

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ТА СОЄВОЇ ОЛІЇ

В. М. Мельник, М. М. Гнип

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 72-71-48,  
e-mail: v a s j a m e l @ u k r . n e t

На даний час у сфері альтернативних видів палива спостерігається постійне нарощування обсягів їх виробництва. В Європі та світі вводять все більш жорсткі вимоги екологічного стандарту (Євро 6, з 2025 р. Євро 7), на застосування якого до автомобілів і моторних палив висуваються вимоги, що підвищують їх екологічну безпеку. Однак, більшість альтернативних палив самі по собі не можуть розглядатися як готове до використання моторне паливо. Це пов'язано з тим, що експлуатаційні та екологічні властивості більшості альтернативних палив не відповідають властивостям товарних палив. Вирішення даної проблеми можливе двома основними шляхами: 1) поліпшення властивостей альтернативних палив за рахунок їх доопрацювання та очищення; 2) використання сумішей альтернативних палив із товарними паливами в певних співвідношеннях, які не завдають шкоди ні двигуну, ні навколишньому середовищу. Для покращення експлуатаційних та екологічних властивостей товарних палив та промислових масштабів виробництва альтернативних сумішевих біодизельних палив із соєвої олії нами досліджено основні фізико-хімічні та експлуатаційні показники отриманих паливних сумішей. За результатами отриманих досліджень додавка соєвої олії до дизельних палив у кількості до 60 % об. забезпечує підвищення його цетанового числа до 11 %, поліпшення в'язкісно-температурних властивостей і дає можливість використання таких сумішей у дизельних двигунах без зміни в конструкції системи живлення і регулювання паливної апаратури, що характеризує соєву олію як перспективне альтернативне паливо для ДВЗ.

Ключові слова: двигун внутрішнього згорання, альтернативне паливо, соєва олія, біодизель, економія, змішування, фізико-хімічні показники, застосування.

Currently, alternative fuels are experiencing a steady increase in production volumes. Europe and the world are introducing increasingly stringent environmental standards (Euro 6, starting in 2025, Euro 7), which impose requirements on cars and motor fuels that improve their environmental safety. However, most alternative fuels cannot be considered as ready-to-use motor fuels by themselves. This is due to the fact that the operational and environmental properties of most alternative fuels do not match those of commercial fuels. There are two main ways to solve this problem: 1) improving the properties of alternative fuels by refining and purifying them; 2) use of mixtures of alternative fuels with commercial fuels in certain proportions that will not harm either the engine or the environment. To improve the operational and environmental properties of commercial fuels and the industrial scale of production of alternative blended biodiesel fuels from soybean oil, we have studied the main physicochemical and operational parameters of the resulting fuel blends. According to the results of the obtained studies, the addition of soybean oil to diesel fuels in the amount of up to 60 % by volume provides an increase in its cetane number up to 11 %, improves viscosity and temperature properties, and makes it possible to use such mixtures in diesel engines without changing the design of the power supply system and fuel control equipment, which characterizes soybean oil as a promising alternative fuel for internal combustion engines.

Keywords: internal combustion engine, alternative fuel, soybean oil, biodiesel, economy, mixing, physical and chemical properties, application.

### Вступ

На даний час у сфері альтернативних видів палива спостерігається постійне нарощування обсягів їх виробництва. В Європі та світі вводять все більш жорсткі вимоги екологічного стандарту (Євро 6, з 2025 р. Євро 7), на застосування якого до автомобілів і моторних палив висуваються вимоги, що підвищують їх екологічну безпеку. Однак більшість альтернативних палив самі по собі не можуть розглядатися як готове до використання моторне паливо. Це

пов'язано з тим, що експлуатаційні та екологічні властивості більшості альтернативних палив не відповідають властивостям товарних палив.

### Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Біодизельне паливо, отримане з відновлюваних ресурсів, останнім часом робить його більш привабливим для використання на ДВЗ.

Біодизель є відновлюваним і чистим паливом, оскільки воно зменшує викиди оксиду вуглецю

глецю, вуглекислого газу, вуглеводнів і твердих частинок порівняно з дизельним паливом на основі нафти.

Біодизель можна використовувати в чистому вигляді (B100) або змішувати з нафтовим дизелем у будь-якій концентрації, якщо його специфікації ідентичні специфікаціям міжнародного стандарту, наданим Американським стандартом для тестування матеріалів (ASTM) або EN14214 в Європейському Союзі для альтернативних видів палива.

В роботі [1] проведено аналіз основних видів альтернативного палива для дизельних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ), досліджено їх основні показники та здійснено оцінку основних фізико-хімічних показників найпоширеніших видів біодизельного палива і описані необхідні умови для їх застосування у ДВЗ. Проте, з результатів виконаних досліджень не можна оцінити вплив добавок SME на характер та закономірність зміни основних техніко-експлуатаційних показників отриманого біодизельного палива.

Робота [2] присвячена аналізу фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей біодизельного палива на основі етилових естерів жирних кислот рижієвої олії та сумішевих біодизельних палив із різним відсотковим вмістом етилових естерів. Проведено порівняльний аналіз зразків біодизельних палив на основі метилових і етилових естерів жирних кислот ріпакової та рижієвої олії. У результаті дослідження обґрунтовано використання рижієвої олії для виробництва біодизельного палива, а саме, для повної або часткової заміни традиційного нафтового дизельного палива.

Дослідження впливу біодизельного палива на токсичність ДВЗ виконано у роботі [3]. Авторами запропоновано ряд заходів із покращення екологічних показників дизельного ДВЗ та досліджено їх вплив на потужність та економічність. Найперспективнішими заходами щодо підвищення екологічних показників ДВЗ виявилися оптимізація кута випередження впорскування палива та оптимізація мінімальної величини коефіцієнта надлишку повітря, в результаті чого викиди діоксидів азоту знизилися на 63 %, а його димність – на 78 %.

В роботі [4] розглянуто основні паливомастильні властивості біодизеля в порівнянні зі звичайним дизельним паливом, його вплив на потужності двигуна. Також автори проаналізували витрати палива і теплову ефективність біодизеля в порівнянні зі звичайним дизельним паливом та дослідили показники викидів біодизельного і дизельного палива. За результатами

досліджень встановлено, що при використанні біодизельного палива в двигунах збільшуються викиди оксиду азоту, але їх можна контролювати шляхом прийняття певних рішень, таких як додавання метанового поліпшувача, затримки впорскування, рециркуляції викидних газів тощо.

Широкомасштабні дослідження біодизельного палива виконано авторами [5]. Ними встановлено, що робота дизеля на біодизельному паливі з більш високою густиною та кінематичною в'язкістю супроводжується зростанням максимальної потужності та крутного моменту, а також підвищенням витрати палива. При цьому також підвищується концентрація оксидів азоту в відпрацьованих газах та зростає димність.

У роботі [6] розглядається можливість використання сивушного спирту як додатку до моторного дизельного палива. Наведено результати експериментальних досліджень дизелів, що працюють на суміші дизельного палива і сивушних масел. За результатами досліджень покращено паливні та екологічні показники двигунів, що працюють на суміші дизельного палива і сивушних масел. Проте, сивушні масла несуть і негативний вплив для елементів системи живлення двигуна, оскільки містять до 8 % води, що неприпустимо для дизельного палива.

Автори [7] досліджують процес виробництва біодизельного палива, зокрема вплив капіталовкладень на собівартість вартість виробництва палива. Результати показують, що основна складова вартості біодизельного палива – ціна сировини. А отже, знизивши собівартість виробництва сировини можна досягнути економічної ефективності використання соєвої олії для виробництва біодизельного палива.

Аналогічні дослідження собівартості виробництва целюлозного етанолу, розробленого та перевіреного Університетом Флориди в лабораторних, пілотних і демонстраційних масштабах, виконані в [8]. Мінімальна відпускна ціна етанолу коливалася від 50,38 до 62,72 центів США/л. Основний внесок у собівартість виробництва внесли вихідна сировина та капітальні витрати, які становили від 23-28% до 40-49% відповідно. Ці висновки свідчать про те, що майбутні зусилля з підвищення економічної доцільності процесу целюлозного етанолу повинні зосередитися на оптимізації для отримання найвищого виходу етанолу.

У роботі [9] в процесі використання біодизельного палива на основі ріпакової олії (RME) B100 на двигуні Renault 2.5 DCI встановлено збільшення середнього діаметру крапель пали-

ва; зафіксовано збільшення далекобійності струменя і зменшення його ширини; контур факела набуває конусної форми; спостерігається загострення при його вершині.

