}O_2$	284,47	1,6247
C18:1	Олеїнова	$C_{18}H_{34}O_2$	282,45	24,2395
C18:1	Вакценова	$C_{18}H_{34}O_2$	282,45	1,503
C18:2	Лінолева (октадекадієнова)	$C_{18}H_{32}O_2$	280,44	23,769
C18:3	Ліноленова	$C_{18}H_{30}O_2$	278,42	9,2512

1		2	3	4
С20:0	Арахінова (ейкозанова)	$C_{20}H_{40}O_2$	312,52	0,5943
С20:1	Гадолеїнова (ейкозенова)	$C_{20}H_{38}O_2$	310,50	7,229
С20:1		$C_{20}H_{38}O_2$	310,50	0,6748
С20:2	Ейкозадієнова	$C_{20}H_{36}O_2$	308,48	0,5515
С22:1	Ерукова (доказенова)	$C_{22}H_{42}O_2$	338,56	25,2592
С24:1	Нервонова (тетракозенова)	$C_{24}H_{46}O_2$	366,61	0,9555

Розрахунок молярної маси триацилгліцеринів ріпакової олії рафінованої проведемо за середнім значенням молярної маси жирних кислот

Середня молярна маса жирних кислот:

$M_{жк}$ = 0,04381·256,42+0,016247·284,47+0,242395·282,45+0,01503·282,45+ +0,23769·280,44+0,92512·278,42+0,005943·312,52+0,07229·310,5+ +0,006748·310,5+0,005515·308,48+0,252592·338,56+0,009555·336,61 =11,23+4,62+68,46+4,25+66,66+25,76+1,86+22,45+2,10+1,70+85,52 +3,50 = 298,11 кг/кмоль.

Середня молярна маса триацилгліцеринів жирних кислот:

$M_{аг}$ = 3 $M_{жк}$+38=3·298,11+38=932,33 кг/кмоль.

Молярна маса гліцерина $C_3H_5(OH)_3$:

$M_{гл}$ = 3·12,011 + 8·1,0079 + 3·15,994 = 36,033 + 8,063 + 47,998= = 92,09 кг/кмоль.

Молярна маса етилового спирту C_2H_5OH:

$M_с$ = 2·12,011 + 6·1,0079 + 15,9994 = 46,07 кг/кмоль.

Середня молярна маса етилових ефірів:

$M_{ээ}$ = $M_{жк}$ + C_2H_4 = 298,11 + 28,05 = 326,16 кг/кмоль.

Проведемо розрахунок кількості реагентів на 1000 кг ріпакової олії.

Розрахунок кількості етилових ефірів:

1000/932,33 = X/3·326,16

X = 1049,51 кг.

Розрахунок кількості етилового спирту (етанолу):

1000/932,33 = X/3·46,07,

X = 148,24 кг.

Розрахунок кількості гліцерину:

1000/932,33 = X/92,09

X=98,77 кг.

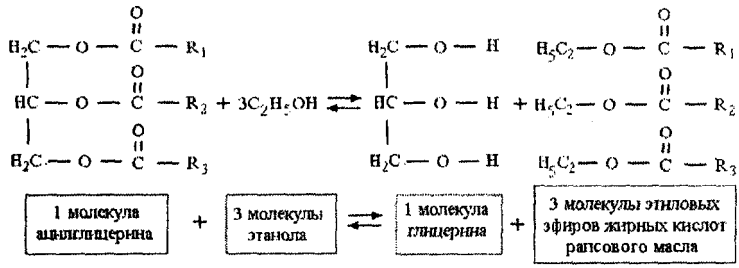
Розрахунок кількості КОН на 100 літрів ріпакової олії:

м.м.	56,1		46,07			84,15		18,02
	KOH	+	C_2H_5OH		→	C_2H_5OK	+	H_2O
кг	1,3		1,07			1,95		0,42

1.5.5. Приклад розрахунку фізико-хімічних властивостей етилових ефірів олій

Визначимо кількість молекул вуглецю, водню та кисню в ріпаковій олії рафінованій.

Реакція переетерифікації ріпакової олії етиловим спиртом протікає за наступним механізмом [84]:



Отже, як було показано вище, середня молярна маса $M_{ээ}$ = 326,16 кг/кмоль. Сумарна атомна вага вуглецю в молекулі етилового ефіру C = 254,17 кг/кмоль, водню H = 39,91 кг/кмоль та кисню O ≈ 32 кг/кмоль. Оскільки молярна вага C = 12,011 кг/кмоль; H=1,0079 кг/кмоль та O=15,9994 кг/кмоль, визначимо

наближено сумарну формулу етилових ефірів високоерукової ріпакової олії:

$C_ф = 254,17/12,011 \approx 21,2$;

$H_ф = 39,91/1,0079 \approx 9,6$;

$O_ф = 2$.

Відповідно, наближена сумарна формула етилових ефірів ріпакової олії матиме вигляд $C_{21,2}H_{39,6}O_2$.

Відносні частки C, H і O в альтернативному паливі:

$C = 254,17/326,16 = 0,7795$;

$H = 39,91/326,16 = 0,1225$;

$O = 32/326,16 = 0,098$.

Нижча теплота згоряння $Q_н$ визначалася за формулою Д.І. Менделєєва [64], МДж/кг:

$Q_н = 34,013C + 125,6H - 10,9O_т - 2,512(9H+W) = 34,013 \cdot 0,7795 + 125,6 \cdot 0,1225 - 10,9 \cdot 0,098 - 2,512 \cdot 9 \cdot 0,1225 = 26,513 + 15,386 - 1,068 - 2,769 = 38,06$.

Стехіометрична кількість повітря L_0 (M_0), теоретично необхідного для повного згоряння 1 кг альтернативного палива, кг/кг:

$L_0 = (2,67C + 8H - O_т)/0,232 = (2,67 \cdot 0,7795 + 8 \cdot 0,1225 - 0,0980)/0,232 = 12,77$, кг/кг;

$M_0 = (C/12 + H/4 - O/32)/0,21 = (0,7795/12 + 0,1225/4 - 0,098/32)/0,21 = 0,44$, кмоль/кг.

1.6. Визначення хімічного складу альтернативних палив рослинного походження методом газорідинної хроматографії

Значний вплив на еколого-економічні показники дизелів мають характеристики застосовуваних видів палива, зокрема їх хімічний склад. Традиційні нафтові дизельні палива – це багатокомпонентна суміш, в яку як інгредієнти входять наступні групи вуглеводнів: насичені ациклічні парафіни (алкани) C_nH_{2n+2} і аліциклічні – нафтени (циклани) C_nH_{2n}; ненасичені (з подвійними зв'язками) ациклічні олефіни (алкени) C_nH_{2n} і аліциклічні C_nH_{2n-2}, а також

ароматичні вуглеводні C_nH_{2n-6} [22]. Груповий вуглеводневий склад впливає на випаровуваність палива і температуру його кипіння, цетанове число, період затримки спалахування, динаміку й ефективність процесу згоряння.

Трохи інакше виглядає структура молекули альтернативних палив рослинного походження (олії та її похідних). Рослинні жири складаються з триацилгліцеринів – гліцеринових ефірів жирних кислот [89]. Всі олії складаються з молекул ацилгліцеринів, що в залежності від сполуки їх жирних кислот бувають одне-, дво- і трикислотними. В структуру молекули трьохкислотного триацилгліцерину ріпакової олії входять радикали ненасичених жирних кислот: ерукової С22:1, олеїнової С18:1 і ліноленової С18:3. В табл. 1.12 наведена сумарна формула, молекулярна маса $M_м$ і нижча теплота згоряння Qн (за формулою Д.І. Менделєєва) триацилгліцерину ріпакової олії (рис. 1.4).

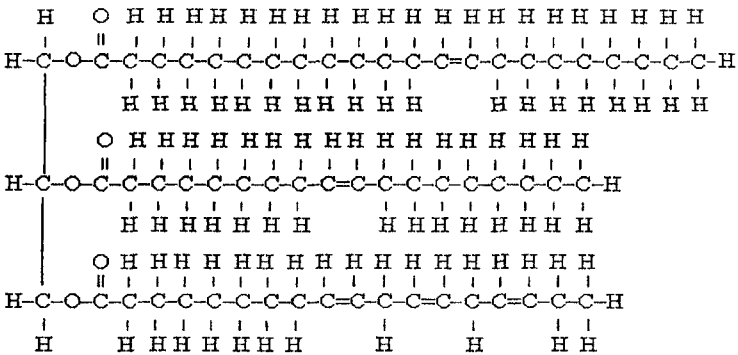


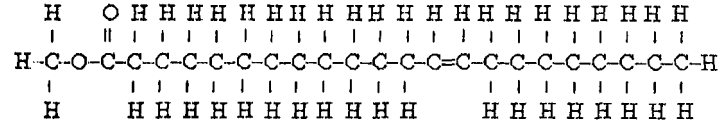
Рис. 1.4. Схема структури молекули триацилгліцерину ріпакової олії

Ріпакова олія, яка використовується як паливо для дизелів, [120], до складу якої входить вищеописаний триацилгліцерин, має наступні властивості (табл. 1.12). Можна відзначити, що за деякими своїми фізико-хімічними властивостями (молекулярна маса, нижча теплота згоряння та ін.) ріпакова олія аналогічна важким паливам, що використовуються в суднових дизелях.

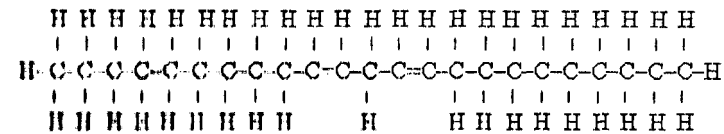
Більш широкого поширення одержали альтернативні палива на основі метилових ефірів жирних кислот ріпакової олії МЕРО [74]. В процесі переетерифікації ріпакової олії метиловим спиртом в

присутності каталізатора [84] із триацилгліцеринів одержують МЕРО. На рис. 1.5 представлені схеми структур молекул метилового ефіру ерукової кислоти і вуглеводню, що входить у дизельне паливо. Властивості цих речовин і МЕРО наведені в табл. 1.12.

В роботі [69] наведені результати фракційної розгонки згідно з методом ДСТУ 2177-99 метилових ефірів жирних кислот ріпакової (МЕРО) і соняшникової (МЕСО) олій, а також RME (ріпакометилові ефіри) німецького виробництва. В процесі розгонки кожного з біопалив відбиралися проби фракцій 0–10 %, 10–50 % і 50–90 % відігнаного продукту. Ці проби, а також вихідні біопалива, були піддані аналізу на хроматографі Shimadzu GC-14B.



а)



б)

Ерукова кислота

$C_{22}H_{42}O_2$ CH_3-$(CH_2)_7$-CH=CH-$(CH_2)_{11}$-$C^{=O}_{-OH}$

Метиловий ефір ерукової кислоти

$C_{23}H_{44}O_2$ CH_3-$(CH_2)_7$-CH=CH-$(CH_2)_{11}$-$C^{O}_{-OCH_3}$

Вуглеводень

$C_{21}H_{44}$ CH_3-$(CH_2)_8$-CH=CH-CH_2-CH=CH-$(CH_2)_8$-CH_3

в)

Рис. 1.5. Структури молекул метилового ефіру ерукової кислоти (а), вуглеводню (б), порівняльна таблиця (в)

Як видно з рис. (1.5) , структурні формули вуглеводню і ефіру відрізняються наявністю кисню у ефірі (група CH_3 у вуглеводні замінена на групу $COOCH_3$), що визначає відмінності ефіру за фізико-хімічними властивостями.

Таблиця 1.12

Фізико-хімічні властивості речовин, які досліджувалися

Показники	Речовина				
	Триацилгліцерини ріпакової олії	ріпакова олія	метиловий ефір ерукової кислоти	вуглеводень	МЕРО
Приблизна сумарна формула	$C_{61}H_{108}O_6$	$C_{57}H_{101,6}O_6$	$C_{23}H_{44}O_2$	$C_{23}H_{44}$	$C_{19}H_{35,2}O_2$
$M_м$, кг/кмоль	961	883	352	320	296
$Q_н$, МДж/кг	37,3	36,7	38,6	43,5	37,1
Цетанове число	–	≈ 44	–	–	52–56
ρ_{15}, кг/м^3	–	916	–	–	882
ν_{20}, мм^2/с	–	75	–	–	6–8

Хроматографування проводилося за таких умов:

– колонка капілярна кварцова 60 м Х 0,32 мм; НР-23; 0,25 мкм;

– температура детектора 250 °С;

–температура випарника 240 °С

– температура термостата колонки: лінійно програмували від 160 °С до 225 °С;

– швидкість потоку газу-носія (водень) при тиску 65 кПа – 1 мл/хв.;

– об'єм проби - 1 мм^3 розчину метилових ефірів жирних кислот у циклогексані.

Для ідентифікації отриманих хроматограм були використані індивідуальні метилові ефіри насичених і ненасичених жирних кислот з числом вуглецевих атомів 12–22. На підставі цього були ідентифіковані основні складові досліджуваних проб, що

співпадають з даними ДСТУ 30089-93 «Олії рослинні. Метод визначення ерукової кислоти». На рис. 1.6 представлені хроматограми вихідних біопалив (RME і MECO), на рис. 1.7 – штрих-хроматограми MEPO і фракції 0–10 % MEPO, на рис. 1.8 – штрих-хроматограми фракцій 10–50 % RME і 50–90 % MECO. На рис. 1.9 представлені гістограми розподілу метилових ефірів основних жирних кислот, що входять до складу триацилгліцеринів вихідних рослинних олій (пальмітинова С16:0, стеаринова С18:0, олеїнова С18:1, лінолева С18:2, ліноленова С18:3, ерукова С22:1) та залишок.

Як видно з рис. 1.6 та 1.7, кількість піків та їх розташування на часовій координаті хроматограм ідентичні для усіх видів біопалив (для MECO відсутній пік метилового ефіру ерукової кислоти). Процентний вміст (за об'ємом) відповідних метилових ефірів у кожному з біопалив різний (рис. 1.9).

Перейдемо до розгляду якісного та кількісного складу фракцій, отриманих в результаті фракційної розгонки біопалив (рис. 1.6–1.9). На гістограмах наведений кількісний зміст основних інгредієнтів усіх фракцій для трьох видів біопалив. На підставі обробки хроматограм в табл. 1.13 занесені мінімальні і максимальні значення часу виходу інгредієнтів біопалив і фракцій, а також їх кількість в кожній із проб.

Можна стверджувати, що в результаті нагрівання, випаровування і конденсації у всіх фракціях конденсату кожного з палив з'являються нові хімічні сполуки. В усіх фракціях знаходяться основні інгредієнти (метилові ефіри жирних кислот), що входять до складу вихідних біопалив. Суміш ефірів є рідиною, що википає у вузькому температурному інтервалі (RME — 90 % біопалива перегоняється в діапазоні температур 598–618 К). Цим можна пояснити те, що при випарюванні палива, що кипить, в парову фазу переходять відразу кілька ефірів, температури кипіння яких близькі. Наприклад, метилові ефіри пальмітинової і стеаринової жирних кислот при тиску 15 мм. рт. ст. киплять відповідно при 469 К і 488 К [89].

Таблиця 1.13

Кількість і часові інтервали виходу інгредієнтів біопалив та їх фракцій

Паливо	Показники			
	Інгредієнти		τ_{min}, хв	τ_{max}, хв
	біопаливо і фракції	кількість		
МЕСО	100 %	18	6,400	25,941
	0–10 %	21	4,576	26,156
	10–50 %	14	7,480	26,011
	50–90 %	25	4,673	26,121
МЕРО	100 %	16	10,307	26,768
	0–10 %	33	4,762	22,607
	10–50 %	30	4,739	22,580
	50–90 %	45	4,781	33,681
RME	100 %	17	10,319	26,782
	0–10 %	28	5,294	22,536
	10–50 %	29	5,280	22,518
	50–90 %	29	5,277	33,657

За даними фракційної розгонки [69], з появою перших крапель конденсату з паровихідної трубки ($T_{п.к.}$ = 598К) температура МЕРО, що кипить, дорівнювала $T_к$ = 628К (замірялася термопарою).

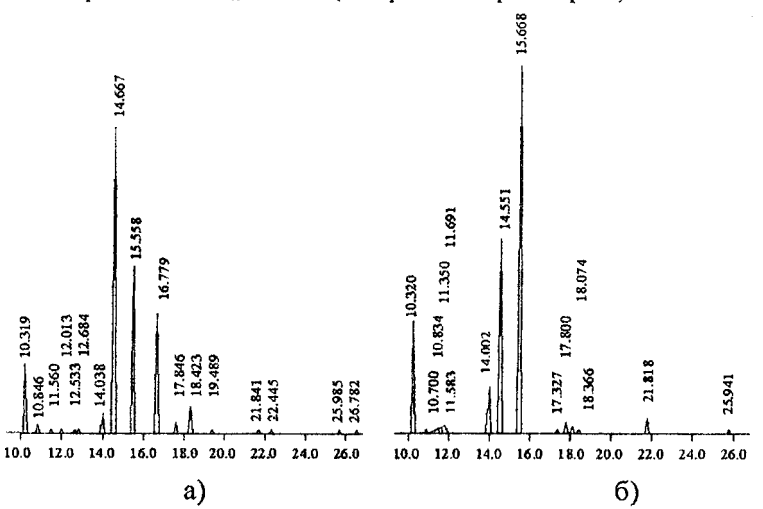


Рис. 1.6. Хромотограми вихідних біопалив: а) RME; б) МЕСО

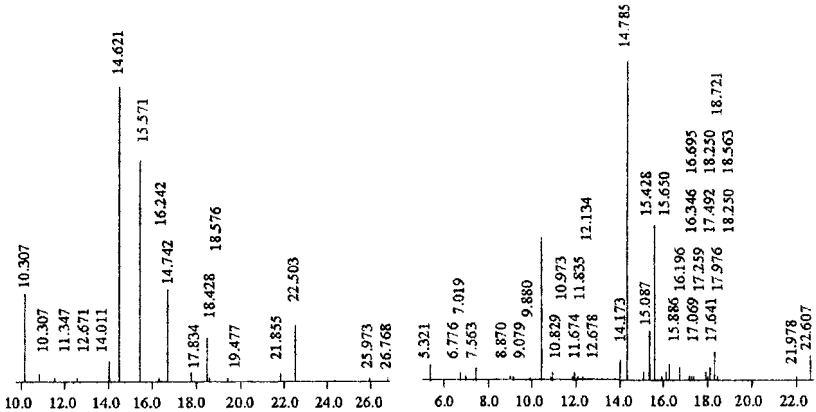


Рис. 1.7. Штрих-хроматограми вихідних біопалив:
а) МЕРО; б) фракція 0–10 % МЕРО

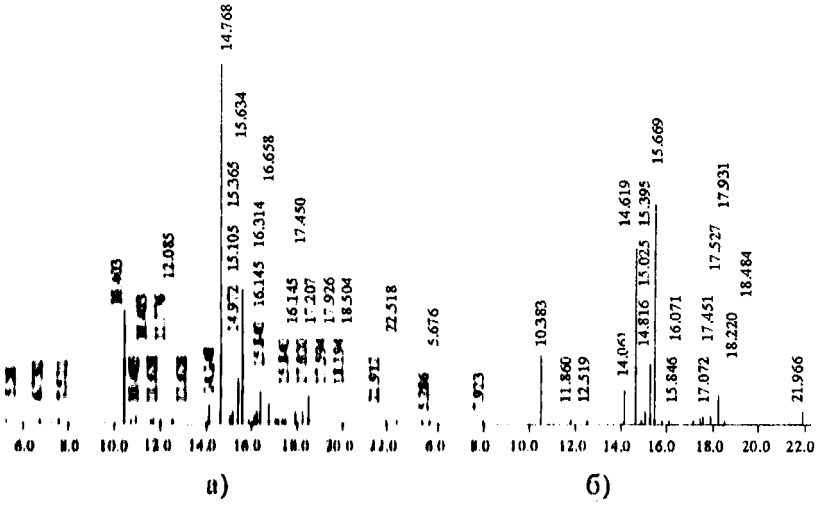


Рис. 1.8. Штрих-хроматограми фракцій біопалив:
а) фракція 10–50 % RME; б) фракція 50–90 % МЕСО

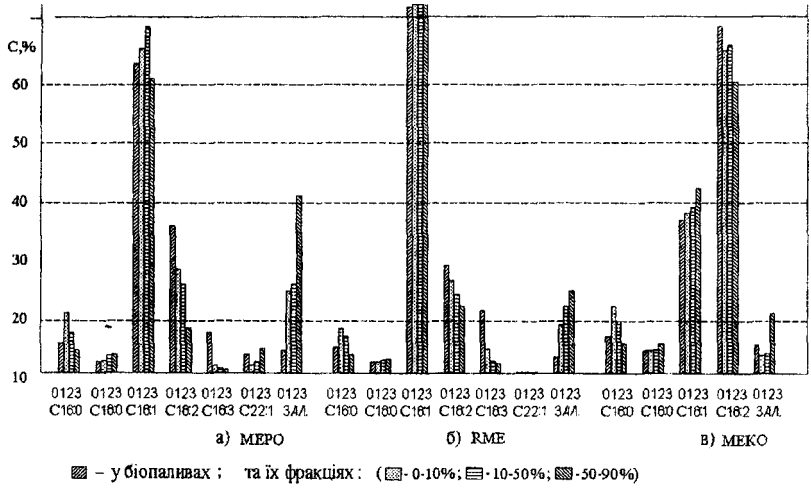


Рис. 1.9. Гістограма розподілу метилових ефірів

Як видно з рис. 1.9, для кожного виду біопалива та його фракцій зростає кількість хімічних сполук, умовно віднесених до залишку До цих речовин відносяться як ідентифіковані метилові ефіри наступних жирних кислот (наприклад, для МЕРО і RME) – насичені: миристинова С14:0, маргаринова С17:0, арахінова С20:0, бегенова С22:0; ненасичені: пальмитоолеїнова С16:1, гадолеїнова С20:1, та інші сполуки, які ще потребують ідентифікації.

Необхідно чітко усвідомлювати, що розгонка композицій метилових ефірів (біопалива) при атмосферному тиску і максимальній температурі його кипіння близько 700 К при орієнтовному виході 80 % конденсату МЕРО [69], відрізняється від його випаровування з наступними процесами деструкції молекул та їх окислювання в умовах камери згоряння дизеля. На номінальному режимі роботи дизеля 6ЧН12/14 (N_e = 191 кВт, n = 2000 хв.$^{-1}$) тиск і температура в камері згоряння на початку і кінці впорскування палива відповідно складає 6,9 МПа і 13,1 МПа; 940 К і 1458 К. Проте, знання хімічного складу та кількісного співвідношення інгредієнтів у фракціях досліджуваних біопалив дозволяє оцінити інтенсивність і повноту його випаровування, створити адекватну математичну модель процесів підготовки біопалива до самоспалахування та горіння.

1.7. Фракційна розгонка метилових ефірів жирних кислот олій при атмосферному тиску

Сукупність фізичних показників палива, що обумовлюють швидкість і повноту процесу випаровування, здатність до утворення паливо-повітряної суміші в циліндрі двигуна, оцінюється інтегральним показником – випаровуваністю палива. Інтенсивність і повнота випаровування палива залежать від його фізичних властивостей, параметрів повітряного заряду, типу двигуна, конструкції камери згоряння і паливної апаратури [19]. Від випаровуваності палива значною мірою залежать техніко-економічні показники двигуна. Випаровуваність характеризується одним із найважливіших показників палива – фракційним складом, що визначається шляхом перегонки палива з поступовим випаровуванням. У [84] вказується, що перегонку метилових ефірів жирних кислот проводять під розрядженням (1–3 мм.рт.ст.), що забезпечує зниження температури кипіння ефірів до границь, при яких термічний розпад їх не відбувається. Так в [57] вказується, що для метилових ефірів пальмітинової та стеаринової жирних кислот зона розкладання знаходиться близько Т = 475–480К та тиску 20–40 мм. рт. ст.

Було отримано криві розгонки метилових ефірів жирних кислот ріпакової (МЕРО) та соняшникової (МЕСО) олій виробництва України, а також біопалива RME німецького виробництва. Як відзначається в [53], за результатами розгонки можна розрахувати теплофізичні властивості палив, визначивши при цьому середньооб'ємну температуру $T_{ср.о}$, середньомасову $T_{ср.т}$ та середньомольну $T_{ср.м}$ температури розгонки, а також середні значення цих температур $T_{ср.}$.

Випаровуваність палив у цілому і окремі експлуатаційні їх властивості оцінюються згідно з ГОСТ 2177-82. При розгонці композицій метилових сфірів витримувалися температура води в холодильнику та швидкість нагрівання. Враховувалася також температурна поправка на тиск навколишнього середовища. При визначенні фракційного складу МЕРО додатково встановлювалася термопара в рідину на відстані 15 мм від дна колби для перегонки, що забезпечувало визначення температури киплячих ефірів при їх випаровуванні в інтервалі 0–80 %. Результати експериментальних досліджень наведені в табл. 1.14.

Таблиця 1.14

Результати фракційної розгонки для різних видів палива

Паливо	ρ_{293}, кг/м^3	п.к. 5 %	10 % 20 %	30 % 40 %	50 % 60 %	70 % 80 %	90 % 95 %	96 % 97,5 %	Θ, К/% $T_{ср.о}$, К
МЕСО	886	– –	605 –	608,5 –	610 –	612 –		–	0,117 609
RME	877	598	606 –	608,5 –	610 –	612,5 –	618 –	–	0,108 609,3
МЕРО пар	–	598 603,5	606 –	607,5 608,5	610,5 613,5	616 617	587 –	–	0,167 610
МЕРО рідина	882	628 629	631 –	636 641	648 661	689 –	–	–	–
$\Delta T_м$,К	–	30 25,5	25 –	28,5 32,5	37,5 47,5	73 –	–	–	–
$\Delta T_д$, К	–	5,5 16,3	17,2 20,3	23,6 24,9	24,9 25,7	25,1 27,0	–	–	–
ДЗ	30	31 –	472 –	518 –	531 –	561 –	586 –	603 –	1,52 521
EMKOR-I	880	96 602	608 –	610,5 –	613 –	618 –	625 –	– 621	0,167 612,4
EMKOR-II	877	583 –	603 –	608 –	610 –	614,5 –	621 –	– 627	0,192 0,9

В табл. 1.14 також наведені дані фракційної розгонки і густина ρ_{293} ефіру EMKOR (ефіри метилові кислот ріпакової олії), що використовується як домішка до дизельного палива [3] і дизельного палива зимового ДЗ [19].

В ДСТУ 3868-99 для дизельного зимового палива наведені наступні фізичні показники: $\rho_{293} \leq 840$ кг/м^3, 50 % переганяється за температури $\leq$ 553 К, 96 % – за $\leq$ 643К. Аналізуючи дані фракційної розгонки МЕСО, RME, МЕРО та EMKOR, можна відмітити, що метилові ефіри розганяються у дуже вузькому діапазоні температур 598–623 К, що аналогічно кривим розгонки вузьких нафтових фракцій. Для дизельного палива (ДЗ) до

досягнення температури біля парової трубки 598 К вже розганяється близько 85 % палива.

Криву розгонки часто використовують для розрахунку деяких фізичних показників палив [19, 53]. В табл. 1.14 наведені дані про середньооб'ємну температуру кипіння $T_{ср.о}$ палив рослинного і нафтового походження, а також про кут нахилу кривої фракційної розгонки Θ, який обчислюють в град. К на 1 % (об'ємний) за формулами:

$$T_{ср.о} = \frac{T_{10} + T_{30} + T_{50} + T_{70}}{4}, \tag{1.8}$$

$$\Theta = \frac{T_{70} - T_{10}}{60}, \tag{1.9}$$

де T_{10}, T_{30}, T_{50}, T_{70} – температури, що відповідають википанню 10, 30,...70 % об'єму палива по кривій фракційної розгонки.

За аналогією з нафтовим паливом [19, 53], знаючи $T_{ср.о}$, можна шляхом введення відповідних поправок, знайти $T_{ср.т}$, $T_{ср.м}$ та $T_{ср.}$ температури розгонки біопалива. Як видно з табл. 1.14, величина Θ для палив МЕСО, RME та МЕРО змінюється в діапазоні 0,108-0,167 К/%, що дозволяє, виходячи з графіка для знаходження поправки [53], прийняти в першому наближенні поправку, що дорівнює нулю. Тоді $T_{ср.о} \approx T_{ср.т} \approx T_{ср.м} \approx 609{,}5$ К. Для нафтових палив деякі їх фізичні властивості, такі як питома теплоємність, ентальпія та ін., можна представити як функції фактора K – параметра, що визначає хімічну природу нафтопродукту [19, 53]. Оцінка величини K для біопалива проводиться за формулами:

$$K = 1{,}216\frac{\sqrt[3]{T_{ср}}}{\rho_{288}^{288}}, \tag{1.10}$$

$$\rho_{288}^{288} = \rho_{277}^{293} + 5\beta, \tag{1.11}$$

$$\beta = \left(18{,}28 - 13{,}2\rho_{277}^{293}\right)10^{-4}. \tag{1.12}$$

При значеннях ρ_{293} в діапазоні 877–886 кг/м^3 та середній температурі $T_{ср.}$ = 609,5 К величина K = 11,6–11,7 близька до значень відповідного фактора K нафтенових нафтопродуктів.

Пояснимо залежність різниці температур $\Delta T_м$ між рідкою і паровою (біля паровідвідної трубки) фазами від долі відгону (табл. 1.14, МЕРО – рідина, пар). В цій же таблиці наведені аналогічні дані $\Delta T_д$ для дизельного палива [42]. Для дизельного палива

величина $\Delta T_д$ монотонно зростає від початку кипіння (п.к.) – 15,5К до 24,9 К (40 % відгону палива), а потім залишається постійною. Для МЕРО величина $\Delta T_м$ має більші значення і постійна (приблизно 25 К) на ділянці початку кипіння – 20 % відгону палива, а потім монотонно зростає до 73 К (70 % відгону палива). Це пов'язано з тим, що МЕРО є рідиною, що менш випаровується порівняно з дизельним паливом, та потребує більш високих температур і більшої кількості теплоти для переведення біопалива, що впорскується, з рідкого стану в пароподібний.

