

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ШКІЛЬНЮК ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 629.7.063:662.6/.9(043.3)

**РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИЧНО-ОРГАНІЗАЦІЙНИХ ЗАСАД  
БІОЛОГІЧНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ АВІАЦІЙНОГО ПАЛИВА**

05.17.07 – хімічна технологія палива і паливно-мастильних матеріалів

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Бойченко Сергій Валерійович**,  
Національний авіаційний університет,  
декан факультету екологічної безпеки, інженерії  
та технологій, науковий керівник Українського  
науково-дослідного та навчального центру  
хіммотології та сертифікації ПММ і ТР

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Гринишин Олег Богданович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри хімічної технології переробки  
нафти та газу

кандидат технічних наук  
**Ксуш Ліна Геннадіївна**,  
Національна металургійна академія України,  
старший науковий співробітник кафедри  
енергетичних систем і енергоменеджменту

Захист відбудеться «27» листопада 2020 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09 у Національному авіаційному університеті за адресою: проспект Любомира Гузара, 1, корпус 5, ауд. 611, м. Київ, 03058.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058 і на сайті [www.nau.edu.ua](http://www.nau.edu.ua).

Автореферат розісланий «   » жовтня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к.т.н., доцент



Л. М. Черняк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Хіммотологічна надійність техніки визначається комплексом показників якості й експлуатаційних властивостей палива, зокрема, стабільністю на усіх етапах життєвого циклу. Практичний досвід і численні дослідження свідчать, що не існує вуглеводнів, що є стійкими до впливу тих чи інших мікроорганізмів. Впливаючи на експлуатаційні матеріали, зокрема, на паливо, мікроорганізми-деструктори викликають пошкодження (мікробіологічне ураження), що призводить до зміни їх первинних експлуатаційних характеристик. Практично усі експлуатаційні матеріали піддаються мікробіологічному ураженню, економічний збиток від якого становить 2–3 % вартості усього об'єму продукції. За даними зарубіжної статистики, причиною 33 % усіх аварій та катастроф літаків, а також 50 % відмов авіаційних реактивних двигунів є забрудненість палива, у тому числі й мікроорганізмами. Розвиток мікроорганізмів у паливних системах призводить до погіршення фізико-хімічних і експлуатаційних властивостей палив внаслідок зміни їх вуглеводневого складу, накопичення слизу та осаду, утворення стійких емульсій, результатом чого є погіршення хіммотологічної надійності та виходу з ладу авіаційної техніки. Забруднення фільтрів і каналів паливної системи мікроорганізмами призводить до непрацездатного стану технічного засобу та аварій загалом.

Відсутність у нашій державі системних досліджень та практичного досвіду забезпечення біологічної стабільності як традиційних, так і альтернативних авіаційних палив потребує створення методично-організаційних засад і розроблення практичних рекомендацій щодо запобігання їх мікробіологічному ураженню. Висока біологічна стабільність авіаційних палив має задовольняти низку хіммотологічних вимог, пов'язаних з ефективністю, надійністю та довговічністю авіаційної техніки.

Постійне вивчення мікроорганізмів, що розвиваються в авіаційному паливі, і своєчасний контроль якості палива та стану авіаційної техніки дозволить уникнути проблем, пов'язаних з мікробіологічним ураженням авіаційного палива й матеріалів паливних систем. Тобто спільна робота технологів, хіміків, хіммотологів і мікробіологів зможе забезпечити високу біологічну стабільність палива та, відповідно, безпечну експлуатацію авіаційної техніки.

Отже, розроблення комплексу заходів забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив є затребуваним і актуальним науково-прикладним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано згідно з планами наукових досліджень кафедри екології Інституту екологічної безпеки (2012–2018), кафедри хімії та хімічної технології Факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій (2018–2020) та Українського науково-дослідного та навчального центру хіммотології і сертифікації паливно-мастильних матеріалів і технічних рідин Національного авіаційного університету за технічними завданнями науково-дослідних проєктів: № 780-ДБ12 «Методологія і технологія розробки та упровадження біологічних палив і мастильних матеріалів для авіаційної техніки» (2012–2014, номер державної реєстрації 0112U002049); № 933-ДБ14 «Розробка проєкту технічного регламенту щодо вимог до авіаційного бензину,

палива для реактивних двигунів» (2014, номер державної реєстрації 0114U001192); № 940-ДБ14 «Підвищення енергоощадності та екологічності авіаційної і наземної техніки впровадженням альтернативних моторних палив» (2014–2015, номер державної реєстрації 0114U001597); № 994-ДБ15 «Підвищення екологічної безпеки авіаційної техніки впровадженням альтернативних моторних палив» (2015–2016, номер державної реєстрації 0115U002469); № 1055-ДБ16 «Отримання та використання високоефективних екологічно безпечних компонентів сумішевих авіаційних палив» (2016–2017, номер державної реєстрації 0116U004631), № 182-ДБ18 «Підвищення експлуатаційних характеристик палив для газотурбінних двигунів, безпеки авіаційного транспорту та його екологічності» (2018–2019, номер державної реєстрації 0118U003369).