Можна припустити існування надзбагаченої серцевини струменя, що призводить до зменшення кута розкриття факела. Перераховані фактори призводять до погіршення розподілу палива по зонах факела розпилення. Тільки 50 % палива знаходиться в оболонці струменя, що призводить до погіршеного змішуванні палива з повітрям. У ядрі стінки знаходиться 18 % палива, яке буде розтікатися по стінках і погано змішуватися з повітрям. Решта палива (36 %) буде знаходитися в ядрі струменя, на фронті вільного струменя та зонах перетину пристінних потоків і частково візьме участь у сумішоутворенні. Це свідчить, що використання RME у чистому вигляді призводить до запізнення тепловиділення на 18–20 градусів повороту колінчастого валу.

А отже, використання SME та RME без зміни конструкції системи живлення ДВЗ можливе тільки у сумішах із товарним паливом у пропорціях до 60 % мас.

Теоретичні дослідження робочого циклу двигуна на біодизельному паливі здійснені у роботі [10]. За результатами дослідження робочого циклу дизеля встановлено, що живлення двигуна біодизельним паливом на основі SME та RME в порівнянні з використанням мінерального палива характеризується зменшенням швидкості тепловиділення та збільшенням тривалості процесу згоряння, що призводить до незначного погіршення індикаторного ККД. Проте, зазначені чинники сприяють зниженню кількості оксиду азоту, що утворюється у камері згоряння дизеля, а зміна іншого індикаторного показника біодизельного палива, зменшення тривалості періоду затримки займання палива сприяє зниженню рівня шуму та димності відпрацьованих газів дизеля [10].

Біодизель – це алкіловий ефір, виготовлений із відновлюваної сировини, наприклад, відходів тваринного жиру, рослинної олії та водоростей. Крім того, біодизель за складом і властивостями порівнянний з нафтодизелем (табл. 1) [11].

Дизельне або петродизельне паливо – це невідновлюване викопне паливо, яке отримують із сирової нафти і, ймовірно, буде вичерпано в майбутньому [12]. Оскільки дизельне паливо виробляється з невідновлюваних ресурсів, це призводить до зростання витрат на енергію, особливо через падіння видобутку сирової нафти [13]. У той час як біодизель виробляється із ви-

хідної сировини за допомогою реакції перестерифікації, яка включає обмін гліцеридів (основного компонента вихідної сировини) органічною групою на органічну групу спирту для виробництва біодизеля та гліцерину як побічного продукту [14, 15]. У табл. 1.1 наведено склад і властивості біодизеля, а також товарного дизельного палива [16, 17].

**Таблиця 1 – Коротка характеристика основних властивостей дизельного палива та біодизельного палива на основі ріпакової олії**

Назва показника	Значення для ДП згідно з ДСТУ 7688:2015	Біодизельне паливо, SME
Вміст компонентів:		
С	0,87	0,7731
Н	0,126	0,1188
О	0,004	0,1081
Нижча теплота згоряння, мДж	42,5	36,22
Вміст сірки, %	0,01	0,005
Цетанове число, не менше	51	51-65
Густина, кг/м <sup>3</sup>	835	885
Температура спалаху, °С	60-80	100-170

Біодизель є одним із поширених видів біопалива, яке використовується в багатьох країнах, зокрема у великих кількостях у США, Бразилії, Індонезії, Малайзії, Франції, Німеччині та інших європейських країнах. Світове виробництво біодизеля зросло з 3,5 мільйонів тонн у 2005 році до 16 мільйонів тонн у 2010 році, досягло 29 мільйонів тонн у 2016 році та, як очікується, перевищить 36,5 мільйонів тонн у 2025 році [18].

Багато експертів припускають, що глобальне виробництво біодизеля буде збільшено, щоб задовольнити майбутні потреби в біодизелі, які становитимуть близько 277 мільйонів тонн на рік до 2050 року [19, 20].

Екологічно-чисте горіння, хороша ефективність змащування, низький вміст ароматичних речовин, низький вміст сірки, високе цетанове число та низька температура застигання позитивно характеризують біодизель на противагу товарному дизельному паливу.

Хороші властивості біодизеля зменшують викиди твердих частинок (PM), оксиду вуглецю (CO) і вуглеводнів (HC) у викидних газах. Тому біодизель є екологічно чистим паливом [21, 22].

Сировина є дуже важливою перспективою в біодизельній промисловості, оскільки вартість біодизеля значною мірою залежить від переробленої сировини, що використовується. На сьогодні витрати на вихідну сировину становить щонайменше 80 % витрат, пов'язаних з виробництвом біодизеля [23].

Близько 95% виробництва біодизеля в усьому світі виробляється з харчових олій, що не є актуальним, оскільки світ переживає продовольчу проблему [24].

Тому зараз новим трендом є виготовлення біодизеля з дешевої нехарчової олії [25].

Деякі види сировини відрізняються високою продуктивністю у виробництві біодизеля через високий вміст тригліцеридів, такі як пальма, ятрофа, мікрородорості, кокосова олія та відпрацьована кулінарна олія [26].

Сировину для біодизелю можна поділити на дві основні категорії, як показано нижче [27]:

- харчова рослинна олія: соєва, арахісова, соняшникова, пальмова, кокосова;
- нехарчова рослинна олія: рапсова, ятрофова, відпрацьована кулінарна олія.

Біодизель виробляють з рослинної олії шляхом її переетерифікації, яка є реакцією тригліцеридів зі спиртом у визначений час, температуру, швидкість змішування та в присутності каталізатора, утворюючи алкілові ефіри жирних кислот (біодизель) і неочищений гліцерин [28,29]. Основними спиртами, які використовуються в реакціях переетерифікації є метанол, етанол або бутанол [30].

Існує чотири типи реакцій переетерифікації [29, 31]:

- лужний каталізатор;
- кислотний каталізатор;
- ферментний каталізатор;
- некаталізована суперкритична переетерифікація метанолу.

У промисловості лужна або основно-каталізована переетерифікація є найпоширенішим процесом, оскільки це найпростіший і найшвидший процес [32, 33].

Вільні жирні кислоти (ВЖК) є небажаними сполуками у вихідній сировині, оскільки вони реагують з основним каталізатором, утворюючи солі карбонових кислот (мило) і воду. Реакція милоутворення є найбільшою перешкодою для біодизельної промисловості, оскільки мило скорочує вихід біодизеля, підвищує в'язкість продуктів, утворює емульсії та ускладнює відділення гліцерину від біодизеля [34]. Тому високий вміст ВЖК руйнує реакцію переетерифікації.

Сировина з вмістом ВЖК понад 1 % не обробляється безпосередньо базовим каталізатором переетерифікації, а тому до вихідної сировини повинні застосовуватися додаткові етапи обробки, і навпаки, вихідну сировину з ВЖК менше 1 % можна обробити ним безпосередньо.

У промислового застосуванні кислотна етерифікація є найпоширенішим процесом обробки для зменшення ВЖК. Етерифікація гліцерину або гліцероліз є ефективним процесом для зменшення вмісту ВЖК, але він невідомий як кислотна етерифікація. Гліцероліз здатний зменшити ВЖК у сировині низької якості за відсутності етапів метанолу та вакуумної десорбції [36].

Кислотна обробка здійснюється шляхом реакції спирту з ВЖК із використанням кислоти як каталізатора для отримання біодизеля та води, таким чином, вміст ВЖК знижується. Цей процес обробки застосовують у разі вмісту ВЖК у сировині більше 1 % [37]. При кислотній обробці один моль метанолу реагує з одним молем ВЖК для досягнення реакції, тому для завершення реакції потрібна велика кількість метанолу [36].

Гліцероліз або етерифікація гліцерину – це процес обробки, який має здатність перетворювати ВЖК на гліцериди. Гліцероліз включає реакцію ВЖК і гліцерину з утворенням гліцеридів і води. Утворені гліцериди потім перетворюються на біодизель за допомогою лужної переетерифікації [38].

При гліцеролізі потрібна невелика кількість гліцерину: один моль гліцерину достатньо для трьох молей ВЖК [39].

Процес гліцеролізу не є поширеним у виробництві біодизеля, оскільки вимагає використання дорогих металевих каталізаторів при високій температурі, яка може досягати 220 °C [40-42]. Гліцероліз широко використовується в інших галузях промисловості для виробництва поверхнево-активних речовин і емульгаторів, наприклад, у харчовій, косметичній або фармацевтичній промисловості. Неочищений гліцерин – побічний продукт виробництва біодизеля – можна використовувати в реакції гліцеролізу, але тільки після його обробки, оскільки він містить багато домішок і має високий рН.

Біодизель можна виготовляти з понад 300 видів харчових і нехарчових рослинних олій [43, 44]. Більшість цієї сировини має високу продуктивність біодизеля через високу концентрацію тригліцеридів [45].

