

УДК 502.1:620.9.06:628.5:662.756

DOI: 10.60022/2(5)-19S

Кофанов Олексій Євгенович

кандидат економічних наук, кандидат технічних наук, доцент
доцент кафедри промислового маркетингу
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

Kofanov Oleksii

Ph.D. in Economics, Ph.D. in Engineering Sciences, Associate Professor
Associate Professor at the Department of Industrial Marketing
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine
ORCID: 0000-0003-2181-9288

Ткачук Костянтин Костянтинович

доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

Tkachuk Kostiantyn

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Geoengineering
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine
ORCID: 0000-0001-5230-9980

Кофанова Олена Вікторівна

доктор педагогічних наук, кандидат хімічних наук, професор
професор кафедри геоінженерії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

Kofanova Olena

Doctor of Pedagogical Sciences, Ph.D. in Chemistry, Professor
Professor at the Department of Geoengineering
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine
ORCID: 0000-0002-9851-6392

Тверда Оксана Ярославівна

доктор технічних наук, професор, професор кафедри геоінженерії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна

Oksana Tverda

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Geoengineering
National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine
ORCID: 0000-0003-3163-0972

Проценко Сергій Іванович

здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти
Державний університет «Київський авіаційний інститут», Україна

Protsenko Serhii

PhD Student
State University «Kyiv Aviation Institute», Ukraine
ORCID: 0009-0007-7015-6632

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ ЗБІЛЬШЕННЯ ЧАСТКИ БІОРОЗКЛАДНИХ ДОБАВОК ДО ДИЗЕЛЬНИХ ПАЛИВ ДЛЯ ВАНТАЖІВОК, ВІЙСЬКОВОЇ ТА СПЕЦТЕХНІКИ

Анотація. У статті проаналізовано процеси, що відбуваються у природному середовищі за участю інгредієнтів відпрацьованих газів двигунів; оцінено екотоксикологічний вплив вантажного

транспорту, військової та спецтехніки на територію країни; визначено шкідливий вплив компонентів викидів двигунів на здоров'я людей і довкілля. Проаналізовано роль забезпечення сталого розвитку країни та дотримання принципів циркулярної зеленої економіки у військовий час та у період повоєнного відновлення держави. Із застосуванням математичного методу аналізу ієрархії та авторського програмного продукту у RStudio обґрунтовано еколого-економічну доцільність підвищення екологічної стійкості транспортного комплексу країни шляхом модифікації дизельного палива біорозкладними добавками (біодизелем, у концентрації до 30% об.), що є перспективним напрямом зменшення екологічного тиску на повітряне середовище і територію країни. Доцільність імплементації запропонованого рішення підтверджено з вірогідністю 82,9%, тоді як отримане низьке значення відношення узгодженості свідчить про надійність отриманих у дослідженні результатів.

Ключові слова: екологічні наслідки воєнних дій, відпрацьовані гази двигунів, біодизель, ліпидовмісні відходи, математичні методи аналізу, принципи циркулярної зеленої економіки та сталого розвитку

ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF INCREASING THE SHARE OF BIODEGRADABLE ADDITIVES TO DIESEL FUELS FOR TRUCKS, MILITARY, AND SPECIAL VEHICLES

Abstract. Protecting the airspace and territory of the country from pollution caused by the emissions of internal combustion engines from trucks, military and special vehicles is a complex problem, especially during and after military operations. Therefore, solving this problem requires significant efforts from vehicle and motor fuel manufacturers, road transport organizations, gas and service station employees, drivers, etc. This study aims to substantiate the economic and environmental feasibility of partially replacing diesel motor fuel with environmentally acceptable fuels containing certain types and concentrations of biodegradable modifying additives for powering trucks, military and special vehicles. As a result, assessment of the ecotoxicological impact of trucks, military and special vehicles on the country's territory was conducted; the harmful effects of emission components on human health and the environment were identified. The role of ensuring the country's sustainable development and compliance with the principles of a circular green economy during wartime and post-war reconstruction were analyzed by the authors. With the help of the mathematical Analytic Hierarchy Process method and the author's software product implemented in the RStudio, the ecological and economic feasibility of increasing the environmental sustainability of the country's transport complex by modifying diesel fuel with biodegradable additives (biodiesel, up to 30% by volume) was substantiated. Such criteria have been assessed – the availability of biodiesel for the enterprise; compliance of the fuel physico-chemical properties and performance characteristics with the regulatory standards of Ukraine and EU countries; reduction of emissions of PM_{10} , nitrogen oxides, and products of incomplete fuel combustion; environmental safety of production and use of biodegradable additives; the usage of lipid-containing waste for biodiesel synthesis; cost and consumption of the modified fuel; possibilities of improving the eco-image of the enterprise. The feasibility of the proposed solution implementation was confirmed with a high probability of 82.9%. The calculated consistency ratio value was 2.3%, which is significantly lower than the generally accepted threshold of 10.0%, indicating the reliability of the obtained results.

Keywords: environmental consequences of military operations, engine exhaust gases, biodiesel, lipid-containing waste, mathematical methods of analysis, principles of circular green economy and sustainable development

Постановка проблеми. Проблема захисту повітряного простору і території країни від забруднення екотоксичними компонентами викидів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) вантажних автомобілів, воєнної і спецтехніки, особливо під час воєнних дій та у післявоєнний період, є складною і багатогранною. Отже, її успішне і своєчасне розв'язання потребує значних зусиль з боку виробників транспортних засобів (ТЗ) і моторних палив (МП), автотранспортних організацій, працівників автозаправних станцій, станцій техобслуговування, водіїв тощо. І особливу увагу в цьому контексті приділяється саме дизельним ТЗ.

З відпрацьованими газами (ВГ) дизельних ДВЗ в атмосферне повітря викидаються дві основні групи токсичних речовин:

- речовини, що мають прямий негативний вплив на організми людини і вищих тварин, на

навколишнє середовище тощо. Це, зокрема, оксиди Карбону(II, IV) і Нітрогену NO_x ; незгорілі вуглеводні C_xH_y , у тому числі поліароматичні та гетероциклічні; альдегіди та інші сполуки, що є складовими різноманітних присадок до МП і олів, компонентами технічних рідин тощо;

- речовини, які здатні спричиняти вторинні негативні наслідки для навколишнього середовища. Це, наприклад, прекурсори фотохімічного «смогу», парникові гази, дрібнодисперсні тверді частки пилу і сажі (PM_{10}).