В результаті проведеного експериментального дослідження отримані криві фракційної розгонки вітчизняних аналогів польського EMKOR і німецького RME біопалив. Визначено густину МЕСО, RME і МЕРО, кут нахилу кривої фракційної розгонки, середню температуру розгонки, фактор K, що характеризує ці процеси. Ці дані надалі дозволять розрахувати кількість палива, що випаровується під час паливоподачі, прогнозувати показники робочого циклу в процесі згоряння, вирішувати завдання вибору раціональних регулювальних та режимних параметрів дизеля.

1.8. Визначення вищої теплоти згоряння альтернативних палив рослинного походження калориметричним методом при постійному об'ємі

В умовах дефіциту рідких енергоносіїв нафтового походження і з метою зниження екологічної небезпеки відпрацьованих газів дизелів доводиться використовувати альтернативні палива з поновлюваних джерел сировини (олії та їх похідні). При обробці експериментальних даних і розрахунках робочого циклу дизелів важливе значення має знання величини нижчої теплоти згоряння палива $Q_н$. Значення $Q_н$ обчислюється розрахунковим шляхом за величиною вищої теплоти згоряння $Q_в$, яка визначається калориметричним методом в ізотермічному й адіабатичному режимах при постійному об'ємі [13]. Якщо для традиційних нафтових палив значення $Q_в$ ($Q_н$) і розрахункові формули для їх визначення широко відомі [51], то для біопалив із рослинної сировини їх значення зібрані і систематизовані в [65]. І хоча експериментальні значення $Q_в$ ($Q_н$) та їх розрахунок за формулою Д.І. Менделєєва дають задовільний збіг, був проведений прямий

вимір $Q_в$ за допомогою калориметра спалювання з бомбою рідинної типу В-08МА [13]. В ГОСТ 21261-91 відзначено, що "даний стандарт поширюється на рідкі палива, вуглеводневі і компоненти, що містять кисень...", що дозволяє вважати методику визначення $Q_в$ придатною і для кисневмісних ($O_т$ = 9...10 %) олій та їх похідних.

Дослідженню були піддані наступні зразки біопалив [62, 73]:

–зразок 1 –RME (ріпакометилові ефіри німецького виробництва, ерукова кислота С22:1 = 0,6 %; ρ_{20} = 877 кг/м^3);

–зразок 2 –РОРВ (ріпакова олія рафінована високоерукова С22:1 ≈ 30 %; ρ_{20} = 916 кг/м^3);

–зразок 3 –СОР (соєва олія, екструдер, ρ_{20} = 916 кг/м^3);

–зразок 4 –ДЗ (дизельне паливо зимове, ρ_{20} = 826 кг/м^3);

–зразок 5 –РОР (ріпакова олія рафінована, С22:1 ≈ 10%; ρ_{20} = 915 кг/м^3);

–зразок 6 –МЕРО (метилові ефіри жирних кислот ріпакової олії рафінованої високоерукової РОРВ, ρ_{20} = 874 кг/м^3);

–зразок 7 –МЕРО (метилові ефіри жирних кислот ріпакової олії рафінованої РОР, ρ_{20} = 874 кг/м^3).

Калориметричні випробування проводилися в лабораторії температурних і теплофізичних вимірів Харківського державного науково-дослідного інституту метрології (ХДНДІМ).

При визначенні ефективної теплоємності калориметра C_i (кДж/°С) в ізотермічному режимі за МІ 2096 спалюється надчиста кислота бензойна (C_6H_5COOH, $t_{пл}$=122,4 °С) –зразкова міра за ТУ 6-09-4985, атестована за теплотою згоряння при 25 °С. Для бензойної кислоти чистої не менше 99,9 % стандартна питома теплота згоряння дорівнює 26454 кДж/кг при зважуванні в повітрі та 26434 кДж/кг для маси навіски, приведеної до вакууму. Необхідно зазначити, що всі виміри температури проводилися за допомогою кварцового термометра, для якого були визначені такі константи:

–коефіцієнт кварцового термометра $K_т$ = 3,856 Гц/°С;

–частота кварцового термометру при 0 °С –100678,5357 Гц.

В табл. 1.15, як приклад для зразка 4, наведено результати реєстрації температури калориметра реєстратором по кварцовому термометру в Гц.

Таблиця 1.15

Дослід 1						Дослід 2					
Показання по шкалі реєстратора						Показання по шкалі реєстратора					
Початковий період		Головний період		Кінцевий період		Початковий період		Головний період		Кінцевий період	
№ виміру, n_o	Показання реєстратора, Гц	№ виміру, n	Показання реєстратора, Гц	№ виміру, n_n	Показання реєстратора, Гц	№ виміру, n_o	Показання реєстратора, Гц	№ виміру, n	Показання реєстратора, Гц	№ виміру, n_n	Показання реєста
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,519 t^1	1	5,787	1	8,625	1	0,660	1	4,516	1	9,465
2	0,533	2	8,173	2	8,631	2	0,677	2	8,908	2	9,471
3	0,549	3	8,433	3	8,637	3	0,691	3	9,265	3	9,476
4	0,563	4	8,487	4	8,644	4	0,705	4	9,325	4	9,481
5	0,578	5	8,504	5	8,650	5	0,720	5	9,344	5	9,487
6	0,592	6	8,512	6	8,656	6	0,735	6	9,353	6	9,492
7	0,607	7	8,517	7	8,662	7	0,750	7	9,361	7	9,498
8	0,621	8	8,521	8	8,669	8	0,767	8	9,367	8	9,504
9	0,636	9	8,525	9	8,675	9	0,781	9	9,373	9	9,509
10	0,651 t_o	10	8,530	10	8,681t^{11}	10	0,796	10	9,378	10	9,514
		11	8,535					11	9,384		
		12	8,541					12	9,389		
		13	8,546					13	9,395		
		14	8,552					14	9,400		
		15	8,558					15	9,405		
		16	8,564					16	9,411		
		17	8,570					17	9,417		
		18	8,576					18	9,421		

Закінчення табл.. 1.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		19	8,582					19	9,427		
		20	8,588					20	9,433		
		21	8,596					21	9,438		
		22	8,601					22	9,444		
		23	8,606					23	9,449		
		24	8,613					24	9,454		
		25	8,619 t_n					25	9,459		

У випадку, коли ефективна теплоємкість калориметра з ізотермічною оболонкою визначена з похибкою менше 0,1 % [13], використовуються вихідні дані і приймається наведений нижче порядок розрахунку вищої теплоти згоряння (табл. 1.16, 1.17).

Таблиця 1.16

№ зразка	$t_к$, ° С	$m\times10^3$, кг	t_o, Гц	t_n, Гц	S^a,%	W^a, %	$\rho_к$, $кг/м^3$	$\sum_1^{n-1} t_i$,Гц
1	14,0	0,7748	0,670	8,764	0,01	0,03	877	214,930
	13,0	0,6872	0,726	7,974	[490]	[490]		195,232
2	13,5	0,6875	0,658	7,935	0,002	0,15	916	194,923
	14,0	0,6878	0,670	7,856	[486]	[487]		191,858
3	14,0	0,6982	0,755	7,989	0	0,15	916	195,061
	13,0	0,7116	0,779	8,127	[488]	[488]		198,499
4	18,5	0,6616	0,651	8,619	0,5	Відсутня.	826	210,647
	19,0	0,7209	0,796	9,459	[489]	[489]		229,529
5	18,0	0,6864	0,638	7,817	0,007	0,15	915	190,938
	18,5	0,6710	0,652	7,668	[486]	[487]		187,682
6	15,0	0,6842	0,621	7,830	0,01	0,03	874	192,653
	15,0	0,6940	0,648	7,482	[490]	[490]		196,478
7	15,0	0,6830	0,620	7,798	0,01	0,03	874	191,590
	16,0	0,6845	0,679	7,913	[490]	[490]		194,099

У табл. 1.16 наведено вихідні дані для розрахунку $Q_в$ досліджуваних зразків палива. Необхідно зазначити, що точність методу визначення $Q_в$ оцінюється збіжністю, яка визначається тим, що два результати виміру, отримані послідовно одним виконавцем, визнаються достовірними (з 95 %-ною довірчою ймовірністю), якщо розбіжність між ними не перевищує 130 кДж/кг [13].

Отже, у табл. 1.16 позначено: $t_к$ –температура повітря в кімнаті, де проводяться теплотехнічні виміри, °С; m –маса, що задається, зразка палива в повітрі, кг; t_o –показання термометра, що відповідають температурі спалювання, Гц; t_n –показання термометра, що відповідають кінцевій температурі, Гц; $\sum_1^{n-1} t_i$ –сума температур калориметра в головному періоді (табл. 1.15), Гц; S^a та W^a –відповідно масова частка сірки і води у зразках палив, що випробуються, %; ρ_s –густина палив, що випробуються, кг/м^3.

Необхідно зазначити особливості запису величин t_o, t_n та $\sum_1^{n-1} t_i$. Так, для t_o та t_n (табл. 1.16) необхідно читати: наприклад, для зразка палива № 1, перший рядок, t_o=100774 + 0,558 Гц, а t_n=100774 + 8,764 Гц. Отже, виходячи з вищевказаних значень $К_т$ та частоти кварцового термометра в 0 °С, величина t_o дорівнює (100774,558 - 100678,535)/3,856=24,902°С, а t_n=(100782,764-100678,535)/3,856=27,030 °С. Істинне значення $\sum_1^{n-1} t_i$ для кожного з рядків в табл. 1.16 записується 25·100774+214,9306 Гц (перший рядок), аналогічним способом визначаються всі інші величини.

Загальними вхідними даними для всіх зразків палива є: $t_{об}$ – температура оболонки калориметра 27,5 °С; m_c –маса посуду з водою (7,980кг); m_2 –маса згорілого дроту для запалювання зразка

палива, яка дорівнює різниці мас дроту до і після запалювання, ($0{,}006 \cdot 10^{-3}$кг); q_2 –питома теплота згоряння дроту: мідний круглий електротехнічний марки ММ діаметром 0,1-0,15 мм –2510 кДж/кг; ρ_w та ρ_a –відповідно густина матеріалу гирі для зважування навіски палива і густина атмосферного повітря (1,20, кг/м^3).

Таблиця 1.17

Зразок	$m_0 10^3$, кг	t', Гц	t'', Гц	Θ_o, Гц	Θ_n, Гц	K	Δh, Гц	Δt, Гц	Q_B^a, кДж/кг	$\overline{Q}_B^a$, кДж/кг	Q_S^a, кДж/кг	Q_S^d, кДж/кг
1	0,7758	0,558	8,797	0,614	8,781	0,001	-0,07338	8,02102	40070	40075	40074	40086
	0,6880	0,611	8,017	0,669	7,997	0,00095	-0,09785	7,15005	40080			
2	0,6883	0,551	7,973	0,605	7,956	0,00099	-0,08517	7,19150	40298	40268	40268	40328
	0,6886	0,580	7,885	0,625	7,872	0,00086	-0,06157	7,18423	40239			
3	0,6990	0,642	8,029	0,697	8,011	0,00103	-0,09014	7,14106	39402	39374	39374	39433
	0,7124	0,676	8,164	0,728	8,148	0,000956	-0,08047	7,26773	39346			
4	0,6625	0,519	8,681	0,585	8,653	0,000946	-0,14049	7,82751	45574	45604	45616	45616
	0,7218	0,660	9,514	0,728	9,489	0,001007	-0,12335	8,53975	45633			
5	0,6872	0,529	7,862	0,584	7,843	0,000976	-0,09689	7,08211	39747	39744	39744	39803
	0,6718	0,537	7,711	0,594	7,692	0,00109	-0,0945	6,92200	39740			
6	0,6850	0,527	7,822	0,574	7,842	0,00102	-0,04941	7,159387	40308	40340	40339	40351
	0,6949	0,550	8,009	0,599	7,997	0,000993	-0,06064	7,273158	40371			
7	0,6838	0,530	7,819	0,575	7,809	0,000978	-0,04721	7,130598	40216	40199	40198	40210
	0,6853	0,569	7,954	0,624	7,935	0,001001	-0,09348	7,14012	40182			

Величини та їх обчислення (табл. 1.17).

m_o –масу зразка палива обчислюють у вакуумі, кг:

$$m_o = m + m\left(\frac{\rho_a}{\rho_s} - \frac{\rho_a}{\rho_w}\right). \quad (1.13)$$

Температури t' та t'' (табл. 1.15) –відповідно, початкова температура початкового періоду та кінцева температура кінцевого періоду, Гц; Θ_o та Θ_n –відповідно середні температури початкового та кінцевого періодів реєстрації температури калориметра, Гц; К –константа охолодження калориметра:

$$K = \frac{V_2 - V_1}{\Theta_n - \Theta_o}, \quad (1.14)$$

де V_1 та V_2 –середні швидкості зміни температури (температурний хід) в початковому і кінцевому періодах за 30 сек., Гц;

$$V_1 = \frac{t' - t_0}{n_o},$$

$$V_2 = \frac{t_n - t''}{n_n}. \quad (1.15)$$

Поправка на теплообмін калориметра з навколишнім середовищем Δh, Гц:

$$\Delta h = K\left(\frac{t_0 + t_n}{2} + \sum_{1}^{n-1} t_i - n\Theta_0\right) + nV_1, \quad (1.16)$$

де n_o, n, n_n, –число вимірів у початковому, головному і кінцевому періодах.

Виправлений підйом температури в досліді Δt, Гц:

$$\Delta t = \left(t_n - t_0 + \Delta h\right). \quad (1.17)$$

Запис в табл. 1.17 температур в Гц та переведення їх в °С аналогічні описаним для табл. 1.16.

Теплота згоряння випробуваного зразка палива в калориметричній бомбі (Q_B^a), кДж/кг:

$$Q_B^a = \frac{C_i \Delta t - q_2 m_2}{m}, \ кДж/кг \quad (1.18)$$

Добуток $q_4 m_4$ в (1.18) відсутній, тому що в дослідах полімерні ампули не використовувалися.

$$Q_S^a = \overline{Q}_B^a - 94S^a + \Delta Q_S, \ {}^{кДж}/_{кг}. \qquad (1.19)$$

де $\overline{Q}_B^a$ –середнє арифметичне двох вимірів, кДж/кг;

Q_S^a –вища теплота згоряння випробуваного зразка палива;

94 –теплота утворення сірчаної кислоти з двоокису сірки і розчинення сірчаної кислоти у воді на 1 % сірки, яка перейшла при зпалюванні палива в сірчану кислоту, кДж/кг;

ΔQ_S –поправка, кДж/кг [13] (для дизельного палива ΔQ_S =59 кДж/кг);

Q_S^d –вища теплота згоряння палива з урахуванням масової частки води W^a в ньому (табл. 1.16).

Використовуючи отримані дані по Q_B (Q_S^a) для дизельного палива (зразок 4), визначимо його нижчу теплоту згоряння:

$$Q_i^a = Q_S^a - 24,42(8,94H^a + W^a), \qquad (1.20)$$

де 24,42 –теплота пароутворення при температурі вимірів 25 °С з розрахунку на 1 % води, що виділилася, кДж/кг;

8,94 –коефіцієнт перерахунку масової частки водню на воду;

H^a –масова частка водню у випробуваному продукті (при $W^a = 0$, $H^d = H^a$).

Величину $H^a(H^d)$ обчислюємо за формулою:

$$H^d = 0,001195Q_S^d - 41,4 = 13,11\%.$$

Таким чином:

$$Q_i^a\left(Q_i^d\right) = 45616 - 24,42 \cdot 8,94 \cdot 13,11 = 42754 \ {}^{кДж}/_{кг}.$$

Згідно з [13] результат округлюють до найближчого значення кратного 20 кДж/кг, тобто $Q_i^a = 42760 \ {}^{кДж}/_{кг}$.

Отримані експериментальні дані по вищій теплоті згоряння біопалив (ріпакової та соєвої олій, а також метилових ефірів ріпакової олії – RME (Німеччина) і МЕРО (Україна)) добре збігаються з даними вітчизняних і зарубіжних дослідників та

дозволяють з високим ступенем достовірності визначати індикаторні й ефективні показники роботи дизельного (багатопаливного) двигуна. Результати дослідження підтверджують, що високоерукова олія та її похідні мають більш високий енергетичний потенціал, ніж низькоерукова.

1.9. Визначення фізичних властивостей альтернативних бінарних палив на основі біодизеля та газового конденсату

Відомо, що при створенні нових видів палива існують наступні два варіанти: 1) альтернативне паливо адаптується під існуючу конструкцію двигуна; 2) під розроблене альтернативне паливо конвертується двигун, що потребує значних науково-технічних зусиль та матеріальних витрат.

Відомо більше десяти стандартів на «біодизель», що діють у ряді країн Європи і США. Наприклад, хіміко-фізичні властивості ріпакового метилового ефіру (Rapsölmethylester), відображені у стандарті Німеччини DIN 51606 [1].

За основними показниками, що впливають на процеси впорскування, випаровування, сумішоутворення і згоряння палива в циліндрі дизеля, «біодизель» (метилові ефіри ріпакової олії) незначно відрізняються від відповідних показників дизельного палива, що в остаточному підсумку впливає на протікання та показники робочого процесу та інтегральні еколого-економічні характеристики дизеля. Докладно питання можливості застосування в сучасних швидкохідних дизелях із безпосереднім упорскуванням (DI – direct injection) палив розширеного фракційного складу розглянуті в [32,58,59,78]. В них відзначається, що «паливо зі всіма необхідними, часто суперечливими властивостями, повинно бути скомбіноване розумним поєднанням окремих нафтових фракцій» [59]. При цьому звертається увага на те, що проблема формування («конструювання») оптимального складу широкофракційного палива повинна бути розроблена з таких точок зору: хіммотологічної, хіміко-технологічної, експлуатаційної та енерго-економічної [32, 58].

Необхідне наукове обґрунтування та практична реалізація результатів компаундування метилових ефірів ріпакової олії і

газового конденсату українських родовищ, що дозволяють створити бінарне альтернативне паливо з показниками (густиною, в'язкістю і поверхневим натягом), ідентичними показникам дизельного палива.

Саме ці показники використовуються в залежностях А.С. Лишевського [40] для наближених розрахунків характеристик паливного струменя в умовах дизельного впорскування. У такому випадку, при впорскуванні цього палива в циліндр двигуна, динаміка розвитку паливного струменя (швидкість руху переднього фронту струменя U_m, його дальнобійність l, час досягнення стінок камери згоряння τ та кут конуса струменя γ) і характеристики розпилювання палива (діаметр розпилювання d_{32} і однорідність) будуть відповідати величинам для дизельного палива, тобто не буде відбуватися порушення протікання процесу горіння через застосування іншого виду палива. За даними [50, 59] густина і в'язкість газового конденсату значно менш, ніж у метилового ефіру ріпакової олії. При цьому величини цетанових чисел на достатньо високому рівні.

Наведені в [43, 61] дані показують, що можна одержати паливні композиції, які за густиною та в'язкістю будуть близькі до дизельного палива. Проте, для максимального наближення експлуатаційних властивостей розглянутого бінарного палива шляхом оптимізації його складу були накладені додаткові обмеження на діапазон процентного співвідношення метилового ефіру ріпакової олії і газового конденсату за величинами: густини ρ, кінематичної в'язкості ν, температури спалахування в закритому тиглі $T_{сп}$, а також величин поверхневого натягу σ.

Розглянемо можливість створення альтернативного бінарного палива на основі біодизелю (метилові ефіри жирних кислот ріпакової олії – МЕРО) і газового конденсату. В ряді робіт [20, 23] наведені експериментальні дані з визначення фізичних показників біодизельного палива (МЕРО) та його сумішей з бензином, керосином і дизельним паливом. До показників, що мають суттєвий вплив на процеси впорскування, випаровування і сумішоутворення відносяться: густина палива ρ, кінематична ν і динамічна μ в'язкості, поверхневий натяг σ. Біодизельне паливо має вищі значення цих величин порівняно з дизельним паливом (табл. 1.18). Тому була зроблена спроба створити такі бінарні суміші біодизеля і традиційних нафтових палив, які б за своїми

фізичними характеристиками наближувались до дизельного палива [20, 46, 61]. При цьому з біодизелем змішувались бензин і керосин, які мають низькі значення цетанового числа – відповідно 8 і 20. Це дозволило одержати для сумішей значення ρ, ν і μ, що близькі до дизельного палива, але при цьому значно знижувалось значення цетанового числа – основної характеристики дизельного палива.

Фізичні показники сумішей МЕРО і ГК (цетанове число > 40) в різних об'ємних співвідношеннях і за різних температур представлені в табл. 1.18.

Таблиця 1.18

Показники нафтових палив та їх сумішей з газовим конденсатом

Палива	Температура, К	ρ, кг/м^3	ν, мм^2/с	$\mu\ 10^3$ Па × с	ν_1, мм^2/с	ν_2, мм^2/с	ν_3, мм^2/с	δ, %
100 % ДП	293	826	3,83	3,16	3,32	2,83	2,63	31,3
	323	805	2,11	1,70	2,09	1,83	1,79	15,2
	343	791	1,67	1,32	1,57	1,44	1,39	16,8
100 % М ЕРО	293	877	8,00	7,02	12,08	15,20	6,71	16,1
	323	856	4,25	3,64	6,86	6,59	4,57	7,5
	343	842	3,10	2,61	4,84	4,27	3,53	13,9
100 % ГК	293	772	0,99	0,77	1,10	1,09	0,98	1,0
	323	751	0,77	0,58	0,79	0,84	0,67	13,0
30 % МЕРО + 70 % ГК	293	805	1,72	1,38	2,09	1,83	1,79	4,1
	323	784	1,19	0,93	1,37	1,29	1,22	2,5
	343	771	0,96	0,74	1,08	1,07	0,96	0
50 % МЕРО + 50 % ГК	293	828	2,68	2,20	3,48	2,97	2,73	1,9
	323	807	1,77	1,43	2,19	1,90	1,86	5,1
	343	794	1,42	1,13	1,67	1,51	1,47	3,5
75 % МЕРО + 25 % ГК	293	854	4,90	4,18	6,51	6,16	4,40	10,2
	323	835	2,71	2,26	4,09	3,54	3,11	14,7
	343	821	2,20	1,81	2,97	2,53	2,40	9,3

Була також зроблена перевірка відомих відношень між густиною та кінематичною в'язкістю нафтопродуктів:

$$\nu = 4{,}9 - 7{,}2\rho - \frac{1}{400\lg^3 \rho}; \qquad (1.21)$$

$$\lg\nu = \frac{1{,}306\rho - 1}{1 - \rho}. \qquad (1.22)$$

Аналіз показує, що формули (1.21) і (1.22) не забезпечують необхідного наближення експериментальних ν і розрахункових ν_1 і ν_2 значень кінематичної в'язкості (розходження досягає 90 %). Експериментальну залежність кінематичної в'язкості $\nu = f(\rho)$ можна описати:

$$\nu = 7 \times 10^{-7} \times 1{,}0185^{\rho}, \text{ мм}^2/\text{с}. \qquad (1.23)$$

В табл. 1.18 наведені результати розрахунків за формулою (1.23) і відсоток відхилення δ розрахункових значень ν_3 від експериментальних:

$$\delta = \frac{|\nu - \nu_3|}{\nu} 100, \%\ .$$

Кореляційний аналіз залежності 1.23 (коефіцієнт кореляції 0,9), показує певний зв'язок між густиною бінарних палив і їх кінематичною в'язкістю у даному діапазоні температур.

1.10. Відпрацьований фритюрний жир – вихідний продукт одержання альтернативного палива для дизельних двигунів

В роботі [62] зроблено аналітичний аналіз еколого-економічних показників дизелів з безпосереднім упорскуванням палива (DI – direct injection) і розділеними камерами згоряння (IDI – indirect injection). Було показано, що в дизелях IDI як моторне дизельне паливо можна застосовувати як підігріті олії, так і їх суміші з нафтовими паливами. В той же час для дизелів DI краще використовувати «біодизель» (метилові або етилові ефіри жирних кислот олій). Автори [88] докладно розглядають екологічні аспекти використання палив рослинного походження і відзначають, що «перспективно, з економічної точки зору, використання як палив метилових ефірів, одержуваних з відходів олій, що використовувалися для готування харчових продуктів». В Іспанії мав побудуватися завод на 18000 тонн на рік, на якому «біодизель» повинен вироблятися з сировини, що включає відходи

м'ясопереробки, відпрацьовані кухонні жири та свіжі олії. Використання відпрацьованого жиру (олії) нарівні із соняшниковою, кукурудзяною та оливковою оліями для виробництва «біодизеля» і використання його в якості палива для дизеля IDI розглянуто в [122]. В табл. 1.19 наведені найбільш характерні показники дизельного палива і «біодизеля».

Було досліджено [71] зразки олії (жиру): соняшникової олії рафінованої вимороженої дезодорованої (до і після використання) Харківського масложирового комбінату; відпрацьований жир одного з підприємств суспільного харчування (табл. 16.2). Жирнокислотний склад відпрацьованої олії (жиру) визначався методом газорідинної хроматографії за методикою, викладеною у ДСТУ ISO 5508-2001. Для аналізу використовувався хроматограф Shimadzu GC-14B. При хроматографуванні встановлювалися наступні умови:

– колонка капілярна кварцова 60м х 0,32 мм HP-23 0,25 мкм;

– температура детектора 250 °С;

– температура випарника 240 °С;

– температура термостата колонки, що програмувалася, від 175 °С до 225 °С;

– швидкість потоку газу-носія (водень) при тиску 65 кПа - 1 мл/хв.;

– об'єм проби - 1 мм^3 розчину метилових ефірів жирних кислот у циклогексані.

На рис. 1.10 наведена схема трансформації жирів при тепловій обробці [82]. В результаті термічного окислювання утворюються продукти, що можна підрозділити на декілька груп:

– речовини зі скороченим ланцюгом, що утворюються в результаті окисної деструкції жирних кислот (за даними [86] високотемпературне нагрівання від 140 до 200 °С соняшникової рафінованої олії через 36 годин призводить до зменшення йодного числа від 138,67 до 105,84, також більш, ніж у два рази збільшується в'язкість олії);

– окислені триацилгліцерини і продукти ізомеризації;

– полімеризовані або конденсовані жирні кислоти.

Знання відсоткового вмісту насичених і ненасичених жирних кислот в досліджуваних зразках дозволяє визначити молекулярну масу композиції метилових ефірів, відносну частку вуглецю, водню та формулу гіпотетичних метилових ефірів.

Таблиця 1.19

Показники дизельного палива і біодизеля [122]

Показник	Розмірність	Дизельне паливо	Біодизель на основі олій			
			Соняшникова олія	Кукурудзяна олія	Оливкова олія	Відпрацьована олія
Густина при 15°С	кг/м^3	837,1	885,3	885,8	880,1	882,9
Сірка	%	0,035	0,0047	0,0047	0,0010	0,0010
Температура спалахування	°С	68	110	111	>110	>110
Кінематична в'язкість при 40 °С	мм^2/с	3,0	4,391	4,515	4,700	4,500
Вода	мг/кг	80	518	528	243	320
Цетановий індекс	-	54,8	-	-	-	-
Цетанове число	-	-	58	65	61	59
Попіл	%	0,005	0,0007	0,005	0,0054	0,0091
Гранична температура фільтрованості (CFPP)	°С	-11	-2	-7	-6	-4
Нижча теплота згоряння	кДж/кг	42722	38473	38481	37287	37338

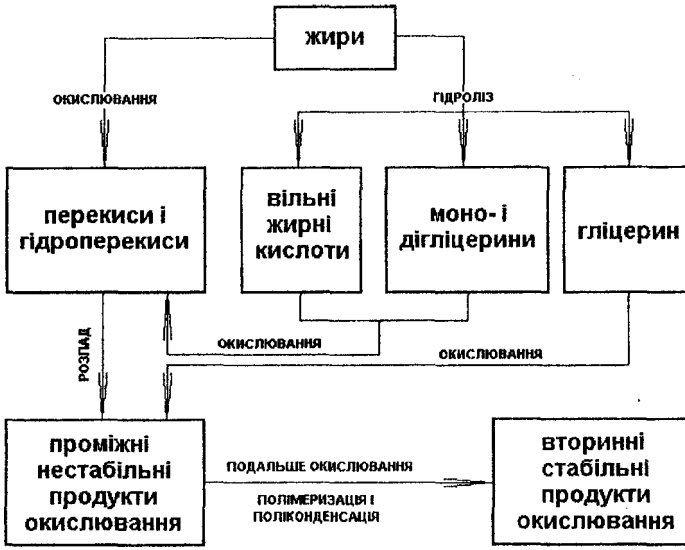


Рис. 1.10. Схема трансформації жирів
під час термічної обробки

Були також визначені нижча теплота згорання $Q_н$ і теоретично необхідна кількість повітря L_o (M_o) для повного згоряння біодизеля за формулами:

$$Q_н = 34{,}013C + 125{,}6H - 10{,}9O_m - 2{,}512 \cdot 9H \text{, МДж/кг;} \quad (1.24)$$

$$M_o = \frac{1}{0{,}21}\left[\frac{C}{12} + \frac{H}{4} - \frac{O_m}{32}\right] \text{, кмоль повітря/кг палива;} \quad (1.25)$$

$$L_o = \frac{1}{0{,}23}\left[\frac{8}{3}C + 8H - O_m\right] \text{, кг повітря/кг палива,} \quad (1.26)$$

де C, H, $O_т$ – відносні частки вуглецю, водню та кисню.

В табл. 1.21 наведені результати розрахунків для метилових ефірів жирних кислот відпрацьованої соняшникової олії та жиру.

Таблиця 1.20

Жирно-кислотний склад жирів, що досліджувалися

Жир, %	Жирна кислота						
	C16:0	C18:0	C18:1	C18:2	C18:3	C20:0	C20:1
Вихідна соняшникова олія	7,0	3,7	23,3	66,0	-	-	-
Відпрацьована соняшникова олія	7,5	4,5	26,3	61,7	-	-	-
Відпрацьований жир	7,2	3,7	73,8	11,0	2,5	0,6	1,2

Таблиця 1.21

Фізико-хімічні показники метилових ефірів жирних кислот відходів олії

Метилові ефіри	Молярна маса, кг/кмоль	C	H	$O_т$	Наближена сумарна формула	$Q_н$, МДж/кг	M_o, кмоль/кг	L_o, кг/кг
Відпрацьованої соняшникової олії	293,3	0,772	0,119	0,109	$C_{18,85}H_{34,7}O_2$	37,33	0,432	12,6
Відпрацьованого жиру	294,9	0,770	0,122	0,108	$C_{18,90}H_{35,7}O_2$	37,57	0,435	12,7

Проведене розрахунково-експериментальне дослідження дозволяє зробити висновок, що метилові ефіри жирних кислот, які отримані з відходів олій від готування харчових продуктів, можуть бути використані як альтернативне паливо рослинного походження для дизельних двигунів з безпосереднім впорскуванням і розділеними камерами згоряння.