Харчова олія виробляється з рослинних ресурсів; використовується в основному для безпосереднього споживання людиною у їжу. Міс-

тять різні поживні інгредієнти, тому є здоровою їжею [46].

Видобуток харчової олії з її ресурсів зазвичай не потребує хімічної обробки. Найбільш поширеною харчовою олією, яка використовується для виробництва біодизеля, є пальмова, соєва, соняшникова, рапсова та арахісова олії [25, 47].

Пальмова олія видобувається з насіння пальми, а вміст олії в ній досягає 20-21 % [50]. Пальмова олія є важливою харчовою олією, оскільки від 70 % до 90 % пальмової олії використовується в харчовій промисловості, а решта використовується в інших галузях [48]. Також вона має високу продуктивність біодизеля, оскільки 1,25 літра пальмової олії виробляє 1 літр біодизеля [49].

Перед реакцією переестерифікації для видалення твердих частинок, води, кольору та запаху пальмова олія повинна бути оброблена, після обробки вміст ВЖК в ній становить 0,1 %.

Найбільшими виробниками пальмової олії є Малайзія та Індонезія [26].

Соєва олія є важливою харчовою олією через її багато переваг для здоров'я. Світове виробництво соєвої олії становить 222 млн. тонн і виробляється, в основному, в США, Бразилії та Східній Азії. Біодизель з соєвої олії виробляється, в основному, в США. Для виробництва одного літра біодизеля потрібно 1,3 літра соєвої олії [48].

Ріпак – жовта квітка, яку висаджують переважно в Європі та Канаді, використовується як корм для тварин. Ріпакова олія є нехарчовою та характеризується високою продуктивністю, оскільки з 1,1 літра ріпакової олії виходить 1 літр біодизеля [51].

Нехарчова олія – це олія, яка не є придатною для харчування людей. Щоб зробити нехарчову олію придатною для певного застосування, необхідні різні хімічні процеси, тому її дешевше використовувати в промислових цілях, таких як виробництво біопалива, мила, мийних засобів і фарб [46]. Найпоширенішою нехарчовою олією, яка використовується для виробництва біодизеля, є рицина тваринного жиру, ятрофа, жожоба та використана кулінарна олія [25, 47].

Перешкодою для використання нехарчової олії як сировини для біодизеля є велика кількість ВЖК, які реагують з основним каталізатором, утворюючи емульсії та мило, перешкоджаючи цим основній реакції переестерифікації [52] і знижуючи вихід біодизельного палива. Тому перед реакцією переестерифікації слід зменшити концентрацію ВЖК [34].

Масло ятрофи отримують з насіння цієї культури. Ятрофа культивується при високій температурі зі стічними водами, тому це перспективний ресурс біодизеля в Єгипті. Також це основний ресурс біодизеля в Азії та Африці. Олія ятрофи характеризується значною продуктивністю біодизеля, оскільки її насіння містять 30-35 % олії. [26]. Олія строфи, як нехарчова, також використовується в інших цілях, таких як виробництво мила, косметики та мастильних матеріалів [36].

Рицинова олія – безбарвна або слабо-жовта рідина з виразним смаком і запахом. Температура її кипіння – 313 °С, густина – 961 кг/м<sup>3</sup>. В'язкість олії приблизно в сім разів перевищує в'язкість інших рослинних олій. Біодизель, виготовлений з рицинової олії, має надзвичайно низьку температуру помутніння та температуру застигання, що робить цей біодизель ідеальною альтернативою в зимових умовах, але в'язкість біодизеля з рицинової олії не відповідає міжнародним стандартам біодизельного палива [53, 54].

Відпрацьована кулінарна олія є багатообіцяючою альтернативою для виробництва біодизеля завдяки численним перевагам. У порівнянні з іншими оліями, використана кулінарна олія характеризується низькою ціною, доступністю, легкістю збирання в будинках і ресторанах і поновлюваністю [26]. Крім того, це мінімізує необхідність використання землі для вирощування біодизельного палива. У багатьох країнах використана кулінарна олія просто викидається, спричиняючи забруднення навколишнього середовища, незважаючи на її важливість у виробництві біодизеля.

Отже, біодизель можна виготовляти з понад 300 видів харчових і нехарчових рослинних олій. Більшість цієї сировини має високу продуктивність біодизеля через високу концентрацію тригліцеридів.

У промисловості лужна або основнокаталізована переестерифікація є найпоширенішим процесом, оскільки це найпростіший і найшвидший процес.

ВЖК є небажаними сполуками у вихідній сировині, оскільки вони реагують з основним каталізатором, утворюючи солі карбонових кислот (мило) і воду. Реакція милоутворення є найбільшою перешкодою для біодизельної промисловості, оскільки мило скорочує вихід біодизеля, підвищує в'язкість продуктів, утворює емульсії та ускладнює відділення гліцерину від біодизеля. Тому високий вміст ВЖК руйнує реакцію переестерифікації.

Як бачимо, велика увага науковців спрямована на дослідження біодизельного палива на основі ріпаку. З рослин, придатних для виготовлення біопалива, в Україні найбільша посівна площа у пшениці та соняшнику. Вирощується також ріпак ярий та ріпак озимий, соя, кукурудза та цукровий буряк. Майже всі ці рослини, крім сої та пшениці, становлять небезпеку для ґрунту. А, тому, виходячи з наведеного вище, більш перспективними для отримання біодизельного палива є соя.

### Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Основні фізичні та експлуатаційні показники сумішей дизельного палива та SME – цетанове число, густина, кінематична в'язкість та ін. досліджувалися експериментальним шляхом.

Під час проведення експериментальних досліджень та обробки результатів застосовувалися методи найменших квадратів та математичної статистики.

Методи дослідження розроблялися з урахуванням основних фізичних та хімічних властивостей соєвої олії. Наведені в табл. 1 показники SME є близькими до характеристик дизельного палива.

Змішування SME з товарним літнім дизельним паливом здійснювався у закритій посудині за допомогою мішалки з електричним приводом протягом 5 хв при температурі 20 °С. Спостереження за процесом змішування засвідчили повне розчинення SME дизельному паливі. Утворені суміші витримувалися в герметично закритих скляних посудинах протягом 60 діб за температури 21 °С. За цих умов зберігання в сумішах не зафіксовано розшарування товарного палива і SME та виникнення неоднорідностей у всьому об'ємі сумішей.

До основних фізико-хімічних характеристик дизельних палив та їх сумішей з SME, що будуть досліджуватися, відносяться: цетанове число; вміст водорозчинних кислот і лугів; густина при 20 °С; кислотність за показником рН та ін.

Цетанове число дизельного палива та його сумішей з SME вимірювали приладом SHATOX SX-100K відповідно до інструкції з експлуатації.

Коротка технічна характеристика приладу SHATOX SX-100K наведена в табл. 2.

Фракційний склад дизельного палива та його сумішей з SME визначали згідно з ГОСТ 2177-82 з максимальною похибкою вимірювання  $\pm 2\%$ . Цей показник для дизельних палив но-

рмується згідно з ДСТУ 7688:2015 температурою 50 % та 96 % википання.

**Таблиця 2 – Коротка технічна характеристика приладу SHATOX SX-100K**

Поз.	Назва параметру	Один. вимір.	Значення параметра
1	Діапазон вимірювання цетанового числа	од.	20-100
2	Час вимірювання, не більше	сек.	10
3	Похибка вимірювання цетанового числа	-	$\pm 1$
4	Температура застигання	°С	-50
5	Похибка вимірювання температури застигання	-	$\pm 2$
6	Напруга живлення	В	4,5

**Таблиця 3 – Коротка технічна характеристика іонометра моделі ЭВ-74**

Поз.	Назва параметру	Один. вимір.	Значення параметра
1	Границі вимірювання рН: - від - до	рН рН	-1 +19
2	Відносна похибка: - верхня шкала - нижня шкала	% %	$\pm 0,5$ $\pm 1,5$
3	Струм повного відхилення	мкА	200

Кінематичну в'язкість дизельного палива вимірювали з максимальною похибкою  $\pm 3\%$  згідно з ГОСТ 33-66 капілярним віскозиметром ВПЖ-2 у комплекті з рідинним термостатом моделі СЖМЛ-19 /2,5-ІІ [56].

Температуру спалаху дизельного палива та його сумішей з ріпаковою олією визначали згідно з ГОСТ 6356-75 на приладі моделі ТВ-2 з максимальною похибкою  $\pm 1,5\%$  [56].

Відсутність у паливі водорозчинних кислот і лугів визначали згідно з ГОСТ 6307-75.

Низькотемпературні властивості дизельних палив та паливних сумішей, що характеризуються граничною температурою фільтрованості та температурою застигання, визначали з максимальною абсолютною  $\pm 1,5\%$  згідно з ГОСТ 22254 та ГОСТ 20287 приладом SHATOX SX-100K.