Механізми і специфіка дисперсії у навколишньому середовищі екотоксикантів, що є викидами двигунів ТЗ, потребують особливої уваги, враховуючи активні воєнні дії і необхідність перевезення територією країни величезної кількості великогабаритних вантажів. При цьому викиди токсичних речовин від роботи двигунів ТЗ нерівномірно розподіляються за часом і за територією країни, що обумовлено нерівномірністю перевезень вантажів і роботи воєнної та спецтехніки, їх типом, режимами роботи, руху різними типами доріг України, технічним станом ТЗ та багатьма іншими чинниками. Крім того, на дисперсію токсичних речовин значно впливатиме метеорологічні умови, особливості орографії місцевості, наявність чи відсутність міської забудови, час доби та інші чинники.

Всі зазначені процеси ускладнюються через потенційно можливі хімічні, фотохімічні, фізико-хімічні та інші взаємодії речовин-токсикантів як між собою, так і зі складовими повітряного середовища на певній місцевості. Проблемою також є створення специфічних геохімічних аномалій, особливо внаслідок вторинного забруднення територій. Як наслідок, повітряне середовище країни перенасичене шкідливими компонентами, концентрації яких у повітрі у декілька разів (а іноді й в десятки разів) перевищують гранично допустимі максимальні разові концентрації. Важливим і є те, що деякі перетворення речовин починаються безпосередньо з моменту їх викиду в атмосферу, тоді як інші – тільки за наявності сприятливих для цих перетворень умов і наявності певних домішок у повітрі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дія токсичних складових викидів двигунів ТЗ на людину, вищих тварин і природне середовище дуже різноманітна – від ініціації певних неприємних симптомів (запаморочення, кашель, подразнення слизових оболонок тощо) до виникнення і росту ракових пухлин, інших небезпечних захворювань. При цьому ступінь шкідливого впливу екотоксикантів безпосередньо залежить від характеру і вмісту цих речовин у викидах ДВЗ, у повітряному середовищі тощо; стану людини (наприклад, люди з особливими потребами, діти, особливо раннього віку, та люди похилого віку здатні сильніше реагувати на несприятливі умови життя); умов дисперсії цих шкідливих домішок в атмосферному повітрі.

Численні дослідження надають вагомі аргументи щодо негативного впливу на здоров'я людини таких екотоксикантів – компонентів ВГ двигунів ТЗ, як:

- чадний газ, який внаслідок утворення в організмі людини карбоксигемоглобіну ускладнює газообмін клітин, заважаючи перенесенню кисню. Це, своєю чергою, спричинює кисневе голодування, незворотні порушення у нервовій та ендокринній системах, сприяє розвитку серцевих захворювань, атеросклерозу, виникненню інфаркту міокарда і розвитку легеневих захворювань [1; 2];

- оксидів Нітрогену, зокрема NO , який через декілька годин після викиду практично повністю перетворюється на NO_2 , що є навіть більш токсичним газом за нітроген(II) оксид. Він є надзвичайно сильним подразником очей, слизових оболонок і дихальних шляхів; впливає навіть на активність головного мозку. Крім того, значний вплив на організм людини і навколишнє середовище виявляють нітратна і нітритна кислоти, які є вторинними продуктами взаємодії оксидів Нітрогену з парами води в атмосферному середовищі [3; 4];

- незгорілі вуглеводні різних класів, основну небезпеку серед яких представляють ароматичні, поліароматичні і гетероциклічні вуглеводні, а саме – бензол, толуол, ксилол, фенантрен, антрацен, бенз(а) пірени, фурани і діоксини. Їх високий вміст у повітряному середовищі не тільки викликає наркотичну дію у людини, а й є причиною розвитку ракових пухлин, порушень генетичного апарату (мутагенна дія), різноманітних вад розвитку у новонароджуваних і дітей раннього віку, змін у складі крові людини тощо. Олефінові вуглеводні, разом з оксидами Нітрогену, маючи високу хімічну активність, створюють умови для формування фотохімічного смогу [5; 6];

- дрібнодисперсні тверді частинки сажі і пилу, які є, в основному, емітентами ДВЗ дизельних двигунів, продукти зносу шин, гальмівних колодок, дорожнього покриття тощо. Умовний діаметр таких часток зазвичай менше 10 мкм, тому вони легко потрапляють до альвеол легенів, відкладаються в носових пазухах, трахеях, бронхах тощо. Ці дрібнодисперсні тверді частинки мають надзвичайно розвинуту поверхню і за рахунок фізико-хімічної адсорбції утримують на ній значні кількості канцерогенних, мутагенних та інших токсичних речовин [4; 5];

- альдегіди різних класів, зокрема, формальдегід і акролеїн, які негативно впливають на центральну нервову систему та інші важливі органи організму людини [7; 8].

Діоксид Карбону (вуглекислий газ), хоч і не є токсичною домішкою повітряного середовища, але є парниковим газом, а за підвищеного вмісту в повітрі матиме наркотичну і подразнюючу дію. Окрім того, у природному середовищі цей газ здатний вступати в хімічну взаємодію зі складовими будівельних матеріалів, створюючи небезпеку їх руйнування [5; 9].

У Європейському Союзі (ЄС) і в нашій країні вміст у викидах двигунів ТЗ таких екоотоксикантів, як оксиди Нітрогену, монооксид Карбону, вуглеводні, особливо поліароматичні, дрібнодисперсні тверді частинки тощо жорстко регулюється законодавством для більшості типів ТЗ; причому, для кожного типу ТЗ застосовуються свої стандарти. Як наслідок, ті ТЗ, що не відповідають чинним стандартам ЄС, не можуть продаватися або пересуватися його територією. У нашій країні гармонізовані з ЄС екологічні норми розповсюджуються тільки на нові ТЗ, але не застосовуються до застарілих і вживаних ТЗ, які активно завозяться в країну.