РОЗДІЛ 2. ВІДМІННОСТІ У ПРОЦЕСАХ РОЗПИЛЮВАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ТА БІОПАЛИВ

2.1. Вплив фізичних характеристик альтернативного біопалива на його розпилювання

Оскільки біопалива на основі олій мають інші фізичні характеристики, ніж дизельне паливо, виникає проблема адаптації моделей розпилювання, що створенні для дизельних палив, до біопалив. Відомо [1, 3, 62], що на процеси впорскування палива великий вплив мають такі фізичні характеристики палива, як його густина ρ, кінематична ν або динамічна μ в'язкості та поверхневий натяг σ.

Наступний етап досліджень, який повинен бути проведений, це вплив відмінностей в значеннях ρ, ν (μ) та σ альтернативного біопалива на характеристики його впорскування, динаміку розвитку паливного факела, розмірів мікрочастинок розпилювання тощо.

Визначення фізичних показників РО (ріпакової олії), МЕРО (метилового ефіру ріпакової олії) та ДП (дизельного палива), а також їх сумішей проводилось з використанням відомих лабораторних приладів. Так, кінематична в'язкість визначалась капілярним віскозиметром скляним, поверхневий натяг – приладом Ребіндера. Хроматографічні дослідження проби РО дозволили визначити якісний та кількісний склад жирних кислот, що входять до складу ріпакової олії: гексоденова (пальмітинова) – 4,83 %; октодеканова (стеаринова) – 1,72 %; 9-октадеценова (олеїнова) – 43,72 %; 9, 12-октадекадиенова (лінолева) - 20,92 %; 9, 12, 15-октадекатриїнова (лінолинова) – 8,52 %; гадолеїнова (ейкозенова) – 4,81 %; доказенова (ерукова) – 14,01 %; не ідентифікований залишок – 1,47 %.

Для отримання МЕРО краще використовувати РО, що пройшла дві стадії: віджим та фільтрацію [89]. Далі, шляхом прямої переетерифікації гліцеридів РО з метиловим спиртом при температурі 60–70°С в присутності їдкого калію отримується суміш метилових ефірів жирних кислот РО.

В табл. 2.1 зроблене порівняння властивостей МЕРО з дизельним паливом.

Таблиця 2.1

Показник	ДП	МЕРО
Густина, кг/м^3 при t = 20° С	826	877
Кінематична в'язкість, мм^2/с при t = 20° С	3,83	8,0
Поверхневий натяг, Н/м при t = 20° С	$27{,}1 \cdot 10^{-3}$	$30{,}7 \cdot 10^{-3}$
Цетанове число, не менше	45	51
Температура, °С		
спалахування (не менше)	60	120
застигання (не більше)	–10	–8
Коксування 10 % залишку в %, (не більше)	0,5	0,3
Випробовування на мідну пластинку	витримує	витримує
Кислотне число, мгКОН/г	0,06	0,5
Вміст в %		
сірки, не більше	0,2	0,02
золи, не більше	0,02	0,02
води	відсутня	0,05
Сумарний вміст гліцерину, % (max)	–	0,3
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	42,5	37,1–37,5

В табл. 2.2 наведені фізико-хімічні показники РО, МЕРО, ДП та їх суміші в діапазоні температур 20–70° С. Показники при температурах 50–70° С необхідні для розрахунків процесів випаровування та сумішоутворення, оскільки саме до таких температур нагрівається пальне при його стискуванні в напірній секції паливного насоса.

Таблиця 2.2

Склад палива	Густина ρ, кг/м^3			Динамічна в'язкість μ·10^3, Па·с			Поверхневий натяг σ·10^3,Н/м	
	20°	50°	70°	20°	50°	70°	20°	50°
РО	913	891	878	–	–	15,3	33.2	31,8
МЕРО	877	856	842	7,02	3,64	2,61	30,7	29,2
ДП	826	805	791	3,16	1,7	1,32	27,1	25,3
30%МЕРО+ 70% ДП	841	821	806	4,1	2,19	1,69	27,8	26,0
50%МЕРО + 50% ДО	851	830	816	4,78	2,46	1,94	28,6	26,9
75%МЕРО + 25% ДП	864	843	829	5,99	3,1	2,27	29,5	27,8

Дані табл. 2.2 дозволяють провести якісну оцінку впливу цих показників. Так, динамічна в'язкість МЕРО у 2 рази більша, ніж в ДП. Ріст в'язкості призводить до збільшення дальнобійності паливного факела. У зв'язку з цим зменшується доля об'ємного сумішоутворення, і значна частина палива буде потрапляти на стінки камери згоряння. Крім цього, це призводить до зменшення кута розсіювання паливного факела та до збільшення середнього діаметру крапель. Ріст поверхневого натягу МЕРО по відношенню до ДП 14 % призводить до збільшення неоднорідності розпилювання пального. Зростання густини МЕРО по відношенню до ДП на 6 % збільшує максимальний тиск перед форсункою та збільшує час до початку впорскування палива.

Скориставшись відомими математичними залежностями А.С. Лишевського [40], можна провести кількісну оцінку впливу ρ, σ та μ на характеристики впорскування та розпилювання палива. Проведені розрахунки показали, що використання 100 % МЕРО порівняно з ДП збільшує діаметр крапель d_{32} (діаметр Заутера) на 14 %, при цьому кут розсіювання паливного струменю зменшується на 15 %.

При моделюванні властивостей біопалива потрібно враховувати відмінності у їх структурі. Наприклад, нижче наведені

структурні формули ерукової кислоти, її метилового ефіру та вуглеводню класу алкадієнів.

Кислота	$C_{22}H_{42}O_2$	$CH_3-(CH_2)_7-CH=CH-(CH_2)_{11}-C^{=O}_{-OH}$
Ефір	$C_{23}H_{44}O_2$	$CH_3-(CH_2)_7-CH=CH-(CH_2)_{11}-C^{=O}_{-OCH_3}$
Вуглеводень	$C_{23}H_{44}$	$CH_3-(CH_2)_8-CH=CH-CH_2-CH=CH-(CH_2)_8-CH_3$

Отже, структурні формули вуглеводню і ефіру відрізняються тим, що группа CH_3 замінена на группу $COOCH_3$. Оскільки МЕРО є кисневовмісною сполукою, то нижча теплота згоряння ефірів дещо менша, ніж у ДП. Якщо в ДП – біля 0,4 % кисню, то в метиловому ефірі олеїнової кислоти – 10,8 %, а в метиловому ефірі ерукової кислоти – 9,1%. Тому із високоерукової РО можна отримати ефіри з максимально можливою теплотворною здатністю. Але потрібно мати на увазі, що використання чистої РО, а також суміші ДП та РО обмежено із-за підвищеної в'язкості та схильності до коксування РО.

2.2 Аналітичне визначення фізичних характеристик сумішей палив на основі біодизеля

Відомо, що фізичні характеристики традиційних нафтових палив (дизельне паливо, бензин, керосин, газовий конденсат та ін.), що представляють собою багатокомпонентні суміші, залежать від складу вуглеводнів. В роботах [20,23] наведені експериментальні дані з густини ρ [кг/м^3], кінематичної в'язкості ν [мм^2/с], динамічної в'язкості μ [Па× с] та поверхневого натягу σ [Н/м] в залежності від температури t_T і об'ємної концентрації m_T сумішей. Але математичні моделі процесів сумішоутворення і згоряння в циліндрі двигуна потребують визначення аналітичних залежностей вказаних вище характеристик від температури та концентрації. В даному розділі узагальнені одержані експериментальним шляхом характеристики бінарних сумішей біодизеля (метилових ефірів жирних кислот ріпакової олії) і нафтових палив.

Однією із найважливіших характеристик палива є його в'язкість. В'язкість палива впливає на процес атомізації паливного

струменя в камері згоряння і значить на формування відкладень у двигуні. Чим більша в'язкість палива, тим більше проблем, пов'язаних із відкладеннями. Кінематична в'язкість для біодизеля закладена у стандартах. Це 1,9–6,0 мм^2/с відповідно до ASTM D6751 та 3,5–5,0 мм^2/с відповідно до EN 14214, та ДСТУ6081:2009 [26].

Динамічна в'язкість рідини еквівалентна відношенню зсувних напружень до прикладеної швидкості зсуву $d\gamma/dt$. Таким чином, динамічна в'язкість є мірою опору рідини до текучості. Це відношення є постійним для ньютонівської рідини, тобто для цих рідин в'язкість не залежить від швидкості зсуву. Неньютоновські рідини показують в'язку поведінку як функцію прикладеної швидкості зсуву. Це можна виразити функцією:

$$\mu = K\,(d\gamma/dt)^{N-1},$$

де N – індекс текучості (плинності).

Для ньютонівської рідини індекс текучості (плинності) дорівнює одиниці і отже $\mu = K$. В деяких роботах [94] тригліцериди та їх суміші розглядаються як псевдопластики з індексом текучості, меншим за одиницю, це значить, що в'язкість буде зменшуватися зі збільшенням швидкості зсуву. Згідно з [35] в'язкість суміші тригліцеридів може бути підрахована за емпіричною формулою:

$$\mu_{MIX}^{1/2} = \Sigma(x_i \mu_i^{1/2}),$$

де x_i – вміст і-го компоненту у суміші;

μ_i – в'язкість і-го компоненту.

З іншого боку, в роботі [34] описані дослідження для ріпакової олії і для зразків біодизеля, і показано, що ньютонівська поведінка рідини спостерігається лише за температур, вищих за 270 K, а за температур, що були нижчі 270 K, спостерігалася неньютонівська поведінка рідини. Автори вважають, що таку поведінку і слід було очікувати для температур, що нижчі від температури кристалізації. Для температури, що вище за 270 K, рівняння для динимічної в'язкості біодизельного палива можна представити у вигляді:

$$\mu = \exp\,(2359/T - 6{,}1),$$

де T – абсолютна температура.

Експериментальні дослідження, наприклад Грабоскі [102], показують, що в'язкість біодизельного палива зменшується зі збільшенням температури швидше, ніж для дизельного палива.

Аналіз [23, 43] показав, що густина і кінематична в'язкість розглянутих бінарних палив задовільно описуються залежностями:

$$\rho = \rho_0 - 10^{-4}\,(18000 - 13\,\rho_0)\,(t_T - t_0)\ \text{кг/м}^3,$$
$$\nu = \nu_0 + (1{,}1\nu_0 - 0{,}3)\,(1{,}3 - \lg t_T),\ \text{мм}^2/\text{с},$$

де ρ_0, ν_0, – густина і кінематична в'язкість за $t = 20\ ^0$С відповідно; ρ, ν – густина і кінематична в'язкість за температури $t_T\ ^0$С досліджуваних палив відповідно.

Дослідження показали, що густина бінарних сумішей МЕРО з різними видами палива описується різними аналітичними залежностями.

Густина суміші МЕРО і дизельного палива:

$$\rho_{CM}^{ДП} = 840 - 0{,}7\,t_T + 0{,}51\,m_T;$$

густина суміші МЕРО і керосину КС-30:

$$\rho_{CM}^{КС-30} = 796 - 0{,}7\,t_T + 0{,}96\,m_T;$$

густина суміші МЕРО та бензину А-76:

$$\rho_{CM}^{А-72} = 747 - 0{,}7\,t_T + 1{,}45\,m_T,$$

де t_T температура ^{0}С досліджуваного палива; m_T – частка МЕРО у суміші.

Для визначення поверхневого натягу бінарних палив можна використовувати вирази Пригожина і Дефе [43]:

$$\sigma = N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 - \beta\,N_1\,N_2,\ \text{Н/м}, \qquad (2.1)$$

де N_1,σ_1, і N_2,σ_2, – мольні частки і поверхневий натяг відповідно першого і другого компонентів бінарної суміші, β - напівемпірична константа.

В роботі [43] наведені графічні залежності поверхневого натягу від мольної частки МЕРО (молярна маса – 305 кг/кмоль) в бінарних сумішах з дизельним паливом (м.м. – 190 кг/кмоль), з керосином КС-30 (м.м. – 165 кг/кмоль) і А-76 (м.м. – 115 кг/кмоль), що побудовані за експериментальними даними. В діапазоні точності експериментального визначення поверхневого натягу для інтервалу температур 20 – 70^{0}С для суміші МЕРО + ДП та МЕРО + КС-30 одержані лінійні залежності, а для суміші МЕРО + А-76 нелінійні залежності. Аналізуючи формулу (2.1) для

перших двух випадків, можемо зробити висновок, що $\beta = 0$ (похибка визначення σ не більше, ніж 0,3 %), а для суміші МЕРО + А-76 значення $\beta = -4{,}8$ (похибка не більша, ніж 2 %).

2.3. Аналіз параметрів розпилювання альтернативних палив порівняно з дизельним паливом

Розглянемо питання розробки математичної моделі процесу сумішоутворення і згоряння в камері згоряння дизельного двигуна рідких альтернативних палив. На наш погляд, враховуючи відмінності фізико-хімічних властивостей рідких альтернативних палив, до них доцільно застосовувати математичні моделі сумішоутворення та згоряння, отриманих і експериментально перевірених для рідких вуглеводневих палив нафтового походження, основу яких заклав проф. Разлейцев М.Ф.

Перш за все на динаміку паливного струменя та характеристики розпилювання впливають:

– поверхневий натяг;

– густина;

– динамічна в'язкість.

Підвищення в'язкості збільшує дальнобійність струменя, що зменшує долю об'ємного сумішоутворення та призводить до потрапляння великої кількості пального на стінки камери згоряння. Зменшення в'язкості палива зменшує середній діаметр крапель та їх розпилювання стає однорідніщим, при цьому кут розпилювання струменя збільшується і дальнобійність зменшується.

Підвищення поверхневого натягу збільшує стійкість краплі до зовнішніх збурень та збільшує її розміри. Навпаки, зменшення поверхневого натягу покращує процес розпилювання палива та сприяє покращенню сумішоутворення і згоряння.

Також суттєвий вплив на процеси випаровування і згоряння має середня об'ємна температура кипіння за характеристиками розгонки палива, критична температура і тиск фазового переходу рідкого палива в пару та інші. Враховуючи відмінність цих характеристик рідких альтернативних палив від характеристик ДП, можна визначити константу випаровування палива та з допомогою кінетичних рівнянь випаровування згоряння розпиленого палива

розрахувати характеристики тепловиділення на ділянках впорскування, розвинутого дифузного горіння та догоряння. У зв'язку зі складністю фізико-хімічних процесів в камері згоряння дизеля, теоретичні рівняння, отримані на основі законів хімічної кінетики, необхідно доповнити емпіричними коефіцієнтами, що враховують особливості процесу горіння паливної суміші в циліндрі дизеля. Значення цих коефіцієнтів можна отримати екстраполяцією з математичних моделей, отриманих для дизельного палива, або ідентифікацією цих моделей, використовуючи експериментальні значення тепловиділення процесу горіння рідких альтернативних палив за експериментальними характеристиками тепловиділення. Хоча другий шлях вимагає проведення експериментальних досліджень характеристик рідких альтернативних палив на процеси сумішоутворення, горіння та показники роботи двигуна.

Для розробки математичних моделей сумішоутворення та горіння вуглеводневих рідких альтернативних палив (метанол, етанол, ріпакова олія, метиловий ефір ріпакової олії та ін.) використані підходи А.С. Лишевського, вдосконалені та уточнені М.Ф. Разлейцевим для швидкохідних форсованих дизелів.

Нижче наведена оцінка можливості використання критеріальних залежностей для визначення дальнобійності l_T та кута розгортання паливного струменя γ_T, характерного розміру крапель розпилювання d_T в застосуванні до альтернативного палива (наприклад, ріпакової олії або МЕ ріпакової олії). В математичних моделях присутні фізичні параметри палива:

- густина палива ρ_T;
- динамічна в'язкість μ_T;
- поверхневий натяг σ_T.

Для стандартного (літнього) дизельного палива дані параметри мають наступні значення:

$\rho_T = 860$ кг/м^3; $\mu_T = 3{,}8 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\sigma_T = 28 \cdot 10^{-3}$ Н/м,

для ріпакової олії

$\rho_T = 915$ кг/м^3; $\mu_T = 69 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Критеріальні залежності А.С. Лишевського побудовані для рідин, у яких ρ_T, μ_T та σ_T змінювались в межах :

$\rho_T = (0{,}7 \ldots 0{,}93) \cdot 10^3$ кг/м^3; $\mu_T = (0{,}4 \ldots 89{,}7) \cdot 10^{-3}$ Па·с;

$\sigma_T = (22 \ldots 30{,}7) \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Аналіз показав, що для альтернативних палив, які розглядаються, ρ_T, μ_T і σ_T не вийдуть за вказані межі. Отже, характеристики впорскування та динаміку струменя будемо розраховувати, використовуючи вищенаведені критеріальні залежності А.С. Лишевського.

Розглянемо математичні вирази, за якими визначаються характеристики впорскування палива та критеріальні залежності.

Середня швидкість за час впорскування циклової порції палива:

$$U_0 = B_ц \Big/ \left(\mu f_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{впр}\right), \tag{2.2}$$

де $B_ц$ – циклова порція палива;

μf_c – площа ефективного прохідного перетину отворів розпилювання;

i – кількість отворів розпилювання;

$\tau_{впр}$ – тривалість впорскування порції палива.

У формулах для розрахунку показників струменя розпиленого палива скористаємось наступними критеріями:

– критерій Вебера, що характеризує співвідношення сил поверхневого натягу та сил інерції:

$$W_e = U_0^2 \cdot d_c \cdot \rho_T \big/ \sigma_T \; ; \tag{2.3}$$

– критерій M, що характеризує співвідношення сил поверхневого натягу та в'язкості:

$$M = \mu_T^2 \big/ \left(\rho_T \cdot d_c \cdot \sigma_T\right); \tag{2.4}$$

– відношення густини повітря до густини палива:

$$\rho = \rho_a \big/ \rho_T \; , \tag{2.5}$$

де d_c – діаметр отвору розпилювання форсунки;

ρ_a – густина повітря в циліндрі двигуна.

Проведемо оцінку впливу фізичних параметрів альтернативного біопалива на характеристики впорскування та розпилювання. Допускаємо, що змінюються тільки фізичні параметри палива, а режими роботи двигуна, конструктивні та регулювальні параметри залишаються незмінними.

Розрахунок шляху струменя паливної суміші від розпилювача до границі між початковою та основною фазами розвитку струменя. Запишемо вираз для розрахунку границі між початковою та основною фазами розвитку струменя:

$$l_T = C_s \cdot d_c \cdot W_e^{0,25} \cdot \mu^{0,4} \cdot \rho^{-0,6}, \tag{2.6}$$

де $C_s = 8,85$ – емпіричний коефіцієнт.

Або:

$$l_T = C_s \cdot d_c \cdot \left(U_0^2 \cdot d_c \cdot \rho_T \cdot \sigma_T^{-1}\right)^{0,25} \cdot \left(\mu_T^2 \cdot \rho_T^{-1} \cdot d_c^{-1} \cdot \sigma_T^{-1}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_T}\right)^{-0,6}. \tag{2.7}$$

Після нескладних перетворень отримаємо вирази l_T функції величин ρ_T, μ_T і σ_T для традиційних палив:

$$l_T = A \cdot \rho_T^{-0,05} \cdot \sigma_T^{-0,65} \cdot \mu_T^{0,8}, \tag{2.8}$$

де A – множник постійних величин.

Аналогічно (2.8) запишемо вираз для РАП:

$$l_{T_A} = A \cdot \rho_{T_A}^{-0,05} \cdot \sigma_{T_A}^{-0,65} \cdot \mu_{T_A}^{0,8}. \tag{2.9}$$

Розділивши (2.9) на (2.8), отримаємо:

$$\frac{l_{T_A}}{l_T} = \left(\frac{\rho_{T_A}}{\rho_T}\right)^{-0,05} \cdot \left(\frac{\sigma_{T_A}}{\sigma_T}\right)^{-0,65} \cdot \left(\frac{\mu_{T_A}}{\mu_T}\right)^{0,8}. \tag{2.10}$$

Як випливає з (2.10), зміна густини палива дуже мало впливає на границю між початковою та основною фазами розвитку струменя. Збільшення поверхневого натягу та зменшення в'язкості без зміни інших умов розпилювання призводять до зменшення l_{T_A} та наближення границі фаз до розпилювача. Основним фактором, що впливає на положення міжфазної границі, є динамічна в'язкість. Її значення, в залежності від палива, може змінюватися на порядок і більше, тоді як поверхневий натяг змінюється в 1,3…1,5 раза.

Оцінка відносного часу руху струменя рідких альтернативних палив до стінки камери згоряння. Оцінимо відносний час τ_{s_A} / τ_s руху струменя рідких альтернативних палив до стінки камери згоряння. Вважаємо, що шлях струменя

традиційного та альтернативного палива однаковий, і дорівнює відстані від розпилювача форсунки до стінки камери.

Дальнобійність струменя палива на основній ділянці його розвитку:

$$l_T = B_s^{0,5} \cdot \tau_s^{0,5}, \tag{2.11}$$

де $B_s = d_c \cdot U_0 \cdot W_e^{0,21} \cdot M^{0,16} / \left(D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho\right)$,

де $D_s = 4...5$ – коефіцієнт.

Час руху паливного струменя від отвору розпилювача до стінки камери згоряння τ_s:

$$\tau_s = l_T^2 \cdot \frac{D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho}{d_c \cdot U_0 \cdot W_e^{0,21} \cdot M^{0,16}}. \tag{2.12}$$

Після перетворень отримаємо:

$$\tau_s = l_T^2 \cdot D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_T^{0,37} \cdot \sigma_T^{0,37} \cdot \mu_T^{-0,32}. \tag{2.13}$$

Для альтернативного палива:

$$\tau_{s_A} = l_T^2 \cdot D_s \cdot \sqrt{2} \cdot \rho_{T_A}^{0,37} \cdot \sigma_{T_A}^{0,37} \cdot \mu_{T_A}^{-0,32}. \tag{2.14}$$

Розділивши (2.14) на (2.13), отримаємо відносний час руху струменя до стінки камери згоряння:

$$\frac{\tau_{s_A}}{\tau_s} = \left(\frac{\rho_{T_A}}{\rho_T}\right)^{0,37} \cdot \left(\frac{\sigma_{T_A}}{\sigma_T}\right)^{0,37} \cdot \left(\frac{\mu_{T_A}}{\mu_T}\right)^{-0,32}. \tag{2.15}$$

Із (2.15) слідує, що по мірі збільшення ρ_{T_A} та σ_{T_A} порівняно з аналогічними величинами для літнього дизельного палива при малозмінному значенні μ_{T_A}, час руху струменя паливної суміші від розпилювача форсунки до стінки камери згоряння збільшується. Це призводить до збільшення випаровування палива, що впливає на динаміку тепловиділення на початковій фазі горіння, і збільшення «жорсткості» роботи двигуна. Якщо величина динамічної в'язкості значно збільшується (наприклад, ріпакова олія має $\mu_{T_A} = 67 \cdot 10^{-3}$ Па·с, а літнє дизельне паливо $\mu_T = 3{,}8 \cdot 10^{-3}$ Па·с) час τ_{s_A} зменшується в 2,5 раза, що, в кінцевому результаті,

призводить до збільшення частки плівкового сумішоутворення. При цьому раціональне конструювання форми камери згоряння та впускних клапанів дозволить запобігти рикошетному рухові палива на "холодну" поверхню днища головки циліндра, що сприятиме інтенсифікації процесу сумішоутворення.

Оцінка впливу фізичних параметрів палива на фракційність розпилювання. Критеріальне рівняння оцінки середніх діаметрів крапель струменя паливної суміші можна записати:

$$d_k = E_k \cdot d_c \cdot (\rho \cdot We)^{-0,266} \cdot M^{0,0733}, \qquad (2.16)$$

де E_k – постійний коефіцієнт, що залежить від конструкції форсунки та способу осереднення розмірів крапель.

Оскільки розмір форсунки залишається незмінним при переході до альтернативного палива, коефіцієнт E_k залишається незмінним.

Для знаходження середнього діаметра крапель скористаємось наступним рівнянням:

$$d_k = E_k \cdot d_c \cdot \left[\frac{\rho_a}{\rho_T} \cdot \left(\frac{B_c}{\mu f_c \cdot i_c \cdot \rho_T \cdot \tau_{впр}} \right)^2 \cdot d_c \cdot \frac{\rho_T}{\sigma_T} \right]^{-0,266} \qquad (2.17)$$

$$\left[\mu_T^2 \cdot \rho_T^{-1} \cdot d_c^{-1} \cdot \sigma_T^{-1} \right]^{0,0733} = B \cdot \rho_T^{0,4587} \cdot \sigma_T^{0,1927} \cdot \mu_T^{0,1466},$$

де B - константа, що виражає всі величини, незмінні для різних видів палив.

Рівняння для розрахунку середнього діаметра крапель альтернативного палива:

$$d_{k_A} = B \cdot \rho_{T_A}^{0,4587} \cdot \sigma_T^{0,1927} \cdot \mu_T^{0,1466}. \qquad (2.18)$$

Відносна зміна діаметра крапель при переході від традиційного до альтернативного палива:

$$\frac{d_{k_A}}{d_k} = \left(\frac{\rho_{T_A}}{\rho_T} \right)^{0,4587} \cdot \left(\frac{\sigma_{T_A}}{\sigma_T} \right)^{0,1927} \cdot \left(\frac{\mu_{T_A}}{\mu_T} \right)^{0,1466}. \qquad (2.19)$$

Як слідує з (2.19), на діаметр крапель впливає густина, поверхневий натяг та в'язкість палива. Зі збільшенням ρ_{T_A}, σ_{T_A} та

μ_{T_A} (перехід до важчих палив з більшою в'язкістю) середній діаметр крапель зростає. При використанні ріпакової олії середній діаметр крапель зростає порівняно з літнім дизельним паливом в 1,6 раза. Деяке збільшення дальнобійності паливного струменя (за рахунок зростання діаметра крапель) частково компенсує погіршення процесів випаровування та сумішоутворення крупніших крапель палива.

Оцінка впливу фізичних параметрів палива на кут розсіювання паливного струменя. Найбільш інтенсивно процеси випаровування та сумішоутворення розпиленого палива протікають на основній ділянці (при малих змінах кута розкриття паливного струменя зростає його бокова поверхня по мірі віддалення від розпилювача форсунки).

Критеріальне рівняння визначення кута розкриття паливного струменя на основній ділянці:

$$\gamma_T = 2 \cdot arctg\left(F_s \cdot We^{0,32} \cdot M^{-0,07} \cdot \rho^{0,5}\right), \tag{2.20}$$

де $F_s = 0{,}009$ - постійний коефіцієнт.

$$tg\left(\frac{\gamma_T}{2}\right) = F_s \cdot We^{0,32} \cdot M^{-0,07} \cdot \rho^{0,5}. \tag{2.21}$$

З рівняння (2.21) після перетворень маємо:

$$tg\left(\frac{\gamma_T}{2}\right) = F_s\left[\left(\frac{B_c}{\mu f_s i_c \rho_T \tau_{впр}}\right)^2 d_c \frac{\rho_T}{\sigma_T}\right]^{0,32} \left[\mu_T^2 \rho_T^{-1} d_c^{-1} \sigma_T^{-1}\right]^{-0,07} \left(\frac{\rho_a}{\rho_T}\right)^{0,5} \cdot \tag{2.22}$$

Подальші перетворення дозволяють отримати:

$$tg\left(\frac{\gamma_T}{2}\right) = F_s \cdot C \cdot \rho_T^{-0,75} \cdot \sigma_T^{-0,25} \cdot \mu_T^{-0,14}, \tag{2.23}$$

де C – константа, що включає в себе всі незмінні величини для різних палив.

Аналогічно для струменя альтернативного палива:

$$tg\left(\frac{\gamma_{TA}}{2}\right) = F_s \cdot C \cdot \rho_{TA}^{-0,75} \cdot \sigma_{TA}^{-0,25} \cdot \mu_{TA}^{-0,14}. \tag{2.24}$$

Відносна зміна кута розсіювання паливного струменя при переході від традиційного палива до альтернативного:

$$\frac{tg\left(\frac{\gamma_{TA}}{2}\right)}{tg\left(\frac{\gamma_T}{2}\right)} = \left(\frac{\rho_{TA}}{\rho_T}\right)^{-0,75} \cdot \left(\frac{\sigma_{TA}}{\sigma_T}\right)^{-0,25} \cdot \left(\frac{\mu_{TA}}{\mu_T}\right)^{-0,14}. \quad (2.25)$$

При впорскуванні в камеру згоряння в'язкої ріпакової олії кут розсіювання паливного струменя та його бокова поверхня зменшуються, що призведе до зменшення випаровування палива та „пом'якшення" роботи двигуна. Зменшення кута розсіювання паливного струменя дозволяє через збільшення кількості отворів впорскування збільшити турбуленцію паливної суміші та покращити паливну економічність двигуна.

2.4. Моделювання розпилювання дизельного палива та аналіз застосування моделей для дизельного палива до альтернативних палив

В цьому параграфі проаналізовано можливість застосування моделей для розпилювання палив, що найбільш розповсюджені у Західній Європі та США (модель KIVA) у застосуванні до біопалив рослинного походження.

В основному, процес розпаду крапель при аналізі розпилювання в дизельних двигунах розглядають як двостадійний [114]. В потоці рідини, що витікає з форсунки, спочатку в формі циліндра, коливання підсилюються, і рідина розпадається на краплі. Цей процес інколи називають початковим розпадом. Якщо краплі досягають критичного розміру, вони далі розпадаються на дрібніші краплі. Цей процес має назву вторинного розпаду. Два різні наближення використовуються, щоб моделювати процес розпаду. Це модель Тейлора (TAB модель) і хвильова модель Рейца (WB), що базуються на лінійному аналізі стійкості потоку рідини [114].

Відповідно до BSB моделі [121], режим руйнування крапель відбувається як:

"Bag" руйнування, коли

$We_g > 6$,

"Stripping" руйнування, коли

$We_g > 0{,}5\, Re_g^{1/2}$,

де Re_g – число Рейнольдса і We_g – число Вебера для газу.