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розроблення комплексу методично-організаційних заходів забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив. Для досягнення мети необхідно розв'язати такі основні завдання:

- систематизувати інформацію щодо мікробіологічного ураження авіаційних палив, методів виявлення та способів запобігання;
- виявити причини, джерела, умови виникнення та поширення мікробіологічного забруднення авіаційних палив;
- визначити біологічну стабільність традиційних і альтернативних авіаційних палив;
- дослідити видовий склад мікроорганізмів-деструкторів авіаційних палив;
- дослідити основні закономірності та механізм біодеструкції авіаційних палив;
- розробити універсальний метод оперативного встановлення мікробіологічного забруднення авіаційних палив;
- систематизувати чинники, що сприяють виникненню та розвитку мікробіологічного забруднення в паливних системах літаків;
- проаналізувати ефективність та систематизувати інформацію щодо існуючих методів забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив;
- запропонувати організаційні та методичні заходи запобігання мікробіологічному ураженню авіаційних палив. Створити практичні рекомендації для забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив.

**Об'єкт дослідження** – мікробіологічне ураження, біодеструкція та зміна властивостей авіаційних палив.

**Предмет дослідження** – методично-організаційні засади забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив.

**Методи дослідження.** В основу науково-методичного забезпечення досліджень покладено використання комплексу емпіричних інженерних і теоретичних методів. Серед теоретичних методів застосовувалися системний аналіз і синтез, узагальнення, формалізація, класифікація, аналогія. Серед емпіричних – вимірювання, порівняння та експеримент із застосуванням стандартних методів дослідження фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей традиційних і альтернативних авіаційних палив. З інструментальних методів аналізу використовували газову хроматографію хімічного складу авіаційних палив. З метою найбільш ефективного вирішення поставлених завдань застосовувались евристичні методи виявлення мікробіологічного ураження

моторних палив, оброблення й упорядкування системи закономірностей, організаційних і методологічних засобів формування нового завдання щодо забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив на основі узагальнення колишнього досвіду та випереджаючого відображення моделей майбутнього.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Важливі наукові результати, що були досягнуті під час досліджень й визначають новизну дисертації, полягають у такому: 1. Дістало подальшого розвитку знання про видовий склад мікроорганізмів-деструкторів, що здатні засвоювати вуглеводні авіаційного палива. Це мікроскопічні гриби, бактерії та дріжджі. Встановлено, що найпоширенішими серед них є гриби. Активним деструктором визнано гриб *Hormoconis resiniae*.

2. Розвинуто теоретичне уявлення про механізм деструкції вуглеводнів авіаційних палив, що полягає в адаптивному ферментативному окисненні вуглеводнів. Встановлено, що мікроорганізми мають до різних вуглеводнів властивість вибіркового відношення, що визначається не тільки структурою вуглеводню, а й кількістю вуглеводневих атомів у його структурі.

3. Уперше описано деструкційний вплив мікроорганізмів-деструкторів на біокомпоненти до авіаційних палив. Експериментально доведено, що вміст біокомпонента рослинного походження у складі авіаційного палива інтенсифікує розвиток мікробіологічного ураження палив.

4. Доведено можливість використання колориметричних методів для визначення наявності мікробіологічного забруднення в авіаційних паливах. Встановлено, що нінгідрінова реакція (або так звана реакція Руемана) дозволяє якісно встановити наявність мікроорганізмів у складі авіаційних палив традиційного та альтернативного походження.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблено комплекс практичних заходів для забезпечення мікробіологічної стабільності авіаційних палив. А також:

- доведено незворотну зміну показників якості авіаційних палив унаслідок мікробіологічного ураження. Встановлено, що розвиток мікробіологічного забруднення в паливі впливає на кислотність та корозійні властивості, і обґрунтовано призводить до появи мікробіологічної корозії експлуатаційних матеріалів паливної системи, резервуарів тощо під час виконання технологічних операцій з авіаційними паливами;

- розроблено та упроваджено методику оперативного визначення вмісту мікробіологічного забруднення у складі авіаційних палив традиційного та альтернативного походження. Рівень валідації методики за внутрішньолабораторною відтворюваністю становить 98 %;

- розроблено систему моніторингу мікробіологічного забруднення паливно-заправних комплексів і паливних систем транспортних засобів;

- систематизовано чинники, що сприяють виникненню та розвитку мікробіологічного забруднення в паливних системах літальних апаратів. Для графічного відтворення причинно-наслідкових зв'язків мікробіологічного ураження та хімотологічної надійності побудовано причинно-наслідкову діаграму (*Ishikava Diagram, cause effect diagram*);

- оцінено ефективність біоцидних додатків.

Наведені в роботі дані є теоретичною базою для розроблення національного стандарту щодо мікробіологічного забруднення палив і паливних систем. Отримані результати можуть бути використані для створення мікробіологічно стабільного біопалива.

Корисність, новизну та практичну значущість роботи підтверджено патентом України № 94190 від 10.11.2014 р., двома актами упровадження в навчальний процес у Національному авіаційному університеті та двома актами упровадження у виробництво в ТОВ «Дніпроавіа» (м. Дніпро) та Центр екологічної безпеки в аеропортах (м. Київ).