Таким чином, попри значну кількість наукових публікацій і досліджень, присвячених негативному впливу компонентів викидів двигунів ТЗ на здоров'я людей, проблема транспортного забруднення, особливо з боку дизельних ДВЗ, все ще залишається невирішеною, а тому вимагає нагального і комплексного підходу. Отже, **метою даного дослідження** є обґрунтування з економічної і екологічної точок зору доцільності часткової заміни дизельного моторного палива (ДП) на екологічно прийнятні види палива з визначеним видом і концентрацією біорозкладних модифікувальних добавок для живлення вантажного транспорту, військової та спецтехніки різного призначення.

Виклад основного матеріалу. Сучасні МП, у тому числі й альтернативні, зокрема, біопалива, мають задовольняти певним вимогам, що пов'язані з їхніми фізико-хімічними, екологічними та експлуатаційними властивостями, економічністю, надійністю і довговічністю роботи двигунів. Необхідною умовою безпечної експлуатації двигунів ТЗ є екологічна сприятливість і вуглецева нейтральність застосованих МП і олив. У цьому аспекті важливим є те, що біопалива практично не містять сполук Сульфуру і ароматичних вуглеводнів, що не тільки поліпшує екологічні характеристики МП, а й значно зменшує його корозійні властивості (за відсутності води) та запобігає нагаро- і смолоутворенню. Дослідженнями встановлено, що додавання до МП біокомпонентів зміцнює граничну плівку на поверхні металів, поліпшуючи тим самим протизносні властивості паливних сумішей [10; 11].

Відомо, що використання біорозкладних добавок (біодизелю) до традиційного ДП надає можливість досягти не тільки активного функціонування автотранспортних перевезень на території України навіть в умовах дефіциту нафтопродуктів, а й сприяє підвищенню екологічної дружності дизельних ТЗ, особливо вантажних, військової та спецтехніки. При цьому актуальність використання альтернативних, екологічно дружних, видів МП для живлення ДВЗ під час активних воєнних дій на території країни, враховуючи необхідність перевезень величезної кількості різноманітних, у тому числі й великогабаритних вантажів, зростає в рази. Це, своєю чергою, надає можливість не тільки розширити паливну базу, а й підвищити паливну незалежність країни, екологічність транспортних перевезень і використання воєнної та спецтехніки, особливо за рахунок виробництва біодизельного МП з ліпидовмісних відходів і використання під час проведення реакції переестерифікації (основна реакція при виробництві біодизелю) етанолу або відходів його виробництва замість метанолу як спиртового реагенту [12-14].

Щоб бути конкурентноспроможним на ринку паливно-мастильних матеріалів, біодизель повинен коштувати хоча б на (5...10)% менше порівняно з традиційним дизельним МП [15]. Тому, керуючись принципами циркулярної зеленої економіки та сталого розвитку, для виробництва біодизелю доцільно використовувати доступну ліпидовмісну сировину, зокрема, відходи масложирокомбінатів (тваринний чи пташиний жир), підприємств харчової і переробної промисловості (некондиційні масла рослинного походження, використана рослинна олія із харчових підприємств), некондиційну деревину і відходи лісопереробки, сільськогосподарського виробництва тощо, водорості та інші морські біоресурси.

Запропонована раніше авторами дослідження модифікація традиційного МП біодобавками вмістом до 30% об. має величезне значення з точки зору забезпечення екологічної безпеки і кліматичної нейтральності МП. Для доведення цієї тези проаналізуємо вуглецеве число С/Н (відношення кількості атомів Карбону до кількості атомів Гідрогену) для модифікованих біодобавками МП (табл. 1). Як можна побачити, цей показник закономірно зменшується при переході від дизельного МП до біодизелю (різниця становить приблизно 6%). При цьому відомо, що збільшення вуглецевого числа С/Н у паливах

призводить до збільшення вмісту парникових газів (зокрема, оксидів Карбону) у ВГ двигуна. А оскільки важливою умовою забезпечення стійкого розвитку суспільства і біосфери є сприяння кліматичній нейтральності, у тому числі й за рахунок скорочення викидів парникових газів, то людству вкрай потрібні низьковуглецеві енергоносії, бажано біорозкладні, біологічного походження.

Таблиця 1

Вуглецеве число і енергоємність для досліджуваних МП

№ п/п	Паливо	Вуглецеве число С/Н	Енергоємність відношення Н/С
1.	Дизельне паливо літнє	6,82	0,147
2.	Модифіковане МП, 10% об. біодобавки	6,78	0,147
3.	Модифіковане МП, 15% об. біодобавки	6,74	0,148
4.	Модифіковане МП, 30% об. біодобавки	6,72	0,149
5.	Біодизельне паливо	6,42	0,156

Джерело: складено авторами

Своєю чергою, водневе число Н/С характеризує енергоємність МП. Отже, як можна побачити з таблиці 1, енергоємності ДП і модифікованих біодобавками МП мають достатньо близькі значення – $\sim (0,147 \dots 0,149)$, що надає можливість модифікування властивостей МП у достатньо широких межах. Разом з тим, у модифікованих біодобавками паливах збільшується масова частка Оксигену, що дещо зменшує нижчу теплоту згоряння МП $Q_{\text{н}}$. Так, $Q_{\text{н}}$ біодизелю приблизно на 11% менша за $Q_{\text{н}}$ дизельного МП.

Кількість теплоти, що виділяється при згорянні 1 кг МП, значною мірою залежить від вуглецевого числа. А оскільки при застосуванні модифікованих біодобавками МП С/Н закономірно зменшується (табл. 1), то це приводить до збільшення вмісту парів води у вихлопах дизеля і одночасного зменшення вмісту оксидів Карбону. Своєю чергою, збільшення частки Оксигену в біоскладовій МП спричинює зниження теоретично необхідної кількості повітря для згоряння 1 кг МП приблизно на 13% [16]. Отже, щоб компенсувати зниження потужності двигуна, спричинене меншою теплотворною здатністю біодобавки, необхідно збільшити циклову подачу МП при забезпеченні необхідних значень коефіцієнту надлишку повітря α (приблизно в $(1,3 \dots 1,5)$ рази). Окрім того, завдяки відносному збільшенню густини модифікованих біодобавками палив підвищується енергонасиченість циклової порції МП рівного об'єму, а тому падіння теплотворної здатності майже не впливатиме на його експлуатаційні характеристики.