$Re_g = 2\,\rho_g\, v_{rel}\, r_d / \mu_g$,

$We_g = \rho_g\, v_{rel}^2\, r_d / \sigma_f$,

де $v_{rel} = | v_g - v_d |$;

v_g, v_d – швидкість газу і швидкість крапель відповідно;

ρ_g– густина газу, μ_g – динамічна в'язкість газу, σ_f –поверхневий натяг краплі.

Перший режим є аналогія нестабільності Релея–Тейлора, що зв'язана з розвитком нормального напруження. Другий режим – це аналогія нестабільності Кельвіна–Гельмгольца, що зв'язана з розвитком тангенційного напруження.

Рейцем була запропонована хвильова модель Wave breakup (WB) руйнування рідини, яка була розвинута в [113, 120]. У відповідності до [113], КН руйнування розвивається з частотою Ω_{KH} і довжиною хвилі Λ_{KH}:

$$\frac{\Lambda_{KH}}{r_p} = 9{,}02\frac{(1+0{,}45Z^{0,5})(1+0{,}4T^{0,7})}{(1+0{,}87We_g^{1,67})}, \qquad (2.26)$$

$$\Omega_{KH}\left[\frac{\rho_f r_p^3}{\sigma_f}\right]^{0,5} = \frac{0{,}34+0{,}38We_g^{1,5}}{(1+Z)(1+1{,}4T^{0,6})},$$

де використовуються наступні безрозмірні параметри:

$Re_f = \rho_f\, v_{rel}\, r_p / \mu_f$ – число Рейнольдса для палива;

$We_g = \rho_g v_{rel}^2\, r_p / \sigma_f$ – число Вебера для газу;

$We_f = \rho_f v_{el}^2\, r_p / \sigma_f$ – число Вебера для палива;

$Z = We_f^{0,5} / Re_f$ – параметр Охнесорга;

$T = Z\, We_g^{0,5}$ – параметр Тейлора;

v_{rel} – відносна швидкість між краплями і оточуючим газом;

r_p - радіус „батьківської" краплі;

ρ_f – густина палива;

μ_f, μ_g – динамічна в'язкість палива і газу.

В WB моделі допускалося, що нові дочірні хвилі формуються з „батьківських" хвиль завдяки збільшенню поверхні хвилі. Протягом руйнування діаметр краплі знижується до критичного радіуса з постійною швидкістю [120]:

$$r_c = B_0 \Lambda_{KH}, \qquad (2.27)$$

де B_0 – константа ($B_0 = 0{,}61$);

Λ_{KH} – довжина хвилі.

Радіус „батьківських" r_p крапель розраховувався, використовуючи наступне рівняння [120]:

$$\frac{dr_p}{dt} = -\frac{r_p - r_c}{\tau_{KH}} \tag{2.28}$$

Час руйнування крапель:

$$\tau_{KH} = \frac{3{,}726 B_1 r_p}{\Lambda_{KH} \Omega_{KH}}, \tag{2.29}$$

де B_1 – константа руйнування (для WB руйнування).

Вакісака [120] запропонував модифікувати хвильову модель Рейца, ввівши емпіричний зв'язок між радіусами крапель, середнім діаметром Заутера та об'ємними фракціями. В гібридній моделі [113] допускається, що початкове руйнування відбувається завдяки KH-нестабільності, а RT-нестабільність є причиною основного руйнування (рис. 2.1). Для WB моделі оптимальне значення коефцієнта B_1 змінювалося від 20 до 40 [113] і було вибрано 10 або 30. У роботі [120] було допущено, що B_1 = 1,73 у випадку попадання на стінки. Оцінка цього коефіцієнта для альтернативних палив потребує додаткових експериментальних досліджень.

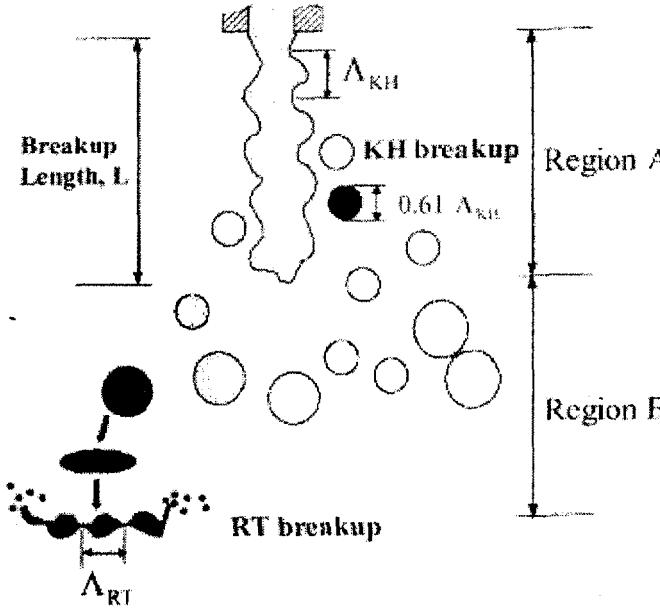


Рис. 2.1. WB модель розпилювання [113]

У всіх моделях, що перераховані вище, вважається, що паливо, яке виходить із форсунки, розпадається на краплі, які мають той же діаметр, що і вихідний отвір форсунки. Як правило, допускають, що початкова відносна швидкість U_0 між потоком рідини і газу дорівнює абсолютній швидкості V витікання палива з форсунки. Ця швидкість зв'язана з різницею тиску ΔP [120]:

$$U_0 = V = k_v \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_f}}, \tag{2.30}$$

де $\Delta P = P_f - P_g$;

P_f – тиск впорскування палива;

P_g – тиск повітря в циліндрі двигуна,

k_v – коефіцієнт швидкості.

Сажин [121] допускає при моделюванні початкової стадії розпилювання, що краплі є ідеальні сфери, і динаміка крапель описується рівнянням:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = -\frac{3}{8r_d} C_D \frac{\rho_g}{\rho_d} \left(\frac{dS}{dt} - V_g \right) \left| \frac{dS}{dt} - V_g \right|, \qquad (2.31)$$

де V_g, – швидкість газу;

ρ_d – густина крапель палива;

V_d – щвидкість крапель палива, $V_d = \frac{dS}{dt}$;

C_D – коефіцієнт опору.

Коефіцієнт опору C_D залежить від числа Re_g. Сажин розглядає розпилення палива в трьох режимах: режим Стокса ($Re_g < 2$), Алена ($2 < Re_g < 500$) і Ньютона ($500 < Re_g < 10^5$). Коефіцієнт опору був вибраний $C_D = 24/ Re_g$ (режим Стокса), $C_D = 18{,}5 / Re_g^{0,6}$ (режим Алена) і $C_D = 0{,}44$ (режим Ньютона) [121]. Умови $Re_g < 10^5$ задовольняють реалістичним краплям в дизельних двигунах, в тому числі для альтернативних палив [107].

Аналіз рівняння (2.31) для використання біопалива показав, що воно дає значні похибки порівняно з експериментальними даними. В застосуванні до біопалив, рівняння (2.31) дає менші довжини конуса розпилювання, ніж для дизельного палива, що суперечить експериментальним даним. Ще один недолік цього рівняння є те, що воно застосовано до одиничної краплі і не враховує колективний характер руху крапель.

Моделювання довжини конуса розпилювання для дизельного палива, виходячи з закону збереження імпульсу для струменя і порівняння з експерементальними даними з розпилювання дизельного палива, можна знайти також в роботах [33, 107].

Використовуючи формулу (2.26), $k_v = 0{,}95$, експериментальні дані ($p_f = 64$ МПа, $p_g = 1{,}2$ МПа), та значення для густини палив [107], було знайдено швидкості розпилювання для ріпакової олії, біодизельного палива порівняно з дизельним паливом. Використовуючи експериментальні дані для густини, в'язкості та поверхневого натягу дизельного палива та альтернативних палив,

були розраховані значення головних параметрів розпилювання [107].

Важливо також визначити основні контролюючі параметри при розпилюванні альтернативних палив. Як було показано в [107], для випадку в'язких палив головним контролюючим параметром є число Охнесорга $Oh = \mu_f/(\rho_f d \sigma_f)^{0,5}$. Вплив в'язкості крапель є не дуже значним, коли число Охенсорга, що базується на властивостях краплі (рідини), є меншим, ніж 0,1 [107]. Число Охнесорга для дизельного палива, біодизельного палива та ріпакової олії складає відповідно Oh = 0,047, Oh = 0,095 і Oh = 1,03. Тобто для біопалив на основі ріпакової при розрахунку процесу розпилювання повинен бути врахований вплив в'язкості.

Гельфанд [99] виділяє такий перший критичний параметр для в'язкої рідини:

$$We_{\mu}^{*} = We^{*}(1+1,5\,Oh^{1.6}), \qquad (2.32)$$

де We_{μ}^{*} – критичний параметр для рідини з довільною в'язкістю; We^{*} – критичний параметр для рідини з низьким значенням в'язкості.

Тобто, для ріпакової олії значення критичного параметра Вебера We_{μ}^{*} збільшується приблизно в 2,5 рази порівняно з We^{*}.

На рис. 2.2 представлена залежність числа Охнесорга (*Oh*) від температури для досліджуваних альтернативних палив.

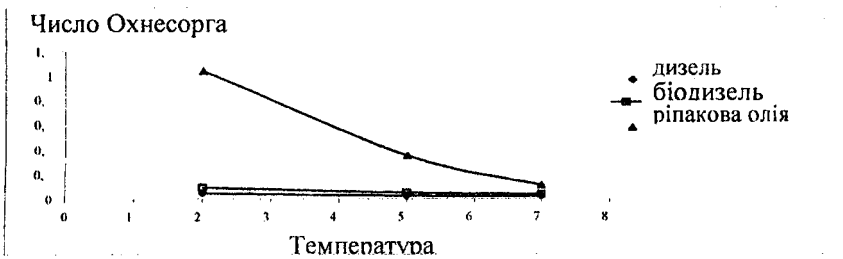


Рис. 2.2. Залежність числа Охнесорга (Ohnesorge number) від температури для палив: дизельного, біодизельного та ріпакової олії

Значення числа Вебера для ріпакової олії ($We_g = 5,4\times10^3$, $We_f = 3,4\times10^5$) і для біодизеля ($We_g = 6,1\times10^3$, $We_f = 3,7\times10^5$) значно

менші порівняно з дизельним паливом (We_g= 7,3×10^3, We_f = = 4,2×10^5) [107]. У випадку малого числа *We* краплі деформуються, але не руйнуються. У відповідності до [99, 107, 120, 121, 112], найбільш типові режими руйнування крапель представлені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Головні режими руйнування крапель і розпилювання рідини

Режими [99]	Діапазон існування [99]	Режими [113, 121, 120]	Діапазон існування [112,113]
Вібраційний Парашут (''bag'') (тичинка, сумка, парасолька)	$10 \le We \le 40$ $0{,}2 \le We\, Re^{-0{,}5} \le 1$	Сумка	$We_g > 6$ (напр., $We_g = 72$)
Атомізація (атомізація плюс ''stripping'')	$40 \le We \le 10^3$ $1 \le We\, Re^{-0{,}5} \le 20$	''Stripping''	$We_g > 0{,}5\, Re_g^{1/2}$ (We_g=150 We_g= 270)
Вибуховий	$10^3 \le We \le 10^5$ $20 \le WeRe^{-0{,}5} \le 10^2$	Катастрофічний	(напр., We_g=532)

В роботі [121] значення числа Вебера базуються на діаметрі краплі $We = 2\rho_g u^2 r_d / \sigma_f$.

Значення *We* і *Re*, розраховані для біодизеля і ріпакової олії, показують, що режим руйнування альтернативних крапель не змінюється порівняно з дизельним паливом.

Обидві WB і модель Лишевського [1, 107] містять коефіцієнти, що повинні бути визначені з експериментальних даних. Використовуючи моделі Лишевського для альтернативних палив, одержується більша довжина розпилення порівняно з дизельними паливами, що підтверджується експериментальними дослідженнями [96].

Для альтернативних палив значення довжини хвилі і час руйнування палива, що були підраховані за WB-моделлю, були більшими, ніж для дизельного палива. Діаметри крапель, що були

знайдені за всіма моделями, у випадку біодизельного палива і ріпакової олії були більшими, ніж для дизельного палива. Це не протирічить експериментальним даним [116]. В середньому SMD діаметр (діаметр Заутера) для крапель кокосової олії був в 1,8 раза більшим, ніж для крапель при розпилюванні дизельного палива [116]. Але дослідження розпилювання в'язких рідин на основі гліцерину при атмосферному тиску показують складну залежність діаметра крапель від в'язкості [117]. Тому питання залежності діаметра крапель від в'язкості для альтернативних палив потребує додаткових досліджень.

2.5. Можливість використання чистих олій як палива та моделювання діаметрів крапель при розпилюванні

У дизельних двигунах поряд з біодизельним паливом можна використовувати також і олію у „чистому" вигляді або в суміші з дизельним паливом. Наприклад, у Великобританії існують двопаливні автомобілі, які при старті і перед зупинкою споживають дизельне паливо, а далі – ріпакову олію. Це допомагає довкіллю, та до того ще й вигідно. Літр ріпакової олії коштував 0.45 £, а літр дизельного палива – 0.95 £ (дані за 2006 р.). Правда, держава обкладає митом бажаючих дешево їздити (0.27 £). За £300 – £600 пропонується допоміжне обладнання для використання ріпакової олії в дизельному двигуні. Сьогодні в Україні є також всі умови для використання цього палива.

Біодизельне паливо складається з ефірів жирних кислот, от же до складу цього палива, як і олій, входить кисень на відміну від дизельного палива. Основні проблеми у використанні ріпакової олії як палива пов'язані з її високою в'язкістю. Деякі порівняльні характеристики палив наведені у табл. 2.4.

Ріпакова олія має більшу температуру спалахування, але нижче значення цетанового числа, ніж дизельне паливо. Наприклад, в роботі [34] описані експерименти, що показують нижче значення цетанового числа і збільшення затримки спалахування для ріпакової олії порівняно з дизельним паливом. З іншого боку, автори [116] вважають, що кокосова олія має більше цетанове число, ніж дизельне паливо, оскільки було одержано меншу затримку спалахування для цієї олії. В той же час дослідження [20] показали, що спалахування для дизельного палива та суміші 75 %

ріпакової олії і дизельного палива при використанні двигуна СМД – 23 практично однакові.

Таблиця 2.4

Порівняльна характеристика дизельного палива, біодизельного палива та ріпакової олії

Характеристика	Ріпакова олія	Біодизельне паливо	Дизельне паливо
Цетанове число	40	48 -51	45
Йодне число гЈ2/100г	90 – 120	97 - 105	6 – 8
Густина, кг /м^3	913	877	826
Кінематична в'язкість, мм^2/с	88	8	3-6
Приблизна фомула	$C_{58.3}H_{104.7}O_6$	$C_{19.5}H_{36.3}O_2$	
Температура спалахування, °С	320	120	60
Нижча теплота згорання, МДж/кг	37,2	37,5	42,5

В табл. 2.2 було показано також йодне число, що характеризує здатність палива до формування відкладень. Вважають, що можна використовувати як паливо олії з йодним числом меншим, ніж 135.

Оскільки ріпакова олія має менше значення нижчої теплоти згорання, то потрібно більше палива, щоб одержати ту ж саму енергію. В основному, експериментальні дослідження показують, що витрати палива для ріпакової олії збільшуються порівняно з дизельним паливом. В експериментах [28] витрата палива (л/100 км) для 30 % суміші ріпакової олії була більшою, ніж для дизельного палива. Теоретичні дослідження цих же авторів [16, 17] вказують на збільшення витрати палива для ріпакової олії порівняно з дизельним паливом на 6 %. Використання олій як палива в основному призводить до зниження середнього індикаторного тиску. Експерименти [116], які проводились в умовах однакового середнього індикаторного тиску для двох палив, показали, що питома витрата палива (ПВП) була більшою для кокосової олії на 34–36 %. Дослідження, описані у [34],

продемонстрували більшу ПВП лише при високих навантаженнях і 3000 хв$^{-1}$. В той же час при низьких навантаженнях і 2400 хв$^{-1}$ значення ПВП для ріпакової олії було меншим, ніж для дизельного палива. Тільки збільшення кута на 3,5 град. п.к.в до ВМТ спричинило збільшення питомої витрати палива.

Якість згоряння дизельного палива і кількість викидів визначаються якістю розпилювання палива. Аналіз руйнування паливного струменя [107] показує, що режими руйнування крапель для альтернативних палив не змінюються порівняно з дизельним паливом. Але при розпилюванні біодизельного палива та ріпакової олії збільшується довжина конуса розпилювання та середній діаметр крапель і зменшується кут розпилювання. З іншого боку, дослідження розпилювання в'язких рідин на основі гліцерину [117] при атмосферному тиску показують складну залежність діаметра крапель від в'язкості.

Середній діаметр крапель при розпилюванні та діаметр Заутера. Для того, щоб охарактеризувати середній діаметр крапель при розпилюванні, використовують діаметр Заутера (SMD діаметр) [114]. Відома формула Елткотба для знаходження цього діаметра [114, 116]:

$$SMD = 3{,}08\nu_f^{0.385}(\sigma\rho_f)^{0.737}\rho_g^{0.06}\Delta P^{-0.54}, \qquad (2.33)$$

Середній діаметр крапель можна оцінити за формулою, запропонованою Лишевським, див. також (2.26):

$$d_m = E_d\, d_0\, (\rho_g/\rho_f We_j)^{-0.266} M^{0.0733}, \qquad (2.34)$$

де E_d – емпірична константа,

d_0 – діаметр вихідного отвору форсунки,

ρ_g – густина газу,

ρ_f – густина палива,

σ – поверхневий натяг палива,

ν_f – кінематична в'язкість палива,

μ_f – динамічна в'язкість палива,

$\Delta P = P_f - P_g$, P_f – тиск вприскування палива,

P_g – тиск повітря в циліндрі двигуна,

$We_f = \rho_f V^2 d_0 / \sigma_f$ – число Вебера для палива,

V – швидкість крапель палива,

M – параметр нестаціонарності.

Був проведений детальний аналіз формул для описання середнього діаметра крапель при розпилюванні палива в застосуванні до альтернативних палив. Аналіз показав, що формула (2.33) дає завищені значення SMD порівняно з експериментальними даними для рослинних палив.

Егерс [34] використовує параметр часу t_v та параметр довжини $l_v = \mu_f^{\ 2}/(\sigma\rho_f)$ для описання розпаду потоку рідини. Була зроблена спроба використати параметр довжини Егерса для описання середнього діаметра крапель при розпилюванні рослинних палив. Чисельний аналіз показав, що для широкого діапазону в'язкостей середній діаметр крапель при розпилюванні можна знаходити за формулою:

$$SMD = 23\, d_0^{\ 0.35}\, l_v^{\ 0.1}\, \Delta P^{-0.54} \rho_g^{\ 0.06}, \qquad (2.35)$$

де $l_v = \mu_f^{\ 2}/(\sigma\rho_f)$ – критичний параметр довжини Егерса.

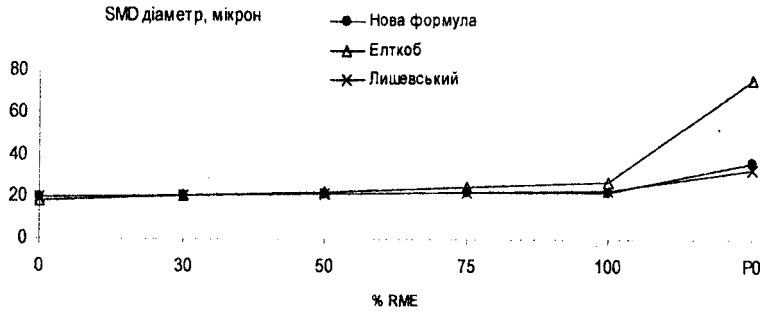
Значення параметрів Егерса для ріпакової олії, біодизельного палива та дизельного палива показані в табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Значення параметрів рідини та параметрів Егерса для палив

Показник	Формула	Ріпакова олія	Біодизельне паливо	Дизельне паливо
Густина, кг/м^3	ρ_f	913	877	826
Динамічна в'язкість, Па×с	$\mu_f = \nu_f\rho_f$	$80{,}9 \times 10^{-3}$	$7{,}02 \times 10^{-3}$	$3{,}16 \times 10^{-3}$
Поверхневий натяг, Н/м	σ	$33{,}2 \times 10^{-3}$	$30{,}7 \times 10^{-3}$	$27{,}1 \times 10^{-3}$
Параметр довжини Егерса, мікрометри	$l_v = \dfrac{\mu_f^2}{\sigma\rho_f}$	216	1,83	0,446
Параметр нестаціонарності	$M = l_v/d_0$	216×10^{-3}	$1{,}83 \times 10^{-3}$	$0{,}446 \times 10^{-3}$
Параметр часу Егерса, мікросекунди	$t_v = \dfrac{\mu_f^3}{\sigma^2\rho_f}$	526	0,419	0,052

На рис. 2.3 представлено значення SMD за новою моделлю (2.35), моделлю Елткотба (2.33) та значення середнього діаметра крапель за формулою Лишевського (2.34) для ріпакової олії, біодизельного палива (RME) та дизельного палива в залежності від відсоткового вмісту RME (ріпаковий метиловий ефір) в паливі за даними [107]. Значення середнього діаметра крапель для ріпакової олії відповідають точці РО на осі x .



а) температура 20 °С

б) температура 50 °С

Рис. 2.3. Значення SMD за моделями Елткотба (2.33), Лишевського (2.34), нова модель (2.35)

Для біодизельного та дизельного палив значення SMD за новою моделлю і моделлю Лишевського практично співпадають (відхилення менше, ніж 1 %). Для ріпакової олії значення SMD за новою моделлю є більшим в 1,6–1,8 рази, ніж для дизельного палива. Це на 4–8 % більше, ніж за моделлю Лишевського, що краще співпадає з експериментальними даними. Так, середній діаметр крапель при розпиленні кокосової олії був в 1,8 раза більший, ніж для дизельного палива [116].

Якщо палива на основі олій мають погані розпилювальні характеристики з утворенням великих крапель при розпилюванні, це повинно привести до бідного змішування, до поганого згоряння і як результат – до підвищеної димності. Але експерименти показують протилежний результат. Автори [116] вважають, що тенденція зменшення димності присутня завдяки вмісту молекул кисню і відсутності ароматичних вуглеводнів в кокосовій олії. Останні, як відомо, роблять вклад у формування сажі, в той же час присутність молекул кисню може допомагати горінню, в результаті чого одержується нижче значення димності. Спостерігалося також збільшення CO і загальної кількості вуглеводнів при збільшенні кількості кокосової олії у суміші. При високих навантаженнях димність була на 36 % меншою і викиди NO_x були на 12 % меншими порівняно з дизельним паливом [116].

Як правило, експериментальні дослідження свідчать про зменшення викидів сажі з використанням палив на основі олій при високих навантаженнях порівняно з дизельним паливом. При низьких навантаженнях кількість сажі збільшується порівняно з високим навантаженням і може бути більшою, ніж для дизельних палив. Було показано [34], що використання 75 % ріпакової олії у суміші з дизельним палаивом при високих навантаженнях в основному приводить до зниження викидів сажі і CO при невеликому рості NO_x. На режимах низьких навантажень викиди сажі і CO зростають, а NO_x знижуються порівняно з дизельним паливом.

З точки зору [96] зниження сажі у відпрацьованих газах приводить до збільшення оксидів азоту і навпаки, причому кількість сажі зменшувалась при збільшенні кількості кисню у суміші. Але викиди оксидів азоту можна знизити до норми за рахунок регулювання паливної системи. Аналіз показав, що найменші викиди сажі для олій будуть при використанні великих

циліндрів IDI двигунів (двигуни з розділеними камерами згоряння) порівняно з DI двигунами (двигуни з прямим впорскуванням) і малими циліндрами IDI двигунів.

Отже, в Україні є всі умови, щоб використовувати ріпакову олію як паливо поряд із біодизельним паливом. Як вважає більшість авторів, ріпакова олія має більшу затримку спалахування, ніж дизельне паливо, але різниця зменшується, як тільки навантаження або швидкість збільшуються. При високих навантаженнях і швидкостях ріпакова олія може мати меншу затримку спалахування, ніж дизельне паливо, тому що ці умови ведуть до кращого випаровування ріпакової олії. Хоча ріпакова олія має гірші розпилювальні характеристики порівняно з дизельним паливом (середні діаметри крапель при розпилюванні збільшуються в 1,6–1,8 раза), їх можна значно покращити при нагріванні палива. Ріпакову олію вигідніше використовувати для IDI (indirect injection) двигунів, ніж DI (direct injection) двигунів, краще для двигунів великих розмірів, ніж для малих. З точки зору викидів сажі кращі результати одержуються при високих навантаженнях, ніж при низьких. Доцільно використовувати гібридні автомобілі з дизельним паливом при низьких навантаженнях та ріпаковою олією при високих навантаженнях.

2.6. Вплив в'язкості біопалив на параметри впорскування та витрату палива

Вплив в'язкості біопалив на параметри впорскування палива в існуючих моделях розпилювання для дизельних палив досліджений ще недостатньо [107]. З іншого боку, існуючі моделі витрати палива, наприклад, підходи, що використовуються в [35], не враховують повною мірою всі властивості палива, що також значно знижує точність прогнозування.

При аналізі роботи двигуна на біопаливі потрібно мати на увазі, що кількість палива для дизельного двигуна вимірюється за об'ємом. Результатом роботи двигуна на паливі з меншим енергетичним потенціалом буде менша механічна енергія на виході. Втрати потужності двигуна можуть компенсуватися більшим об'ємом палива, що повинно бути подано в двигун. За умови, що дизельний двигун буде споживати однаковий об'єм палива у випадках двох палив (дизельного та біопалива), для

біодизельного палива можна буде спостерігати втрату потужності на 8,4 %. У деяких випадках втрата потужності буде меншою, тому що вища в'язкість біодизельного палива може зменшити кількість палива, що протікає між плунжером, залишаючи більше палива для впорскування [100].

Ефективна питома витрата палива (BSFC) визначає кількість палива, що витрачається за годину ефективної потужності. Автор [123] дослідив, що біодизельне паливо має на 12 % більше значення BSFC, ніж дизельне паливо, внаслідок того, що нижча теплота згоряння у біодизельного палива на 12 % нижча за дизельне паливо.

В'язкість рідини еквівалентна відношенню зсувних напружень до прикладеної швидкості зсуву і є мірою опору рідини до текучості. Коли в'язкість палива збільшується (за умови однакового положення регулюючого органу системи живлення дизеля), підвищується витрата палива, що впорскується, внаслідок зменшення протікання палива через зазори плунжерної пари в ході нагнітання.

Автор [123] виконував експериментальні дослідження для біодизельного і дизельного палив (швидкісний режим двигуна 1400 хв$^{-1}$) за умови, що паливний насос віддавав максимальну і однакову кількість палива для обох вказаних палив. Оскільки в'язкість палив була різною, була різною також і його витрата. За всіх температур був впорснутий більший об'єм біодизельного палива, ніж дизельного.

Якщо розглянути течіння палива під високим тиском як ламінарне течіння між двома плоскими пластинами, можна використати наступну формулу [123]:

$$q = \frac{2h^3 \Delta p}{3\mu l}, \tag{2.36}$$

де q швидкість течіння, h половина відстані між пластинами, μ в'язкість, Δp різниця в тиску, l довжина пластини.

За допущення, що різниця тиску не змінюється при зміні складу палив, одержимо, що швидкість протікання дизельного палива при температурі 50 °С буде у 2 рази більша, ніж, наприклад, метилового ефіру ріпакової олії.

Збільшення в'язкості палива викликає зміну циклової подачі палива і фаз впорскування. В роботі [123] було досліджено, що

початок впорскування палива залежить, як від нижчої теплоти згоряння палива, так і від властивостей палива. Причому, в'язкість має виключний вплив на початок впорскування і зв'язана з типом насоса системи живлення двигуна. Початок впорскування для біодизеля соєвої олії відбувався раніше на 0,68° відносно до дизельного палива, тоді як однакова кількість палива була впорснута. Важливо, що початок впорскування буде сповільнений, якщо знижується об'єм палива, що впорскується. Затримка спалахування для дизельного палива складала 4,3°п.к.в, для біодизельного палива соєвої олії – 3,5°, а для біодизельного палива (Yellow Grease) – 3,0° [123]. Причому, коли в'язкість дизельного палива і біодизеля була однаковою (за рахунок різної температури палив), більший об'єм менш густого дизельного палива був впорснутий порівняно з біодизельним паливом, яке було менш густим.

В роботі [95] було порівняно час впорскування для трьох палив: дизельного, парафінового (F-T паливо) і біодизельного. Цетанове число для парафінового палива було достатньо велике (CN = 83) і модуль стискання менший, ніж для дизельного палива, що призводило до пізнішого впорскування. Було досліджено, що більший модуль об'ємного стискування для олій та їх ефірів веде до більш раннього впорскування. Використання біодизельних палив призводить до збільшення викидів оксидів азоту. І зворотна тенденція: парафінові палива викликають сповільнення початку впорскування, бо вони мають нижчий модуль стискання, ніж звичайні палива. Крім того, як досліджено в роботі [95], ці палива сприяють зменшенню викидів оксидів азоту.

Отже, для біопалив на основі олій спостерігається раніше впорскування палива за рахунок вищої в'язкості та більшого модуля об'ємного стискування, що призводить до більшої витрати палива в порівнянні з дизельними паливами.

В'язкість палива призводить до зміни параметрів розпилювання, викликаючи збільшення довжини струменя, зменшення кута розпилювання та збільшення діаметра крапель. В роботі [34]] була запропонована формула для визначення середнього діаметра крапель при розпилюванні (діаметр Заутера або SMD діаметр):

$$SMD = A d_0^{xd} \Delta P^{xp} \rho_g^{xro} l_v^{xl} \qquad (2.37)$$

де d_0 – діаметр вихідного отвору форсунки, ρ_g – густина газу,

$\Delta P = P_f - P_g$, P_f – тиск впорскування палива, P_g – тиск газу в циліндрі двигуна.

$l_\nu = \mu_f^2/(\sigma\rho_f)$ – параметр довжини Егерса, що характеризує характер руйнування рідини [34].