**Особистий внесок здобувача** полягає в участі у формулюваннях науково-прикладної проблеми, мети та завдань досліджень, а також аналізі літератури, виконанні експериментальної частини роботи, а також в аналізі та інтерпретації результатів досліджень. Вивчення фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей, хроматографічні випробування, дослідження індикаторів уражених авіаційних палив виконані в акредитованій Випробувальній інтерактивній лабораторії «АвіаТЕСТ» Національного авіаційного університету. Постановка завдання, планування та постановка експериментів, формулювання основних наукових положень і висновків виконано спільно з науковим керівником. У спільних публікаціях автору належить переважний внесок.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення роботи доповідалися та опубліковані в матеріалах міжнародних і вітчизняних конференцій, зокрема на III, IV, V, VI, VII Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми хімотології» (Київ, 2008, 2010, 2012, 2014, 2017, 2019); IV Всесвітньому конгресі «Aviation in the XXI century» (Київ, 2010); Міжнародній науково-технічній конференції «Systems and means of motor transport» (Poland, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2019); Міжнародній науково-практичній конференції «Поступ у нафтогазо-переробній та нафтохімічній промисловості» (Львів, 2012, 2014, 2018, 2020); Всесвітньому конгресі Petrochemistry and Chemical Engineering (USA, 2013); IX Міжнародній конференції «From Biotechnology to Environmental Protection» (Poland, 2014); XII Міжнародній науково-технічній конференції «ABIA-2015» (Київ, 2015); Міжнародному симпозиумі «International Symposium on Sustainable Aviation» (Turkey, 2015, 2016); XIX Конференції молодих учених «Science – Future of Lithuania' transport engineering and management» (Lithuania, 2016); I Міжнародній науково-практичній конференції «Високоякісні бітуми для будівництва українських доріг» (Львів, 2016).

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень та зміст роботи викладено у 30-и наукових працях: 3 розділи у 3-х монографіях (2 з них видані за кордоном), 9 статей у наукових фахових виданнях, з них 4 статті у вітчизняних фахових наукових журналах з переліку МОН, 3 статті у закордонних періодичних виданнях, 2 статті у закордонних фахових виданнях, що входять до науково-метричних баз даних, 1 патент на корисну модель і 17 матеріалів і тез доповідей на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, 3-х розділів, висновків, списку використаних джерел (165 найменувань) та 8-и додатків. Загальний обсяг дисертації – 166 сторінок. Дисертація містить 21 таблицю та 41 рисунок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі викладено обґрунтування актуальності дисертаційної роботи, положення, що винесено на захист: мету та завдання, об'єкт і предмет дослідження, висвітлено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. Наведено короткий опис джерельної бази дослідження, апробації роботи та публікації, а також дані щодо особистого внеску автора.

У першому розділі вивчено та систематизовано розрізнену дотепер джерельну базу щодо мікробіологічного ураження авіаційних палив. Описано механізм біодеструкції вуглеводнів авіаційних палив. Наведено узагальнену класифікацію та проаналізовано сучасні методи визначення наявності мікробіологічного забруднення авіаційних палив. На підставі аналізу науково-технічної та патентної літератури описано причини, джерела, умови виникнення та поширення мікробіологічного забруднення авіаційних палив.

На підставі виконаних у цьому розділі аналітичних досліджень обґрунтовано напрями подальших досліджень із метою виконання завдань дисертації для досягнення мети і розв'язання виявленого науково-прикладного завдання.

Другий розділ присвячено опису науково-методичних основ, теоретичних і експериментальних результатів дослідження біологічної стабільності традиційних і альтернативних авіаційних палив. Представлено загальну методику виконання дослідження, досліджувані матеріали та методики виконання експериментальної роботи.

Для роботи використовували нафтове паливо для повітряно-реактивних двигунів (ПРД) марок Jet A-1, PT, TC-1, авіаційний бензин марки AVGAS 100 LL, автомобільний бензин марки А-92, а також модифіковані палива для ПРД на основі етилових естерів жирних кислот (ЕЕЖК) ріпакової олії.

Вплив мікробіологічного ураження та як результат цього впливу – біодеструкцію авіаційного палива вивчали за допомогою хроматографічного аналізу на хроматографі КРИСТАЛ-2000М за зміною компонентного складу, а також основними фізико-хімічними властивостями. Динаміку зміни кислотності в авіаційних паливах визначали згідно з вимогами ASTM D 3242 на титраторі Metler Toledo SM TITRINO 702. Властивості зразків моторних палив проаналізовано за стандартними методиками, визначаючи: густину за ДСТУ ГОСТ 31072 (ASTM D4052), кінематичну в'язкість за ДСТУ ГОСТ 33 (ASTM D445), температуру спалаху в закритому тиглі за ASTM D93 на приладі ТВЗ-М, температуру кристалізації за ГОСТ 5066 (ISO 3013), випробування на мідній пластинці за ДСТУ ISO 2160 на приладі LOIPLB-200 з еталонною шкалою корозії, концентрацію фактичних смол за ГОСТ 8489 на приладі ПОС-77, октанове число (ОЧ) за ДСТУ 8737 на установці для визначення детонаційної стійкості УИТ-65. Також були виконані дослідження кольорових реакцій на наявність мікробіологічного ураження в авіаційних паливах за допомогою тесту MicrobMonitor2 та хімічних реагентів.