Густину дизельного палива та паливних сумішей визначали ареометром з максимальною похибкою  $\pm 1\%$  згідно з ГОСТ 3900-85.

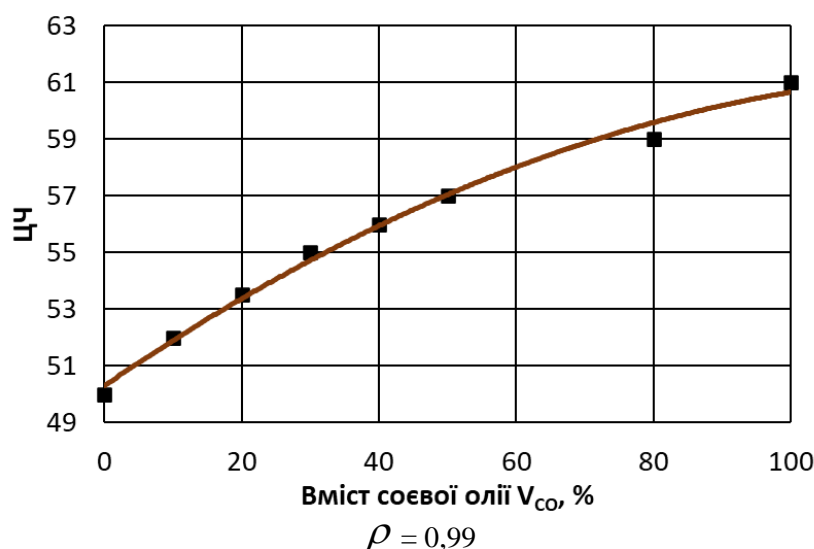


Рисунок 1 – Залежність зміни цетанового числа ЦЧ суміші від об'ємного вмісту SME,  $V_{CO}$

Нижчу теплоту згоряння сумішей SME та дизельного палива визначали розрахунковим методом.

#### Мета та завдання досліджень

Основною метою досліджень є покращення експлуатаційних та екологічних властивостей товарних палив шляхом додавання соєвої олії, дослідження основних фізико-хімічних та експлуатаційних показників паливних сумішей на основі дизельного палива та соєвої олії (SME).

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі основні завдання дослідження:

- утворення паливних сумішей основі дизельного палива та SME;
- дослідження фізико-хімічних показників сумішей дизельного палива та SME;
- дослідження експлуатаційних показників сумішей дизельного палива та SME.

#### Висвітлення основного матеріалу дослідження

Цетанове число SME становить 61 од., а тому для створення паливних сумішей SME та дизельного палива взято вітчизняне літне дизельне паливо, оскільки його цетанове число має найнижче значення і під час утворення сумішей та спалюванні їх у ДВЗ не матиме негативних наслідків. Вимірювання цетанового числа проводилися за допомогою октанометра SHATOX SX-100K.

Згідно з результатами дослідження побудовано графічні залежності цетанового числа суміші дизельного палива з SME від об'ємного вмісту останньої VCO (рис. 1).

Відповідно до результатів визначення цетанового числа сумішей дизельного палива та ріпакової олії отримано апроксимаційне рівняння

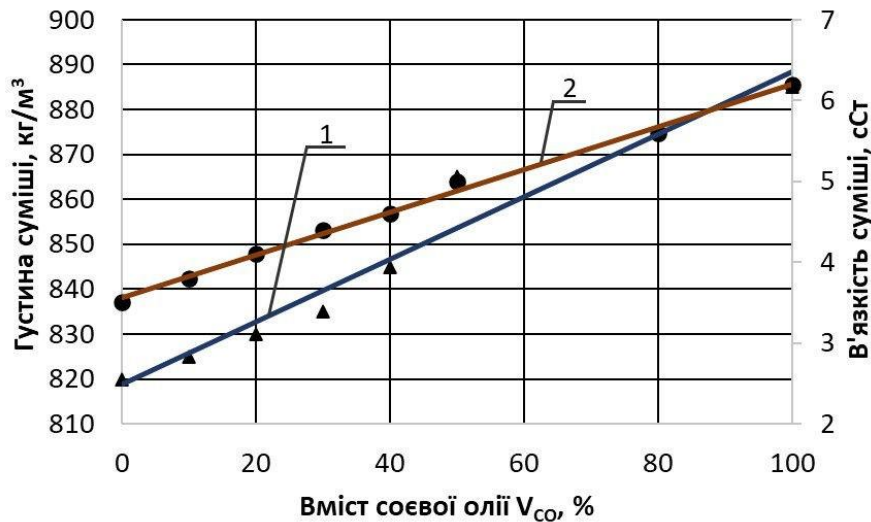
$$ЦЧ = 50,295 - 0,0006V_{CO}^2 + 0,1662V_{CO}, \quad (1)$$

де ЦЧ – цетанове число суміші дизельного палива і SME.

Зростання цетанового числа із збільшенням вмісту SME призводить до полегшення пуску дизеля та збільшення максимального тиску згоряння палива, а тому за цим показником допускається робота ДВЗ на 100 % соєвій олії [56]. Згідно з тенденціями розвитку дизельних двигунів збільшується міра стискування в них, що дозволяє використовувати дизельне паливо з вищим цетановим числом. Однак, значне підвищення цетанового числа призведе до збільшення питомої витрати палива, токсичності та димності відпрацьованих газів, а тому за цим показником оптимальним вмістом SME в ДП до 60 % об.

Досліджувані паливні суміші витримували в лабораторії до досягнення ними температури навколишнього середовища, почергово заливши в скляний циліндр ємністю 100 мл. Суміші для дослідження густини обирали нафтоденсиметр згідно з ГОСТ 3900 із діленням шкали 820-1000 кг/м<sup>3</sup>. Згідно з результатами вимірювання густини досліджуваних сумішей дизельного палива та соєвої олії побудовано експериментальну залежність густини суміші дизельного палива з соєвою олією від об'ємного вмісту соєвої олії,  $V_{CO}$  (рис. 2).

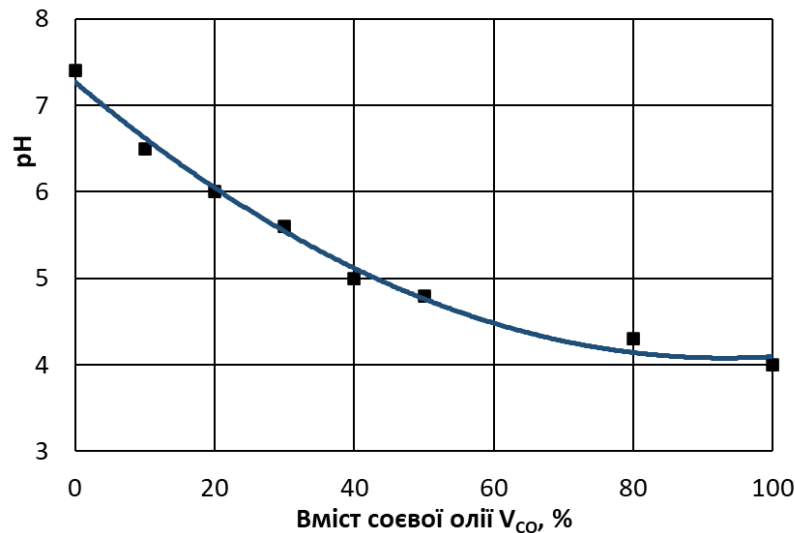
В'язкість досліджуваних сумішей визначали за допомогою віскозиметра типу ВПЖ-2 відповідно до ГОСТ 33-66 у комплекті з термос-



1 – густина паливних сумішей,  $\rho=0,95$ ;

2 – в'язкість паливних сумішей,  $\rho=0,99$ ;  $t_{HC}=20^\circ\text{C}$ ;  $p_B=730$  мм.рт.ст.

Рисунок 2 – Залежність в'язкості  $\nu_D$  і густини  $\rho_D$  суміші від вмісту соєвої олії  $V_{CO}$



$\rho=0,98$ ; умови експерименту:  $t_{HC}=20^\circ\text{C}$ ;  $p_B=740$  мм.рт.ст.

Рисунок 3 – Експериментальна залежність  $\text{pH}^D$  сумішей від вмісту соєвої олії  $V_{CO}$

татом СЖМЛ-19/2,5-И1 для забезпечення сталої температури  $20^\circ\text{C}$ .

