

Ю. О. ВОВК

аспірантка кафедри хімії та хімічної технології
Національний авіаційний університет
ORCID: 0000-0002-1337-3485

Д. А. ПЕТРУК

бакалавр кафедри хімії та хімічної технології
Національний авіаційний університет
ORCID: 0009-0001-9450-2620

СТІЙКІСТЬ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ДО МІКРОБІОЛОГІЧНОГО УРАЖЕННЯ

Проведено оцінку мікробіологічної деструкції біодизельного пального під час експлуатації та її впливу на конструкційні матеріали. Пошук відновлювальних, стійких та екологічно чистих альтернатив нафтовому дизельному паливу викликав зростаючий інтерес до виробництва та використання біодизельного пального. Однак, біодизельне паливо, завдяки своєму хімічному складу, є дуже уразливим до мікробіологічного ураження, що спричинює його біологічну деградацію. У цій роботі систематизовано значний асортимент мікроорганізмів, виявлених у біодизельному паливі. Показано, що основною перешкодою для його широкого застосування є висока біорозкладність, у порівнянні із дизельним паливом, низька стійкість до мікробіологічного ураження та корозійність, що можуть суттєво знижувати якість пального. Також варто зазначити що концентрація біодизельного палива впливає на біохімічні процеси та життєдіяльність мікроорганізмів. Це важливо для розуміння взаємодії біодизеля з мікробним середовищем і процесу корозії. Експериментально підтверджено, що мікроорганізми можуть активно розвиватися та розмножуватися у дизельному паливі, порушуючи його стійкість та сприяючи його біодеградації, формуванню біоплівки на межі паливно-водяної фази, продукуванню механічних забруднень, які засмічують фільтри та можуть прискорювати корозію технологічного обладнання. Продукти життєдіяльності мікроорганізмів призводять до зміни pH паливного середовища. Крім того, процес мікробіологічного ураження вуглеводнів супроводжується утворенням корозійноактивних сполук, що неминуче призводить до руйнування конструкційних матеріалів і формування шкідливих сполук, продуктів зносу, знижує рівень раціонального використання палива. Впровадження та використання біодизельного палива, як заміна традиційного, є перспективним, але покращення стійкості до мікробіологічного ураження і схильність до корозії такого палива є нагальною проблемою, яка потребує безпосередньої оцінки та подальшого вирішення.

Ключові слова: біодизель, палива, мікробіологічне ураження, мікроорганізми, корозія, окислення, зношування, стійкість, екологічна безпека.

YU. O. VOVK

Postgraduate Student at the Department of Chemistry
and Chemical Technology
National Aviation University
ORCID: 0000-0002-1337-3485

D. A. PETRUK

Bachelor at the Department of Chemistry and Chemical Technology
National Aviation University
ORCID: 0009-0001-9450-2620

RESISTANCE OF BIODIESEL FUEL TO MICROBIOLOGICAL CONTAMINATION

An assessment of the microbial degradation of biodiesel during operation and its impact on structural materials has been conducted. The search for renewable, sustainable, and environmentally friendly alternatives to petroleum diesel has led to growing interest in the production and use of biodiesel. However, due to its chemical composition, biodiesel is highly vulnerable to microbial contamination, resulting in biological degradation. This study systematically catalogs a significant variety of microorganisms found in biodiesel. It demonstrates that the main barrier to its widespread use is its high biodegradability compared to diesel fuel, along with its low resistance to microbial contamination and corrosiveness, which can significantly reduce fuel quality.

It is also important to note that the concentration of biodiesel affects biochemical processes and the vitality of microorganisms. This is crucial for understanding the interaction of biodiesel with the microbial environment and the corrosion process. Experimental evidence confirms that microorganisms can actively grow and multiply in diesel fuel, undermining its stability

and promoting its biodegradation, the formation of biofilms at the fuel-water interface, and the production of mechanical contaminants that clog filters and may accelerate the corrosion of technological equipment. The metabolic byproducts of microorganisms lead to changes in the pH of the fuel environment. Furthermore, the microbial degradation of hydrocarbons is accompanied by the formation of corrosion-active compounds, which inevitably leads to the destruction of structural materials and the formation of harmful compounds, resulting in wear products that decrease the efficient use of fuel.