У цьому розділі виокремлено окремих блоків результатів дослідження, де детально було вивчено та систематизовано дані наукової літератури щодо видового складу мікроорганізмів-деструкторів. Проаналізовано їх основні властивості,

основні закономірності їх розвитку та життєдіяльності. Подано їх головні типологічні групи та систематизовано джерельний контент щодо механізму біодеструкції вуглеводнів, що входять до складу авіаційних палив. Встановлено, що здатність засвоювати вуглеводні авіаційного палива властива мікроорганізмам, представленим різними систематичними групами. До них належать різні види мікроміцетів (мікроскопічних грибів), дріжджів і бактерій. Найактивніші деструктори вуглеводнів трапляються серед грибів. Вони характеризуються здатністю до засвоєння широкого спектра вуглеводнів, мають високу швидкість розвитку і, отже, становлять небезпеку для авіаційних палив.

Зазначено, що саме з авіаційного палива вперше був виділений новий гриб, морфологічно й генетично визначений як *Monascus floridanus*. Виділений штам має низку ознак, що не описані для типового штаму: наявність реброподібної опуклої смуги на одній зі сторін аскоспор, утворення поряд з відомими таллоконідіями типу *Basipetospora* другого *phialophora*-подібного спорношення. Виділений штам *Monascus floridanus*, також як і відомий «гасовий» гриб *Hormoconis resinae*, здатний до активного зростання на вуглеводнях авіаційного палива. Представлено систематизований перелік досліджених видів мікроорганізмів (відділ, клас, родина, рід), виявлених в авіаційному паливі, проаналізовано умови їх розвитку та види вуглеводнів, що використовує певний мікроорганізм. Таким чином, дійшли висновку, що здатність засвоювати вуглеводні авіаційного палива властива мікроорганізмам, представленим різними систематичними групами. До них належать різні види мікроскопічних грибів, бактерій і дріжджів.

Аналіз компонентного складу авіаційних палив показав, що мікробіологічний метаболізм пов'язаний зі споживанням вуглеводнів авіаційних палив. Від фізіологічних особливостей кожного роду мікроорганізмів залежить напрямленість процесу деструкції індивідуальних вуглеводнів і їх сумішей, що мають різний ступінь стійкості до деструкції мікроорганізмами. Результати дослідження виявили домінантне зменшення вмісту алканових вуглеводнів (порівняно з іншими групами) у складі авіаційних палив, що підтверджує їх невисоку біологічну стійкість. Зниження парафінового (алканового) потенціалу палива відбувається через видалення з сумішей вуглеводнів *n*-алканів як речовин, що переважно споживають мікроорганізми (рис. 1, 2). Кількість циклоалканових вуглеводнів змінюється менш істотно у складі контрольних і заражених зразків авіаційних палив. Тобто циклоалкани важче піддаються мікробіологічному розкладанню, порівняно з алканами, що пов'язано з наявністю циклу у структурі молекули, здатність до окиснення якого достатньо низька. Біодеструкція циклоалканів інколи передреує їх ароматизації. Отримані результати досліджень різних зразків авіаційних палив дозволили дійти висновку про те, що біодеструкції важче піддаються ароматичні вуглеводні, їх кількість не істотно змінюється і у чистих, і у заражених зразках, зокрема зразках із тривалим мікробіологічним ураженням. Виявлено, що ароматичні вуглеводні можуть підлягати біодеструкції під час аеробних і анаеробних біологічних процесів.