Експериментальні залежності (рис. 2) апроксимуються наступними рівняннями з коефіцієнтами кореляції  $\rho=0,93$  та  $\rho=0,99$  відповідно:

$$\nu_D = 3,5575 + 0,0265V_{CO}, \quad (2)$$

$$\rho_D = 818,76 + 0,6968V_{CO}, \quad (3)$$

де  $\nu_D$  – кінематична в'язкість суміші дизельного палива і соєвої олії, сСт;

$\rho_D$  – густина суміші дизельного палива і соєвої олії,  $\text{кг/м}^3$ .

В'язкість та густина дизельного палива впливають на процес його прокачування системою живлення, безвідмовну роботу паливного насоса високого тиску, спрацювання прецизій-

них пар, безперервну подачу палива в циліндри, якість розпилення та повноту згорання, на його витрату та склад відпрацьованих газів [56]. Густина палива для сучасних дизелів коливається в межах  $820 - 845 \text{ кг/м}^3$ , а в'язкість для літнього дизельного палива – в межах  $(2,0 - 4,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [56].

Згідно з результатами експерименту (рис. 2) за даними показниками допустимий максимальний вміст RME в паливі – 54 %.

Показник рН дизельного палива та його сумішей з соєвою олією визначали за допомогою іонметра ЭВ-74. За результатами визначення рН побудовано експериментальну залежність рН сумішей дизельного палива з соєвою олією від об'ємного вмісту соєвої олії,  $V_{CO}$  (рис. 3).



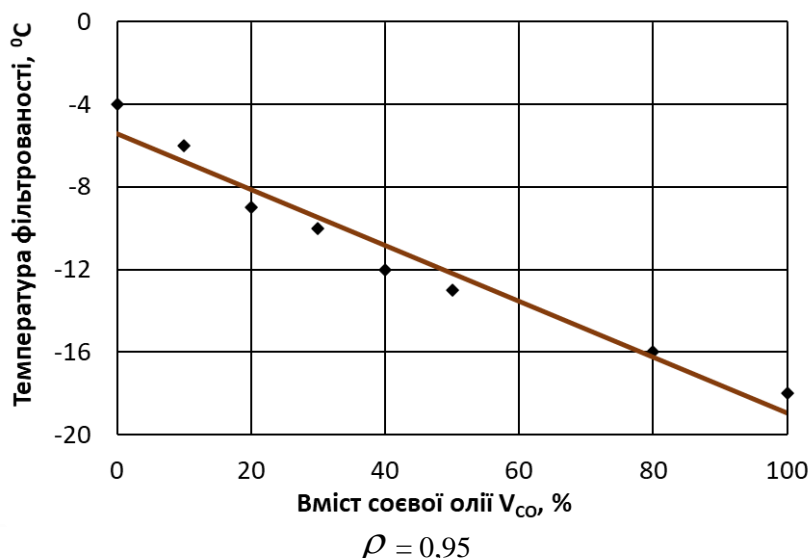


Рисунок 4 – Експериментальна залежність граничної температури фільтрованості суміші від вмісту SME,  $V_{CO}$

Експериментальна залежність показника  $pH^D$  сумішей дизельного палива та ріпакової олії описується наступним поліномом:

$$pH^D = 7,2717 + 0,0004V_{CO}^2 - 0,0686V_{CO}, \quad (4)$$

де  $pH^D$  – показник pH суміші дизельного палива з соєвою олією.

При додаванні соєвої олії до дизельного палива показник pH з більш лужного середовища знижується до показника нейтрального середовища, що буде сприяти зменшенню корозійної активності таких паливних сумішей.

Водорозчинні кислоти, луки та кислотність дизельного палива спричиняють корозію металевих деталей двигуна та системи живлення, а тому кислотність палива більша 5 мг КОН на 100 см<sup>3</sup> та наявність водорозчинних кислот і лугів неприпустима [56]. Їх наявність в паливі визначили згідно з ГОСТ 6307-75. Результати експерименту з визначення водорозчинних кислот і лугів засвідчують про їх відсутність у створених паливних сумішах.

Визначення граничної температури фільтрованості та температури застигання дизельного палива та його сумішей з SME визначали за допомогою стандартного приладу згідно з ГОСТ 22254 та ГОСТ 20287.

За результати визначення граничної температури фільтрованості і застигання сумішей дизельного палива та соєвої олії побудовано експериментальну залежність цих температур від об'ємного вмісту в сумішах соєвої олії (рис. 4).

Залежності граничної температури фільтрованості палива від об'ємного вмісту соєвої олії описуються наступним рівнянням:

$$t_{\phi} = -5,4253 - 0,1351V_{CO}, \quad (5)$$

де  $t_{\phi}$  – температура фільтрованості суміші дизельного палива і соєвої олії, °C.

Як видно з результатів дослідження (рис.4) додавання соєвої олії до дизельних палив призводить до пониження граничної температури фільтрованості, отже, паливні суміші дизельного палива з вмістом соєвої олії можна використовувати за температури не нижче -18 °C.

Важливим показником, що впливає на пожежну безпеку під час зберігання дизельного палива, є температура спалаху, що для літнього палива має бути не нижчою за 40 °C [56]. Температура спалаху визначалася стандартним приладом моделі ТВ-2 згідно з ГОСТ 6356-75. За результатами визначення температури спалаху в закритому тиглі сумішей дизельного палива і соєвої олії побудовано експериментальну залежність температури спалаху дизельного палива від об'ємного вмісту соєвої олії  $V_{CO}$ , (рис. 5).

Експериментальна залежність температури спалаху сумішей дизельного палива з соєвою олією описується наступним рівнянням:

$$t_{СП} = 57,045 + 2,1747V_{CO}, \quad (6)$$

де  $t_{СП}$  – температура спалаху суміші дизельного палива і соєвої олії, °C.

Отже, згідно з результатами дослідження (рис. 5) при додаванні SME до дизельних палив температура спалаху підвищується, а при додаванні її до дизельного палива підвищується його пожежна безпека.

Вирішальний вплив на корозійну агресивність дизельних палив робить вміст і характер сірчаних сполук. Встановлено, що загальне

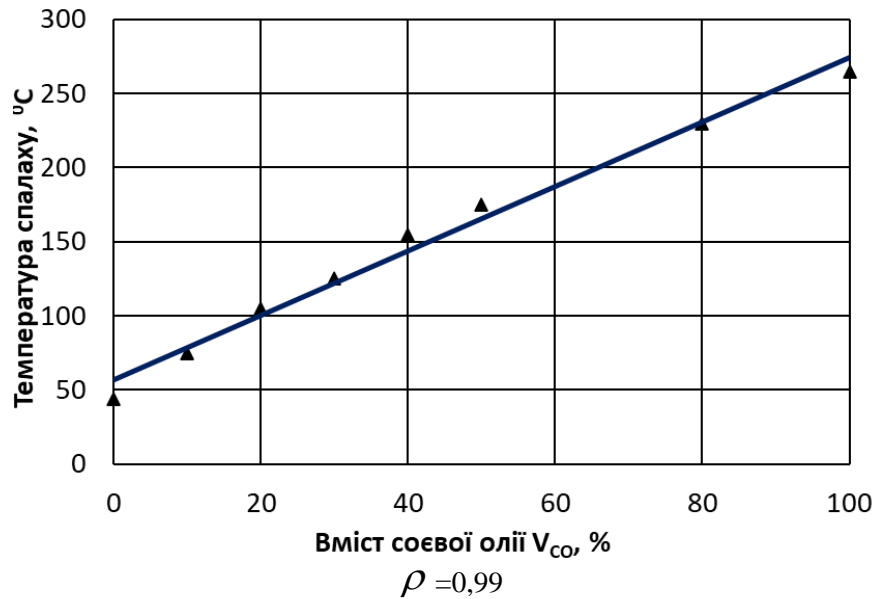


Рисунок 5 – Залежність температури спалаху  $t_{СП}$  сумішей від вмісту SME,  $V_{CO}$

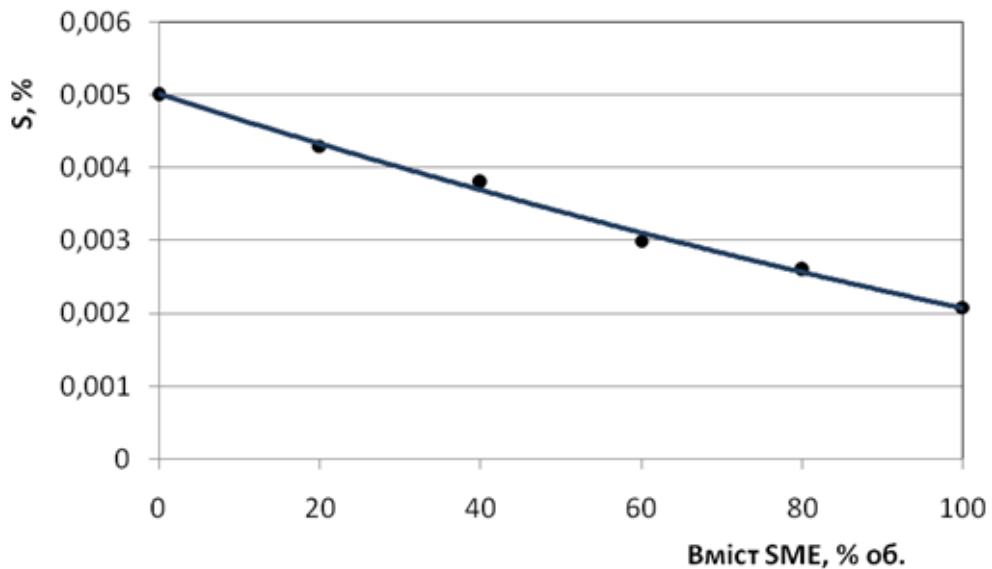


Рисунок 6 – Графічна залежність зміни вмісту сірки в ДП від вмісту SME, % об.