The introduction and use of biodiesel as a replacement for traditional fuel is promising, but improving its resistance to microbial contamination and susceptibility to corrosion is an urgent issue that requires direct assessment and further resolution.

Key words: biodiesel, fuel, microbiological damage, microorganisms, corrosion, oxidation, wear, sustainability, environmental safety.

Постановка проблеми

Пошук відновлювальних, стійких та екологічно чистих альтернатив дизельному паливу нафтового походження призвів останнім часом до підвищення зацікавленості щодо виробництва та використання біодизельного палива, але біорозкладність і схильність до корозії такого палива є нагальною проблемою, яка потребує безпосередньої оцінки та вирішення. Біодизельне паливо є дуже «біоактивним», завдяки своєму хімічному складу, основною складовою якого є метилові ефіри жирних кислот, гігроскопічним властивостям та вмісту високої концентрації кисню, що створює сприятливі умови для біологічної деградації біодизельного палива та активному росту мікроорганізмів у паливних системах, резервуарах для зберігання та ємностях для транспортування. Спільноти мікроорганізмів, включаючи бактерії, грибки та дріжджі, можуть активно розвиватися та розмножуватися у біодизельному паливі, порушуючи його стійкість та сприяючи його біодеградації, формуванню біоплівки на межі паливно-водяної фази, продукуванню механічних забруднень, які можуть засмічувати фільтри та прискорювати корозію металевих поверхонь у резервуарах для зберігання біодизельного палива.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Мікробіологічне ураження паливних систем транспорту – це добре відоме явище. Основною особливістю розвитку цього типу забруднення є здатність мікроорганізмів активно рости та розвиватися, використовуючи органічні речовини як джерело карбону для їхнього метаболізму [1]. Перші випадки пошкодження вуглеводневих палив були зафіксовані ще в останнє десятиліття XIX століття [2, 3].

Забруднення спричинене мікроорганізмами є характерною особливістю не лише для конкретного типу палива, до нього схильні такі види, як дизельне паливо, бензин, біодизельне паливо, пальне для морського, авіаційного та автомобільного транспорту. Керосин, а також середні дистилати, отримані шляхом переробки нафти, особливо вразливі до мікробіологічної деградації [4], оскільки вуглеводневі ланцюги C₁₀–C₁₈ легко використовуються мікроорганізмами як джерело карбону. Швидкість процесу та ступінь мікробіологічного ураження обумовлюється вуглеводневим складом палива [5]:

лінійні вуглеводні > розгалужені вуглеводні > ароматичні вуглеводні.

Основним підґрунтям мікробіологічного ураження біодизельного палива є потрапляння до нього мікроміцетних грибів, дріжджів, бактерій та водоростей [6]. Усі перелічені організми присутні в навколишньому середовищі, тому вони легко можуть втручатися до всіх етапів ланцюга постачання палива. Основними складовими, які необхідні для існування мікробів є: вода – як необхідне середовище для життя, паливо – як важливе джерело живлення та кисень – як необхідний елемент для росту. Таблиця наведена нижче (табл. 1), демонструє деяких представників мікроорганізмів, що здатні до біодеградації нафтопродуктів. Основні представники мікроорганізмів, що спричиняють біодеградацію палив [7].

Таблиця 1

Мікроорганізми, що спричиняють старіння палива

Гриби	Дріжджі	Водорості	Бактерії
<i>Verticillium</i>	<i>Cryptococcus</i>	<i>Agmenellum spp</i>	<i>Streptomyces</i>
<i>Varicospora Penicillium</i>	<i>Candida Debaryomyces</i>	<i>Chlorella sorokiniana</i>	<i>Sphingomonas paucimobilis</i>
<i>Luhworthia</i>	<i>Hansenula</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Rhodococcus spp.</i>
<i>Gliocladium</i>	<i>Pichia</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Pseudomonas</i>
<i>Achremonium sp Aspergillus</i>	<i>Trichosporon</i>	<i>Selenastrum capricornutum</i>	<i>Mycobacterium spp.</i>
<i>Bjerkandera adusta</i>	<i>Torulopsis</i>	<i>Pseudomonas migulae</i>	<i>Flavobacterium</i>
<i>Cunninghamella</i>	<i>Sporobolomyces</i>	<i>Sphingomonas yanoikuyae</i>	<i>Corynebacterium</i>
<i>Corollasporium Cladosporium</i>	<i>Saccharomyces</i>	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	<i>Burkholderia</i>
<i>Dendryphiella</i>	<i>Rhodotorula</i>		<i>Brevibacterium</i>
<i>Fusarium</i>	<i>Yarrowia</i>		<i>Bacillus</i>
			<i>Alcaligenes</i>
			<i>Haemophilus spp.</i>
			<i>Paenibacillus spp.</i>