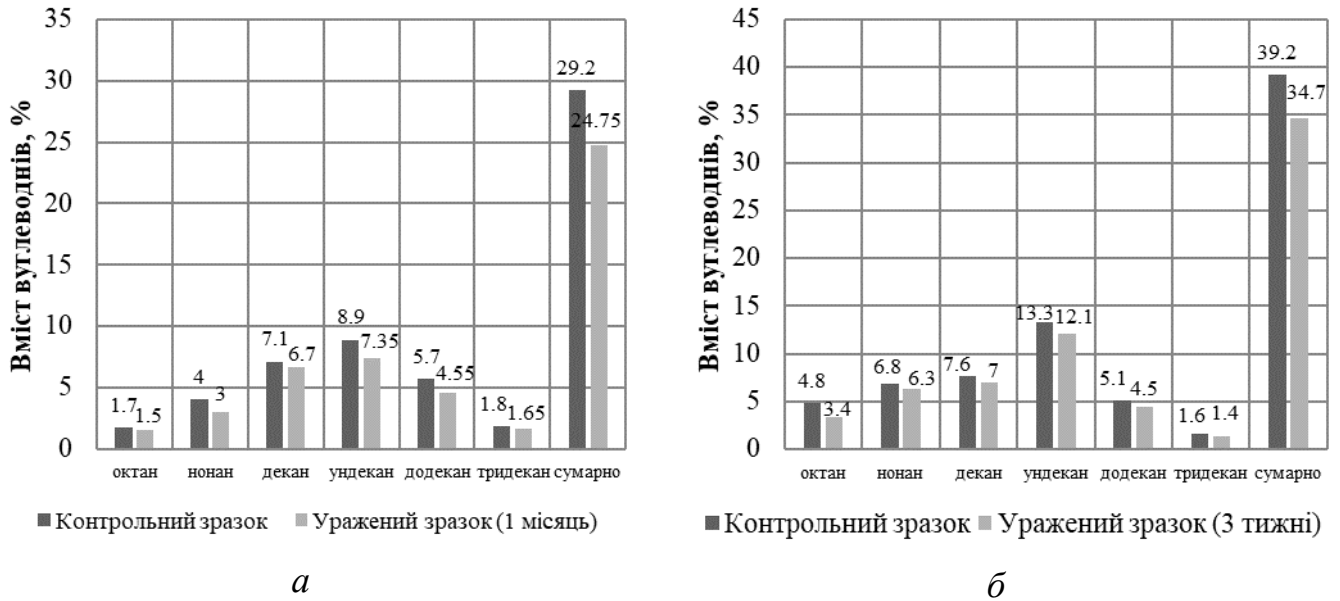


Рис. 1. Зміна вмісту алканових вуглеводнів у складі авіаційних палив марок РТ (а) і ТС-1 (б)

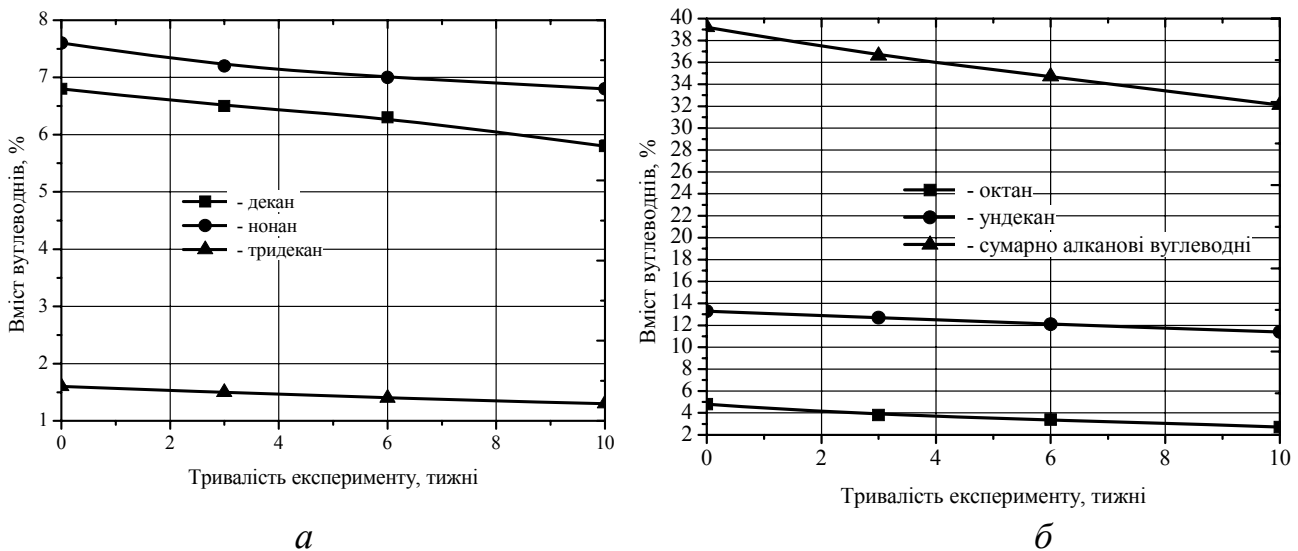
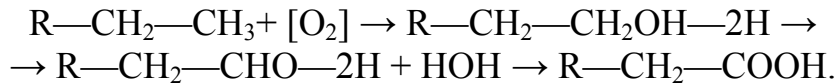


Рис. 2. Динаміка зміни вмісту алканових вуглеводнів у складі палива марки ТС-1

Під час виконання досліджень було виявлено, що на біодеструкцію насичених вуглеводнів впливають не тільки їх фізико-хімічні властивості – такі як розчинність у воді, здатність до емульгування та величина поверхневого натягу, але й біологічні чинники, такі як, ферментативна активність мікроорганізмів, реакційна здатність субстрату. Особливої уваги було приділено вивченню процесу мікробіологічного окиснення основних груп вуглеводнів, що представляють компонентний склад авіаційних палив – алканів, алкенів, ароматичних вуглеводнів. Основну увагу було приділено алкановим вуглеводням. Встановлено, що процес окиснення *n*-алканів мікроорганізмами складається з трьох основних етапів: 1) первинне окиснення *n*-алкану, що призводить до послідовного утворення відповідного спирту, альдегіду і монокарбоних кислот жирного ряду; 2)  $\beta$ -окиснення цих кислот з утворенням ацетил-КоА як основного проміжного продукту; 3) окиснення ацетату в

циклі трикарбонових кислот. Загальну схему реакцій мікробіологічного окиснення алканів можна репрезентувати так:



Також показано, що ненасичені вуглеводні можуть окиснюватись одночасно за метильною групою та за подвійним зв'язком молекули. У таких ароматичних сполуках, як бензоати і феноли, подвійні зв'язки бензольного кільця спершу відновлюються додаванням гідрогену до молекули, далі кільце розщеплюється і модифікується, що приводить до утворення насичених жирних кислот або дикарбонових кислот. В ароматичних сполуках із замісниками (крезоли і толуоли з арилметильними групами) ці групи можуть спершу окиснюватися з утворенням карбоксильних груп (окиснені молекули води) з подальшим розщепленням кільця. Бензол є моноароматичною сполукою, деструкція якої в анаеробних умовах відбувається надзвичайно повільно.