З екологічної точки зору, у [17] було проведено стендові випробування дизеля, а також досліджено навантажувальні характеристики при роботі двигуна на традиційному ДП, чистому біопаливі і сумішевих МП. Автори роботи дійшли висновку, що при застосуванні 100%-го біодизелю витрата палива збільшується приблизно на 12% порівняно з традиційним ДП, що пояснюється меншою теплотою згоряння, а сумарні питомі викиди екотоксикантів з ВГ двигуна, зведені до монооксиду Карбону CO , і димність при цьому значно зменшуються. Аналогічні результати було отримано і у ранніх дослідженнях авторів [14; 16].

Важливим був також висновок авторів [17], що використання для живлення ДВЗ модифікованих біодизелем МП не вимагатиме суттєвих змін у його конструкції. Тобто хоча деякі з фізико-хімічних й експлуатаційних властивостей модифікованих біодобавками палив дещо відрізняються від властивостей традиційного ДП, всі необхідні для безпечної експлуатації ТЗ характеристики знаходяться у допустимих межах [17; 18]. При цьому підвищений уміст Оксигену в модифікованих біодобавками МП дещо підвищує температуру у камері згоряння двигуна, тим самим сприяючи підвищенню вмісту оксидів Нітрогену NO_x у ВГ двигуна. Це значно обмежує діапазон застосування біодобавок приблизно на рівні до 30% об., оскільки за більших концентрацій біодобавки інтенсифікується взаємодія між Оксигеном і азотом повітря, а також створюються умови для різноманітних вільно-радикальних перетворень. Проте, у той самий час, значно скорочуються викиди продуктів неповного згоряння МП – чадного газу, сажі і незгорілих вуглеводнів [19].

Отже, дослідження показало, що заміна традиційного МП на модифіковані біодобавками паливної композиції (з об'ємною часткою біоскладової до 30%) надає змогу суттєво покращити екологічні показники дизеля, що сприятиме зменшенню екологічної небезпеки експлуатації дизельних ДВЗ вантажного транспорту, військової та спецтехніки за рахунок суттєвого скорочення викидів сажі, чадного

і вуглекислого газів (через зменшення C/H), оксидів Нітрогену і Сульфуру (біодизель практично не має у своєму складі сполук Сульфуру), небезпечних ароматичних і поліциклічних та гетероциклічних вуглеводнів тощо. Окрім того, модифіковані біодобавками МП мають покращені мастильні властивості порівняно з нафтовим низькосірчистим ДП, що є особливо важливим для дизельних двигунів.

З метою кількісного оцінювання та обґрунтування технологічної, екологічної й економічної доцільності запропонованих у дослідженні модифікацій нами розроблено програмний продукт на базі методу аналізу ієрархій (MAI), англ. Analytic Hierarchy Process, Томаса Лорі Сааті [20; 21] і пакету ahp [22] із застосуванням мови програмування R у середовищі RStudio. Розроблену нами ієрархію і результати розрахунків наведено у табл. 2; приклад застосування програмного продукту показано на рис. 1.

Таблиця 2

Результати аналізу у RStudio доцільності збільшення частки біоскладової ДП

Критерії та підкритерії	Вага	Так*	Ні*	Відношення узгодженості
Ціль: Оцінити доцільність збільшення частки біорозкладної складової дизельного палива на прикладі підприємства з вантажоперевезень	100,0%	82,9%	17,1%	2,3%
<i>1. Технологічна можливість застосування запропонованої модифікуючої біодобавки</i>	52,8%	44,8%	8,0%	5,1%
1.1. Доступність біодизелю як компоненту паливної композиції	27,8%	23,5%	4,3%	–
1.2. Відповідність фізико-хімічних характеристик модифікованого палива чинній нормативній базі України та країн ЄС	15,1%	13,0%	2,1%	–
1.3. Зміна експлуатаційних властивостей палива та необхідність внесення змін у конструкцію двигуна	9,9%	8,3%	1,6%	–
<i>2. Екологічна безпека і відповідність принципам сталого розвитку та циркулярної зеленої економіки</i>	35,7%	30,5%	5,2%	7,6%
2.1. Зменшення викидів PM_{10} внаслідок модифікації	14,6%	12,8%	1,8%	–
2.2. Зменшення викидів продуктів неповного згоряння МП (чадного газу і незгорілих вуглеводнів)	9,6%	8,5%	1,1%	–
2.3. Скорочення викидів оксидів Нітрогену	6,2%	4,6%	1,6%	–
2.4. Екологічна безпека виробництва і використання біорозкладної добавки до моторного палива	3,7%	3,2%	0,5%	–
2.5. Використання відходів виробництва у процесі синтезу біодизелю	1,6%	1,4%	0,2%	–
<i>3. Економічна доцільність використання модифікованого біорозкладною добавкою МП</i>	11,5%	7,6%	3,9%	1,7%
3.1. Вартість модифікованого біорозкладною добавкою палива	5,9%	3,3%	2,6%	–
3.2. Питомі витрати моторного палива після його модифікації біорозкладною добавкою	3,5%	2,6%	1,0%	–
3.3. Покращення екоіміжду підприємства та його сприйняття як еко-орієнтованого бізнесу	2,1%	1,8%	0,3%	–

Примітка: * Альтернативи: Так, збільшення частки біорозкладної складової дизельного палива є доцільним; Ні, збільшення частки біорозкладної складової дизельного палива є недоцільним.