Формула (2.37) була перевірена для дизельного палива, ріпакової олії та метилового ефіру ріпакової олії. При виборі коефіцієнтів A=23, xd = 0,35, xp = -0,54, xro =0,06, xl = 0,1 були одержані середні діаметри для крапель ріпакової олії, що в 1,8 – 2 раза більші, ніж для дизельного палива. Це краще співпадає з результатами експериментів [116], ніж формула, що запропонована Лишевським [34], яка дає відношення 1,6 діаметра крапель ріпакової олії до діаметрів крапель дизельного палива.

В експериментальних дослідженнях, що були проведені в одному з університетів Канади [94], середній діаметр крапель для дизельного палива складав 10,88 мікрон, метилового ефіру кокосової оії – 11,6 мікрон, метилового ефіру соєвої олії – 13,37 мікрон та метилового ефіру ріпакової олії (каноли) – 13,58 мікрон. В роботі [94] використовувалась наступна залежність для визначення SMD діаметра :

$$SMD = 0{,}002103\mu_f + 0{,}00033\sigma\,. \qquad (2.38)$$

Коефіцієнти формули (2.22) потрібно уточнити для широкого діпазону біопалив з рослинних олій різного складу і походження. Аналіз експериментальних данних показав, що формулу (2.22) для середнього діаметра крапель при розпилюванні можна представити у вигляді:

$$SMD = 0{,}001 l_\nu^{0,29}, \qquad (2.39)$$

де $l_\nu = \mu_f^2/(\sigma\rho_f)$ параметр довжини Егерса, ρ_f – густина палива, σ поверхневий натяг палива, μ_f – динамічна в'язкість палива.

На рис. 2.4 представлено значення SMD за новою моделлю (2.39), моделлю (2.38) та експериментальними даними [94] для біодизеля олій (метилових ефірів олій).

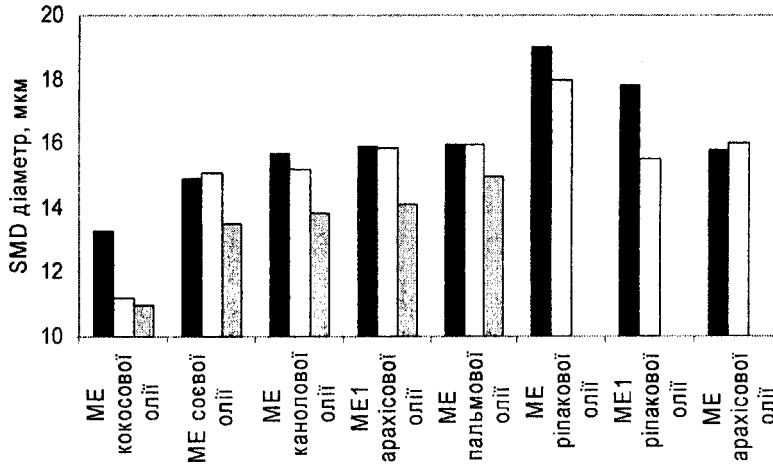


Рис. 2.4. Порівняння середніх діаметрів крапель при розпилюванні біодизельних палив за формулами (2.38) та (2.39) з експериментальними даними [94]: лівий стовпчик – формула (2.38); середній стовпчик – нова формула (2.39); правий стовпчик – експериментальні дані

Як видно з рис. 2.4, формула (2.38) дає добрі результати для описання діаметрів крапель при розпилюванні для біодизельних палив. Але з підвищенням в'язкості точність прогнозування знижується. Так, для ріпакової олії, згідно з (2.38), одержувались значення SMD діаметра, які більші у 10 разів, ніж для дизельного палива, що протирічить експериментальним даним. Запропонована формула (2.39) більш точно описує SMD діаметр для біопалив на основі рослинних олій при більш високих значеннях в'язкості палив.

Хірооусу зв'язує SMD діаметр з об'ємом палива, що подається у двигун [108], мкм:

$$SMD = A\Delta P^{-0,135}\rho_g^{0,121}q_f^{xq}, \qquad (2.40)$$

де ΔP – тиск, МПа, q_f циклова подача палива для одного циліндра, мм^3/хід, xq=0,131. Коефіцієнт A залежить від типу форсунки.

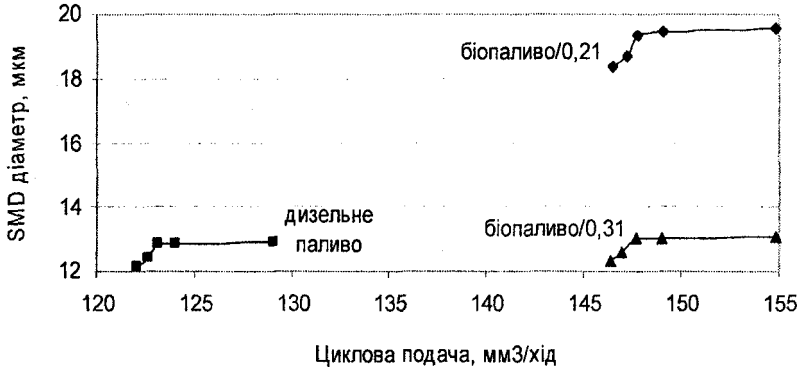


Рис. 2.5. Порівняння середніх діаметрів крапель при розпилюванні для дизельних палив та біопалив згідно з (2.40)

Формула (2.40) перевірялася згідно з експериментальними даними Delphi [35] для двосоленоїдної електронної впорскувальної системи для дизельного палива і A=9 (рис. 2.5). Згідно з експериментальними даними [116], циклова подача палива для рослинних олій має відрізнятися від дизельного палива не більше, ніж у 1,2 раза. Формула (2.40) при xq=0,131, якщо прийняти умову рівності ΔP для дизельного палива і рослинних олій, показує дуже маленькі значення діаметрів для рослинних олій, що суперечить експериментальним даним. Отже, формула (2.40) може застосовуватись тільки для палив з малою в'язкістю. Точність розрахунків може бути покращена збільшенням коефіцієнта до xq=0,21.

2.7. Розпилювання двокомпонентної суміші (олія + диметиловий ефір)

Останнім часом одним з найбільш перспективних альтернативних палив є диметиловий ефір (ДМЕ), що є найпростішим ефіром і має формулу складу CH_3-O-CH_3 (або C_2H_6O). При нормальних атмосферних умовах ДМЕ перебуває в газоподібному стані, але зріджується вже при тиску 0,53 МПа. ДМЕ нетоксичний і не забруднює навколишнє середовище. У молекулі ДМЕ два метилових радикала CH_3 з'єднані атомом

кисню, а частка кисню в цій молекулі складає близько 35 %. Тому при згорянні ДМЕ в дизелі практично не утворюється сажа, але через значний вміст кисню в молекулі ДМЕ цей ефір має низьку теплоту згоряння. У табл. 2.6 наведені найважливіші з точки зору використання в дизелях фізико-хімічні властивості ДМЕ [20].

Таблиця 2.6

Характеристика палива	ДМЕ	ДП
Формула складу	CH_3-O-CH_3	$C_nH_{1,8n}$
Молекулярна маса	46	190…220
Елементний склад %, мас. C H O	 52,2 13,0 34,8	 87,0 12,6 0,4
Густина рідкої фази при 20 °C, кг/м^3	668	831…845
Кінематична в'язкість рідкої фази при 20 °C, мм^2/с	0,22	3,0
Коефіцієнт поверхневого натягу, Н / м	0,0012	0,028
Нижча теплотворна здатність, МДж / кг	28,84	42,5
Цетанове число	>55	40…55
Температура самозаймання, °C	235	240-310

За результатами досліджень, представленими на рис. 2.6, можна відзначити відмінності в динаміці струменів олії, ДМЕ та їх сумішей.

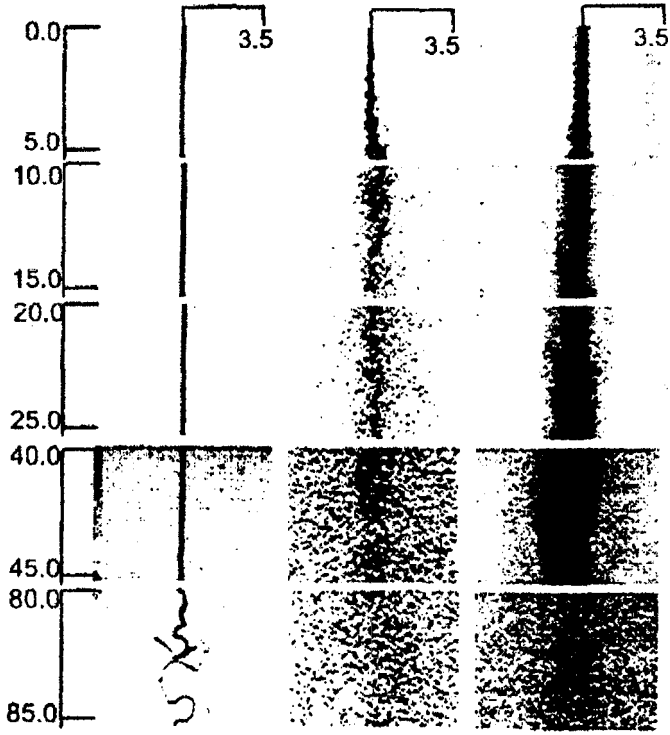


Рис. 2.6. Розвиток струменя олії (зліва), суміш олії з 25 % ДМЕ (в центрі) і чистого ДМЕ при тиску впорскування $p_{ВПР}$ = 2МПа, тиск середовища p_a=0,5МПа [20]

Помітно, що навіть малий вміст ДМЕ в суміші забезпечує якісне розпилювання палива. Використання таких сумішей можна розглядати як радикальний засіб поліпшення протікання процесів сумішоутворення і згоряння. При цьому визначальним механізмом руйнування струменя та подрібнення крапель розпилювального палива є «мікровибухи» всередині сумішевого палива, викликані тим, що тиск середовища при даній температурі стає нижче тиску насичених парів. При цьому ДМЕ, що починає кипіти, інтенсифікує руйнування струменя і подрібнення крапель. Відзначимо, що більш низький тиск, ніж у циліндрі або бомбі, має

місце в сопловомі каналі розпилювача, і руйнування струменя може починатися на ще більш ранніх стадіях. Таким чином можна відмітити наступну закономірність: радикальне поліпшення розпилювання спостерігається навіть при малому вмісті ДМЕ в змішаному біопаливі. Ця закономірність дозволяє кардинально поліпшити якість процесу сумішоутворення в дизелі, що працює на сумішевих біопаливах. Причому ефект значного поліпшення якості процесу сумішоутворення може бути отриманий не тільки при роботі на сумішевих біопаливах, що містять ДМЕ, а й на сумішах олій з іншими легкими паливами, що наближаються за своїми фізичними властивостями до ДМЕ (пропан-бутанові суміші, легкі нафтові палива, легкі газові конденсати та ін.) [20].

Якщо випаровування крапель достатньо швидке, то воно може бути швидшим, ніж процес агломерації крапель. Якщо випаровування повільне, то в результаті агломерації розмір крапель може зростати, що можна спостерігати при розпилюванні таких важких палив, як вугільні суспензії. Навпаки, струмінь чистого ДМЕ при віддаленні від сопла швидко випаровується. Ситуація з сумішами більш складна. Спочатку внаслідок швидкого випаровування ДМЕ з крапель палива спостерігається швидке руйнування струменя та зменшення середнього діаметра крапель. Далі середній діаметр крапель збільшується внаслідок агломерації крапель, оскільки у краплях залишаються більш важкі фракції дизельного палива або рослинної олії. Цей ефект тим сильніший, чим гірші були умови розпилювання (нижче тиск середовища та розпилювання) [20]. Так, наприклад, на рис. 2.7. показаний середній діаметр за Заутером для ДТ і суміші рослинної олії з ДМЕ в залежності від відстані до сопла при різних тисках впорскування.

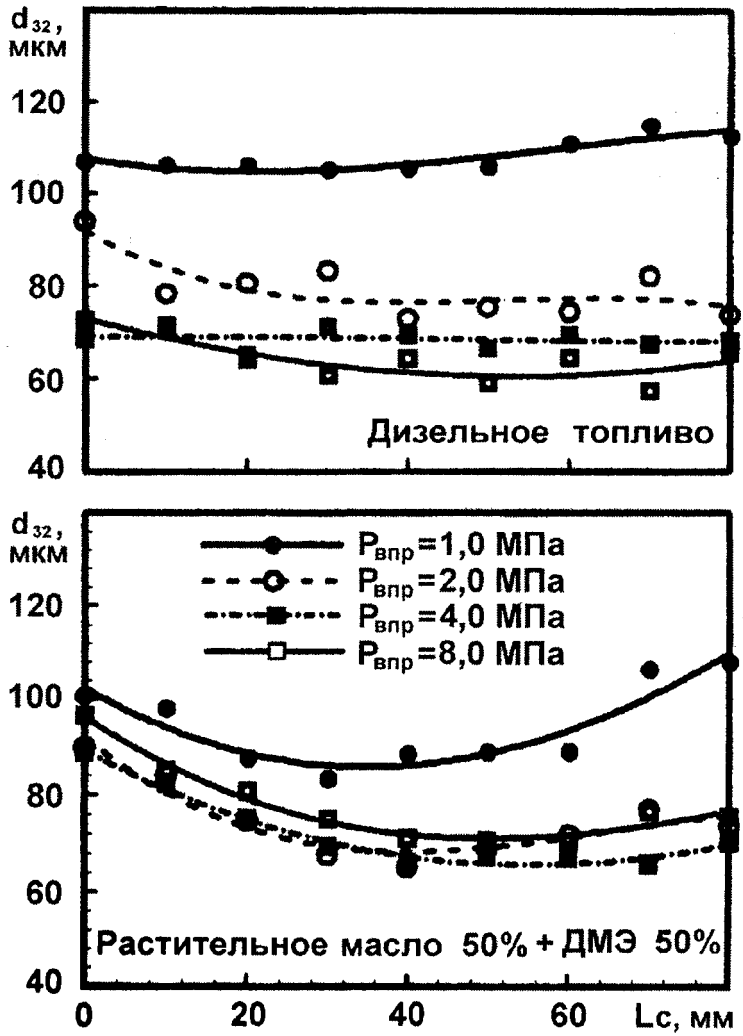


Рис.2.7. Середній діаметр крапель за Заутером розпиленого палива в залежності від відстані від сопла для ДТ і суміші олії з ДМЕ при тисках впорскування 1–8 МПа і тиску середовища 0,5 МПа [20]

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ ДИЗЕЛІВ НА НАФТОВИХ ПАЛИВАХ ТА БІОПАЛИВАХ

3.1. Проведення стендових випробовувань біопалив

Розробка та впровадження в експлуатацію нових видів палива викликає необхідність в їх натурних випробуваннях, що дозволяє реєструвати режимні показники та екологічні характеристики дизельного двигуна при використанні різних видів палив та їх сумішей. Отже, для натурних випробовувань біопалив на основі олій був розроблений стенд на основі серійного двигуна СМД-17Н (4ЧН12/14) [91]. У табл. 3.1. показані технічні характеристики дизельного двигуна СМД-17Н (4ЧН12/14), що встановлюється на гусеничний трактор ДТ-75Н, господарські трактори ТЛТ-100 та інші транспортні засоби .

Таблиця 3.1

Показники	Одиниця вимірювання	Значення
Потужність експлуатаційна	кВт	70
Номінальна частота обертання колінчастого вала	$хв^{-1}$	1800
Число циліндрів		4
Діаметр / хід поршня	мм / мм	120 /140
Ступінь стиску	–	15,5
Камера згоряння	типу ЦНІДІ	
Порядок работи циліндрів	1 – 3 – 4 – 2	
Паливний насос ($d_{пл}$ = 10 мм)	Секційний 4-плунжерний правого обертання, з центробіжним багаторежимним регулятором	
Форсунка	4-х соплова закритого типу 4×0,34; $P_{зат}$ = 17,5 МПа	
Система охолодження	Водяна примусова, закритого типу	
Турбокомпресор	ТКР 8,5 Н	
Фази газорозподілу		
	Впуск	Випуск
Відкриття	9 ° до ВМТ	55 ° до НМТ
Закриття	48 ° після НМТ	17 ° після ВМТ

Як показує аналіз вітчизняних та зарубіжних досліджень, конвертування дизельного двигуна традиційної конструктивної схеми на альтернативні види пального, і в першу чергу – на олії та їх суміші – призводить до деякого погіршення його нормальної роботи. При короткочасній роботі (в межах 50 годин) це викликає утворення значних нагарів в районі соплових отворів та їх закоксованості. При тривалій роботі двигуна на альтернативних паливах із олій можливі поломки і відмови двигуна внаслідок великих нагароутворень в камері згоряння [91].

Види палива, що досліджувалися (НТУ "ХПІ", кафедра ДВЗ): традиційне – дизельне та альтернативне – ріпакова олія рафінована та її бінарні суміші з дизельним паливом. Вимірювальний комплекс на випробувальному стенді дозволяв реєструвати параметри, що наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

1. Тиск		
1.1. Атмосферний B_0	мм Hg	барометр
1.2. Тиск наддуву Δp_s	кгс/см^2	зразковий манометр 1 кгс/ см^2 – 250 поділок.
1.3. Тиск відпрацьованих газів $\Delta p_т$	кгс/см^2	зразковий манометр 1 кгс/ см^2 – 250 поділок
2. Температура		
2.1. Атмосферна t_0	°С	термометр 0,5°/поділка
2.2. Наддуву повітря t_s	°С	термометр опору
2.3. Відпрацьованих газів $t_т$	°С	термопара
3. Частота обертання колінчастого вала n	хв.$^{-1}$	зубчасте колесо z=60, датчик, частотомір
4. Потужність (навантаження) $p_т$	кгс	навантажувальний гідропристрій
5. Витрати повітря $G_в$	кг/год	сопло, водяний манометр
7. Температура води в системі охолодження на виході $t_{в\,вих}$	°С	термометр опору
8. Температура масла на вході в систему масляну $t_{м\,вх}$	°С	термометр опору

Програма випробовувань передбачала визначення ефективних показників дизеля при його роботі з частотами обертання

колінчастого вала n = 1600 хв$^{-1}$ та n = 1800 хв$^{-1}$, а також на режимі максимального крутного моменту (n = 1400 хв$^{-1}$, $M_{кр_{max}}$ = 440 Н·м).

Види палив, що досліджувалися:

1. ДП – 100 %.

2. Ріпакова олія рафінована – 100% РОР.

3. Бінарні суміші (об'ємні долі): 25 % РОР + 75 % ДП, 50 % РОР + 50 % ДП.

3.2. Обробка результатів експериментальних досліджень

Була визначена наближена сумарна формула технічної ріпакової олії (ерукової кислоти > 5 %), ріпакової олії рафінованої $C_{60,5}H_{108,8}O_6$, нижча теплота згоряння $Q_н$ = 37,5 МДж/кг, L_0 = 12,58 кг/кг, густина ρ_{20} = 916 кг/м^3, кінематична в'язкість ν_{20} = 88,6 мм^2/с.

Для ДП елементарного складу С = 0,87; Н = 0,126; $O_т$ = 0,004; L_0 = 14,3 кг/кг; $Q_н$ = 42,5 МДж/кг; ρ_{20} = 810 кг/м^3; ν_{20} = 3,9 мм^2/с. Для сумішей РОР та ДП (об'ємні долі) були визначені величини $Q_н$ та L_0:

25 % РОР + 75 % ДП: $Q_н$ = 41,2 МДж/кг; L_0 = 13,84 кг/кг;
ρ_{20} = 837 кг/м^3;

50 % РОР + 50 % ДП: $Q_н$ = 40,0 МДж/кг; L_0 = 13,40 кг/кг;
ρ_{20} = 863 кг/м^3.

Дані експериментальних досліджень та результати їх обробки наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Показники роботи дизеля 4ЧН12/14 на експлуатаційних режимах

Паливо	Показники						
	g_e, кг/кВт·год	$P_т$, кПа	$T_т$, К	α	η_e%	$g_ц \cdot 10^6$,кг	$Q_ц$, мм^3
n = 1600 хв$^{-1}$, N_e = 25,3 кВт, P_e = 0,3 МПа							
100 % ДП	0,2623	128,1	540	3,68	32,3	34,6	42,7
25 % РОР	0,3060	129,0	550	3,18	28,6	40,3	48,2
50 % РОР	0,3155	128,9	552	3,21	28,5	41,6	48,2
100 % РОР	0,3305	127,8	542	3,15	29,0	43,6	47,5
n = 1800 хв$^{-1}$, N_e = 70 кВт, P_e = 0,74 МПа							
100 % ДП	0,2397	168,5	757	2,09	35,3	77,7	95,9
25 % РОР	0,2453	170,6	752	2,11	35,6	79,5	95,0
50 % РОР	0,2576	170,5	759	2,10	34,9	83,5	96,7
100 % РОР	0,2713	170,1	751	2,06	35,4	87,9	96,0
n = 1400 хв$^{-1}$, N_e = 64,4 кВт, P_e = 0,87 МПа							
100 % ДП	0,2366	137,1	854	1,61	35,8	90,7	112,0
25 % РОР	0,2433	137,2	840	1,62	35,9	93,3	111,4
50 % РОР	0,2543	136,3	839	1,59	35,4	97,5	113,0
100 % РОР	0,2993	136,8	848	1,44	32,1	114,7	125,3

У табл. 3.3 використані наступні позначення: $P_т$ – тиск у випускному колекторі, $Q_ц$ – об'ємна циклова подача, g_e – питома ефективна витрата пального.

Аналіз роботи дизельного двигуна СМД-17Н (4ЧН12/14) на сумішах рафінованої ріпакової олії (РОР) та дизельного палива (ДП) показав (див. табл. 3.3):

1. Питомі ефективні витрати пального g_e на кожному режимі ростуть по мірі збільшення долі РОР в бінарній суміші, що, очевидно, пояснюється зменшенням нижчої теплоти згоряння бінарної суміші.

2. На кожному із швидкісних режимів по мірі збільшення долі РОР в бінарній суміші зростає масова циклова подача пального $g_ц$, хоча об'ємна циклова подача $Q_ц$ (крім режимів n = 1600 хв$^{-1}$, 100 % ДП та n =1600 хв$^{-1}$, 100 % РОР) на кожному із режимів залишається практично постійною.

3. Ефективний ККД на кожному із режимів (крім вказаних вище) практично не змінюється, коефіцієнт надлишку повітря практично однаковий, температура відпрацьованих газів практично постійна.

4. При роботі на чистій РОР відмічено закоксовування отворів розпилювачів форсунок, що пов'язано з високою в'язкістю та особливістю хімічного складу РОР.

3.3. Аналітичне дослідження роботи дизельного двигуна СМД-31 при використанні метилових ефірів ріпакової олії як палива

Розрахункове дослідження процесів впорскування та сумішоутворення метилових ефірів ріпакової олії (МЕРО) та дизельного палива проводилося на дизельному двигуні СМД-31 (6ЧН12/14)[[52], основні параметри якого наведені в табл. 3.4.

Експериментальні дослідження основних фізико-хімічних показників МЕРО [23, 52] показали деяку їх відмінність від показників традиційного дизельного палива (ДП), що показані в табл. 3.5. При дослідженні робочого циклу ДВЗ використовувалась математична модель, що базується на роботах професора М.Ф. Разлейцева.

Таблиця 3.4

Параметри двигуна СМД-31

№ з/п	Параметр	Показник
1	Число циліндрів	6
2	Діаметр циліндра, м	0,120
3	Хід поршню, м	0,140
4	Ступінь стискування	15,5
5	Номінальна частота обертання КВ, $хв^{-1}$	2000
6	Номінальна ефективна потужність, кВт	191

Таблиця 3.5.

Основні фізико-хімічні показники ДП і МЕРО

№ з/п	Показники	ДП	МЕРО
1	Цетанове число, не менше	45	48
2	Густина ρ, кг/$м^3$ при Т = 323К	805	856
3	Кінематична в'язкість ν, $мм^2/с$ (Т = 323К)	2,11	4,25
4	Поверхневий натяг σ, Н/м (Т = 323К)	$25,3 \cdot 10^{-3}$	$29,2 \cdot 10^{-3}$
5	Нижча теплота згоряння $Q_н$, МДж/кг	42,5	37,7
6	Теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння 1 кг палива L_0, кг	14,35	12,6
7	Хімічний склад палива, %		
	C	87,0	77,5
	H	12,6	12,0
	O	0,4	10,5

Дослідження процесів впорскування палива та сумішоутворення (табл. 3.6) показало, що середній діаметр крапель при дослідженні МЕРО збільшився на 9 %, кут розкриття паливного струменя зменшився на 9 %, відповідно збільшується

також дальнобійність струменя порівняно з дизельним пальним. Зміна цих показників може привести до того, що 79 % палива може попасти на стінки камери згоряння (59 % для дизельного палива), що зменшує долю об'ємного сумішоутворення і негативно відображається на процесах сумішоутворення і згоряння.

Таблиця 3.6.

Параметри, що характеризують впорскування і сумішоутворення палива

№ з/п	Параметри	ДП	МЕРО
1	Кут початку впорскування, град.п.к.в.	348,0	346,0
2	Тривалість впорскування, град. п.к.в.	20,3	20,3
3	Максимальний тиск перед форсункою, МПа	57,46	62,86
4	Критерій Вебера	785952	868205
5	Критерій М	0,000373	0,001395
6	Швидкість витікання палива $U_{0м}$, м/с	255	279
7	Середній діаметр крапель d_{32}, м × 10^6	22,7	24,8
8	Дійсний коефіцієнт випаровування B_i	403,4	326,1
9	Кут розкриття струменя, град	23,8	21,7

Заміна дизельного палива на МЕРО може привести до погіршення ефективних показників двигуна (табл. 3.7), наприклад, об'ємна ефективна витрата палива може збільшитися на 6 %.

Таблиця 3.7.

Розрахункові показники роботи дизельного двигуна

№ з/п	Показники	ДП	МЕРО
1	Ефективна потужність, кВт	191,1	191,4
2	Циклова подача палива, $мм^3$/цикл	140,6	154
3	Питома ефективна витрата палива, кг/(кВт×год), [дм3/(кВт×год)]	0,2187 [0,2647]	0,2541 [0,2897]
4	Ефективний тиск, МПа	1,207	1,209
5	Ефективний ККД	0,3855	0,3759
6	Індикаторний тиск, МПа	1,448	1,450
7	Індикаторний ККД	0,4622	0,4507
8	Максимальний тиск циклу, МПа	12,95	13,03
9	Коефіцієнт надміру повітря	2,002	1,956
10	Густина ρ_{50} /ρ_{20}	805/826	856/877

Розрахункове дослідження дозволяє зробити висновки про те, що для забезпечення техніко-економічних показників при застосуванні МЕРО необхідна інтенсифікація процесів впорскування, сумішеутворення і згоряння. Позитивний вплив на ці процеси може мати підігрівання впорскуваного палива (~до 70°С), що приведе до покращення фізико-хімічних показників палива; збільшення тиску впорскування палива (~до 80 МПа), також приведе до зменшення діаметра крапель розпилювального палива; інтенсифікація турбулізації повітряного заряду дозволить покращити процеси випаровування і сумішоутворення.

3.4. Аналіз показників роботи дизелів на нафтових та альтернативних паливах рослинного походження

Узагальнення результатів використання біопалива для дизелів [10,16, 28 - 30, 39, 41, 55, 75, 87, 91, 97, 121,125] та проведення аналізу такого використання має певні труднощі внаслідок відсутності необхідної кількості конструктивних, режимних та

регулювальних даних для дизелів, що розглядаються. Головною метою аналізу є оцінка впливу фізико-хімічних показників традиційних і альтернативних палив на паливну економічність та екологічні характеристики цих дизелів. В [125] представлені результати експериментального дослідження передкамерного шестициліндрового дизеля MWM D-916-6 (виробництва Німеччини) з турбонаддувом і проміжним охолодженням повітря ($V_л$=6,24 л; ε=21; $N_{ен}$=74 кВт; $n_н$=2500 хв$^{-1}$) під час його роботи за абсолютною зовнішньою швидкісною характеристикою. Як паливо використовувалися: ріпаковометиловий ефір RME-1 (йодне число ЙЧ=100-115); ріпаковометиловий ефір RME-2 (ЙЧ=90-110); ріпакова олія рафінована (РОР); соняшникова олія нерафінована (СО); дизельне паливо (ДП). В табл. 3.8 наведено фізико-хімічні властивості вказаних палив.

Під час досліджень було виявлено, що питома ефективна витрата палива під час роботи на RME-2 нижча ніж на RME-1. Це пов'язано з тим, що RME-2 у своєму складі мала більшу кількість метилових ефірів ерукової кислоти (йодне число 90-110). Деякі сорти ріпакової олії мають до 53 % ерукової кислоти, що впливає на величину $Q_н$. Збільшення вмісту метилових ефірів ерукової кислоти в RME з 0,6 % до 53 % призводить до зростання $Q_н$ на 1,5–1,6 % [70]; з іншого боку, як уже було відмічено вище, збільшення ерукової кислоти підвищує в'язкість палива, що негативно впливає на роботу двигуна.

Таблиця 3.8

Фізико-хімічні властивості палив

Показник	RME* [125]	POP [125]	CO	ДП [125]
Приблизна сумарна формула	$C_{19}H_{35.2}O_2$	$C_{57}H_{101.6}O_6$	$C_{56.7}H_{100.4}O_6$	$C_{13}H_{24}$
Молярна маса, кг/кмоль	296	883	878	220-320
Нижча теплота згоряння, МДж/кг	37,1	36,7	37,0	42,7
Густина при 20 °С, кг/м^3	880	916	917	840
Кінематична в'язкість за 20 °С, мм^2/с	8	75	60,6	4-5,5
Стехиометрична кількість повітря в кг, теоретично необхідна для згоряння 1 кг палива	12,53	12,43	12,37	14,57
M_0, кмоль/кг	0,434	0,430	0,428	0,504

*RME – ріпаковий метиловий ефір (Rapsölmethylester);
POP – ріпакова олія рафінована;
CO – соняшникова олія нерафінована;
ДП – дизельне паливо.