Найбільшу загрозу для експлуатації біодизельного палива ураженим переліченими мікроорганізмами становлять ниткоподібні мікроміцети, що пов'язано з їх здатністю утворювати в результаті метаболізму агресивні побічні продукти, а їх міцелій може засмічувати елементи паливної системи, зокрема насоси та фільтри. Певні види бактерій та грибів, які зустрічаються у паливі, як правило, мають малі розміри (1–2 мкн), використовуючи при цьому вуглеводні та присадки, що додаються до біодизельного палива, в якості джерела їжі. Завдяки цьому вони активно та швидко розмножуються, утворюючи при цьому мулоподібну речовину як побічний продукт.

Під час метаболізму мікроорганізмів у біодизельному паливі в результаті можуть утворюватися різноманітні побічні продукти, продукування яких може змінюватися в залежності від виду мікроорганізмів та умов поживного середовища, в тому числі органічні кислоти, газу (CH_4 , H_2S та CO_2) та енергетичні речовини: адезинотрифосфат (АТФ), ацетил-кофермент А (ацетил-КоА). Представлені продукти метаболізму мікроорганізмів є важливими для розуміння впливу мікробіологічного ураження на стійкість біодизельного палива.

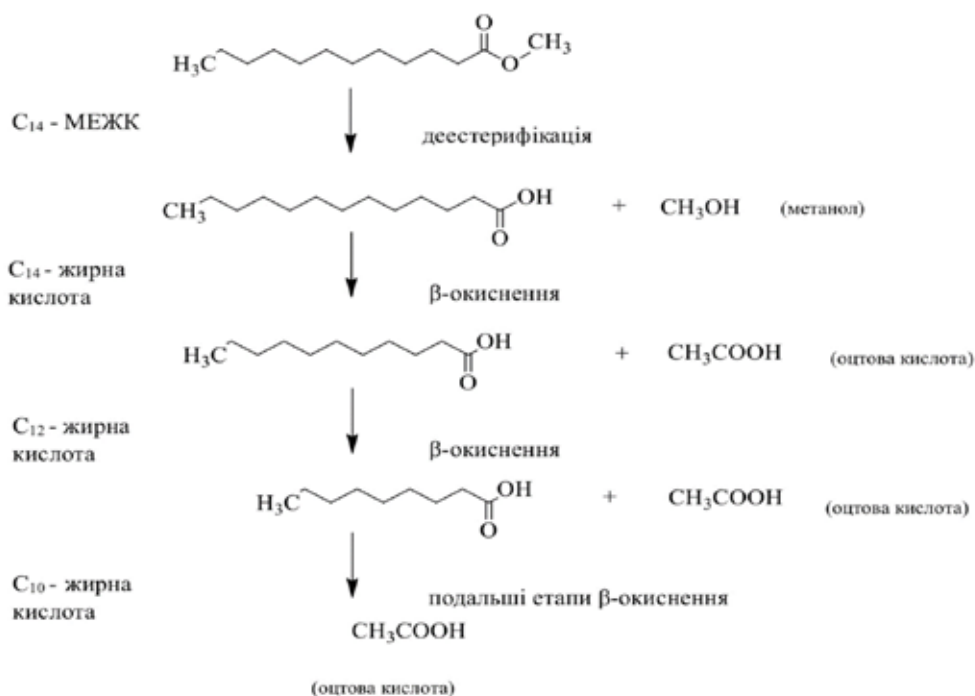


Рис. 1. Біодеградація метилових ефірів жирних кислот (МЕЖК), спричинена мікроорганізмами