Джерело: складено авторами

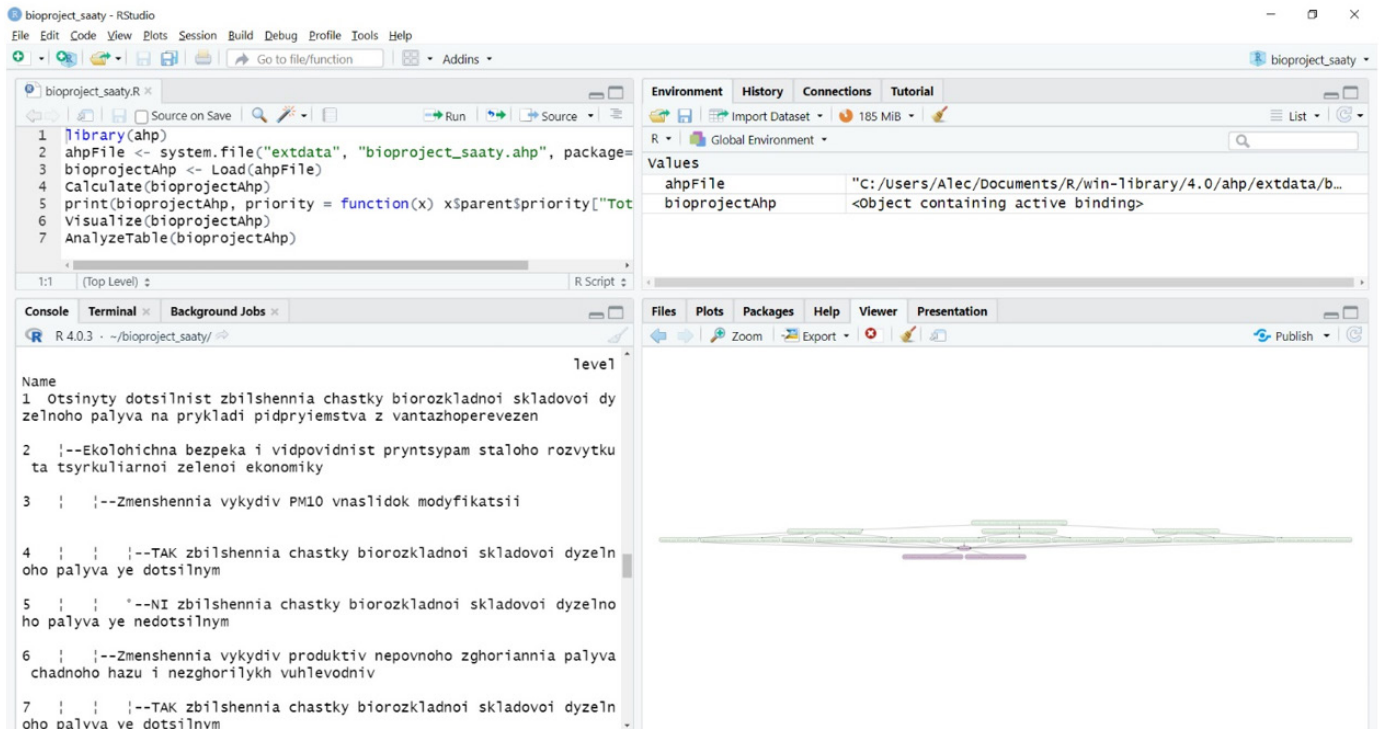


Рис. 1. Приклад застосування розробленого авторами програмного продукту у RStudio
Джерело: сформовано авторами

Найвищим рівнем створеної ієрархії є ціль – оцінка доцільності збільшення частки біорозкладної складової ДП на прикладі підприємства з вантажоперевезень. Відповідно до методики, у результаті розрахунків для цілі, кожного критерію і підкритерію ієрархії визначаються їх вагові значення; також встановлюється перевага однієї з двох альтернатив (у відсотках) – «Так, збільшення частки біорозкладної складової дизельного палива є доцільним» і «Ні, збільшення частки біорозкладної складової дизельного палива є недоцільним».

Отже, результати аналізу за детально описаною у роботі [23] методикою свідчать, що у нашому дослідженні варіант «Так» отримав пріоритет (вагове значення) у 82,9%, тоді як варіант «Ні» отримав значно менший пріоритет – лише 17,1%. При цьому пороговим значенням прийняття рішення щодо доцільності збільшення частки біорозкладної складової ДП є значення 75,0%. Отже, отримана під час аналізу пріоритетність варіанту «Так» вказує на чітке експертне схвалення запропонованого нами підходу щодо модифікації МП біодобавками на основі біодизелю вмістом до 30% об.

Відношення узгодженості (ВУ), англ. Consistency Ratio, для найвищого рівня ієрархії становить 2,3%, що значно нижче загальноприйнятого порогу у 10,0%, до якого неузгодженість вважається допустимою. Це доводить високу узгодженість суджень експертів щодо порівнянь на цьому рівні і, відповідно, свідчить про надійність отриманих результатів. Переходячи до аналізу критеріїв наступного рівня, що безпосередньо впливають на досягнення поставленої цілі аналізу, нами визначено три основні групи критеріїв – технологічну, екологічну та економічну, сутність яких деталізовано у табл. 2.

Технологічна можливість застосування запропонованої модифікуючої біодобавки є найвагомим критерієм, маючи пріоритет у 52,8%. Його ВУ становить 5,1%, що свідчить про прийнятну узгодженість суджень експертів щодо його значущості. Ключова роль цього критерію підкреслює принципову важливість того, що запропоноване рішення може бути технічно реалізоване на досліджуваному підприємстві. Внесок даного критерію до альтернативи «Так» складає 44,8%, тоді як до альтернативи «Ні» – 8,0%. Це обумовлено, зокрема, тим, що використання модифікованих біодобавками МП не вимагатиме суттєвих змін у конструкції двигуна, а їх фізико-хімічні та експлуатаційні властивості знаходяться в допустимих для безпечної роботи двигуна межах.

Екологічна безпека і відповідність принципам сталого розвитку та циркулярної зеленої економіки є другим за вагою критерієм; його пріоритетність складає 35,7%, а внесок до альтернативи «Так», відповідно, 30,5%. Показник ВУ для цього критерію становить 7,6%, що також є прийнятним і вказує

на узгодженість суджень експертів. Тобто, як можна побачити з табл. 2, значимість екологічного аспекту щодо експлуатації ДВЗ дизельних вантажних ТЗ, військової та спецтехніки під час ведення на території країни активних бойових дій значно посилюється.

Своєю чергою, аналіз підкритеріїв екологічної групи показує, що «Зменшення викидів PM_{10} внаслідок модифікації» МП є найсуттєвішим серед них, оскільки його вагове значення становить 14,6%, з яких 12,8% припадає на альтернативу «Так». На другому місці стоїть підкритерій «Зменшення викидів продуктів неповного згоряння палива (чадного газу і незгорілих вуглеводнів)», який має вагове значення 9,6%, 8,5% з яких припадає на альтернативу «Так». Це повністю узгоджується з нашими попередніми дослідженнями, які показали скорочення питомих викидів екотоксикантів, включаючи дрібнодисперсні тверді частинки, при застосуванні біодобавки [14; 16].