В табл. 3.9 представлені розрахункові значення ефективної потужності N_e, ефективного коефіцієнта корисної дії η_e, масової циклової $g_ц$ та об'ємної циклової $Q_ц$ подач палива, а також добутку $g_ц M_0$ (M_0 – стехіометрична кількість повітря в кмоль,

теоретично необхідна для згоряння 1 кг палива). За вхідні дані були використані експериментальні значення середнього ефективного тиску P_e та питомої витрати палива g_e [125]. Можна припустити, що для будь-якого виду палива на кожному швидкісному режимі кількість робочого тіла в циліндрі добуток $\eta_v M_h$ змінюється незначно і тоді добуток $g_ц M_0$ буде характеризувати коефіцієнт надміру повітря α:

$$\alpha = \frac{\eta_v M_h}{g_ц M_0}, \qquad (3.1)$$

де η_v – коефіцієнт наповнювання,

M_h – потенційний заряд.

Аналіз розрахунково-експериментальних даних (табл. 3.9) показує:

1. *Потужність двигуна N_e.* При роботі на дизельному паливі (n=2500 хв.$^{-1}$, потужність дизеля N_{emax}=80,6 кВт ($N_{ен}$=74 кВт)) знімалася абсолютна зовнішня швидкісна характеристика. Режим n=1750 хв.$^{-1}$ відповідав режиму максимального крутного моменту (P_{emax}). Найбільша потужність по всій характеристиці (крім n=1000 хв.$^{-1}$) була отримана на дизельному паливі, при цьому об'ємні циклові подачі $Q_ц$ на дизельному паливі, RME-1 та RME-2 були практично рівні, а для ріпакової олії рафінованої та соняшникової олії величина $Q_ц$ по всій характеристиці була менше на 15–20 %, що можна пояснити зниженням ефективності наповнювання надплунжерного простору в прецизійних парах паливного насоса паливами, що мають більшу густину і в'язкість.

Під час роботи дизельного двигуна на n=2500 хв$^{-1}$ кількість теплоти, виділеної в циклі при використанні RME і соняшникової олії, відповідно, була менша на 8,3 та 17,6 %, ніж при застосуванні дизельного палива. Проте більш високі значення α та η_e, а також більш ефективне протікання процесу виділення тепла в циліндрі при роботі на RME і соняшниковій олії призводить до зменшення потужності дизеля відповідно на 4 та 14 %.

При n=1000 хв$^{-1}$ і роботі на дизельному паливі та соняшниковій олії в цикл вноситься практично однакова кількість теплоти. Однак, за рахунок кращої організації протікання робочого процесу (більш високі значення α та η_e) вдається одержати підвищення потужності на 5,4 %.

2. *Коефіцієнт надміру повітря* α. В [125] наведені дані з величини α під час роботи дизельного двигуна при n=2500 хв.$^{-1}$. Значення α при роботі дизеля на максимальній потужності для палив: RME-1 – 1,56; RME-2 – 1,62; ріпакова олія рафінована – – 1,69; соняшникова олія – 1,72; дизельне паливо – 1,43. Ці дані логічно пов'язані зі значеннями $g_ц \cdot M_0$, що дозволяє використовувати їх як аналог величини α. В діапазоні обертів n=1500-2000 хв.$^{-1}$ величина $g_ц \cdot M_0$ змінюється незначно для кожного виду палива. При зменшенні кількості обертів до n=1000 хв.$^{-1}$ відбувається збільшення $g_ц \cdot M_0$ в порівнянні з дизельним паливом на режимі n=2500 хв.$^{-1}$: на 23–25 % (для палив RME-1 та RME-2) та на 7–8 % (для ріпакової олії рафінованої та соняшникової олії). Це пов'язано зі зниженням циклової порції палива.

Таблиця 3.9.

Показники роботи дизеля MWM D-916-6 на режимах абсолютної зовнішньої швидкісної характеристики

Показники	n, хв.$^{-1}$				
	1000	1500	1750	2000	2500
RME-1					
P_e, бар/N_e, кВт	5,34/27,8	6,34/49,5	6,51/59,2	6,34/65,9	5,97/77,6
g_e, кг/кВт·год	0,263	0,266	0,271	0,278	0,293
η_e, %	36,9	36,4	35,8	34,9	33,1
$g_ц \cdot 10^6$, кг	40,6	48,8	50,9	50,9	50,6
$Q_ц$, мм^3	46,0	55,3	57,7	57,7	57,4
$g_ц M_0 \cdot 10^6$, кмоль	17,6	21,2	22,1	22,1	22,0
RME-2					
P_e, бар/N_e, кВт	5,34/27,8	6,34/49,5	6,51/59,2	6,34/65,9	5,97/77,6
g_e, кг/кВт·год	0,257	0,266	0,264	0,266	0,284
η_e, %	37,7	36,4	36,7	36,5	34,2
$g_ц \cdot 10^6$, кг	39,8	48,8	49,7	48,6	48,9
$Q_ц$, мм^3	45,1	55,3	56,3	55,1	55,4
$g_ц M_0 \cdot 10^6$, кмоль	17,3	21,2	21,6	21,1	21,2

Закінчення табл. 3.9.

Ріпакова олія рафінована					
P_e, бар/N_e, кВт	5,63/29,3	6,11/47,7	6,11/55,6	5,80/60,3	5,43/70,6
g_e, кг/кВт·год	0,269	0,271	0,274	0,281	0,301
$\eta_{e,}$ %	36,4	36,1	35,9	34,9	32,5
$g_ц \cdot 10^6$, кг	43,8	47,9	48,3	47,1	47,3
$Q_ц$, мм^3	47,8	52,3	52,7	51,4	51,6
$g_ц M_0 \cdot 10^6$, кмоль	18,8	20,6	20,8	20,3	20,3
Соняшникова олія					
P_e, бар/N_e, кВт	5,63/29,3	6,11/47,7	6,11/55,6	5,80/60,3	5,43/70,6
g_e, кг/кВт·год	0,267	0,268	0,270	0,278	0,298
$\eta_{e,}$ %	36,4	36,3	36,0	35,0	32,7
$g_ц \cdot 10^6$, кг	43,5	47,2	47,7	46,5	46,7
$Q_ц$, мм^3	47,4	51,5	52,0	50,7	50,9
$g_ц M_0 \cdot 10^6$, кмоль	18,7	20,2	20,6	19,9	20,0
Дизельне паливо					
P_e, бар/N_e, кВт	5,34/27,8	6,69/52,2	6,80/61,9	6,57/68,3	6,20/80,6
g_e, кг/кВт·год	0,246	0,236	0,241	0,249	0,266
$\eta_{e,}$ %	34,2	35,8	35,0	33,9	31,7
$g_ц \cdot 10^6$, кг	38,1	45,6	47,3	47,2	47,6
$Q_ц$, мм^3	45,4	54,3	56,3	56,2	56,7
$G_ц M_0 \cdot 10^6$, кмоль	19,2	23,0	23,8	23,8	24,0

Значеня α впливають на індикаторний коефіцієнт корисної дії дизельного двигуна та, в кінцевому рахунку, на $\eta_{e,}$.

3. ***Ефективний коефіцієнт корисної дії η_e.*** Внаслідок того, що всі види вищерозглянутих біопалив є кисневмісними речовинами ($O_т$=10-11 %), їх нижча теплота згоряння $Q_н$ менша за дизельне паливо ($O_т$=0,4 %). Цей факт, як відзначалося вище, призводить до зниження потужності дизельного двигуна (при тому ж положенні рейки паливного насоса) і до зростання g_e. Найбільше значення η_e=37,7% у цих дослідженнях мало паливо RME-2 на режимі

n=1000 хв.$^{-1}$, що монотонно зменшується до η_e=34,2 % за n=2500 хв.$^{-1}$, N_e=77,6 кВт.

Необхідно звернути увагу на той факт, що η_e дизельного двигуна при його роботі на біопаливах вище, ніж при роботі на дизельному паливі. Це можна пояснити наступним чином. Двигун, що випробовувався, був передкамерним, що обумовлює сумішоутворення і згоряння, які відрізняються від аналогічних характеристик дизельного двигуна з безпосереднім впорскуванням палива. Проведені розрахункові дослідження [52] показали, що застосування метилових ефірів ріпакової олії як палива, які мають більшу густину та в'язкість, для дизеля з безпосереднім впорскуванням палива СМД-31 (6ЧН 12/14, N_e=191 кВт, n=2000 хв.$^{-1}$) призводить до збільшення далекобійності струменя палива, середнього діаметра крапель палива, зменшення кута конуса струменя розпилювання палива. Це все зумовлює зменшення частки об'ємного сумішоутворення і зниження η_e. В передкамерному дизелі, на відміну від дизеля з безпосереднім впорскуванням, головним фактором ефективності процесу тепловиділення в циліндрі двигуна є коефіцієнт надміру повітря.

В [41] наведено результати експериментального дослідження триціліндрового дизеля AD3.152 (Польща) без наддуву та з безпосереднім впорскуванням палива ($V_л$=2,502 л; ε=16,5; $N_{eн}$=28кВт; n=2000 хв.$^{-1}$; $M_{кр\ max}$=139,6 Н·м; $n_м$= 3000 хв.$^{-1}$).

Результати розрахункового дослідження проведені на основі експериментальних даних та подані в табл. 3.10. Фізико-хімічні властивості соєвої олії як біопалива розраховувалися з урахуванням середнього жирнокислотного складу (ГОСТ 7825-76 «Масло соевое. Технические условия»): пальмітинова кислота С16:0-10 %; стеаринова С18:0-4 %; олеїнова С18:1-24 %; лінолева С18:2-53 %; ліноленова С18:3-9 %. Наближена сумарна формула соєвої олії $C_{56,4}H_{99,4}O_6$, молярна маса – 873 кг/кмоль, значення $Q_н$ та L_0 наведені в табл. 3.10.

Наведені в [41] дані швидкості згоряння палива dx/dφ 1/°п.к.в. і швидкості тепловиділення dQ/dφ кДж/кг/°п.к.в., що віднесені до маси поданого в циліндр повітря, дозволили визначити коефіцієнт надміру повітря α. Ефективні показники (g_e та N_e) для номінального режиму $n_н$=2000 хв.$^{-1}$ та $N_{eн}$ для режиму

максимального крутного моменту n=1300 хв.$^{-1}$ при роботі на дизельному паливі були взяті з [115].

Таблиця 3.10

Показники роботи дизеля AD3.152 на дизельному паливі та оліях

Показники	Дизельне паливо		Ріпакова олія		Соняшникова олія		Соєва олія	
	Частота обертання колінчастого вала, хв.$^{-1}$							
	1300	2000	1300	2000	1300	2000	1300	2000
ρ_{20}, кг/м^3	839		914		917		917	
ν_{40}, мм^2/с	2,84		34,56		31,54		31,98	
$Q_н$, МДж/кг	43,8		37,1		37,0		37,0	
L_0, кг/кг	14,57		12,43		12,37		12,36	
dx/dφ, 1/°п.к.в.	0,084	-	0,089	0,076	0,083	0,086	0,078	0,077
dQ/dφ,(кДж /кг)/°п.к.в.	177,6	-	187,2	172,8	162,2	207,0	157,4	165,8
α	1,422	1,628	1,419	1,313	1,531	1,243	1,483	1,390
η_v	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85
G_b, кг/год	104,1	151,3	104,1	151,3	104,1	151,3	104,1	151,3
$B_ц$, кг/год	5,02	6,38	5,90	9,27	5,50	9,84	5,69	8,83
P_i, МПа	0,99	0,93	0,90	0,79	0,92	0,64	0,82	0,65
N_i, кВт	26,8	38,8	24,4	32,9	24,9	26,7	22,2	27,1
g_i, кг/кВт·год	0,187	0,164	0,242	0,282	0,221	0,369	0,256	0,326
$\eta_{i,\%}$	43,9	50,1	40,1	34,4	44,0	26,4	38,1	29,9
$\eta_м$	0,71	0,72	0,68	0,67	0,68	0,59	0,65	0,60
P_e, МПа	0,70	0,67	0,61	0,53	0,63	0,38	0,53	0,39
N_e, кВт	19,0	28,0	16,5	22,1	17,1	15,3	14,4	16,3
g_e, кг/кВт·год	0,264	0,228	0,358	0,419	0,322	0,623	0,395	0,542
$\eta_{e,\%}$	31,1	36,1	27,1	23,1	30,2	15,3	24,7	18,0
$g_ц$ 10^6, кг	42,9	35,5	50,4	51,5	47,0	54,7	48,6	49,1
$Q_ц$, мм^3	51,1	42,3	35,2	56,3	51,2	59,6	53,0	53,5

Годинна витрата повітря $G_в$ і годинна витрата палива $B_ч$ розраховані через коефіцієнт наповнення η_v та потенційний заряд M_h. З урахуванням величин середнього індикаторного тиску P_i та середнього ефективного тиску P_e на режимах $N_{eн}$ та $N_{eм}$ були визначені механічні втрати $P_м$ та механічний коефіцієнт корисної дії $\eta_м$ дизеля при його роботі на різних видах палива. В результаті розрахунків були визначені: середній ефективний тиск P_e, ефективна потужність дизеля N_e, питома ефективна витрата палива g_e та ефективний коефіцієнт корисної дії η_e. Дані, отримані непрямими розрахунками, дозволяють з високим ступенем достовірності оцінити вплив виду палива на ефективні показники дизеля.

Під час роботи на біопаливах знижуються N_e та η_e дизельного двигуна, особливо на підвищених частотах обертання колінчастого вала. Зниження N_e та η_e пов'язано, як відзначалося в [20, 41], з особливостями процесів сумішоутворення і згоряння палив, що мають більшу густину та в'язкість.

Збільшена на 17–21 % за n=1300 хв.$^{-1}$ тривалість впорскування, підвищена до T=473–620 K температура спалахування олій, термічне розкладання ріпакової олії за температури T=523–623 K [41]], більш високі значення теплоти пароутворення жирних кислот ($r_{ДП}$=230 кДж/кг, $r_{ЖК}$=335 кДж/кг) - все це призводить до зниження ефективності згоряння біопалив. В [41] відзначається, що при впорскуванні олій підвищується швидкість наростання тиску в паливопроводі та його максимальне значення, збільшується дійсний кут випередження впорскування палива. Це можна пояснити меншими значеннями коефіцієнта стискування β рослинних олій. При атмосферних умовах дизельне паливо має наступні характеристики: ρ_{20}=839 кг/м^3, ν_{20}=4 мм^2/с, β_{20}=(80-90)10^{-11} м^2/Н; а оливкова олія – ρ_{20}=912 кг/м^3, ν_{20}=85 мм^2/с, $\beta_{20,5}$=64·10^{-11} м^2/Н.

В [97] наведені результати порівняльних досліджень чотирициліндрового дизеля D3900 із безпосереднім впорскуванням палива при його роботі за швидкісною характеристикою на таких видах палив: дизельне ($Q_н$=42,5 МДж/кг, ρ_{15}=850 кг/м^3), соняшникова олія рафінована ($Q_н$=38,2 МДж/кг, ρ_{15}=920 кг/м^3) та суміші 50 % (за об'ємом) дизельного палива та 50 % соняшникової олії рафінованої ($Q_н$=40,3 МДж/кг,

ρ_{15}=885 кг/м^3). Експериментальні дані (g_e і N_e) і результати їх обробки подані в табл. 3.11.

Таблиця 3.11

Показники роботи дизеля D 3900 на режимах швидкісної характеристики

Показники	n, хв.$^{-1}$						
	1200	1300	1500	1700	1900	2100	2300
Дизельне паливо							
g_e, кг/кВт·год	0,250	0,250	0,251	0,252	0,255	0,258	0,262
N_e, кВт	30,4	32,9	37,7	42,3	46,3	49,6	52,5
H_e, %	33,8	33,8	33,8	33,6	33,2	32,9	32,3
$G_ц \cdot 10^6$, кг	52,8	52,7	52,6	52,3	51,8	50,8	49,8
$Q_ц$, мм^3	62,1	62,0	61,9	61,5	60,9	59,7	58,6
Соняшникова олія рафінована							
g_e, кг/кВт·год	0,305	0,302	0,297	0,297	0,299	0,306	0,317
N_e, кВт	29,1	32,1	37,8	42,9	47,2	50,5	52,5
η_e, %	30,9	31,2	31,7	31,8	31,5	30,8	29,7
$g_ц \cdot 10^6$, кг	61,6	62,2	62,4	62,5	61,9	61,3	60,3
$Q_ц$, мм^3	67,0	67,6	67,8	67,9	67,3	66,7	65,5
50 % дизельного палива + 50 % соняшникової олії рафінованої							
g_e, кг/кВт·год	0,3	0,295	0,287	0,283	0,283	0,288	0,296
N_e, кВт	29,2	32,2	37,9	43,0	47,4	50,6	52,5
η_e, %	29,8	30,3	31,2	31,6	31,6	31,0	30,2
$g_ц \cdot 10^6$, кг	60,8	60,9	60,4	59,7	58,8	57,8	56,3
$Q_ц$, мм^3	68,7	68,8	68,3	67,4	66,5	65,4	63,6

Особливість проведення експерименту полягала в тому, що на кожному виді палива паливна апаратура дизеля регулювалася так, щоб на номінальній частоті обертання колінчастого вала вихідна потужність складала $N_{ен}$=52,5 кВт. Результати показують, що для дизельного палива та його суміші з соняшниковою рафінованою олією величини $g_ц$ та $Q_ц$ монотонно зростають зі зменшенням частоти обертання колінчастого вала, для соняшникової олії рафінованої $g_ц$ ($Q_ц$) зростають до n=1700 хв.$^{-1}$, а потім – зменшуються.

Ефективна потужність при роботі двигуна в діапазоні n=1500-2000 хв.$^{-1}$ на дизельному паливі була мменша, ніж при роботі на соняшниковій олії рафінованій та їх суміші. Це, очевидно, можна пояснити збільшеними перетіканнями в прецизійних парах паливного насосу високого тиску дизельного палива, яке має меншу густину та в'язкість, а також регулюванням паливної апаратури. Ефективний коефіцієнт корисної дії дизеля при роботі на альтернативних паливах (соняшникова олія рафінована та її суміш) був нижчим, ніж для дизельного палива, що пояснюється якісною розбіжністю в протіканні робочого процесу в циліндрі двигуна при різних видах палива [52].

В науково-виробничому підприємстві "Агродизель" (Росія) [10] були проведені дослідження чотиритактного одноциліндрового дизеля МД-6 (1Ч8.0/7.5) з повітряним охолодженням і нерозділеною камерою згоряння на режимах навантажувальної характеристики n=3000 хв.$^{-1}$ Дослідження проводились для дизельного палива та ріпакової олії, яку підігрівали з метою зниження її в'язкості. Експериментальні дані і результати їх обробки подані в табл. 3.12.

Таблиця 3.12

Показники роботи дизеля МД-6 за навантажувальною характеристикою

Показники	Ре, Мпа			
	0,2	0,3	0,4	0,5
Дизельне паливо/Ріпакова олія ($Q_н$ = 42,5/37,1 $\frac{МДж}{кг}$; L_0 = 14,5/12,4 $\frac{кг}{кг}$; ρ_{20} = 840/920 $\frac{кг}{м^3}$)				
$N_е$, кВт	1,89	2,83	3,77	4,24
$g_е$, кг/кВт·год	0,438/0,502	0,342/0,435	0,296/0,433	0,292/-
$\eta_е$, %	19,3/19,3	24,8/22,3	28,6/22,4	29,0/-
$T_г$, К	528/573	573/643	643/748	673/-
$g_ц \cdot 10^6$, кг	9,2/10/5	10,8/13,7	12,4/18,1	13,8/-
$Q_ш$, мм^2	11,0/11,4	12,9/14,9	14,8/19,7	16,4/-
α	2,34/2,4	2,0/1,84	1,74/1,39	1,56/-

Постійну потужність дизеля на кожному з режимів для різних палив забезпечували збільшенням $g_ц$, причому η_e при N_e=1,89 кВт виявився однаковим при роботі на дизельному паливі і ріпаковій олії. Прийнявши коефіцієнт наповнювання η_v=0,7, визначили значення α, які на даному режимі виявилися близькими за величиною для обох видів палива. Очевидно, на цьому режимі процеси сумішоутворення і згоряння при впорскуванні палива, що має більшу густину та в'язкість, незначно впливають на вихідні показники дизеля (α>2,3; близькі значення $Q_ц$), хоча температура відпрацьованих газів $T_т$ (непрямий показник якості робочого процесу в циліндрі) була більшою на 45 К. При подальшому зростанні P_e та $g_ц$ виявляється розбіжність у протіканні процесів сумішоутворення і згоряння дизельного палива та ріпакової олії, що призводить при роботі на ріпаковій олії до уповільнення росту η_e, зниженню α, підвищенню $T_т$ і при P_e=0,35 МПа досягнення границі димлення. Збільшення кута випередження впорскування при роботі на ріпаковій олії з 25°п.к.в. до 33°п.к.в. до ВМТ на режимі P_e=0,4 МПа призводить до зниження g_e і $T_т$ відповідно на 80 г/кВт·год та 60К, що пов'язано з зростанням періоду затримки спалахування, внаслідок чого більша частка палива вигоряє ближче до ВМТ у фазі об'ємного згоряння.

Автори [91] провели експериментальне дослідження дизеля СМД-17Н (4ЧН 12/14) з турбонаддувом і нерозділеною камерою згоряння ЦНІДІ при його роботі на дизельному паливі, рафінованій ріпаковій олії та їх сумішах. Дані експериментальних досліджень і результати їх обробки наведені в табл. 3.13.

На основі проведених досліджень можна стверджувати:

1. Питома ефективна витрата палива g_e на кожному з режимів зростає зі збільшенням % ріпакової олії рафінованої в паливі, що пов'язано з монотонним зменшенням нижчої теплоти згоряння палива і деяким зниженням ефективності процесу згоряння.

2. В процесі переходу на кожному зі швидкісних режимів від дизельного палива до ріпакової олії рафінованої зростає масова циклова подача палива $g_ц$, хоча об'ємна циклова подача $Q_ц$ (крім режимів n=1600 хв.$^{-1}$ і 100 % для дизельного палива та n=1400 хв.$^{-1}$ і 100 % рафінованої ріпакової олії) на кожному з режимів залишається практично постійною.

Таблиця 3.13

Показники роботи дизеля 4ЧН12/14 на експлуатаційних режимах

Паливо	g_e,кг/кВт·год	P_s, кПа	$P_т$, кПа	$T_т$, К	G_B, кг/год	α	η_e, %	$g_ц \cdot 10^6$, кг	$Q_ц$, мм^3
n=1600 хв.$^{-1}$, N_e=25,3 кВт, P_e=0,3 МПа									
100 % ДП	0,2623	107,7	128,1	540	349	3,68	32,3	34,6	42,7
25 % РОР	0,3060	109,2	129,0	550	341	3,18	28,6	40,3	48,2
50 % РОР	0,3155	110,5	128,9	552	343	3,21	28,5	41,6	48,2
100 % РОР	0,3305	107,3	127,8	542	332	3,15	29,0	43,6	47,5
n=1800 хв.$^{-1}$, N_e=70 кВт, P_e=0,74 МПа, ρ_{20}=916 кг/м^3									
100 % ДП	0,2397	160	168,5	757	501	2,09	35,3	77,7	95,9
25 % РОР	0,2453	162,3	170,6	752	500	2,11	35,6	79,5	95,0
50 % РОР	0,2576	163,0	170,5	759	507	2,10	34,9	83,5	96,7
100 % РОР	0,2713	161,5	170,1	751	492	2,06	35,4	87,9	96,0
n=1400 хв.$^{-1}$, N_e=64,4 кВт, P_e=0,87 МПа									
100 % ДП	0,2366	135,6	137,1	854	351	1,61	35,8	90,7	112,0
25 % РОР	0,2433	136,8	137,2	840	352	1,62	35,9	93,3	111,4
50 % РОР	0,2543	136,4	136,3	839	348	1,59	35,4	97,5	113,0
100 % РОР	0,2993	136,4	136,8	848	349	1,44	32,1	114,7	125,3

3. Ефективний коефіцієнт корисної дії на кожному з режимів (крім зазначених вище) мало змінюється, коефіцієнт надміру повітря практично однаковий, температура відпрацьованих газів $T_т$ майже постійна.

4. Під час роботи на ріпаковій рафінованій олії відзначається коксування отворів розпилювачів форсунок.

В роботах [39, 75] відмічено, що при конвертації дизеля з нафтового палива на олії конструкція дизеля зазнає суттєвих змін: змінюється конструкція поршня і камери згоряння; форсунка замінюється на одноструменову штифтову; передбачається попередній підігрів палива; замість водяного охолодження застосовується охолодження оливою. Така трансформація дизеля дозволяє забезпечити мінімальну питому витрату очищеної ріпакової олії g_e=0,250 кг/кВт·год (безнаддувний рядний дизель, з безпосереднім впорскуванням, ступінь стиску ε=17, D/S=11,8/13,5, $N_{ш}$=11,5 кВт/л).

В Університеті Дружби Народів (Росія) були проведені дослідження показників роботи дизеля Ч 8.5/11 ($V_л$=0,624 л) з

вихорокамерним способом сумішоутворення на суміші дизельного палива і ріпакової олії в рівному співвідношенні компонентів [87]. Використовували ріпакову олію, що мала цетанове число ЦЧ=34; в'язкість ν_{20}=75 мм^2/с; $Q_н$=37,3 МДж/кг; ρ_{20}=915 кг/м^3. Для бінарної суміші ці показники мали наступні значення: ЦЧ=39; ν_{20}=39,8 мм^2/с; $Q_н$=40 МДж/кг; ρ_{20}=867 кг/м^3. Після випробувань на розпилювачі форсунки та на поверхні вставки камери згоряння був виявлений пухкий наліт бурого кольору. Основні ефективні показники дизеля вдалося відновити після введення присадки до паливної суміші та нанесення каталітично активного покриття на поверхню вставки камери.

Сумісно з «ДержавтотрансНДІпроект», Національним транспортним університетом (НТУ), Національним технічним університетом України «КПІ» [55] проводилися дослідження на режимах навантажувальної характеристики дизеля Д-243 (n=1500 хв.$^{-1}$, N_e від холостого ходу до 37 кВт) з оцінюванням впливу сумішей дизельного палива з ріпаковою олією (домішки олії 10 %, 20 % та 30 %), що спеціально кавітаційно оброблялися [79], на показники роботи двигуна. Відзначалося, що на середніх і високих навантаженнях при роботі на сумішах витрата палива була на 2–5 % вище, ніж на дизельному паливі, але температури відпрацьованих газів були практично однакові. Під час досліджень в ємностях, де знаходилися суміші, було виявлено осад, на стінках – сліди слизу і жиру. Були також проведені випробування того ж двигуна й на тих самих режимах на дизельному паливі і RME. Відзначалося, що при роботі на RME має місце зниження потужності до 5 %, на часткових навантаженнях - підвищення годинної і питомої ефективної витрат палива до 3-6 % у порівнянні з дизельним паливом.

Результати наведених експерементальних досліджень також узгоджуються з результатами випробовувань дизелів СМД-62 та Д-240 з безпосереднім впорскуванням палива при роботі на суміші 25 % дизельного палива та 75 % ріпакової олії, що були проведені в Росії. Вони показали, що при незмінному регулюванні паливної апаратури потужність двигуна зменшується на 4,5 %.

РОЗДІЛ 4. ТОКСИЧНІСТЬ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

В рішеннях міжурядової Конференції в Кіото (Японія) відзначено, що головною причиною виникнення парникового ефекту є збільшення викидів CO_2 в атмосферу у зв'язку з зростанням споживання видобувного органічного палива (вугілля, нафти, газу) [93, 48]. Економія енергоносіїв органічного походження, жорсткі норми викидів шкідливих речовин із відпрацьованими газами двигунів, а також обмеження емісії диоксиду вуглецю (CO_2), змушують більшість країн світового співтовариства шукати шляхи зменшення екологічної небезпеки впливу двигунів внутрішнього згоряння на навколишнє середовище.

4.1. Емісія токсичних компонентів відпрацьованих газів дизельних двигунів при їх роботі на біопаливах рослинного походження

В роботах [20, 41, 10, 55] наведено результати експериментальних досліджень емісії шкідливих речовин з відпрацьованими газами дизелів. На додаток до цих результатів розглянемо експериментальні дані токсичності відпрацьованих газів передкамерного дизеля [125] при його роботі на різних видах палива (табл. 4.1).

В роботі [127] наведені показники токсичності відпрацьованих газів вихорокамерного чотирициліндрового дизеля з турбонаддувом Golf 1,6l TD (D/S = 76,5/86,4; ε=23) при його роботі на режимах дослідницького тесту US–FTP 75 (табл. 4.2) для таких видів палив: рівакова олія (ρ_{15}=920 кг/м^3; ЦЧ=41; вміст сірки =0,001 %; ν_{20}=73,5 мм^2/с); дизельне паливо (ρ_{15}=840 кг/м^3; ЦЧ=52; вміст сірки=0,14 %; ν_{20}=4,35 мм^2/с; $Q_н$=43,47 МДж/кг); суміш рівакової олії та дизельного палива; RME (ρ_{15}=880 кг/м^3; ЦЧ=54; $Q_н$=37,02 МДж/кг; ν_{20}=7,19 мм^2/с; ЙЧ=104).

Таблиця 4.1

Емісія токсичних компонентів відпрацьованих газів дизеля MWM D-916-6 при його роботі за 13-ступінчастим циклом

Викиди, г/кВт	Паливо						Норми Євро II/ Євро III
	RME-1	RME-2	РО	РОР	СО	ДП	
НС	0,115 0,113	0,106 0,123	0,160 0,191	0,164 0,139	0,139 0,145	0,161 0,149	1,1/0,6
СО	1,0 1,0	1,0 1,0	1,2 1,3	1,3 1,2	1,3 1,3	1,8 1,9	4,0/2,0
NO_x	4,3 4, 5	4,5 4,7	4,7 4,1	4,1 4,6	4,5 4,5	4,0 3,8	7,0/5,0
РМ	0,41	-	-	0,44		0,57	0,15/01

Таблиця 4.2

Емісія токсичних компонентів відпрацьованих газів дизеля Golf 1.6l TD при його роботі на режимах дослідницького тесту US-FTP 75

Вимірювання	Паливо	Компоненти, г/милю				
		НС	СО	NO_x	РМ	ПАВ
1	100 % ДП	0,2	0,7	0,9	0,2	90
	100 % РО	0,5	1,3	0,85	0,55	177
2	100 % ДП	0,22	0,81	0,93	0,16	-
	90 % ДП + 10 % РО	0,19	0,83	0,90	0,15	-
	70 % ДП + 30 % РО	0,22	0,96	0,88	0,16	-
3	100 % ДП	0,27	1,07	0,92	0,27	233
	100 % RME	0,14	0,82	1,27	0,23	120

В табл. 4.3 наведені дані перспектив зниження норм CO_2 у відпрацьованих газах двигунів внутрішнього згоряння, що запропоновані в Європі [105].