Відомо, що біодеградація біодизельного палива спричинена впливом мікроорганізмів. МЕЖК є природними продуктами, оскільки основною складовою є жирні кислоти, отримані з рослинних та тваринних жирів, тому численні мікроорганізми, що живуть у ґрунті та ґрунтових водах, можуть їх засвоювати та метаболізувати. Біодеградація молекул МЕЖК – це складний процес, що складається з кількох послідовних етапів, і цей процес перебігає подібно в аеробних і анаеробних умовах (рис. 1). Спочатку відбувається деестерифікація молекул МЕЖК з утворенням ВЖК та метанолу. Надалі ВЖК здійснюється поступове відокремлення двовуглеводневих компонентів за допомогою процесу – β-окиснення, в результаті з утворенням мурашиної та оцтової кислоти. Вивільнений метанол легко біологічно розкладається в будь-яких умовах [8,9].

Забезпечення стійкості біодизельного палива під час всіх етапів його постачання є одним з критично важливих питань. Для деяких практичних користувачів термін зберігання біодизельного палива обмежений чотирма тижнями – чотирма місяцями, що значною мірою залежить від початкової стабільності зберігання самого палива. Встановлено, що швидкість біодеградації біодизельного палива в п'ять разів вища, ніж у дизельного палива.

Silva та ін. виявили, що МЕЖК, отримані з ріпакової, соняшникової та соєвої олії повністю розкладаються протягом 28 днів [10].

Внаслідок накопичення анаеробних та аеробних мікроорганізмів у паливі відбувається:

- суттєве погіршення показників якості та властивостей палива;
- утворення осаду, що забруднює біодизельне паливо;
- утворення біоплівки, яка в подальшому призводить до розвитку корозії металевих поверхонь теологічного обладнання, резервуарів, трубопроводів та ємностей для транспортування; до закупорення фільтрів і порушення роботи насосів;

– зміни фізико-хімічних властивостей захисних матеріалів, що призводить до зниження їх міцності, еластичності і втрати основної функції – захисту [11].

Таким чином, основною перешкодою для масштабного застосування біодизельного палива є його схильність до біорозкладності та низька стійкість до мікробіологічного ураження, що може суттєво вплинути на його якість.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є оцінка мікробіологічної деструкції біодизельного палива в процесі експлуатації та вплив на конструкційні матеріали.

Викладення основного матеріалу дослідження

На основі оброблених експериментальних даних досліджень [1–14] було виявлено значний асортимент мікроорганізмів, в тому числі бактерій, грибків, плісняви та дріжджів у чистому біодизельному паливі (B100), його сумішах з дизельним паливом і в самому дизельному паливі. Детальний систематизаційний аналіз, проведений нами, показав, що найбільш розповсюдженими мікроорганізмами, виявленими у біодизельному паливі є: *Serratia marcescens*, *Pseudallescheria boydii*, *Candida lipolytica*, *Meyerozyma guilliermondii*, *Bacillus megaterium* та *Pseudomonas aeruginosa*.

Вода у будь-якому виді палива є невід’ємною його частиною, і знаходиться у ньому як у вільному так і в розчиненому стані, що в основному залежить від температури. Зниження температури призводить до виділення фази вільної води, яка осідає на днищі резервуарів для зберігання та ємностей для транспортування, спричиняючи корозію та погіршуючи міцність конструкційних матеріалів технологічного обладнання. Підвищення температури збільшує можливість помутніння палива через поглинання води (розчинена вода у паливі переходить у «вільний стан» за рахунок температурних фазових переходів). Позбутися води повністю практично неможливо, навіть не значна концентрація води у паливі може сприяти росту мікроорганізмів, і цього майже неможливо уникнути в реальних умовах зберігання та експлуатації палива, зокрема в паливних баках.

Мікробіологічне забруднення може сприяти також передчасному «старінню» палива: поглинання і послідовний метаболізм n-алканів, інтенсифікація окиснювальних процесів, підвищений вміст сірки, зростаючий показник кислотності палива, тощо. Надходження органічних кислот у палива, можна пояснити як результат життєдіяльності мікроорганізмів. Зазвичай корозійні зміни спричинюють такі складові палива та продукти життєдіяльності мікроорганізмів як сполуки сірки, органічні кислоти а також водорозчинні неорганічні кислоти та основи. Серед перелічених сполук найбільш агресивними, є активні сполуки сірки (наприклад, вільна сірка, сірководень), особливо в присутності води. Більш детально це питання висвітлено було нами у попередніх дослідженнях [11–13].