Третє місце серед підкритеріїв посідає «Скорочення викидів оксидів Нітрогену» із ваговим значенням 6,2%. Важливо відзначити при цьому, що хоча альтернатива «Так» (4,6%) у даному підкритерії все ще переважає «Ні» (1,6%), різниця між цими альтернативами є менш значною порівняно з іншими підкритеріями екологічної групи. Це можна пояснити тим, що підвищений вміст Оксигену в модифікованих біоскладовою паливах може спричинити підвищення температури в камері згоряння двигуна, сприяючи тим самим підвищенню вмісту оксидів Нітрогену NO_x у ВГ. Саме це, на нашу думку, впливає на обмеження діапазону застосування біодобавок до МП саме на рівні 30% об.

У підкритеріях «Екологічна безпека виробництва і використання біорозкладної добавки до моторного палива» (має вагове значення 3,7%) та «Використання відходів виробництва у процесі синтезу біодизелю» (1,6%) спостерігається доволі значне переважання варіанту «Так» із сумарним внеском у 4,6%. Важливо відмітити, що ці дані відповідають принципам циркулярної зеленої економіки та сталого розвитку, що передбачають використання екологічно прийнятної і доступної сировини та ліпідовмісних відходів для виробництва біодизелю.

МАІ-аналіз показав, що «Економічна доцільність використання модифікованого біорозкладною добавкою моторного палива» має вагове значення 11,5% з 7,6%-м внеском до альтернативи «Так». Його ВУ становить 1,7%, що є дуже високим показником узгодженості суджень експертів. Зазначимо, що експертна перевага, яку було надано двом іншим групам критеріїв, зумовлена здебільшого специфікою досліджуваного підприємства. Оскільки це підприємство займається вантажоперевезеннями, у тому числі й великогабаритних вантажів, його ключовими пріоритетами є безперебійна робота ТЗ та дотримання чинних норм. У цьому контексті технологічні й екологічні аспекти використання МП набувають, на думку експертів, більшої ваги, ніж його економічні показники.

У даному контексті важливо також відмітити, що посилення екологічних стандартів і підвищення соціальної відповідальності змушують зазначене підприємство приділяти більшу увагу скороченню викидів екотоксикантів при роботі ДВЗ, що дозволяє уникнути штрафів і зміцнити репутацію компанії. Таким чином, навіть якщо модифіковане МП не буде дешевшим за традиційне, непрямі економічні вигоди від його використання, такі як, наприклад, надійність, довговічність і відповідність екологічним нормам у довгостроковій перспективі є важливішими.

Висновки. Враховуючи потенційну можливість збільшення екологічної безпеки територій країни за рахунок використання для живлення вантажних ТЗ, військової та спецтехніки модифікованих біоскладовою МП (до 30% об. біодизелю), проведено математичний аналіз еколого-економічної доцільності імплементації запропонованого рішення. Обґрунтування здійснено із застосуванням розробленої авторами програми у середовищі RStudio на основі методу аналізу ієрархій. Підтверджено доцільність збільшення частки біорозкладної добавки до ДП на підприємстві з вантажоперевезень. Пріоритетність варіанту «Так» при цьому складає 82,9%, що перевищує порогове значення у 75,0%, а отримані низькі значення відношення узгодженості свідчать про надійність результатів.

Найвагомішим критерієм є технологічна можливість застосування запропонованої біодобавки (52,8%), що враховує її доступність та відповідність фізико-хімічних і експлуатаційних властивостей біодизелю вимогам безпечного функціонування двигуна. Другим за значенням є критерій екологічної безпеки і відповідності принципам сталого розвитку та циркулярної зеленої економіки (35,7%), який враховує зниження викидів PM_{10} , продуктів неповного згоряння МП, скорочення викидів оксидів Нітрогену; а також екологічну безпеку виробництва і використання біодобавки до МП і використання ліпідовмісних відходів виробництва у процесі синтезу біодизелю.

Економічна доцільність використання модифікованого біорозкладною добавкою МП посідає третє місце (11,5%), оскільки, на думку експертів, для підприємств з вантажоперевезень ключовими є безперебійна робота ТЗ і дотримання чинних норм. При цьому, економічна група підкритеріїв є важливою

для таких підприємств, оскільки вони сфокусовані на таких аспектах, як вартість модифікованого МП, його питомих витратах та покращенні іміджу підприємства.

Таким чином, встановлено, що запропоноване рішення відповідає принципам циркулярної зеленої економіки та сталого розвитку, передбачаючи не тільки застосування екологічно сприятливих видів МП для дизельних ТЗ, військової та спецтехніки, а й підвищення рівня переробки і утилізації ліпидовмісних відходів. Запропоновані інноваційні підходи до модифікування традиційних МП біорозкладними добавками забезпечать мінімізацію шкідливого впливу на довкілля і здоров'я людей від викидів екотоксикантів при роботі ДВЗ.