Узагальнено, на підставі проаналізованих основних закономірностей, а також, як передумова істинності наукового пізнання, запропоновано аксіоматично-феноменологічний опис механізму біодеструкції авіаційних палив. Застосування такого поєднання аксіоматичного та феноменологічного методів наукового пізнання дало змогу сприйняти процес біологічної деструкції палив таким як він є, ґрунтуючись на результатах численних досліджень біодеструкції нафтових вуглеводнів. Така композиція аксіоматичного та феноменологічного методів дозволяє створити необхідні та достатні теоретичні умови для подальшого розроблення заходів запобігання мікробіологічному ураженню авіаційних палив.

Для визначення рівня біостабільності палив було використано стандартну методику за ГОСТ 9.023. Ступінь біоураження визначали візуально за швидкістю розмноження мікроорганізмів по поверхні поживного середовища в чашці Петрі протягом 28 діб (рис. 3, 4).

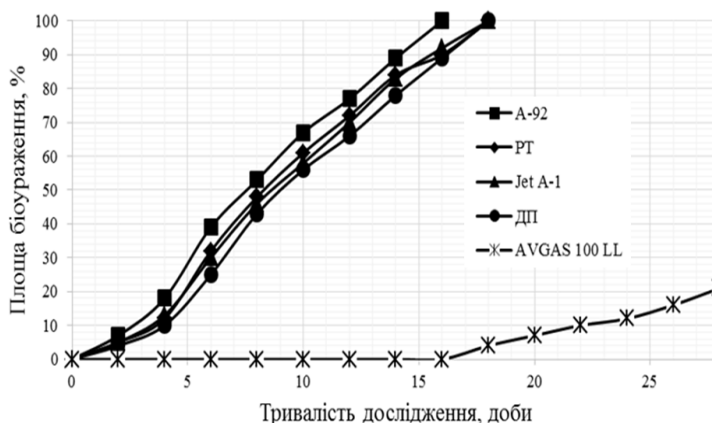


Рис. 3. Порівняльна оцінка мікробіологічної стабільності зразків моторних палив

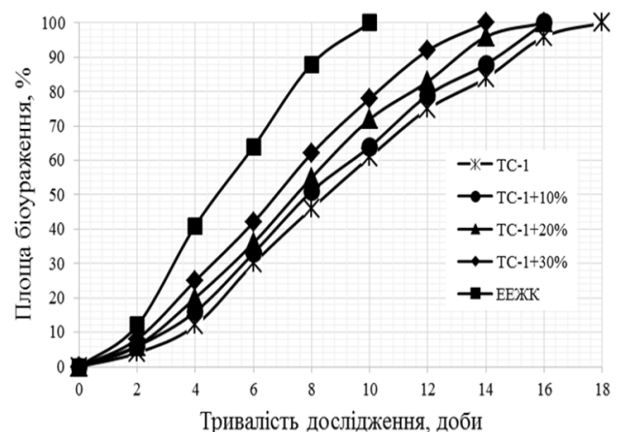


Рис. 4. Порівняльна оцінка мікробіологічної стабільності традиційного палива марки TC-1 і реформульованого (сумішевого TC-1 із вмістом ЕЕЖК)

Результати експериментальних досліджень показали, що автомобільний бензин, палива для реактивних двигунів і дизельне паливо мають майже однаковий рівень біологічної стійкості. Серед досліджуваних моторних палив авіаційний бензин має найвищий рівень біостійкості. Пояснити це можна наявністю в складі бензину тетраетилсвинцю (ТЕС), що як надто токсична речовина спричиняє токсичну дію на мікроорганізми. А ЕЕЖК – мікробіологічно нестабільна речовина. Відповідно вміст біокомпонента у паливі ТС-1 зменшує його стійкість до мікробіологічного ураження.

На наступному етапі наукової праці з метою встановлення взаємозв'язку між біоураженням сучасних авіаційних палив та зміною їх показників якості нами були виконані дослідження зміни властивостей традиційних і альтернативних авіаційних палив. Результати випробувань, наведених у табл. 1, 2, 3, свідчать про негативний вплив мікробіологічного забруднення на якість сучасних палив. Точність експериментальних даних підтверджена збіжністю результатів випробувань, що знаходиться в межах нормативних значень згідно зі стандартами на методи випробувань.

Результати досліджень виявили збільшення концентрації фактичних смол (у 2,6–4,2 рази), що становить істотні ризики для надійної роботи двигуна через відкладення смолистих сполук на деталях паливної апаратури (табл. 1, 2).