Таблиця 4.3

Зміна викидів CO_2 з відпрацьованими газами двигунів

Роки	1995	2000	2003	2008	2012
CO_2, г/км	190	175	166	140	120

Кількість диоксиду вуглецю Mco_2 у відпрацьованих газах залежить від витрати палива B_T і відносної частки вуглецю C у складі палива та визначається за відомим стехіометричним співвідношенням:

$$M_{CO_2} = 3{,}67 B_T C, \text{ кг/год.} \qquad (4.1)$$

Робота дизелів на традиційному нафтовому дизельному паливі та альтернативних паливах рослинного походження (олії та їх похідні) залежить від елементарного складу палив (табл. 4.4): ДП – дизельне паливо, РОР – ріпакова олія рафінована, СО – соняшникова олія, RME (Rapsolmethylester) – ріпакові метилові ефіри (біодизель) [125].

Таблиця 4.4

Елементарний склад палив для дизельного двигуна

Склад	Дизельне паливо	Ріпакова олія рафінована	Соняшникова олія	Ріпакові метилові ефіри
C	0,867	0,775	0,776	0,772
H	0,133	0,116	0,115	0,120
O_1	-	0,109	0,109	0,108

В табл. 4.5 і 4.6 наведено результати обробки даних експериментального дослідження, відповідно передкамерного дизеля MWM D - 916-6 з турбонаддувом ($V_л$=6,24л; ε=21) [20] і одноциліндрового дизеля з безпосереднім впорскуванням палива (V_h=1,007л; ε= 17) [20] на режимах зовнішньої швидкісної характеристики.

Як видно з табл. 4.5 і 4.6, при однакових режимних параметрах двигуна кількість диоксиду вуглецю у відпрацьованих газах дизелів для більшості режимів їх роботи на альтернативних паливах ($CO_2^{АП}$ та CO_2^{CO}) менше, ніж на дизельному паливі ($CO_2^{ДП}$).

Таблиця 4.5

Результати розрахунку емісії CO_2 з відпрацьованими газами дизеля для дизельного палива (ДП) та альтернативного палива (АП) на основі олій

Показники режиму	Паливо	g_e, кг/(кВт год)	$B_ч$, кг/год	C	CO_2, кг/год	$\frac{CO_2^{АП}}{CO_2^{ДП}}$
n=2500	ДП	0,266	18,78	0,867	59,70	-
хв.$^{-1}$;	RME	0,284	20,05	0,772	56,76	0,951
N_e=70,6	POP	0,301	21,25	0,775	60,38	1,010
кВт	CO	0,298	21,04	0,776	59,86	1,003
n=2000	ДП	0,249	15,01	0,867	47,71	-
хв.$^{-1}$;	RME	0,266	16,04	0,772	45,40	0,951
N_e=60,3	POP	0,281	16,94	0,775	48,15	1,009
кВт	CO	0,278	16,76	0,776	47,70	0,999
n=1250	ДП	0,239	9,22	0,867	29,31	-
хв.$^{-1}$;	RME	0,250	9,66	0,772	27,34	0,933
N_e=38,6	POP	0,261	10,06	0,775	28,60	0,976
кВт	CO	0,269	10,38	0,776	29,54	1,008
n=1000	ДП	0,246	6,84	0,867	21,74	-
хв.$^{-1}$;	RME	0,257	7,14	0,772	20,22	0,930
N_e=27,8	POP	0,269	7,48	0,775	21,25	0,977
кВт	CO	0,267	7,42	0,776	21,12	0,971

Таблиця 4.6

Результати розрахунку емісії CO_2 з відпрацьованими газами дизельного двигуна для дизельного палива (ДП) та соняшникової олії (СО)

Режим	Паливо	G_e, кг/кВт ·год	$B_ч$, кг/год	С	CO_2, кг/год	$\frac{CO_2^{CO}}{CO_2^{ДП}}$
n=1400 хв.$^{-1}$,	ДП	0,264	2,24	0,87	7,16	-
N_e=8,5 кВт	СО	0,288	2,44	0,776	6,94	0,97
n=1600 хв.$^{-1}$,	ДП	0,271	2,57	0,87	8,19	-
N_e=9,5 кВт	СО	0,292	2,77	0,776	7,88	0,962
n=1800 хв.$^{-1}$,	ДП	0,975	2,88	0,87	9,2	-
N_e=10,5 кВт	СО	0,295	3,09	0,776	8,8	0,956
n=2000 хв.$^{-1}$,	ДП	0,293	3,35	0,87	10,68	-
N_e=11,4 кВт	СО	0,309	3,53	0,776	10,04	0,94

Отже, застосування альтернативних палив рослинного походження зі зменшеною (на 11-12 %) долею вуглецю дозволяє знизити емісію CO_2. Крім того, рослини, з яких виготовляються біопалива, природно поглинають CO_2 під час свого росту. Наприклад, в [47] відзначається, що ріпакове поле за рік зв'язує до 6 т вуглецю (близько 22 т CO_2) на площі в 1 га.

Відносний вміст паливних фракцій - бензинових, газових, дизельних та інших (мазуту) у сирій нафті середнього складу становить відповідно 27, 10, 25 і 38 % [11]. Виробництво 1 т дизельного палива потребує 4 т нафти як сировини і ще 1–3 т нафти, як джерела енергії, що в сумі складає 5–7 т, а в середньому – 6 т нафти [48]. При спалюванні однієї тонни нафти утворюється : 3100 кг CO_2, 20 кг SO_2, 6 кг NO_2, 6–30 кг CO та 0,5 кг вуглеводнів, що не згоріли [11]. Введення в Україні безподаткового виробництва біодизеля й екологічного податку на дизельне паливо дозволить стимулювати виробників біопалива і значною мірою задовольнити власні потреби країни в енергоносіях. Втрати від недоотриманих податків можна буде компенсувати за рахунок продажу іншим країнам зекономленої частини національної квоти України на викиди диоксиду вуглецю [45,48, 93].

4.2. Дослідження димності відпрацьованих газів автомобіля для біопалив на основі олій

Токсичність відпрацьованих газів автомобільних дизелів оцінюють за димністю. Вперше обмеження димності було прийняте в 1972 році Правилами ЄЕК ООН № 24 та Директивою 72/306/ЕЕС. Останні поправки серії 03 до цих правил були внесені у 1986 році. Сучасні екологічні вимоги для автомобілів з дизелями стають дедалі жорсткішими, в тому числі й за показником димності. Так, наприклад, рівні вимог „Євро-2" (2000 року) та „Євро-5" (2008 року) передбачають зменшення димності відпрацьованих газів дизелів (при випробуванні за циклами ESC та ELR) з 0,8 $м^{-1}$ до 0,15 $м^{-1}$, тобто більше, ніж в 5,3 раза.

Нормованим параметром димності дизеля прийнятий натуральний показник (коефіцієнт) поглинання, який характеризує оптичну густину відпрацьованих газів і вимірюється в $м^{-1}$. Випробування проводять на режимі без зовнішнього навантаження і здійснюють не менше, ніж з десятиразовим повторенням розгону і сповільнення дизеля від мінімальної до максимальної частоти обертання колінчастого вала. За результат вимірювань приймається середнє значення коефіцієнта поглинання за останні чотири розгони, коли результати відрізняються між собою не більше, як на 0,25 $м^{-1}$. Значення димності повинно відповідати скоригованому значенню коефіцієнта поглинання, визначеному при затвердженні колісного транспортного засобу чи двигуна згідно з Правилами № 24 або Директивою 72/306/ЕЕС. Якщо такі дані відсутні, або компетентний орган країни-члена ЄС вирішує не застосовувати скориговані значення коефіцієнта поглинання, граничні значення димності становлять для дизелів без наддуву 2,5 $м^{-1}$, з наддувом - 3,0 $м^{-1}$, для дизелів, що відповідають нормам Євро-4, Євро-5 – 1,5 $м^{-1}$. Ця норма стала обов'язковою для всіх колісних транспортних засобів, що вводяться в експлуатацію, або вперше реєструються після 01.07.2008 р. [2].

За даними різних дослідників існують суперечливі висновки щодо зміни димності відпрацьованих газів дизелів при використанні дизельних палив з домішками ріпакової та інших олій. Дослідження [28] показують, що за наявністю різних олій в дизельному паливі, відбувається зміна викидів сажі з відпрацьованими газами двигуна автомобіля.

Суперечливі висновки різних дослідників про зміну в бік зменшення (або збільшення) викидів сажі, можливо, пов'язані з різним способом сумішоутворення в різних двигунах, впливом різних концентрацій в паливі різних олій на процеси сумішоутворення і, відповідно, згоряння. Тому, розроблені теоретичні моделі потребують експериментальної перевірки та уточнення в залежності від способу сумішоутворення, природи олій, їх концентрацій тощо.

Авторами [29] було проведено експериментальне визначення димності відпрацьованих газів автомобільного дизеля при використанні палив з добавками ріпакової, кукурудзяної, соняшникової, оливкової олій. Додатково визначалися показники димності при використанні малих об'ємних концентрацій біоетанолу як домішки до дизельного палива.

Перш за все димність відпрацьованих газів визначається наявністю твердих часток, до складу яких входить сажа. Сажа утворюється під час згоряння вуглеводнів за певних температур та тиску з нестачею (відсутністю) кисню, тобто під час згоряння багатих сумішей. В дизелі такі суміші можуть з'являтися в зонах локалізації залишкових газів (наприклад, між циліндром та поршнем над верхнім компресійним кільцем).

Теоретичні дослідження зміни токсичності відпрацьованих газів дизеля не повністю відбивають реальну ситуацію з димністю відпрацьованих газів, оскільки не повною мірою враховують зміну показників сумішоутворення, а лише пов'язані зі зміною коефіцієнта надміру повітря, тому потребують теоретичного і експериментального уточнення.

Експерименти з вимірювання димності відпрацьованих газів автомобіля МАЗ-5335 з двигуном ЯМЗ-236 за допомогою димоміра „ИНА-109" за методикою [27] та [25] за атмосферного тиску 740 мм.рт.ст., та температури повітря - 1,3 °С проводились в Житомирському державному технологічному університеті [29].

Додатково вимірювалася димність на режимах холостого ходу двигуна. Палива, що використовувалися, були виготовлені безпосередньо перед початком випробувань, однорідність палива забезпечувалася надмірним механічним перемішуванням компонентів, що входили до їх складу. Під час досліджень використовувалися дизельне паливо та наступні сумішеві палива на його основі (об'ємна концентрація): дизельне паливо та 20 %

ріпакової олії; дизельне паливо та 40 % ріпакової олії; дизельне паливо та 20 % кукурудзяної олії; дизельне паливо та 40 % кукурудзяної олії; дизельне паливо та 20 % соняшникової олії; дизельне паливо та 40 % соняшникової олії; дизельне паливо та 20 % оливкової олії; дизельне паливо та 40 % оливкової олії; дизельне паливо та 4 % біоетанолу; дизельне паливо та 8 % біоетанолу.

Результати досліджень наведено на рис. 4.1 та табл. 4.7, додатково розраховані середнє арифметичне чотирьох останніх отриманих значень димності відпрацьованих газів $Kcp_{7\text{-}10}$ та їх середньоквадратичне відхилення $\sigma_{7\text{-}10}$.

Отримані останні чотири значення не утворюють послідовність, що спадає, лежать в зоні шириною не більше, ніж 0,25 $м^{-1}$, що відповідає вимогам [25].

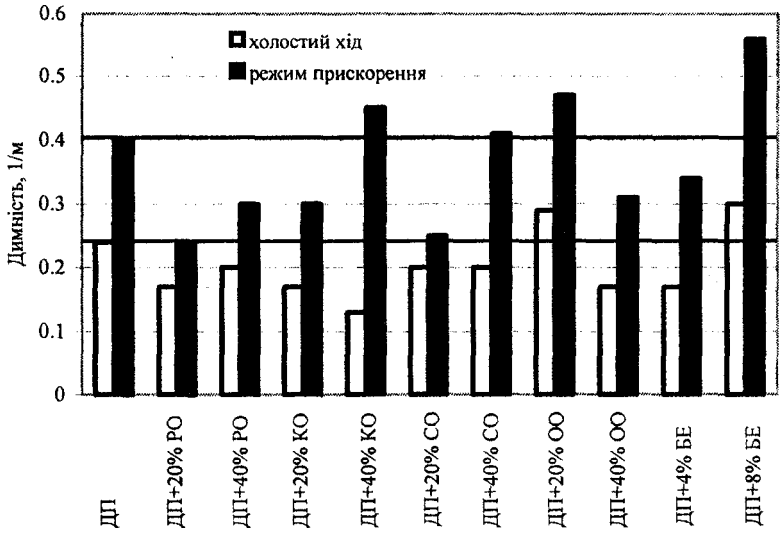


Рис. 4.1. Зміна димності відпрацьованих газів дизеля для дизельного палива (ДП) та сумішей ДП з ріпаковою олією (РО), кукурудзяною олією (КО), соняшниковою олією (СО), оливковою олією (ОО) та біоетанолом (БЕ) [29]

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що наявність різних олій в дизельному паливі різних концентрацій не завжди однозначно змінює димність відпрацьованих газів. Так, наприклад, для дизельного палива з 20 % домішкою кукурудзяної олії спостерігається зменшення димності відпрацьованих газів дизеля на 0,1 $м^{-1}$, а при підвищенні концентрації до 40 % , навпаки, – збільшення на 0,05 $м^{-1}$ відносно дизельного палива. Аналогічна картина для дизельного палива з домішками соняшникової олії, а для дизельного палива з домішками оливкової олії, картина зворотна, – спочатку спостерігається збільшення димності, а при використанні дизельного палива з 40 % за об'ємом оливкової олії – її зменшення відносно дизельного палива.

Таблиця 4.7

Вимірювання	Результати вимірювання димності відпрацьованих газів дизеля при роботі на різних паливах, K, м$^{-1}$										
	ДП	ДП+20 % РО	ДП+40 % РО	ДП+20 % КО	ДП+40 % КО	ДП+20 % СО	ДП+40 % СО	ДП+20 % ОО	ДП+40 % ОО	ДП+4 % БЕ	ДП+8 % БЕ
Холостий хід	0,24	0,17	0,2	0,17	0,13	0,2	0,2	0,29	0,17	0,17	0,3
Режим прискорювання											
1	0,9	0,64	0,66	1,28	1,48	1,38	1,7	1,43	0,81	1,14	1,07
2	0,45	0,32	0,37	0,28	0,43	0,49	0,42	0,62	0,47	0,43	0,49
3	0,42	0,3	0,35	0,35	0,36	0,27	0,42	0,43	0,36	0,31	0,51
4	0,47	0,33	0,35	0,28	0,43	0,31	0,31	0,47	0,36	0,29	0,46
5	0,47	0,33	0,36	0,24	0,36	0,35	0,42	0,47	0,36	0,3	0,49
6	0,44	0,31	0,36	0,24	0,36	0,27	0,31	0,45	0,3	0,43	0,76
7	0,31	0,22	0,3	0,28	0,43	0,27	0,38	0,47	0,29	0,3	0,61
8	0,42	0,21	0.34	0,28	0,49	0,24	0,38	0,44	0,3	0,4	0,53
9	0,42	0,26	0,32	0,32	0,47	0,24	0,38	0,51	0,3	0,3	0,53
10	0,43	0,28	0,29	0,32	0,42	0,27	0,48	0,45	0,36	0,36	0,57
$K_{ср7\text{-}10}$	0,4	0,24	0,3	0,3	0,45	0,25	0,41	0,47	0,31	0,34	0,56
$\sigma_{7\text{-}10}$	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,03	0,03	0,05	0,04

4.3. Зниження викидів поліциклічних ароматичних вуглеводнів шляхом використання біодизельного палива

Викиди дизельного двигуна складаються з суміші сотні складових частинок в газовій формі або ж у формі твердих частинок. Газовий компонент містить вуглекислий газ, кисень, азот, водяну пару, СО, складові з азотом, складові з сіркою і велику кількість низькомолекулярних вуглеводнів. Серед газових вуглеводнів відомі ті, що мають токсичні складові: альдегіди (наприклад, формальдегіди, ауеталедогіди, акролеїн), бензин, 1,3 бутадієн і поліциклічні ароматичні вуглеводні і нітро-поліциклічні ароматичні вуглеводні [103].

Одними із найбільш токсичних компонентів ВГ дизелів є тверді частинки (ТЧ), тобто все те, що відкладається на спеціальному фільтрі. Основними складовими частинами ТЧ є сажа, метали і їх оксиди, сульфати, а також незгорівші частинки палива, моторного масла і вода [20]. Тверді частинки, що присутні у вихлопних газах, складаються із центральної вуглецевої серцевини і адсорбуючих органічних складових, а також невеликої кількості сульфатів, нітратів, металів та інших елементів [103].

Механізм утворення сажі являє собою процес розкладання (піроліза) вуглеводнів у газової фазі в умовах недостачі кисню:

$$C_n H_m \Leftrightarrow nC + 0{,}5m\, H_2 . \qquad (4.2)$$

Кінетика процесу утворення сажі значною мірою залежить від структури молекул вуглеводнів і числа атомів вуглецю в них. Найбільше утворення сажі спостерігається під час окислення ароматичних вуглеводнів. При відносно низьких температурах у ароматичних вуглеводнів переважають реакції полімеризації і конденсації, в результаті чого можуть легко утворюватися поліциклічні сполуки, що у відсутності кисня легко перетворюються у зародки сажі [28].

При цьому можуть також активно утворюватися високомолекулярні поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ). У вихлопних газах автомобілів знайдено близько 20 різних ПАВ. Як вважають автори [20], вони безпосередньо переходять з палива в рідких або газоподібних станах, або ж виникають в результаті

термічного розкладу (піролізу) важких фракцій палива у зонах з нестачею кисню, або ж синтезуються у камері згоряння з більш легких вуглеводнів. Найбільш токсичним, стабільним, а також канцерогенним представником серед ПАВ є бенз(а)пирен $C_{20}H_{12}$, що представляє собою за нормальних умов кристалічну речовину, а в ОГ дизельного палива він може знаходиться в рідкому, твердому або ж газоподібному станах [20].

Можна стверджувати, що канцерогени, що поступають в атмосферу, є продуктами неповного згоряння органічних палив, тобто продуктами діяльності людини. Незважаючи на різноманітність канцерогенних речовин, що утворюються при згорянні палива, присутність їх в продуктах згоряння в повітрі оцінюється за наявністю бенз(а)пірена.

Стехіометричне рівняння утворення бенз(а)пірена:

$$C_6H_2 + 3C_2H_2 + 4C_2H = C_{20}H_{12}, \qquad (4.3)$$

де C_6H_2 – напіврадикал, що є зародком сажі;
C_2H_2, C_2H – елементарні будівельні блоки.

Як правило, бенз(а)пирен утворюється в локальних збагачених паливом зонах камери згоряння при відносно низьких температурах. Як відмічено у роботі [28] для зниження рівня утворення бенз(а)пірена та інших канцерогенних сполук (бенз(а)атрофен, бенз(х)пірен, бенз(х)атрофен тощо) необхідно здійснювати високоякісне розпилювання палива і повне його змішування з повітрям. Тому питання сумішоутворення з точки зору виділення канцерогенів має важливе значення.

Канцерогенні властивості ПАВ є настільки виражені, що навіть при періодичному контакті шкіри людини с цими вуглеводнями, що знаходяться у паливі відмічені передракові утворення – кератози, папіломи та ін. Бензопірен та інші ПАВ, що містяться у повітрі, разом з опадами потрапляють в землю і відкладаються у рослинній масі сільськогосподарських культур. Частково найбільші концентрації ПАВ відмічаються у пробах білокачанної капусти. Коли людина використовує цю їжу, ПАВ акумулюються клітинами, поступово накопичуючись до критичних концентрацій [20]. Дослідником [102] була проаналізована велика кількість наукових робіт, які показали, що використання біодизельного палива зменшує викиди ПАВ і

мутагенну активність. Більшість якісних досліджень доводять, що викиди альдегідів також зменшуються у випадку добре очищеного біодизельного палива. В той же час було відмічено, що викиди акролеїна можуть збільшуватися, якщо гліцерин або гліцериди є присутніми у біодизельному паливі. Слід відмітити, що аналіз [102] виконаний в основному на соєвому і менше – на ріпаковому біодизельному паливі .

В одному із університетів Швеції (Chalmers University), були виконані експерименти [111], використовуючи маленький реактор, що був підігрітий до 550 °С. Один із парадоксальних висновків, зроблених дослідниками: було відмічено в 10 раз більше викидів бензапірена в частинках біодизеля, ніж шведського дизельного палива МК1. Дослідники з Німеччини довели, що такий хибний результат був пов'язаний з використанням маленького реактора. Були виконані детальні експерменти з досліджені метилового ефіру ріпакової олії як палива (RME) у порівнянні з різними видами палива на двигуні Daimler Crysler [111].

Двигун Mercedes-Benz OM 904 LA з потужністю 125 кВт, як правило викоистовується для вантажівок легкої ваги. Було досліджено, що при використанні RME зменшуються всі види викидів, спостерігалося незначне збільшення окисів азоту.

Як відомо, дизельний двигун є джерелом частинок (діаметр менше 2.5 мікрометра) та ультра- частинок (діаметр менше 0,1 мікрометра). Найбільші викиди трапляються від частинок розміром від 10 до 300 нанометрів. Дослідження [111] показали, що використання RME веде до більшої кількості частинок розміром від 10 до 40 нанометрів і меншої кількості частинок більшого діаметра. Ароматичні вуглеводні (напр. бензини) були знайдені в основному на режимах незначних навантажень. У порівнянні з дизельним паливом RME мало значно менші викиди на цих режимах.

Результати тесту показали зниження алкенів (альдегіди і кетони: формальдегіди, ацеталдегіди, акролеїн) на 30 % у порівнянні з традиційним дизельним паливом. Автори вважають, що можливо це зв'язано з нижчим вмістом сірки.

Дуже важливим є той факт, що RME показував мутагенний ефект у 5 разів менше, ніж традиційне дизельне паливо, що зменшує риск ракових захворювань при використанні цього палива. Також спостерігалася кореляція між вмістом сірки у паливі

і мутагенністю. Було також вказано, що ароматичні складові мають вплив на мутагенний ефект [111].

На основі даних [10, 41, 55, 121,125] табл. 4.1–4.2, 4.7 та рис. 4.1 можна зробити наступні висновки про екологічну небезпеку відпрацьованих газів дизелів, що працюють на біопаливах на основі олій:

1. При роботі передкамерного і вихорокамерного дизелів [125, 121] найменша кількість токсичних компонентів у відпрацьованих газах (у порівняні з МЕ інших олій) спостерігається на ріпакових метилових ефірах RME (крім оксидів азоту NO_x). Збільшення викидів NO_x пов'язано з тим, що метилові ефіри олій є кисневмісними паливами у порівнянні з дизельним паливом, тому в момент максимальних температур в циліндрі дизеля відбувається додаткове утворення оксидів азоту. Одним із заходів, що сприяє зниженню емісії NO_x при роботі на RME, є зменшення кута випередження впорскування палива [119].

2. Визначено, що при згорянні RME в дизелях із передкамерою (безпосереднє впорскування) зменшується емісія наступних токсичних компонентів: CO-12(10) %, HC-35(10) % , PM-36(24) %, сажі-50(52) %. При цьому збільшується NO_x-8(12) %.

3. В RME практично відсутня сірка, тому у відпрацьованих газах дизельних двигунів відсутні викиди SO_2 і SO_3, які є однією з причин кислотних дощів. Відсутність сірки в RME дозволяє ефективно використовувати окисні каталізатори типу «RME-Oxikat», що забезпечують подальше зниження токсичних компонентів [60,119,].

4. Деякі дослідники відмічають, що при роботі на ріпаковій олії майже у 2 рази зростає у відпрацьованих газах кількість поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), що законодавчо не нормуються. З іншого боку, дослідження німецьких вчених [118] показали, що ПАВ, які одержуються внаслідок роботи адаптованого двигуна на ріпаковій олії, мають значно нижчий раковий потенціал у порівнянні з дизельним паливом.

В той ж час при роботі на RME кількість ПАВ знижується майже вдвічі в порівнянні з дизельним паливом. Робота дизельного двигуна на RME спричиняє мутагенний ефект у 5 разів

менший, ніж традиційне дизельне паливо, що зменшує риск ракових захворювань при використанні цього палива [111].

5. Для дизелів із безпосереднім впорскуванням палива використання ріпакової олії призводить до різкого зростання оксидів азоту (на 20-40 % в діапазоні P_e=0,2-0,35 МПа), оксиду вуглецю з 2,5 % при P_e=0,2 МПа до 5 % при P_e=0,4 МПа, а димність відпрацьованих газів зростає при цьому практично втричі [10].

6. При роботі дизеля Д-243 (n=1500 хв.$^{-1}$) за навантажувальною характеристикою [55] на дизельному паливі та його сумішах з ріпаковою олією (10 %, 20 % та 30 %) концентрація CO, CO_2, HC, а також димність, практично не змінюються. При цьому відзначається незначне зростання концентрації оксидів азоту. При роботі дизеля Д-243 на RME відбувається зниження CO_2 на 20–35 % в усьому діапазоні навантажень, незначне зниження емісії CO та HC, димність практично однакова, NO_x зростає на 10–15 %.

7. Наявність домішок олій в дизельному паливі різних концентрацій впливає на димність відпрацьованих газів дизельного двигуна. За ознакою вагомості впливу на димність відпрацьованих газів дизеля олії , що досліджувалися як домішки в 20 % за об'ємом до дизельного палива, можна рекомендувати в наступному порядку: ріпакова, соняшникова, кукурудзяна. Оливкова олія в зазначеній концентрації призводить до збільшення димності відпрацьованих газів відносно дизельного палива на 0,07 м$^{-1}$ [29] .

8. За ознакою зменшення впливу на димність відпрацьованих газів дизеля ЯМЗ-236 олії, що досліджувалися як домішки в 40 % за об'ємом до дизельного палива, можна рекомендувати в наступному порядку: ріпакова та оливкова. Соняшникова та кукурудзяна олії таких концентрацій призводять до збільшення димності відпрацьованих газів відносно дизельного палива і не можуть (в названих концентраціях) з цієї точки зору бути рекомендовані як домішка до дизельного палива [29] .

9. Автори [29] вважають, що найбільш перспективною з точки зору зменшення димності відпрацьованих газів дизеля можна вважати ріпакову олію як добавку до дизельного палива, яка в концентрації 20 % за об'ємом на холостому ході зменшує димність

відпрацьованих газів на 0,07 $м^{-1}$, на режимі вільного прискорення - на 0,16 $м^{-1}$, а 40 % за об'ємом - на холостому ході на 0,04 $м^{-1}$, на режимі вільного прискорення - на 0,1 $м^{-1}$ у порівнянні з дизельним паливом.

10. Для зменшення димності відпрацьованих газів дизеля ЯМЗ-236 перспективними можна вважати домішки біоетанолу в 4 % за об'ємом до дизельного палива, які зменшують димність відпрацьованих газів на 0,06 $м^{-1}$ [29].

4.4. Висновки до розділу 4

На основі представленого вище матеріалу зроблено аналіз ефективних показників і екологічних характеристик дизелів з різними способами сумішоутворення при їх роботі на експлуатаційних режимах з використанням різних видів палив: дизельного, олій, їх сумішей та біодизеля (метилові ефіри ріпакової олії). Інформація про конструкцію двигунів, їх розмірності, режимні параметри, види використовуваних палив і ефективних показників наведені в табл. 4.8.

Аналізу піддавалися дизелі, конструктивні і режимні параметри яких змінювалися в межах: діаметр D і хід поршня S відповідно, 80-120 мм та 75- 140 мм, ефективна потужність Ne, частота обертання колінчастого вала n і середній ефективний тиск Pe, відповідно, 1,89-80,6 кВт (1000-3000 хв.-1) та 0,2-0,87 МПа; типи камер згоряння - розділені (передкамера і вихрова камера), напіврозділена (камери типу ЦНІДІ) та нерозділена. Проведений аналіз дає можливість зробити наступні висновки:

1. Найвищий ефективний коефіцієнт корисної дії спостерігається на передкамерному дизелі при його роботі на метилових ефірах ріпакової олії з підвищеним вмістом ерукової кислоти (RME-2, η_e=37,7 %), але з іншого боку підвищений вміст ерукової кислоти підвищує в'язкість палива, що потребує зниження за допомогою добавок до біодизельного палива.

Таблиця 4.8

Конструктивні особливості і показники роботи дизелів на дизельному й альтернативних паливах

Параметри; паливо	Країна				
	Німеччина [125]	Польща [41]	Болгарія [97]	Росія [10]	Україна [91]
Марка двигуна	MWM D 916-6	AD3.152	D 3900	МД-6	СМД-17Н
Наддув	ТН*+ПОП**	-	-	-	ТН*
D/S, мм/мм	-	-	-	80/75	120/140
Ступінь стиску	21	16,5	-	-	15,5
Камера згоряння	Передкамера	Нерозділена	Нерозділена	Нерозділена	Типу ЦНІДІ
Режими роботи	Швидкісний	2 режим	Швидкісний	Навантажувальний	Навантажувальний
Діапазон n, хв.$^{-1}$	1000/ 2500	1300/ 2000	1200/ 2300	3000	1400/1800
Діапазон N_e, кВт	27,8/ 80,6	14,4/ 28,0	30,4/ 52,5	1,89/4,24	25,3/70
$\eta_{e\,max}/P_e$, (% /бар)					
ДП	35,8/6,69	36,1/6,7	33,8/-	29,0/4,5	35,8/8,7
RME	37,7/5,34	-	-	-	-
РО	36,4/5,630	27,1/6,1	-	22,4/4,0	35,4/7,4
СО	36,4/5,63	30,2/6,3	31,8/ -	-	-
Соєва олія	-	24,7/5,3	-	-	-

*ТН – турбонаддув;

**ПОП – проміжне охолодження повітря.

2. З високими η_e відбувається згоряння олій в передкамерному дизелі і дизелі з напіврозділеною камерою згоряння (типу ЦНІДІ). Це пов'язано з особливостями процесів сумішоутворення і згоряння в розділеній камері: широкомасштабна турбулентність у процесі стиску; інтенсивне перемішування палива, що розпилюється, з повітрям; наявність високотемпературних поверхонь камери згоряння. Все це забезпечує ефективну роботу двигуна на різних видах палива при менших коефіцієнтах надміру повітря і тисках впорскування палива. Об'ємно-плівкове сумішоутворення (камера типу ЦНІДІ) також забезпечує задовільне протікання процесів випаровування, сумішоутворення і згоряння олій та їх сумішей, що мають більшу густину і в'язкість, (більш інтенсивне випаровування з гарячих стінок камери палива, що попало на стінку; менша ймовірність влучення паливних струменів на стінки гільзи; гомогенізація паливо-повітряної суміші за рахунок утворення вихорів тощо)

3. Застосування олій як палива у високооборотних дизелях малої потужності при діаметрі циліндра менше 85 мм і з нерозділеною камерою згоряння малоефективне через порушення процесів сумішоутворення та згоряння. Зниження ефективності тепловиділення в циліндрі дизеля пов'язано з підвищеною (на 9–11 %) густиною та в'язкістю (на порядок) біопалива, що призводить до збільшення діаметра крапель розпиленого палива, зростання далекобійності паливного струменя і зменшенню його кута розкриття, сприяє влученню частини палива на стінки циліндра, призводить до затягування процесу випаровування більш великих крапель палива, зниженню швидкості тепловиділення у дифузійній фазі згоряння. Необхідно додати, що підвищена температура спалахування олій 473-523К (дизельного палива 313-323К), більш високі температури випаровування і кипіння олій (під час розганяння під атмосферним тиском відбувається їх термічне розкладання) також сприяють зниженню швидкості згоряння.