Література

1. Halici A., Abatay K., Hür I., Usul E. The properties, epidemiology, and physiopathology of carbon monoxide gas. *Carbon Monoxide Pois.: Prevention, Treatment and Outcomes*. Nova Science Publishers, 2023. С. 1–12.
2. Steuer N. B., Lüken H., Schlanstein P. C., Menne M. F., Hoffmann C., Lübke C., Schmitz-Rode T., Jansen S. V., Steinseifer U., Kopp R. (2025). Extracorporeal hyperoxygenation therapy (EHT) for CO poisoning: In vitro and in vivo feasibility of a full-scale batch system. *Scientific Reports*. 2025. № 15 (1), 4066. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84878-z>. (дата звернення: 11.07.2025).
3. Liu S., Tang Y., Liu Y., Gan T., Yang X. Multi-type vehicles' contributions to air pollution using mobile monitoring and explainable machine-learning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2025. № 146, 104890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104890>. (дата звернення: 11.07.2025).
4. Gudziunaite S., Mackintosh K. A., Davies G. A., Jordan K. A., Lewis P. D., Griffiths C. J., Alexander Swain T., McNarry M. A. Global trends in the relationship between chronic air pollution exposure, physical activity and lung function in youth aged 5–18 years with and without asthma: A systematic review. *Sports Medicine – Open*. 2025. № 11 (1), 57. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00856-3> (дата звернення: 11.07.2025).
5. Ogunkunle O., Ahmed N. A. Overview of biodiesel combustion in mitigating the adverse impacts of engine emissions on the sustainable human–environment scenario. *Sustainability*. 2021. № 13 (10), 5465. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13105465>. (дата звернення: 11.07.2025).
6. Sreedevi K. N. V., Krishna M. M. Effect of EGR on performance of ci engine with diesel and cotton seed oil as fuels. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2019. №9 (5), С. 973–984. <https://doi.org/10.24247/ijmperdoct201986> (дата звернення: 11.07.2025).
7. Xing C., Peng H., Liu C., Li Q., Tang Z., Tan W., Liu H., Hong Q. Hyperspectral remote sensing for air pollutants: Stereoscopic monitoring, source localization & warning, and a dynamic emission inventory concept. *Environment International*. 2025. № 198, 109375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109375>. (дата звернення: 11.07.2025).
8. Ibarra-Espinosa S., Zhang X., Xiu A., Gao C., Wang S., Ba Q., Gao C., Chen W. A comprehensive spatial and temporal vehicular emissions for northeast China. *Atmospheric Environment*. 2021. № 244, 117952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117952>. (дата звернення: 11.07.2025).
9. Wang M., Cho Y., Li J. Air pollution and sleep health in middle-aged and older adults: A systematic review and meta-analysis. *Sleep Medicine Reviews*. 2025. № 83, 102136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2025.102136>. (дата звернення: 17.07.2025).
10. Бекіров А. Ш., Бережний А. О., Токарева І. А., Мухіна Т. П. Альтернативні палива для авіаційної техніки: досягнення і проблеми. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2023. № 2 (51). С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.02>. (дата звернення: 10.07.2025).
11. Яковлева А. В. Фізико-хімічні властивості палив для повітряно-реактивних двигунів, модифікованих компонентами рослинного походження: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07. Київ, 2016. 177 с.
12. Lorne D., Chabrelie M.-F. New biofuel production technologies: overview of these expanding sectors and the challenges facing them. *Panorama 2011. IFP Energies nouvelles*. 2011. URL: <http://www.ifpenergiesnouvelles.com>. (дата звернення: 10.07.2025).
13. Knothe H., Van Gerpen J., Krahl J. *The Biodiesel Handbook*. AOCS Press, Champaign, Illinois, 2005. 286 с.
14. Kofanov O., Vasykivych O., Kofanova O., Zozul'ov O., Kholkovsky Y., Khrutba V., Borysov O., Bobryshov O. Mitigation of the environmental risks resulting from diesel vehicle operation at the mining industry enterprises. *Mining of Mineral Deposits*. 2020. № 14 (2). С. 110–118. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining14.02.110>. (дата звернення: 10.07.2025).

15. Latifundist Media. Біодизель з ріпаку: як виготовити, плюси, мінуси та ціна питань. 27 травня 2022. URL: <https://latifundist.com/cards/64-biodizel-z-ripaku-yak-vigotoviti-plyusi-minusi-ta-tsina-pitannya> (дата звернення: 11.07.2025).

16. Кофанов О. Є. Багатопараметричні моделі прогнозування складу і властивостей модифікованих біокомпонентом паливних систем. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 4 (50) С. 176–183. DOI: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2017.128483>. (дата звернення: 11.07.2025).

17. Захарчук В. І., Захарчук О. В. Покращення екологічних показників транспортного засобу застосуванням біопалива. *Матеріали X Міжнародної науково-технічної інтернет-конференції «Проблеми і перспективи розвитку автомобільного транспорту»*, 14–15 квітня 2022 р.: зб. наук. праць [Електронний ресурс]. Вінниця: ВНТУ, 2022. С. 95–99. URL: <https://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2022.pdf>. (дата звернення: 12.07.2025).

18. Корпач А. О., Левківський О. О. Можливості та перспективи використання біопалива в дизелях. *Автошляховик України*. 2009. № 12. С. 156–158.

19. Wcisło G. (2013). Determination of the impact of FAME biocomponent on the fraction composition of diesel engine fuels. *Combustion Engines*. № 154 (3). P. 1098–1103. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/133795> (дата звернення: 11.07.2025).

20. Saaty T. L., Vargas L. G. Decision making with the analytic network process. Economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks. New York : Springer, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7279-7>. (дата звернення: 14.06.2025).

21. Gu W., Saaty T. L., Wei L. Evaluating and optimizing technological innovation efficiency of industrial enterprises based on both data and judgments. *International Journal of Information Technology & Decision Making*. 2018. № 17 (1). С. 9–43. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219622017500390>. (дата звернення: 14.06.2025).

22. Github. Analytic Hierarchy Process (APH) with R. URL: <https://github.com/gluc/ahp> (дата звернення: 11.06.2025).

23. Kofanov O., Kofanova O., Tkachuk K., Tverd, O., Shostak I. Enhancement of the market attractiveness and success of startups on the circular economy and sustainability principles. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2024. № 10 (2). С. 167–189. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2024.10.02.07> (дата звернення: 10.06.2025).

References

1. Halici A., Abatay K., Hür I., Usul E. (2023). The properties, epidemiology, and physiopathology of carbon monoxide gas. In *Carbon Monoxide Pois.: Prevention, Treatment and Outcomes*. Nova Science Publishers, Inc. (pp. 1–12).

2. Steuer N. B., Lüken H., Schlanstein P. C., Menne M. F., Hoffmann C., Lübke C., Schmitz-Rode T., Jansen S. V., Steinseifer U., Kopp, R. (2025). Extracorporeal hyperoxygenation therapy (EHT) for CO poisoning: In vitro and in vivo feasibility of a full-scale batch system. *Scientific Reports*, vol. 15 No. 1, 4066. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-84878-z>. (accessed July 11, 2025).

3. Liu S., Tang Y., Liu Y., Gan T., Yang X. (2025). Multi-type vehicles' contributions to air pollution using mobile monitoring and explainable machine-learning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 146, 104890. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2025.104890>. (accessed July 11, 2025).