Таблиця 1

**Зміна показників якості під впливом мікробіологічного забруднення  
в паливах для ПРД**

№	Зразки палива Найменування показника	ТС-1		РТ		Jet A-1	
		до ураж.	після випр.	до ураж.	після випр.	до ураж.	після випр.
1	Кислотність, мг КОН на 100 см <sup>3</sup>	0,2	6,8	0,2	6,5	0,1	6,6
2	Концентрація фактичних смол, мг/100 см <sup>3</sup>	2,5	8,7	1,8	7,6	3,8	9,8
3	Випробування на мідній пластинці, бали	1	2а	1	2а	1	3а
4	Температура початку кристалізації, °С	мінус 61	мінус 58	мінус 59	мінус 50	мінус 51	мінус 44
5	Густина за температури 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	793	791	781	781	779	777
6	Кінематична в'язкість за температури 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	1,35	1,4	1,38	1,41	1,36	1,42
7	Нижча теплота згорання, кДж/кг	43313	43004	43254	42822	42911	42411
8	Температура сплаху у відкритому тиглі, °С	34	30	39	33	41	35
9	Термоокиснювальна стабільність у статичних умовах, кількість осаду, мг на 100 см <sup>3</sup>	9	15	4	12	3	10

Серед компонентів палив для ПРД максимальну теплоту згорання мають алкани, потім циклани, далі ароматичні вуглеводні, циклоароматичні та ненасичені. Тобто, внаслідок зменшення алканів через мікробіологічне ураження

палива, знижується його енергетична цінність через зменшення теплоти згорання на 1–5 %.

Таблиця 2

**Зміна показників якості під впливом мікробіологічного забруднення у реформульованого палива для ПРД марки ТС-1 (з додаванням ЕЕЖК)**

№	Зразки палива	ТС-1		ТС-1 + 10% ЕЕЖК		ТС-1 + 20% ЕЕЖК		ТС-1 + 30% ЕЕЖК	
		До ураж.	Після випр.	До ураж.	Після випр.	До ураж.	Після випр.	До ураж.	Після випр.
1	Кислотність, мг КОН на 100 см <sup>3</sup>	0,2	6,8	0,2	8,1	0,18	10,6	0,15	15,3
2	Концентрація фактичних смол, мг/100 см <sup>3</sup>	2,5	8,7	2,5	9,2	2,8	11,8	3,4	14,5
3	Випробування на мідній пластинці, бали	1	2а	1	2с	1	3б	1	4а
4	Температура початку кристалізації, °С	мінус 61	мінус 58	мінус 59	мінус 55	мінус 57	мінус 54	мінус 55	мінус 51
5	Густина за температури 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	793	791	801	798	816	814	816	811
6	Кінематична в'язкість за температури 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	1,3	1,35	1,58	1,64	1,82	2,1	2,25	2,32
7	Нижча теплота згорання, кДж/кг	43313	43004	43082	42657	42048	41292	41463	39354

Таблиця 3

**Зміна показників якості під впливом мікробіологічного забруднення в автомобільному бензині марки А-92 Євро та авіаційному бензині Avgas 100 LL**

№	Зразки палива	А-92		А-92 +10%біоетанолу		А-92 +15%біоетанолу		Avgas 100 LL	
		До раж.	Після випр.	До ураж.	Після випр.	До ураж.	Після випр.	До ураж.	Після випр.
1	Кислотність, мг КОН на 100см <sup>3</sup>	0,09	2,32	0,1	1,9	0,1	2,1	0,05	0,07
2	Концентрація фактичних смол, мг/100 см <sup>3</sup>	5	11,8	1,6	3,8	1,8	5,5	1,2	1,4
3	Випробування на мідній пластинці, бали	1	2а	1	2а	1	2а	1	1
4	Октанове число: – дослідний метод	92,5	90,8	92,7	92,0	93,0	92,0	99,6	99,6
5	Густина за температури 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	735	737	735	737	736	738	738	738

Фільтрувальна здатність авіаційних палив за низьких температур як експлуатаційна характеристика описується комплексом фізико-хімічних явищ, що виникають у них за температури нижчої ніж  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  і регламентується показником температури кристалізації. Як бачимо з експериментальних даних табл. 2, 3 змінення цього показника в бік погіршення може коливатись у межах 2–15 %.

В умовах експлуатації техніки найчастіше під впливом палива з підвищеною кислотністю піддаються корозії деталі агрегатів паливної системи. Виконані дослідження демонструють зміну кислотності (рис. 5) палив у 1,5–70,0 разів (табл. 1, 2, 3) після біоураження. Проте було зафіксовано помірну тенденцію до збільшення кислотності у бензині з вмістом біоетанолу (табл. 3), ніж у попередньому дослідженні, через наявність спирту, що має певні антисептичні властивості та пригнічує розвиток мікробіоти у паливі.

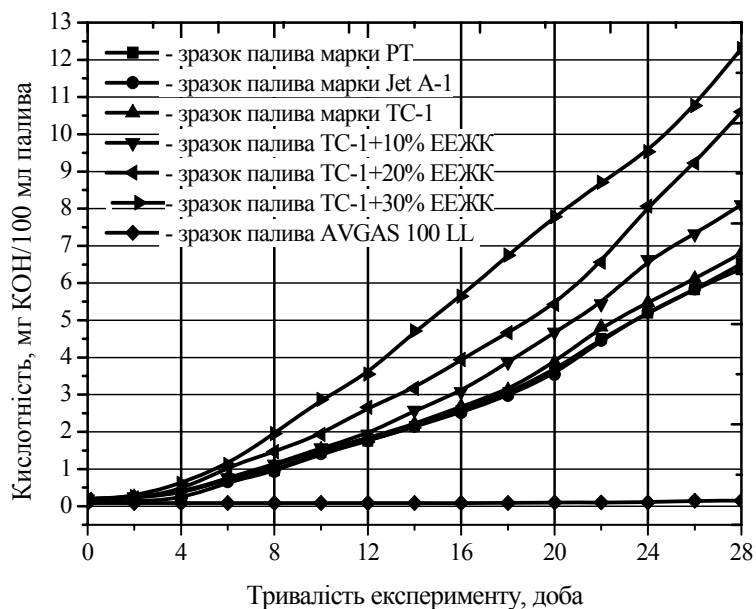


Рис. 5. Динаміка зміни кислотності досліджених авіаційних палив

А наявність у складі авіаційного бензину Avgas 100 LL токсичного ТЕС перешкоджає розвитку мікроорганізмів, що підтверджує відсутність змін у показниках якості (табл. 3).