Збільшення температури навколишнього середовища під час зберігання палива вочевидь порушує хімічну рівновагу біодизельного палива, що в свою чергу сприяє прискоренню процесів окиснення, полімеризації та конденсації, збільшуючи густину та в’язкість і, таким чином, погіршуючи якість палива в результаті зміни цих фізико-хімічних властивостей. Відповідно збільшення температури у теплий період року інтенсифікує продукування мікробіологічного забруднення палива, що може впливати на його фізико-хімічні властивості та призводити до негативних наслідків для його експлуатації в паливній системі транспортного засобу і на обладнанні підприємств паливозабезпечення (табл. 2).

Мікроорганізми мають специфічну властивість використовувати біодизельне паливо як єдине джерело карбону та енергії для свого метаболізму, продукуючи, при цьому екстрацелюлярні полімерні речовини (ЕПР), які більш відомі як «біоплівка», та інші метаболіти, які змінюють стан оточуючого середовища. Це, в свою чергу, сприяє корозійним процесам на металевих поверхнях технологічного обладнання, спричиняючи їхнє окиснення.

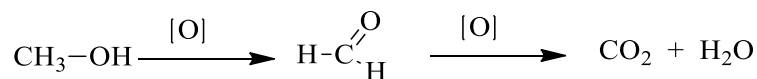
Таблиця 2

Модифікація властивостей біодизельного палива внаслідок біологічної активності

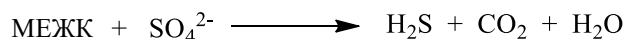
Зміна властивостей	Причина зміни	Наслідки
Збільшення кислотного числа	окиснення, гідроліз	– підвищена корозія елементів технологічного обладнання, двигуна – погіршення якості палива
Збільшення в’язкості	утворення біоплівок та полімерних речовин, внаслідок окиснення та полімеризації палива	– вплив на ефективність розпилення палива в дизельному двигуні, що безпосередньо впливає на процес згоряння
Збільшення вмісту води	утворення умов для продуктивного росту мікроорганізмів	– активне продукування колоній мікроорганізмів, мікробіологічних відкладень, що забивають фільтри і впливають на працездатність паливної системи; – підвищена корозія, – погіршення повноти згоряння біодизельного палива
Зниження температури застигання	формування біоплівок	– проблеми з запуском в холодну пору року
Зниження окиснювальної стабільності	окиснення та деструкція палива мікроорганізмами	– утворення шламу; – скорочення терміну служби фільтрів, – засмічення форсунок

Біоплівки зазвичай розвиваються у вигляді постійних шарів, відкладень і агрегатів. Незалежно від того, чи ростуть вони у вигляді постійного шару, відкладення чи агрегату.

Під час утворення біоплівок на паливно-водній межі мікроорганізми у процесі свого метаболізму можуть виділяти різноманітні гази, зокрема метан, сірководень та вуглекислий газ. Вуглекислий газ може утворюватися в результаті біодеградації МЕЖК мікроорганізмами, під час якої на одному з етапів відбувається вивільнення метанолу, який внаслідок аеробного дихання мікроорганізмів легко біологічно розкладається до CO_2 шляхом, подібним до окиснення:



Також, CO_2 може утворюватися в процесі біологічного відновлення сульфатів (SO_4^{2-}) сульфатвідновлювальними бактеріями, які використовують сульфати як акцептори електронів у своєму анаеробному диханні. Процес можна продемонструвати нижче наведеною хімічною реакцією:



Різні фактори, такі як види мікроорганізмів, морфологія поверхні, хімічний склад середовища по-різному впливають на формування біоплівок на поверхні матеріалу. Проведені нами дослідження формування біоплівки при мікробіологічному забрудненні дизельного палива підтвердили активне продукування у даному шарі газу з 7-го по 21 день експерименту (рис. 2).