4. Gudziunaite S., Mackintosh K. A., Davies G. A., Jordan K. A., Lewis P. D., Griffiths C. J., Alexander Swain T., McNarry M. A. (2025). Global trends in the relationship between chronic air pollution exposure, physical activity and lung function in youth aged 5–18 years with and without asthma: A systematic review. *Sports Medicine - Open*, 11(1), 57. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40798-025-00856-3>. (accessed July 11, 2025).

5. Ogunkunle O., Ahmed N. A. (2021). Overview of biodiesel combustion in mitigating the adverse impacts of engine emissions on the sustainable human–environment scenario. *Sustainability*, 13(10), 5465. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13105465>. (accessed July 11, 2025).

6. Sreedevi K. N. V., Krishna M. M. (2019). Effect of EGR on performance of ci engine with diesel and cotton seed oil as fuels. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, № 9(5), P. 973–984. DOI: <https://doi.org/10.24247/ijmperdoct201986>. (accessed July 11, 2025).

7. Xing C., Peng H., Liu C., Li Q., Tang Z., Tan W., Liu H., Hong Q. (2025). Hyperspectral remote sensing for air pollutants: Stereoscopic monitoring, source localization & warning, and a dynamic emission inventory concept. *Environment International*, vol. 198, 109375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2025.109375>.

(accessed July 11, 2025).

8. Ibarra-Espinosa S., Zhang X., Xiu A., Gao C., Wang S., Ba Q., Gao C., Chen W. (2021). A comprehensive spatial and temporal vehicular emissions for northeast China. *Atmospheric Environment*, vol. 244, 117952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117952>. (accessed July 11, 2025).

9. Wang M., Cho Y., Li J. (2025). Air pollution and sleep health in middle-aged and older adults: A systematic review and meta-analysis. *Sleep Medicine Reviews*, vol. 83, 102136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smr.2025.102136> (accessed July 17, 2025).

10. Biekirov A. Sh., Berezhnyi A. O., Tokarieva I. A., Mukhina T. P. Alternatyvni palyva dlia aviatsiinoi tekhniki: dosiahnennia i problemy [Alternative fuels for aviation techniques: achievements and problems]. *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*. 2023. № 2 (51). С. 15–20. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2023.51.02>. (accessed July 10, 2025). (in Ukrainian).

11. Yakovlieva A. V. Fyzyko-khimichni vlastyvoli palyv dlia povitriano-reaktyvnykh dvyhuniv, modyfikovanykh komponentamy roslynnoho pokhodzhennia [Physical and chemical properties of fuels for air-reaction engines modified with components of plant origin] : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.17.07. Kyiv, 2016. 177 p. (in Ukrainian).

12. Lorne D., Chabrelie M.-F. (2011). New biofuel production technologies : overview of these expanding sectors and the challenges facing them. Panorama 2011. IFP Energies nouvelles. URL: <http://www.ifpenergiesnouvelles.com>. (accessed July 10, 2025).

13. The Biodiesel Handbook / [Ed. : Herhard Knothe, Jon Van Gerpen, Jurgen Krahl]. AOCS Press, Champaign, Illinois, 2005. 286 p.

14. Kofanov O., Vasykivych O., Kofanova O., Zozul'ov O., Kholkovsky Y., Khrutba V., Borysov O., Bobryshov O. (2020). Mitigation of the environmental risks resulting from diesel vehicle operation at the mining industry enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, № 14 (2), P. 110–118. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining14.02.110>. (accessed July 10, 2025).

15. Latifundist Media. Biodyzel z ripaku: yak vyhotovyty, pliusy, minusy ta tsina pytannia [Biodiesel from rapeseed: how to produce it, pros, cons, and price]. 27 travnia 2022. URL: <https://latifundist.com/cards/64-biodizel-z-ripaku-yak-vigotoviti-plyusi-minusi-ta-tsina-pitannya> (accessed July 11, 2025). (in Ukrainian).

16. Kofanov O. Ye. (2017). Bahatoparmetrychni modeli prohnozuvannia skladu i vlastyvolei modyfikovanykh biokomponentom palyvnykh system [Multiparametric models for predicting the composition and properties of fuel systems modified with biocomponents]. *Enerhetyka : ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*. № 4 (50) P. 176–183. DOI : <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2017.128483>. (accessed July 11, 2025). (in Ukrainian).

17. Zakharchuk V. I., Zakharchuk O. V. Pokrashchennia ekolohichnykh pokaznykiv transportnoho zasobu zastosuvanniam biopalyva [Improving the environmental performance of vehicles through the use of biofuels]. *Materialy X Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi internet-konferentsii «Problemy i perspektyvy rozvytku avtomobilnoho transportu»*, 14–15 kvitnia 2022 r.: zb. nauk. prats. Vinnytsia: VNTU, 2022. P. 95–99. URL: <https://atmconf.vntu.edu.ua/materialy2022.pdf>. (accessed July 12, 2025). (in Ukrainian).

18. Korpach A. O., Levkivskiy O. O. (2009). Mozhlyvosti ta perspektyvy vykorystannia biopalyva v dyzeliakh [Possibilities and prospects for the use of biofuels in diesel engines]. *Avtozhliakhovyk Ukrainy*. № 12. P. 156–158. (in Ukrainian).

19. Wcisło G. (2013). Determination of the impact of FAME biocomponent on the fraction composition of diesel engine fuels. *Combustion Engines*. № 154(3). P. 1098–1103. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/133795> (accessed July 11, 2025).

20. Saaty T. L., Vargas L. G. (2013). *Decision making with the analytic network process. Economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks*. New York, Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7279-7>. (accessed June 14, 2025).

21. Gu W., Saaty T. L., Wei L. (2018). Evaluating and optimizing technological innovation efficiency of industrial enterprises based on both data and judgments. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, vol. 17, No. 1, pp. 9–43. <https://doi.org/10.1142/S0219622017500390>. (accessed August 11, 2025).

22. Github. *Analytic Hierarchy Process (APH) with R*. URL: <https://github.com/gluc/ahp> (accessed June 11, 2025).

23. Kofanov O., Kofanova O., Tkachuk K., Tverda O., Shostak I. (2024). Enhancement of the market attractiveness and success of startups on the circular economy and sustainability principles. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*, № 10(2), P. 167–189. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2024.10.02.07>. (accessed June 10, 2025).