спрацювання деталей двигуна майже прямо пропорційне вмісту сірки в дизельному паливі. Наприклад, з підвищенням вмісту сірки з 0,2 % мас. до 0,6 % мас. спрацювання гільз циліндрів і поршневих кілець підвищується приблизно на 5...20 %, а при збільшенні вмісту сірки до 1 % мас. спрацювання цих деталей збільшується в 1,5 рази. Загальний вміст сірки в дизельному паливі не повинен перевищувати 0,05 % мас.

За результатами досліджень (рис. 6), зі збільшенням вмісту SME в ДП призводить до зниження вмісту сірки до 0,02 %, що значно покращує якість ДП та значно знижує його корозійну активність до деталей системи живлення та ЦПГ.

Теплота згоряння палива впливає на його витрату, потужність двигуна. Чим більше теплоти одержано при згорянні палива, тим більшу потужність можна вилучити з двигуна, тим менша питома витрата палива. Вуглеводневі палива мало відрізняються за теплою згоряння: їх нижча теплота згоряння коливається в межах 41000-44000 кДж/кг. За результатами дослідження впливу вмісту SME в ДП на нижчу теплоту згоряння палива встановлено (рис.7), що зі зростанням об'ємної частки SME відбувається зниження даного показника. А, тому, для оптимальної роботи двигуна, забезпечення його економічності за показником нижчої теплоти згоряння, рекомендовано додавати SME не більше 40 % об.

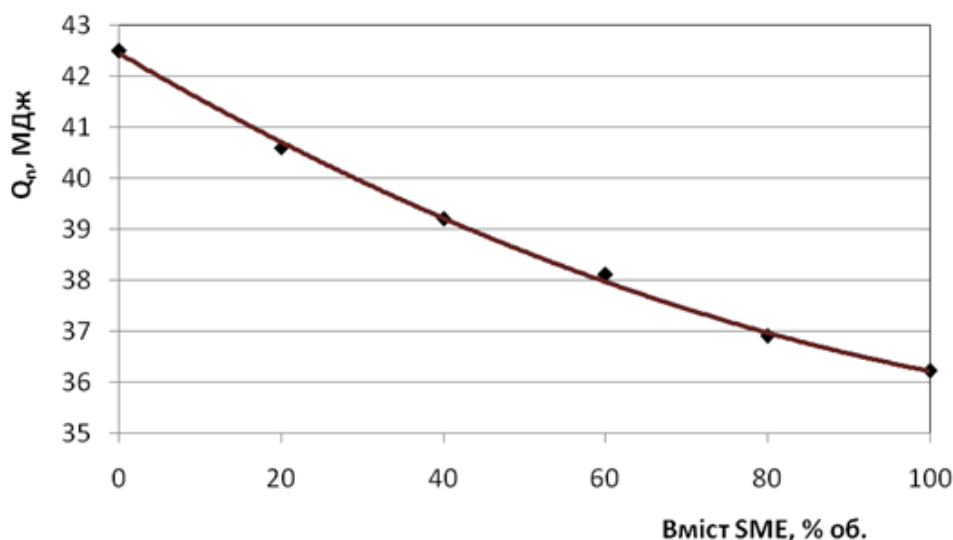


Рисунок 7 – Залежності зміни нижчої теплоти згоряння ДП від вмісту SME, % об.

### Висновки

Отримана за допомогою змішування паливна суміш SME та ДП була однорідною і не розшаровувалася протягом 30 діб зберігання при коливань температури від 14 до 21 °С.

За результатами отриманих досліджень добавка SME до ДП в кількості до 60 % об. забезпечує підвищення його цетанового числа до 11 %, поліпшення в'язкісно-температурних властивостей і дає можливість використання таких сумішей в дизельних двигунах без зміни в конструкції системи живлення і регулювання паливної апаратури, що характеризує SME, як перспективне альтернативне паливо для ДВЗ.

Також важливими показниками для дизельного палива є вміст сірки та теплота згоряння. За результатами досліджень, збільшення вмісту SME в ДП призводить до зниження вмісту сірки до 0,02 %, що значно покращує якість ДП та значно знижує його корозійну активність до деталей системи живлення та ЦПГ.

В результаті дослідження впливу вмісту SME в ДП на нижчу теплоту згоряння палива встановлено, що із зростання об'ємної частки SME відбувається зниження даного показника. А отже, для оптимальної роботи дизельного двигуна, забезпечення його економічності та екологічності рекомендовано додавати SME не більше 40 % об.

### Література

1. Мельник В. М., Войцехівська Т. Й., Сумер А. Р. Дослідження основних техніко-експлуатаційних характеристик альтернативних видів палива для дизельних ДВЗ. *Наукові праці ВНТУ*. 2018. № 2. С. 1-13.

2. Яковлева А. В., Бойченко С. В., Гудзь А. В., Зубенко С. О. Фізико-хімічні властивості біодизельних палив на основі етилових естерів рициєвої олії. *Каталіз та нафтохімія*. 2020. № 29. С. 24-30.

3. Левтеров А. М., Савицький В. Д. Покращення екологічних характеристик дизеля, що працює на біодизельних паливних композиціях. *Автомобільний транспорт*. 2015. № 36. С. 110-117.

4. Журенко Ю. І., Яропуд В. М., Бабин І. А. Біодизель – альтернативна заміна дизельного палива. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2012. № 10 (58). С. 44-51.

5. Корпач А. О., Левківський О. О. Дослідження впливу фізико-хімічних властивостей біодизельного палива на паливну економічність, енергетичні та екологічні показники автомобільного дизеля. *Вісник ЖДТУ*. 2016. № 2 (77). С. 115-121.

6. Kryshchtopa S., Kryshchtopa L., Melnyk V., Prunko I., Demianchuk Y. Experimental research on diesel engine working on a mixture of diesel fuel and fusel oils. *Transport Problems*, 2017, No 12 (2). P. 53–63.

7. Tang Zhang-Chun, Zhenzhou Lu, Zhiwen Liu, Ningcong Xiao. Uncertainty analysis and global sensitivity analysis of techno-economic assessments for biodiesel production. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 175. P. 502–508.

8. Gubicza Krisztina, Nieves Ismael U., Sagues William J., Barta Zsolt, Shanmugam K.T., Ingram, Lonnie O. Techno-economic analysis of ethanol production from sugar cane bagasse using a Liquefaction plus Simultaneous Saccharification and co-Fermentation process. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 208. P. 42–48.