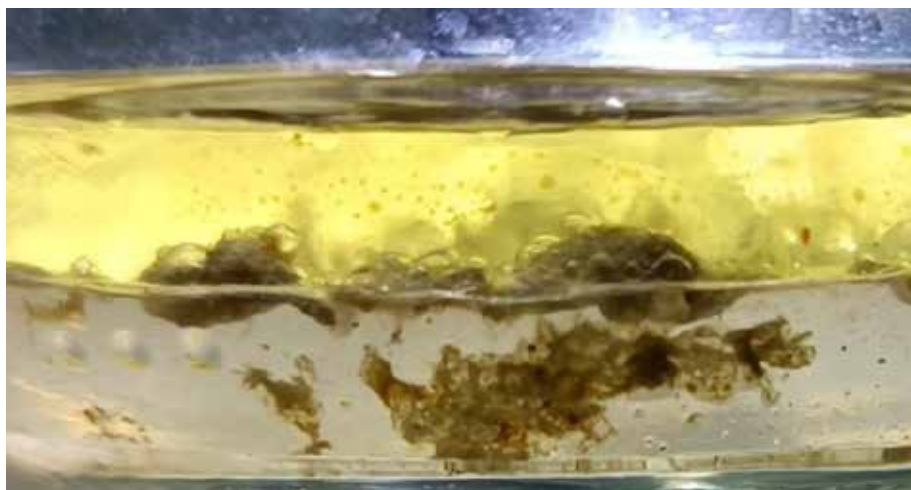


Рис. 2. Продукування газових пухирців внаслідок життєдіяльності біоплівки на водно-паливному шарі дизельного палива. Фото: О. Матвєєва, Ю. Вовк

Варто зазначити, що побічні продукти життєдіяльності мікроорганізмів, які називають продуктами метаболізму, можуть як прискорювати (кислі метаболіти), так і сповільнювати корозійні процеси, або взагалі не впливати ніяким чином на процес, слугуючи лише джерелом енергії для корозійно-агресивних мікроорганізмів. Механізм перебігу мікробіологічної корозії детально розглянутий у попередніх дослідженнях авторів [12], де показано, що результатом життєдіяльності мікробіологічних забруднень палив (бактерії, гриби) стає надходження небажаних сполук (SO_4^{2-}), (CH_3COOH), (CH_2O_2), ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$), ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$)_n. Це призводить до зміни рН паливного середовища, що, в свою чергу, посилює корозію технологічного обладнання. Крім того, процес окиснення пального супроводжується утворенням корозійноактивних сполук, що неминуче призводить до руйнування конструкційних матеріалів і формування шкідливих сполук, які негативно впливають на якість пального.

Проведений нами узагальнюючий систематизаційний аналіз експериментальних даних досліджень [14] впливу концентрацій біокомпонента у дизельному паливі на стійкість до мікробіологічного ураження (рис. 3) підтвердив продукування кислотних продуктів життєдіяльності мікроорганізмів а також показав часовий проміжок активності дії мікробіологічного ураження палива, залежність його інтенсивності від відсотка наявного біокомпонента (B15 – 15% біокомпонента; B20 – 20% біокомпонента; B30 – 30% біокомпонента; B100 – 100% біокомпонента).

Найвищі концентрації кислих метаболітів на 20 день спостерігаються в паливних сумішах з високим вмістом біокомпоненту, а саме B30 (0,00185 моль/л) і B100 (0,0025 моль/л). За наявності високих концентрацій кислих метаболітів мікроорганізми можуть переходити у фазу загибелі або поширюватися через розчинення біоплівки.

Тому концентрація біодизельного палива впливає на біохімічні процеси та життєдіяльність мікроорганізмів. Це важливо для розуміння взаємодії біодизеля з мікробним середовищем і процесу корозії.