4. Застосування олій в дизелях з нерозділеною камерою згоряння є нераціональним через підвищене сажоутворення в камері згоряння, що призводить до значного зношування циліндро-поршневої групи.

5. Застосування як палива лише ріпакової олії призводить до збільшення токсичності відпрацьованих газів, ускладнює пуск

холодного двигуна і є живильним середовищем для росту бактерій. Тільки після проведення тривалих експлуатаційних досліджень можна говорити про обмежене використання сумішей олій з дизельним паливом у співвідношеннях 1:9-3:7.

6. В умовах України як альтернативне паливо рослинного походження можуть використовуватися метилові (етилові) ефіри жирних кислот ріпакової (соняшникової) олії та їх бінарні суміші з нафтовими паливами.

7. Неоднозначний вплив концентрації соняшникової, кукурудзяної, оливкової олій на димність відпрацьованих газів дизеля вимагає необхідність пошуку їх оптимальних об'ємних концентрацій у паливі.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

В даній книзі показані результати досліджень, проведені в основному в Національному технічному університеті "ХПІ" та Житомирському державному технологічному університеті протягом 1999–2007 років, які відносяться до біопалив на основі олій для дизельних двигунів.

Однією із фізичних властивостей олії (ріпакова, соєва, соняшникова, кокосова та ін.), що обмежує використання їх у чистому вигляді для дизельних двигунів, є висока в'язкість олій, яка може бути, наприклад, знижена за допомогою хімічного процесу переестерифікації. Біопаливо, одержане внаслідок переетерифікації (біодизель), знайшло широке поширення у країнах Європи (в основному, біодизель на основі ріпакової олії) та США (як правило, біодизель на основі соєвої олії).

На відміну від біодизеля, застосування олій як палива у дизельних двигунах потребує зміни конструкції двигуна або підігрівання олії чи змішування її з дизельним паливом.

Порівняння розпилювання дизельного палива та альтернативних палив, що проведено в монографії, показало, що альтернативні палива мають більші діаметри крапель та довжини конуса розпилювання, ніж дизельне паливо. Параметри розпилювання для біодизельних палив близькі до дизельного палива.

Проведений в монографії огляд та аналіз физико-хімічних властивостей різних біопалив, особливостей роботи двигуна на цих біопаливах допоможе раціональному їх використанню у двигунах автомобілів.

Результати подальших досліджень авторів книги, пов'язані з біопаливами можна знайти в наступних роботах [20, 34–38, 66, 67, 108].

ЛІТЕРАТУРА

1. Абрамчук Ф.И. Марченко А.П., Разлейцев Н.Ф. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности. – К.: Техника, 1992. –272 с.
2. Автомобільний транспорт України: стан, проблеми, перспективи розвитку: монографія / Держ. автотрансп. наук.-досл. і проект. інст.; За заг. ред. А.М. Редзюка. – К.: ДП «ДержавтотрансНДІпроект», 2005. – 400 с.
3. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії / О.Адаменко, В. Височанський, В. Льотко, М. Михайлов. За ред. докт. техн. наук, проф. В. Льотко. Підручник для енергетичних і екологічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Івано-Франківськ, "Полум'я", 2000. 225 с.
4. Альтернативні палива та інші нетрадиційні джерела енергії. - / О. Адаменко, В. Височанський, В. Льотко, М. Михайлів. – За ред. д.т.н., проф. Льотко В./ - Монографія. – Івано-Франківськ: ІМЕ. 2001. – 432 с.
5. Альтернативное топливо #5. http:// fuelalternative.com.ua
6. Альтернативное топливо #10 (14), октябрь 2008.
7. Альтернативное топливо #9 (13), сентябрь 2008.
8. Аристархова Е. О., Грабар І. Г., Колодницька Р.В. Зниження токсичності викидів автомобілів і радіоактивного забруднення ґрунту шляхом використання ріпака. //Вісник ЖІТІ. – 2001. Спеціальний випуск. С. 38 – 39.
9. Аристархова Е.О., Грабар І.Г., Колодницька Р.В. Використання ріпакової олії як автомобільного палива (проблеми та перспективи) //Вісник ЖІТІ. – 2002. – №2 (21) – С. 3 – 7.
10. Вальехо П., Гусаков С.В., Девянин С.Н. Испытания дизеля МД-6 при работе на рапсовом масле.-«Тракторы и сельскохозяйственные машины». – № 4. – 2001.– С. 42-45.
11. Гершман И.И., Лебединский А.П. Многотопливные дизели. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.

12. Говорущенко Н.Я., Туренко А.Н. Системотехника транспорта (на примере автомобильного транспорта). // Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Харьков: РИО ХГАДТУ, 1999. – 468 с.
13. ГОСТ 21261-91. Нефтепродукты. Метод определения высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. – Изд-во стандартов. 1992. – 23 с.
14. ГСТУ 46.072:2005. Олія ріпакова.Технічні умови. Київ.-Мінагрополітика.-49с.
15. ДСТУ 4534:2006. Олія соєва. Технічні умови. Київ. – Держспоживстандарт України.-35с.
16. Грабар І.Г., Ільченко А.В., Колодницька Р.В. Зміна витрати моторних палив з добавками ріпакової олії // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2004. – № II(29). – С. 19-23.
17. Грабар І.Г., Колодницька Р.В., Ільченко А.В. Дослідження процесів утворення паливної суміші на основі ріпакової олії //Вісник ЖІТІ. – 2003. – № 1 (24) – С. 21–24.
18. Гуреев А.А., Серегин Е.П., Азев В.С. Квалификационные методы испытаний нефтяных топлив. – М.: Химия, 1984. – 200 с.
19. Гуреев А.А., Камфер Г.М. Испаряемость топлив для поршневых двигателей. – М.: Химия, 1982. – 264 с.
20. Девянин С. Н., Марков В.А., Семенов В.Г. Растительные масла и топлива на их основе для дизельных двигателей. – Х.: Новое слово, 2007. – 452 с.
21. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для втузов по спец. «Двигатели внутреннего сгорания» / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
22. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для студ. ВТУЗов, обучающихся по спец. «Двигатели внутреннего сгорания» / В.П. Алексеев, Н.А. Иващенко, В.И. Ильин и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 288 с.

23. Дослідження фізико-хімічних показників альтернативного біопалива на основі ріпакової олії / Марченко А.П., Семенов В.Г., Семенова Д.У., Ліньков О.Ю.// Машиностроение: Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сборник научных трудов. Выпуск 101. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – С. 159–163.
24. ДСТУ 3868-99. Топливо дизельное. Технические условия.- Киев. Госстандарт Украины. – 1999.– 11 с.
25. ДСТУ 4276:2004 „Атмосфера. Норми і методи вимірювань димності відпрацьованих газів автомобілів з дизелями або газодизелями. – К.: Держкомитет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, - 2004. – 8 с.
26. ДСТУ6081:2009. Національний стандарт України. Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги.-Київ. Держспоживстандарт України, 2009-11с.
27. Измеритель переносной непрозрачности отработавших газов автомобилей ИНА-109, паспорт 2.850.250 ПС. – 50 с.
28. Ільченко А.В., Колодницька Р.В., Кур'ята В.П. Вплив добавок рослинних олій на вміст сажі у відпрацьованих газах двигуна автомобіля // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Даля. – 2005. – № 6(88). – С. 225-229.
29. Ільченко А.В., Кур'ята В.П. Вплив домішок рослинних олій до дизельного палива на димність відпрацьованих газів двигуна // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2007. - № 1(40). - С. 29-33.
30. Ільченко А.В., Кур'ята В.П. Математична модель витрати палива автомобіля з урахуванням збіднення паливо-повітряної суміші (на прикладі моторних палив з домішками олій рослинного походження) // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2005. - № 1(32). - С. 15-19.
31. Каніло П.М., Бєй І.С., Ровенський О.І. Автомобіль і навколишнє середовище. – Харків: Прапор, 2000 – 304 с.

32. Ковалько М.П., Денисюк С.П. Відп. ред. Шидловський А.К. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України. – Київ: УЕЗ, 1998. – 506 с.
33. Колодницька Р.В. , Карімі К., Круа К., Хайкель М.Р., Сажина Е.М. Моделювання довжини конуса розпилювання у дизельних двигунах (cofm- модель). Матеріали XI Міжнар. науково-технічної конф. Севастополь 2008. Вісті автомомбільного-дорожнього інституту 2008. № 1 (6). – С. 51 – 55. (ISSN 1990-7796).
34. Колодницька Р.В. Чи можуть автомобілі їздити на чистій ріпаковій олії? Вісник Донецького інституту автомобільного транспорту. 2006. № 2-3. – С. 26 – 31.
35. Колодницька Р.В., Ільченко А. В.. Вплив в'язкості біопалив на їх витрату та параметри впорскування. Матеріали IX Міжнар. науково-технічної конф. Севастополь 2007.
36. Колодницька Р.В. Перспективи застосування олії коноплі як добавки до палива для дизельних двигунів. Матеріали XII Міжнар. науково-технічної конф. Севастополь 2009.
37. Колодницька Р.В. Моделювання розпилювання біодизельного палива на основі конопляної олії //Вісник СНУ ім. В. Даля.- 2010- №6 (148).- С.41-46.
38. Кравченко А.П., Ильченко А.В., Колодницкая Р.В. Энергосберегающие технологии на основе добавок растительных масел в топливо автомобиля с дизельным двигателем. Политранспортные системы. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2009. – С. 470-475.
39. Куликов А. Дизели меняют рацион.- Наука и жизнь, № 6,1993, с. 26-30.
40. Лышевский А.С. Процессы распыливания топлива дизельными форсунками. – М.: Машгиз, 1963. – 180 с.
41. Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания .- М, : МАДИ (ТУ), 2000. - 311 с.
42. Моделирование фракционной разгонки нефтепродуктов с учетом погрешностей измерения температуры / Спиридонов А.В., Жаркова О.Н., Абаев Г.Н. и др // Химия и технология топлив и масел.- 1998.- №4.- С. 41-43.

43. Определение физических показателей альтернативных бинарных топлив на основе биодизеля и газового конденсата. – В.Г. Семенов, О.Ю. Линьков, В.Л. Храбрых, Н.И. Литвинцева. – Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сборник научных трудов. Выпуск 110. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – с. 100-103.
44. Орлов В.В. Основні екологічні проблеми в країнах ЄС // Автошляховик України. – № 4. – 2003. – С. 20-21.
45. Осипчук И. Сумма первой сделки по «продаже» Голландии украинского воздуха составит около трех миллионов долларов. Угроза глобального потепления делает нашу страну потенциальным продавцом необычного товара // Факты и комментарии. – 1998. – 28 окт. - С.8.
46. Пат. 48615А. Україна, МКИ С10L1/00. Спосіб одержання біопалива для дизелів. Пат. 48615А. Україна, МКИ С10L1/00 / Семенов В.Г. (Україна). - №2001107266; Заявл. 25.10.2001; Опубл. 15.08.2002. Бюл. №8.
47. Перегінець В. Біодизель. Сучасне виробництво біодизельного палива з рослинної біомаси. – Київ. – 2001. – 74 с.
48. Перспективи в Україні для мастильних матеріалів на біологічній основі (Огляд). – В.І. Дзюба, О.Л. Ільницька, Г.І. Миронюк, І.М. Василькєвич // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. - № 2. – с.24-27.
49. Применение растительного масла в дизелях в качестве добавки к топливу. - / Крайнюк А.И., Васильев И.П., Петренко А.Е., Корчанова Ю.А. – Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2001, № 6, с. 16-20.
50. Пьядичев Э.В. Расширение ресурсов дизельных топлив за счет газовых конденсатов.- Ташкент: Фан, 1990. 112 с.
51. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. – М.:Наука, 1977. – 344 с.

52. Расчетное исследование особенностей процесса дизеля СМД-31 при его работе на традиционном дизельном топливе и метиловых эфирах рапсового масла. /А.П. Марченко, В.Г. Семенов, И. И. Сукачев, О. Ю. Линьков.- Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков, 2000. - Вып.19. – с. 155-157.
53. Расчеты основных процессов и аппаратов нефтепереработки: Справочник / Рабинович Г.Г., Рябых П.М., Хохряков П.А. и др.; Под. ред. Е.Н.Судакова. – 3-е изд, перераб. и доп. – М.: Химия, 1979. – 568 с.
54. Рафальсон А.Б. Разработка усовершенствованной технологии рафинации рапсового масла. – Автореферат дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – Л. 1987. – 28 с.
55. Редзюк А.М., Рубцов В.О., Гутаревич Ю.Ф. Проблеми та перспективи використання рослинної олії як моторного палива.- "Автошляховик України", № 1,1999, с. 4-6.
56. Руденко А. Бомба под нефтяных магнатов // Автомобильный транспорт. – 2001. – № 9. – с. 21–23.
57. Руководство по методам исследования, технохимическому контролю и учету производства в масло-жировой промышленности.- Т. V / Под ред. В.П. Ржехина, А.Г. Сергеева. – Л., 1969. – 502 с.
58. Свиридов Ю.Б., Малявинский Л.В., Вихерт М.М. Топливо и топливоподача автотракторных дизелей. – Л.: Машиностроение. Ленингр. от-ние, 1979. – 248 с.
59. Свиридов Ю.Б., Пьядичев Э.В. Об использовании газовых конденсатов для работы дизелей. – Труды ЦНИТА, 1974, вып. 60, с. 28-37.
60. Семенов В.Г. , Трофименко Е.В. «Биодизель»: «у них» и у нас.- «Авто Центр», украинский автомобильный еженедельник, № 8, 2001, с. 28-29.
61. Семенов В.Г. Альтернативне паливо для дизеля. – Патент України. №41709А. C10L1/04, F02B1/00. – Опубл. 17.09.2001. Бюл. №8.

62. Семенов В.Г. Анализ показателей работы дизелей на нефтяных и альтернативных топливах растительного происхождения. – Вісник Національного технічного університету "ХПІ": Збірка наукових праць. Харків: НТУ "ХПІ", - 2002, № 3, с. 177-197.
63. Семенов В.Г. Біодизель в Україні чи з України? Зеркало недели» №26-27,11-31.07.09 http://biodiesel.org.ua
64. Семенов В.Г. Зинченко А.А. Вычисление теплоты сгорания биотоплив по данным калориметри и хроматографии.-Химия и технология топлив и масел.-М.,ГУП Издательство» Нефть и газ» РГУ нефти и газа им.Н.М.Губкина, №6, 2006, с.42-44.
65. Семёнов В.Г. Определение теплоты сгорания биотоплив растительного происхождения. – Труды Одесского политехн. ун-та: Науч. и произв.-практич. сб. по техн. и естеств. наукам. – Одесса, 2001. – Вып. 5. – с. 218 – 221.
66. Семенов В.Г. Оптимизация состава бинарного альтернативного дизельного топлива. Химия и технология топлив и масел. - Москва, ГУП Издательство «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. Н.М. Губкина, № 4, 2003, с.29-33
67. Семенов В.Г. Расчетно-экспериментальные исследования по определению цетанового числа и теплоты сгорания биодизельного топлива.:VI Международная конференция «Новые горючие и смазочные материалы с присадками».-Сборник трудов конференции. С-Пб.» Академия прикладных наук», 28сентября-01октября 2010, с.182-184.
68. Семенов В. Г. Україна без нафти: стан і перспекиви розвитку виробництва та застосування екологічно чистого біодизельного палива. Наука та інновації. 2008. Т.4. N 1. С. 81-86.
69. Семенов В.Г. Фракционная разгонка метиловых эфиров жирных кислот растительных масел при атмосферном давлении. – Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Зб. наук. праць. Харків: НТУ "ХПІ", - 2001. № 15. – с. 164-168.

70. Семенов В.Г. Энергетический потенциал традиционных и альтернативных топлив для ДВС./ Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: Материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., Владим. гос. ун-т Владимир, 2001. - с. 408-410.

71. Семенов В.Г., Зинченко А.А. Отработанный фритюрный жир - исходный продукт получения альтернативного топлива растительного происхождения. - Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2002. №9, т. 2. - с. 105-108.

72. Семенов В.Г., Зінченко О.А. Визначення хімічного складу альтернативних палив рослинного походження методом газорідинної хроматографії. - Збірник наукових праць. – ХарДАЗТ, 2002. Вип.52, с.66-74.

73. Семенов В.Г., Колодницька Р.В. Визначення фізико–хімічних показників альтернативних палив рослинного походження для дизелів сільськогосподарських машин // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2003. – № 3(27). – С. 57–65.

74. Семенов В.Г., Кухта В.Г. Дизельное топливо из рапса. – «Хранение и переработка зерна». Днепропетровск., 2000, № 12, с. 59-61.

75. Серебряный М.И. Тракторные дизели работают на растительном топливе.- «Тракторы и сельскохозяйственные машины », № 3,1992, с. 42-44.

76. Серегин Е.П., Бугай В.Т., Россинский В.М. Влияние состава топлива на его сгорание в быстроходных дизелях. – Химия и технология топлив и масел. - №4, 1978, с. 22-24.

77. Семенов В.Г. Отклонение от аддитивности физических показателей смесей углеводородного топлива и производных рапсового масла (третье сообщение). Машинобудування: Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Випуск 101.-Харків:ХДПУ,2000.-с.234-241.

78. Сомов В.А., Ищук Ю.Г. Судовые многотопливные двигатели. – Л.: Судостроение, 1984. – 240 с.
79. Спосіб приготування рідкого пального.- Патент України № 14612, кл. С10 L1/00, опубл. 25.04.97. Бюл. № 2, 1997.
80. Стандарт Германии DIN V 51606. Жидкие топлива. Дизельное топливо из метиловых эфиров растительных масел (RME). – 3 с.
81. Статистичний щорічник України за 2004 рік: Стат. збірник / Державний комітет статистики України, за ред. Осауленка О.Г., відп. за випуск Головко В.А. – К.: Консультант, 2005. - 592
82. Технология производства продукции общественного питания: Учебник для технол. фак-тов торг. вузов / Алешина Л.М., Мглинец А.И. и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Экономика, 1987. – 408 с.
83. Тимофеев В.А., Батырбаев М. Д., Схаляхо А.С. Газ – экологически чистое топливо. – М.: «ЛИФН», «АС», 1993. – 63 с.
84. Тютюнников Б.Н. Химия жиров. – М.: Пищевая промышленность, 1966. – 632 с.
85. Устименко В.С. Поліпшення екологічних показників автомобілів та розширення паливної бази автомобільного транспорту шляхом застосування біоетанолу: Дис... канд. техн. наук. - Київ, 2006. - 178 с.
86. Федак Н.В. Технологія очищення соняшникової олії після фритюрного смаження у підприємствах харчування: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.18.16/Харків, 1997 – 17 с.
87. Фомин В.М., Ермолович И.В., Халиль А. Сатер. Использование рапсового масла в качестве моторного топлива для дизелей.- «Тракторы и сельскохозяйственные машины», № 5,1997, с. 11-12.
88. Фукс И.Г., Евдокимов А.Ю. и др. Экологические аспекты использования топлив и смазочных материалов растительного и животного происхождения. – Химия и технология топлив и масел, 1992, №6, с. 36-40.
89. Химия жиров /Б.Н. Тютюнников, З.И. Бухштаб, Ф.Ф. Гладкий и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Колос, 1992. – 448 с.

90. Широкомасштабные эксперименты по введению рапсового масла в дизельное топливо // Автомобильная промышленность США. – 1997. – № 3. – С. 5-8.
91. Экспериментальное исследование автотракторного дизеля СМД-17Н при его работе на рапсовом масле и его смесях с дизельным топливом.-/ Шеховцов А.Ф., Марченко А.П., Минак А.Ф., Линьков О.Ю.- Вестник НТУ «ХПИ». Темат. сб. науч. трудов «Двигатели внутреннего сгорания». Харьков, НТУ «ХПИ» - 2001, № 2, с. 119-123.
92. Энглин Б.А., Россинский В.М., Туровский Ф.В. Оптимизация характеристик летних дизельных топлив. – Химия и технология топлив и масел. - №11, 1981, с. 12-14.
93. Энергетика и парниковый эффект. Тревоги, реалии, проблемы (Обзор). – А.А. Долинский, Е.Т. Базеев, В.А. Дюков, В.М. Диденко. / Праці Міжнародної Конференції " Енергетична безпека Європи. Погляд у XXI століття (22-25 травня 2001р., Київ) с. 163-167.
94. Allen C.A.W. Prediction of biodiesel fuel atomization characteristics based on measured properties. Thesis. Dalhousie University- Daltech. Halifax, Nova Scotia. Canada. 1998. p. 220.
95. Boehman A., Alam M., Song J., Acharya R, Szybist J.and Zello V. Fuel formulation effects on diesel fuel injection, combustion, emissions and emission control. Proceedings of DOE 2003 Diesel Engine Emissions Reduction Conference August 24-28, 2003, Newport, RI.
96. Choi CY, Reitz RD. An experimental study of the effects of oxygenated fuel blends and multiple injection strategies on DI diesel engine emissions. Fuel 1999, 78: pp.1303-1317.
97. Dimitrov A. J., Dimitrov D.I . Possiblities for using vegetable oils as fuel for diesel engines with direct injection.. / Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС: Материалы VII Междунар. науч.-практ. конф., Владим. гос. ун-т.- Владимир, 1999. – с. 125-127.
98. Elsbett K., Elsbett L., Elsbett G., Behrens M. – Elsbett's reduced cooling for D.I. diesel engines without water or air // SAE Techn. Pap. Ser. – 1987. – 870027. – p. 101-107.

99. Gelfand BE. Droplet breakup phenomena in flows with velocity lag. Prog. Energy Combust. Sci. 25, pp. 201- 265 (1996).
100. Gerpen J. V. The basics of diesel engines and diesel fuels. University of Idaho.
101. Grabar I.G., Kolodnitska R.V., Aristarkhova E.O., Ilchenko A. V. The problem of clean ecological diesel fuels introducing on base of rapeseed oil. AMMA-2002. Kluj –Napoca, 2002-Vol 3. p. 255-256.
102. Graboski Michael S., McCormick Robert L. 1998. Combustion of Fat and Vegetable Oil derived fuels in diesel Engines. Prog. Energy Combust. Sci. Vol. 24. pp. 125-164.
103. Health Assessment Document For Diesel Engine Exhaust www.airimpacts.org/documents/local/HEALTH_ASSESSMENT_DIESEL.PDF
104. Howard – Hilidige R., Condon S., Leathy J.J., McDonell K. Emissions from compression ignition engined vehicles running on mineral and rape seed oil based fuel. International conference on Air Pollution v2, Air Pollution and Management 1995, p. 379 –385.
105. Internationales Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungs motoren. Bargende Michall. MTZ: Motortechn. Z. 2001. 62, № 7-8, c.598-604.
106. Karaosmanoglu F., Kurt G., Ozaktas T.. Direst use of sunflower oil as a compression – ingnition engine fuel. - Energy Sources. 2000, 22, № 7, p. 659 – 672.
107. Kolodnytska R. An evaluation of models for biodiesel injection sprays. // Proceedings of the International Scientific Conference "Mechanics 2004". Rzeszow, Poland. 2004. – pp. 185 – 194.
108. Kolodnytska R., Ilchenko A. An investigation of droplet mean diameters and fuel consumption for straight vegetable oil. // Proceedings of the International Scientific Conference "Mechanics 2006". Rzeszow, Poland. 2006. pp. 95-102.
109. Kolodnytska R.V., K. Karimi, C. Crua, M.R. Heikal, E.M Sazhina. Experimental Investigation and Modelling of Diesel Engine Spray. XIII международный конгресс двигателестроителей 14-19 сентября 2008 г. //Internal combustion engines. – 2008. N 1. – P. 42 – 46.

110. Korbitz W. New trend in developing Biodiesel World-wide.// Asia Bio-Fuels. Evaluating & Exploiting the Commercial Uses of Ethanol Fuel Alcohol & Biodiesel. Singapore /22-23 April 2002.

111. Krahl J., Munack A., Schröder O., Stein H., Bünger J. Comparison of biodiesel with different diesel fuels regarding exhaust gas emissions and health effects. http://www.ufop.de/hilfe.html

112. Lee CH, Reitz RD, An experimental study of the effect of gas density on the distortion and breakup mechanism of drops in high speed gas stream. Int J Multiphase Flow 2000;26, pp. 229-244.

113. Lee CS, Park SW. An experimental and numerical study on fuel atomisation characteristics of high-pressure diesel injection sprays. Fuel 2002, 81, pp. 2417-2423.

114. Lefebvre A. H. Atomization and Sprays. Combustion: An International Series. Taylor and Francis. 1989. p. 421.

115. Lotko W., Longwic R., Gorski K. Analiza wybranych parametrow procesu spalania oleju napedowego w stanach nieustalonych pracy silnika spalinowego.-Journal of KONES. Internal Combustion Engines.-Warsaw-Lublin, 2000,vol. 7, No. 1-2, p. 330-341.

116. Machacon C. H. T., Matsumoto Y, Ohkawara C., Shiga S., Karasawa T., Nakamura H. The effect of coconut oil and diesel fuel blends on diesel engine performance and exhaust emissions. JSAE Review 22 (2001), pp. 349–355.

117. Marmottant P.and Villermaux E. On spray formation. J. Fluid Mech. (2004), vol. 498, pp. 73–111.

118. Maurer K.Undersuchung zur Production von standardisirten Planzenol-Treibstoff und Ermitlung von motor und verbrennnungstechnischen Kennaden bei auf Pflazeno lbetrieb umgerusteten Dieselmotoren. Hohenheim. 2000. P. 102.

119. Nepotravinarske vyuziti repky pro vyrobu bionafty v Ceske republike.- 2000, 8 c.

120. Neuere Untersuchungen über die Umweltverträ – glichkeit und die Dauerstandfestigkeit von Vorkammer – und direckteinspritzenden Dieselmotoren bei Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester: [Vortr.] Tag. «Aspekte alternativer Energieträger Fahrzeugantriebe», Wolfsburg, 24.-26. Nov., 1992/May R., Hattingen U., Birkner C., Adt H.U. // VDI – Ber. – 1992. - № 1020. – C. 189-212.
121. Sazhin SS, Feng G, Heikal MR. A model for fuel spray penetration. Fuel 2001, 80: pp. 2170-2180.
122. Serdari A., Fragiondakis K., Kalligeros S., Stournas S., Lois E. Impact of Using Biodiesels of Different Origin and Additives on the Performance of a Staionary Diesel Engine. – Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power. – 2000, vol. 122, №4. p. 624-631.
123. Tat, Mustafa Ertunc "Investigation of oxides of nitrogen emissions from biodiesel-fueled engines." Thesis. Iowa State University, 2003.
124. The use Of Vegetable Oils In Straight And Modified Form As Diesel Engine Fuels. – Bacon D.M., Brear F., Moncrieff I.D., Walker K.L. "Beyond Energy Crisis: Opportunity and Challenge. 3rd Int. Cons. Energy Use Manag. Berlin (West), Oct. 26-30, 1981. Vol. 3". Oxford e.a., 1981, 1525-1533.
125. Untersuchungen über die Umweltverträglichkeit und die Dauerstandfestigkeit von Vorkammer-und direct einspritzenden Dieselmotoren bei Betrieb mit Rapsöl und Rapsölmethylester:[Vortr.] Tag. "Aspekte alternativer Energieträger Fahrengantriebe", Wolfsburg, 24-26. Nov., 1992/May R., Hattingen U., Birkner C., Adt H. U. // VDI-Berichte-1992 – № 1020. – c. 189-212.
126. Wakisaka T, Shimamoto Y, Isshiki Y, Akamutsu S, Ibaraki K. Improvement in a droplet breakup model for numerical analysis of fuel spray. JSAE Review 1997, 18, pp. 3-10.
127 Weidmann K., Heinrich H. Einsatz von Kraftstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen im VW/Audi Dieselmotor: [Vortr.] Tag. "Aspekte alternativer Energieträger Fahrzeugantriebe", Wolfsburg, 24-26. Nov., 1992// VDI-Ber.-1992.-№ 1020. - c. 149-172.
128. www. //biodiesel.org
129. http://biodiesel.org.ua
130. http:// fuelalternative.com.ua

Наукове видання

ГРАБАР Іван Григорович

КОЛОДНИЦЬКА Руслана Віталіївна

СЕМЕНОВ Володимир Григорович

БІОПАЛИВА НА ОСНОВІ ОЛІЙ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Монографія

Комп'ютерний набір та верстка *Р.В. Колодницька*
Я.К. Свицельський
В.В. Вислоцький
Макетування *В.В. Кондратенко*

Підп. до друку 30.06.11. Формат 60x84 1/16. Папір офс.
Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. аркушів 8,84.
Наклад 300 пр. Зам. № 25.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єкта видавничої справи
Серія ЖТ № 08 від 26.03.2004

Редакційно-видавничий відділ
Житомирського державного технологічного університету
вул. Черняховського, 103, м. Житомир, 10005