9. Мельник В. М., Лях М. М., Синовєрський М. М. Дослідження параметрів сумішо- і теплоутворення дизеля у процесі використання альтернативних палив. *Нафтогазова енергетика*. 2020. №1 (33). С. 109-123.
10. Левтеров А. М., Авраменко А. Н., Савицький В. Д. Теоретичні дослідження робочого циклу біодизельного двигуна. *Автомобільний транспорт*. 2016. № 38. С. 75-82.
11. Kirubakaran M., Selvan V.A.M. A comprehensive review of lowcost biodiesel production from waste chickenfat. *Renewable and sustainable energy reviews* 2018. Vol. 82. P. 390-401.
12. Vonortas A., Papayannakos N. Comparative analysis of biodiesel versus green diesel. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. 2014. Vol. 3(1). P. 3-23.
13. Verma P., Sharma M., Review of process parameters for biodiesel production from different feed stocks. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016. Vol. 62. P. 1063-71.
14. Alptekin E., Canakci M., Sanli H. Methylene production from chicken fat with high FFA. *World Renewable Energy Congress*, Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden. 2011. Linköping University Electronic Press.
15. Jansri S., et al. Kinetics of methylester production from mixed crude palm oil by using acid-alkali catalyst. *Fuel processing technology*. 2011. Vol. 92(8). P. 1543-8.
16. Latif M.A.A., et al. Nanostructure and oxidation properties investigation of engine using Jatropha biodiesel as engine fuel. *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
17. Tziourzioumis D.N., Stamatelos A.M. Investigation of the effect of biodiesel blends on the performance of a fuel additive-assisted diesel filter system. *International Journal of Engine Research*. 2014. Vol. 15(4). P. 406-20.
18. Rouhany M., Montgomery H. Global Biodiesel Production: The State of the Art and Impact on Climate Change. *Biodiesel*. 2019, Springer. P. 1-14.
19. Mishra V.K., Goswami R. A review of production, properties and advantages of biodiesel. *Biofuels*. 2018. Vol. 9(2). P. 273-89.
20. Živković S., Veljković M. Environmental impacts the of production and use of biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25(1). P. 191-9.
21. Giakoumis E.G. Analysis of 22 vegetable oils' physico-chemical properties and fatty acid composition on a statistical basis, and correlation with the degree of unsaturation. *Renewable energy*. 2018. Vol. 126. P. 403-19.
22. El-Gharbawy A.S.A.A. Production of biodiesel from nonedible vegetable oil. 2016
23. Azizian H., Kramer J.K. A rapid method for the quantification of fatty acids in fat sand oils with emphasis on transfatty acids using Fourier?rtrans form near in frared spectroscopy (FT-NIR). *Lipids*. 2005. Vol. 40(8). P. 855-67.
24. Balat M. Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy conversion and management*. 2011. Vol. 52(2). P. 1479-92.
25. Gui M.M., K. Lee, Bhatia S. Feasibility of edible oilvs. non-edible oilvs. Waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*. 2008. Vol. 33(11). P. 1646-53.
26. Rincón L., Jaramillo J., Cardona C. Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 69. P. 479-87.
27. Ambat I., Srivastava V., Sillanpää M., Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2018. Vol. 90. P. 356-69.
28. Demirbas A. Comparison of trans esterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. *Energy conversion and management*. 2008. Vol. 49(1). P. 125-30.
29. Leung D.Y., Wu X., Leung M. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*. 2010. Vol. 87(4). P. 1083-95.
30. Likoazar B., Levec J. Transesterification of canola, palm, peanut, soy bean and sun flower oil with methanol, ethanol, isopropanol, butanol and tert-butanol to biodiesel: Modelling of chemical equilibrium, reaction kinetics and mass transfer based on fatty acid composition. *Applied Energy*. 2014. Vol.123. P. 108-20.
31. Demirbas A. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol trans esterification. *Energy conversion and management*. 2009. Vol. 50(4). P. 923-7.
32. Elgharbawy A.S.A. A cost analysis for biodiesel production from waste cooking oil plant in Egypt. *International Journal of Smart Grid-ij Smart Grid*. 2017. Vol. 1(1). P. 16-25.
33. Elgharbawy A.S., et al. Glycerolysis treatment to enhance biodiesel production from low-quality feedstocks. *Fuel*. 2021. Vol. 284. P. 118970.
34. Ramadhas A.S., Jayaraj S., Muraleedharan C. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*. 2005. Vol. 84(4). P. 335-40.

35. Van Gerpen J. Biodiesel processing and production. *Fuel processing technology*. 2005. Vol. 86(10). P. 1097-107.
36. Atadashi I., et al. Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012. Vol. 16(5). P. 3275-85.
37. Knothe G., Van Gerpen J.H., Krahl J. The biodiesel handbook. AOCS press Champaign, IL. 2005. Vol. 1.
38. Anderson E., et al. Glycerin esterification of scum derived free fatty acids for biodiesel production. *Bioresource technology*. 2016. Vol. 200. P. 153-60.
39. Tan H., Aziz A.A., Aroua M. Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. Vol. 27. P. 118-27.
40. Kombe G.G., et al., Pre-treatment of high free fatty acids oils by chemical re-esterification for biodiesel production – a review. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2013.
41. Felizardo P., et al., Study on the glycerolysis reaction of high free fatty acid oils for use as biodiesel feedstock. *Fuel Processing Technology*. 2011. Vol. 92(6). P. 1225-9.
42. Díaz I., et al. Synthesis of MCM-41 materials functionalised with dialkylsilane groups and their catalytic activity in the esterification of glycerol with fatty acids. *Applied Catalysis A: General*. 2003. Vol. 242(1). P. 161-9.
43. Sani Y., Daud W., Abdul Aziz A. Biodiesel feedstock and production technologies: Successes, challenges and prospects. *Biodiesel-Feedstocks, Production and Applications*. 2012. Vol. 10. P. 52790(2012.)
44. Gebremariam S., Marchetti J. Economics of biodiesel production. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 168. P. 74-84.
45. Gnanaprakasam A., et al., Recent strategy of biodiesel production from waste cooking oil and process in fluencing parameters: a review. *Journal of Energy*, 2013.
46. Bhuiya M., et al., Second generation biodiesel: potential alternative to-edible oil-derived biodiesel. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 61. P. 1969-72.
47. Pragma N., Pandey K.K., Sahoo P. A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. Vol. 24. P. 159-71.
48. Karmakar A., Karmakar S., Mukherjee S. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource technology*. 2010. Vol. 101(19). P. 7201-10.
49. Riazi M., Chiaramonti D. Biofuels production and processing technology. 2017: CRC Press.
50. Sumathi S., Chai S., Mohamed A. Utilization of oil palms a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2008. Vol. 12(9). P. 2404-21.
51. Demirbas A., Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy policy*. 2007. Vol. 35(9). P. 4661-70.
52. Baskar G., Aiswarya R. Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016. Vol. 57. P. 496-504.
53. Demirbas A., et al. Biodiesel production from non-edible plant oils. *Energy Exploration & Exploitation*. 2016. Vol. 34(2). P. 290-318.
54. Banković-Ilić I.B., Stamenković O.S., V-eljković V.B. Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012. Vol. 16(6). P. 3621-47.
55. Пат. 86449 С2 Україна, МПК В01F 3/08, В03В 5/04. Змішувач для моторних палив / Мельник В. М., Козак Ф. В., Климишин Я. Д.; заявник і патентовласник Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. – № а200704406 ; заявлено 20.04.2007; опубл. 27.04.2009, Бюл. № 8. 3 с. : іл.
56. ДСТУ 7688:2015 “Паливо дизельне Євро. Технічні умови”. Видання офіційне. К.: Держстандарт України, 2015. 9 с.

### References

1. Melnyk V. M., Voitsekhivska T. Y., Sumer A. R. Doslidzhennia osnovnykh tekhniko-ekspluatatsiinykh kharakterystyk alternatyvnykh vydiv palyva dlia dyzelnykh DVZ. *Naukovi pratsi VNTU*. 2018. No 2. P. 1-13. [in Ukrainian]
2. Yakovlieva A. V., Boichenko S. V., Hudz A. V., Zubenko S. O. Fyzyko-khimichni vlastyvoli biodyzelnykh palyv na osnovi etylo-?ykh esteriv ryzhiievoi olii. *Kataliz ta naftokhi-?iia*. 2020. No 29. P. 24-30. [in Ukrainian]
3. Lievtierov A. M., Savytskyi V. D. Pokrashchennia ekolohichnykh kharakterystyk dyzelia, shcho pratsiuie na biodyzelnykh palyvnykh kompozytsiiakh. *Avtomobilnyi transport*. 2015. No 36. P. 110-117. [in Ukrainian]
4. Zhurenko Yu. I., Yaropud V. M., Babyn I. A. Biodyzel – alternatyvna zamina dyzelnoho palyva. *Zbirnyk naukovykh prats Vinnytskoho natsi-?nalnoho ahrarnoho universytetu*. 2012. No 10 (58). P. 44-51. [in Ukrainian]
5. Korpach A.O., Levkivskyi O.O. Dosli-?zhennia vplyvu fizyko-khimichnykh vlastyvoستي