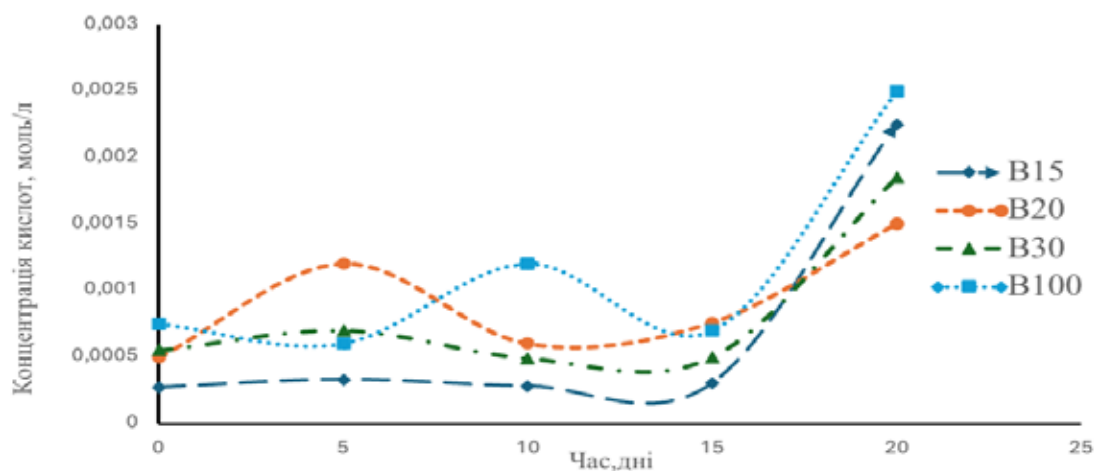


Рис. 3. Зміна концентрацій кислих метаболітів в біоплівці *Bacillus megaterium*, період 20 днів

Висновки

На основі експериментальних даних закордонних досліджень було систематизовано значний асортимент мікроорганізмів, виявлених у біодизельному паливі, показано, що найбільше розповсюдженими з яких є: *Serratia marcescens*, *Pseudallescheria boydii*, *Candida lipolytica*, *Meyerozyma guilliermondii*, *Bacillus megaterium* та *Pseudomonas aeruginosa*.

Основною перешкодою для широкого застосування біодизельного палива є його висока біорозкладність, у порівнянні із дизельним паливом, низька стійкість до мікробіологічного ураження та корозійність, що можуть суттєво знижувати якість палива. Значення відсоткового вмісту у паливних сумішах біокомпоненту до 20%, спричиняє зростання кількості колоній мікроорганізмів, що призводить до погіршення фізико-хімічних властивостей палив, зокрема кислотності. Це, в свою чергу, може суттєво вплинути на інтенсивність корозії технологічного обладнання.

Процес мікробіологічного ураження вуглеводнів супроводжується утворенням корозійноактивних сполук, що неминуче призводить до руйнування конструкційних матеріалів і формування шкідливих сполук, продуктів зносу, знижує рівень раціонального використання палив.

Таким чином, впровадження та використання біодизельного палива, як заміна традиційного, є перспективним, але покращення стійкості до мікробіологічного ураження і схильність до корозії такого палива є нагальною проблемою, яка потребує безпосередньої оцінки та подальшого вирішення.

Список використаної літератури

1. Ching, T. H., Yoza, B. A., Wang, R., Masutani, S., Donachie, et al. Biodegradation of biodiesel and microbiologically induced corrosion of 1018 steel by *Moniliella wahieum* Y12. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016. 108, p. 122-126.
2. Miyoshi, Manabu. Die durchbohrung von membranen durch pilzfäden. 1895.
3. Passman, Frederick J. Fuel and Fuel System Microbiology – Fundamentals, Diagnosis, and Contamination Control. ASTM International, 2003.
4. Dziegielewski, W., & Sarniecki, J. Discussion on microbial contamination of naval fuels. *Polish Maritime Research*, 2009. 16(3), p. 41-44.
5. Shapiro, T., Chekanov, K., Alexandrova, A., Dolnikova, G., et al. Revealing of non-cultivable bacteria associated with the mycelium of fungi in the kerosene-degrading community isolated from the contaminated jet fuel. *Journal of Fungi*, 2021. 7(1), 43.
6. Varjani, S. J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource technology*, 2017. 223, 277-286.
7. Adedeji, J. A., Tetteh, E. K., Opoku Amankwa, M., Asante-Sackey, D., Ofori-Frimpong et al. Microbial bioremediation and biodegradation of petroleum products—A mini review. *Applied Sciences*, 2022. 12(23), 12212.

8. Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Ismail, N. I., & Abdullah, S. R. S. Future challenges in diesel biodegradation by bacteria isolates: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 251, 119716.
9. Thomas, A. O., Leahy, M. C., Smith, J. W., & Spence, M. J. Natural attenuation of fatty acid methyl esters (FAME) in soil and groundwater. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2017. 50(3), 301-317.
10. Da Silva, G. S., Rezende, R. P., Romano, C. C., Dias, J. C. T., Marques, et al. An outlook on microbial behavior: Mimicking a biodiesel (B100) spill in sandy loam soil. *Fuel*, 2019. 235, 589-594.
11. O. Matvyeyeva, Y. Vovk, O. Nilov. Microbiological Contamination of Motor Fuels: Analysis and Identification in Fuelling Companies. *Proceedings of the National Aviation University*. 2021. 1(86). 49-56. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.86.15444>
12. Вовк Ю. О., Матвеева О.Л. Біоушкодження палив та об'єктів підприємств паливозабезпечення // *Наукоєм. технології*. 2023. № 1. 86-92. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.57.17448>
13. Вовк Ю.О., Матвеева О.Л. Зміна якості дизельного палива в умовах довготривалого зберігання. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2024. 337(3(2)), 40-45. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-5>
14. Pusparizkita, Y. M., Harimawan, A., Devianto, H., & Setiadi, T. Effect of bacillus megaterium biofilm and its metabolites at various concentration biodiesel on the corrosion of carbon steel storage tank. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2022. 12(4), 5698-5708.

References

1. Ching, T. H., Yoza, B. A., Wang, R., Masutani, S., Donachie, et al. (2016). Biodegradation of biodiesel and microbiologically induced corrosion of 1018 steel by *Moniliella wahieum* Y12. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 108, p. 122-126.
2. Miyoshi, Manabu.(1895). Die durchbohrung von membranen durch pilzfäden.
3. Passman, Frederick J. (2003). *Fuel and Fuel System Microbiology – Fundamentals, Diagnosis, and Contamination Control*. ASTM International.
4. Dzięgielewski, W., & Sarnecki, J. 2009. Discussion on microbial contamination of naval fuels. *Polish Maritime Research*. 16(3), p. 41-44.
5. Shapiro, T., Chekanov, K., Alexandrova, A., Dolnikova, G., et al. (2021). Revealing of non-cultivable bacteria associated with the mycelium of fungi in the kerosene-degrading community isolated from the contaminated jet fuel. *Journal of Fungi*. 7(1), 43. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7010043>
6. Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource technology*. 223, 277-286.
7. Adedeji, J. A., Tetteh, E. K., Opoku Amankwa, M., Asante-Sackey, D., Ofori-Frimpong et al. (2022). Microbial bioremediation and biodegradation of petroleum products—A mini review. *Applied Sciences*. 12(23), 12212.
8. Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Ismail, N. I., & Abdullah, S. R. S. (2020). Future challenges in diesel biodegradation by bacteria isolates: a review. *Journal of Cleaner Production*. 251, 119716.
9. Thomas, A. O., Leahy, M. C., Smith, J. W., & Spence, M. J. (2017). Natural attenuation of fatty acid methyl esters (FAME) in soil and groundwater. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 50(3), 301-317.
10. Da Silva, G. S., Rezende, R. P., Romano, C. C., Dias, J. C. T., Marques, et al. (2019). An outlook on microbial behavior: Mimicking a biodiesel (B100) spill in sandy loam soil. *Fuel*. 235, 589-594.
11. O. Matvyeyeva, Y. Vovk, O. Nilov. (2021). Microbiological Contamination of Motor Fuels: Analysis and Identification in Fuelling Companies. *Proceedings of the National Aviation University*. 1(86). 49-56. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.86.15444>
12. Vovk Y., Matvyeyeva O.(2023). Biouшкодження palyv ta ob"yektiv pidpryyemstv palyvozabezpechennya. *Science-based technologies*. 57(1):86-92. DOI: 10.18372/2310-5461.57.17448
13. Vovk Y.O., Matveeva O.L. (2024). Change in the quality of diesel fuel under conditions of long-term storage. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337(3(2)), 40-45. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-5>
14. Pusparizkita, Y. M., Harimawan, A., Devianto, H., & Setiadi, T. (2022). Effect of bacillus megaterium biofilm and its metabolites at various concentration biodiesel on the corrosion of carbon steel storage tank. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 12(4), 5698-5708. DOI:10.33263/BRIAC124.56985708