- biodyzelnoho palyva na palyvnu ekonomichnist, enerhetychni ta ekolohichni pokaznyky avtomobilnoho dyzelia. *Visnyk ZhDTU*. 2016. No 2 (77). P. 115-121. [in Ukrainian]
6. Kryshtopa S., Kryshtopa L., Melnyk V., Prunko I., Demianchuk Y. Experimental research on diesel engine working on a mixture of diesel fuel and fusel oils. *Transport Problems*, 2017, No 12 (2). P. 53–63.
7. Tang Zhang-Chun, Zhenzhou Lu, Zhiwen Liu, Ningcong Xiao. Uncertainty analysis and global sensitivity analysis of techno-economic assessments for biodiesel production. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 175. P. 502–508.
8. Gubicza Krisztina, Nieves Ismael U., Sagues William J., Barta Zsolt, Shanmugam K.T., Ingram, Lonnie O. Techno-economic analysis of ethanol production from sugar cane bagasse using a Liquefaction plus Simultaneous Saccharification and co-Fermentation process. *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 208. P. 42–48.
9. Melnyk V. M., Liakh M. M., Synoverskyi M. M. Doslidzhennia parametriv sumisho- i teploutvorennia dyzelia u protsesi vykorystannia alternatyvnykh palyv. *Naftohazova enerhetyka*. 2020. No 1 (33). P. 109-123. [in Ukrainian]
10. Lievtierov A.M., Avramenko A.N., Savytskyi V.D. Teoretychni doslidzhennia robochoho tsykladu biodyzelnoho dvyhuna. *Avtomobilnyi transport*. 2016. No 38. P. 75-82. [in Ukrainian]
11. Kirubakaran M., Selvan V.A.M. A comprehensive review of lowcost biodiesel production from waste chickenfat. *Renewable and sustainable energy reviews* 2018. Vol. 82. P. 390-401.
12. Vonortas A., Papayannakos N. Comparative analysis of biodiesel versus green diesel. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*. 2014. Vol. 3(1). P. 3-23.
13. Verma P., Sharma M., Review of process parameters for biodiesel production from different feed stocks. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016. Vol. 62. P. 1063-71.
14. Alptekin E., Canakci M., Sanli H. Methyl ester production from chicken fat with high FFA. *World Renewable Energy Congress*, Sweden; 8-13 May; 2011; Linköping; Sweden. 2011. Linköping University Electronic Press.
15. Jansri S., et al. Kinetics of methyl ester production from mixed crude palm oil by using acid-alkali catalyst. *Fuel processing technology*. 2011. Vol. 92(8). P. 1543-8.
16. Latif M.A.A., et al. Nanostructure and oxidation properties investigation of engine using Jatropha biodiesel as engine fuel. *MATEC Web of Conferences*. 2017. EDP Sciences.
17. Tziourtzioumis D.N., Stamatelos A.M. Investigation of the effect of biodiesel blends on the performance of a fuel additive-assisted diesel filter system. *International Journal of Engine Research*. 2014. Vol. 15(4). P. 406-20.
18. Rouhany M., Montgomery H. Global Biodiesel Production: The State of the Art and Impact on Climate Change. *Biodiesel*. 2019, Springer. P. 1-14.
19. Mishra V.K., Goswami R. A review of production, properties and advantages of biodiesel. *Biofuels*. 2018. Vol. 9(2). P. 273-89.
20. Živković S., Veljković M. Environmental impacts of production and use of biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25(1). P. 191-9.
21. Giakoumis E.G. Analysis of 22 vegetable oils' physico-chemical properties and fatty acid composition on a statistical basis, and correlation with the degree of unsaturation. *Renewable energy*. 2018. Vol. 126. P. 403-19.
22. El-Gharbawy A.S.A.A. Production of biodiesel from nonedible vegetable oil. 2016
23. Azizian H., Kramer J.K. A rapid method for the quantification of fatty acids in fat sand oils with emphasis on transfatty acids using Fourier transform near infrared spectroscopy (FT-NIR). *Lipids*. 2005. Vol. 40(8). P. 855-67.
24. Balat M. Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy conversion and management*. 2011. Vol. 52(2). P. 1479-92.
25. Gui M.M., K. Lee, Bhatia S. Feasibility of edible oilvs. non-edible oilvs. Waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*. 2008. Vol. 33(11). P. 1646-53.
26. Rincón L., Jaramillo J., Cardona C. Comparison of feedstocks and technologies for biodiesel production: An environmental and techno-economic evaluation. *Renewable Energy*. 2014. Vol. 69. P. 479-87.
27. Ambat I., Srivastava V., Sillanpää M., Recent advancement in biodiesel production methodologies using various feedstock: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2018. Vol. 90. P. 356-69.
28. Demirbas A. Comparison of trans esterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. *Energy conversion and management*. 2008. Vol. 49(1). P. 125-30.
29. Leung D.Y., Wu X., Leung M. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*. 2010. Vol. 87(4). P. 1083-95.
30. Likozar B., Levec J. Transesterification of canola, palm, peanut, soy bean and sun flower

- oil with methanol, ethanol, isopropanol, butanol and tert-butanol to biodiesel: Modelling of chemical equilibrium, reaction kinetics and mass transfer based on fatty acid composition. *Applied Energy*. 2014. Vol.123. P. 108-20.
31. Demirbas A. Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol trans esterification. *Energy conversion and management*. 2009. Vol. 50(4). P. 923-7.
32. Elgharbawy A.S.A. A cost analysis for biodiesel production from waste cooking oil plant in Egypt. *International Journal of Smart Grid-ij Smart Grid*. 2017. Vol. 1(1). P. 16-25.
33. Elgharbawy A.S., et al. Glycerolysis treatment to enhance biodiesel production from low-quality feedstocks. *Fuel*. 2021. Vol. 284. P. 118970.
34. Ramadhas A.S., Jayaraj S., Muraleedharan C. Biodiesel production from high FFA rubber seed oil. *Fuel*. 2005. Vol. 84(4). P. 335-40.
35. Van Gerpen J. Biodiesel processing and production. *Fuel processing technology*. 2005. Vol. 86(10). P. 1097-107.
36. Atadashi I., et al. Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012. Vol. 16(5). P. 3275-85.
37. Knothe G., Van Gerpen J.H., Krahl J. The biodiesel handbook. AOCS press Champaign, IL. 2005. Vol. 1.
38. Anderson E., et al. Glycerin esterification of scum derived free fatty acids for biodiesel production. *Bioresource technology*. 2016. Vol. 200. P. 153-60.
39. Tan H., Aziz A.A., Aroua M. Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. Vol. 27. P. 118-27.
40. Kombe G.G., et al., Pre-treatment of high free fatty acids oils by chemical re-esterification for biodiesel production – a review. *Advances in Chemical Engineering and Science*. 2013.
41. Felizardo P., et al., Study on the glycerolysis reaction of high free fatty acid oils for use as biodiesel feedstock. *Fuel Processing Technology*. 2011. Vol. 92(6). P. 1225-9.
42. Díaz I., et al. Synthesis of MCM-41 materials functionalised with dial kylsilane groups and their catalytic activity in the esterification of glycerol with fatty acids. *Applied Catalysis A: General*. 2003. Vol. 242(1). P. 161-9.
43. Sani Y., Daud W., Abdul Aziz A. Biodiesel feedstock and production technologies: Successes, challenges and prospects. *Biodiesel-Feedstocks, Production and Applications*. 2012. Vol. 10. P. 52790(2012.)
44. Gebremariam S., Marchetti J. Economics of biodiesel production. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 168. P. 74-84.
45. Gnanaprakasam A., et al., Recent strategy of biodiesel production from waste cooking oil and process in fluencing parameters: a review. *Journal of Energy*, 2013.
46. Bhuiya M., et al., Second generation biodiesel: potential alternative to-edible oil-derived biodiesel. *Energy Procedia*. 2014. Vol. 61. P. 1969-72.
47. Pragma N., Pandey K.K., Sahoo P. A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2013. Vol. 24. P. 159-71.
48. Karmakar A., Karmakar S., Mukherjee S. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource technology*. 2010. Vol. 101(19). P. 7201-10.
49. Riazi M., Chiaramonti D. Biofuels production and processing technology. 2017: CRC Press.
50. Sumathi S., Chai S., Mohamed A. Utilization of oil palmas a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2008. Vol. 12(9). P. 2404-21.
51. Demirbas A., Importance of biodiesel as transportation fuel. *Energy policy*. 2007. Vol. 35(9). P. 4661-70.
52. Baskar G., Aiswarya R. Trends in catalytic production of biodiesel from various feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2016. Vol. 57. P. 496-504.
53. Demirbas A., et al. Biodiesel production from non-edible plant oils. *Energy Exploration & Exploitation*. 2016. Vol. 34(2). P. 290-318.
54. Banković-Ilić I.B., Stamenković O.S., -eljkić V.B. Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2012. Vol. 16(6). P. 3621-47.
55. Pat. 86449 S2 Ukraina, MPK B01F 3/08, B03B 5/04. Zmishuvach dlia motornykh palyv / Melnyk V. M., Kozak F. V., KlymyshynYa. D. ; zaiavnyk i patentovlasnyk Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t nafty i hazu. – No a200704406 ; zaiavleno 20.04.2007. ; opubl. 27.04.2009, Biul. No 8. 3 p. : il.
56. DSTU 7688:2015 “PalyvodyzelneYevro. Tekhnichniumovy”. Vydannia ofitsiine. K.: Derzhstandart Ukrainy, 2015. 9 p.