Варто відмітити зміну ОЧ бензинів (на 0,5–1,7 од.) (табл. 3). Загалом детонаційна стійкість вуглеводнів зростає у ряді: *n*-парафінові-нафтенові-ненасичені-ароматичні. А здатність до біодеструкції збільшується у зворотному напрямку, тому й спостерігається помірне зниження ОЧ. Найбільш стійким серед бензинів виявився авіаційний марки Avgas 100 LL.

Існуючі на сьогодні методи виявлення наявності мікроорганізмів у складі авіаційних палив, зокрема, допущений ІКАО метод MicrobMonitor, не здатні до оперативного встановлення ураження мікроорганізмами в умовах оперативної роботи аеропорту.

Тому було проведено цикл досліджень низки кольорових реакцій для виявлення біозабруднення в авіаційних паливах. Основними критеріями вибору індикатора обґрунтовано надійність методу, нескладність та оперативність отримання результату. Для цього використовувались відомі якісні кольорові реакції Фоля, Руемана, Адамкевича, утворення комплексів з металами (табл. 4). Вибір кольорових реакцій визначено наявністю в мікроорганізмах амінокислот. Усі ці реакції відрізняються утворенням забарвлення, характерного для кожного методу кольору, що утворюється під час взаємодії білкових сполук (або амінокислот, що входять до їх складу) з відповідними хімічними реактивами.

**Порівняльне дослідження кольорових реакцій з метою визначення наявності мікробіологічного забруднення в авіаційних паливах**

№ з/п	Назва реакції	Амінокислота	Реактив	Концентрація та кількість реактиву	Очікуваний результат	Отриманий результат
1	імені Фоля	Цистеїн ( <i>α</i> -аміно-β-тіопропіонова кислота) та цистин (3,3'-дитіо-бис-2-амінопропіонова кислота)	Гідроксид натрію (NaOH), ацетат свинцю (Pb(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> )	1мл 5%-го розчину Pb (CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> , 10%-й розчин NaOH 5 мл палива	Осад сульфідів свинцю (II) сіро-чорного кольору	120 год, без змін
				1мл 50%-го розчину Pb (CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> , 10%-й розчин NaOH, 5 мл палива		120 год, без змін
				1мл 50%-го розчину Pb (CH <sub>3</sub> COO) <sub>2</sub> , 10%-й розчин NaOH, 10 мл палива		120 год, без змін
2	Утворення комплексів з металами	<i>α</i> -амінокислоти (амінокарбонові кислоти)	Сульфат міді(II) (CuSO <sub>4</sub> ), гідроксид натрію (NaOH)	3 мл 3%-го розчину сульфату міді(II), декілька крапель 10%-го розчину гідроксиду натрію, 5 мл палива	Розчин гліцинату міді синього кольору	111 год, поява синього кольору
				3 мл 22%-го розчину сульфату міді(II), декілька крапель 10%-го розчину гідроксиду натрію, 5 мл палива		108 год, поява синього кольору
				3 мл 22%-го розчину сульфату міді(II), декілька крапель 10%-го розчину гідроксиду натрію, 10 мл палива		108 год, поява синього кольору
3	імені Руєман а	<i>α</i> -амінокислоти (амінокарбонові кислоти)	Нінгідрин 2,2-Dihydroxyindane-1,3-dione – C <sub>9</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub>	1 □ 2 краплі розчину нінгідрину, 1 □ 2 мл палива	Фіолетове забарвлення	1,5 хв, поява фіолетового забарвлення
4	імені Адамкевича	Триптофан (β-β-індолил)- <i>α</i> -амінопропіонова кислота, C <sub>11</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Концентрована оцтова (CH <sub>3</sub> COOH) та сірчана (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) кислоти	1 мл концентрованої оцтової кислоти, 1 мл концентрованої сірчаної кислоти, 2 мл палива	На межі двох рідин утворюється червоно-фіолетове кільце, поступово поширюється	48 год, утворилося червоно-фіолетове кільце, поширилося на усю рідину

Результати досліджень продемонстрували відсутність змін у контрольних зразках кожної марки палива, не відбулася реакція Фоля для уражених зразків авіаційних палив. Найкращий результат було зафіксовано під час дослідження за допомогою реакції Руемана (нінгідрінова реакція) – результат отримано через 1,5 хв. Мікроскопування зразків з фіолетовим забарвленням показало наявність мікробіологічної фази (рис. 6). Мікроскопування також показало наявність мікробіологічної фази в уражених зразках палив, а в контрольних зразків – відсутність включень та домішок (рис. 6).

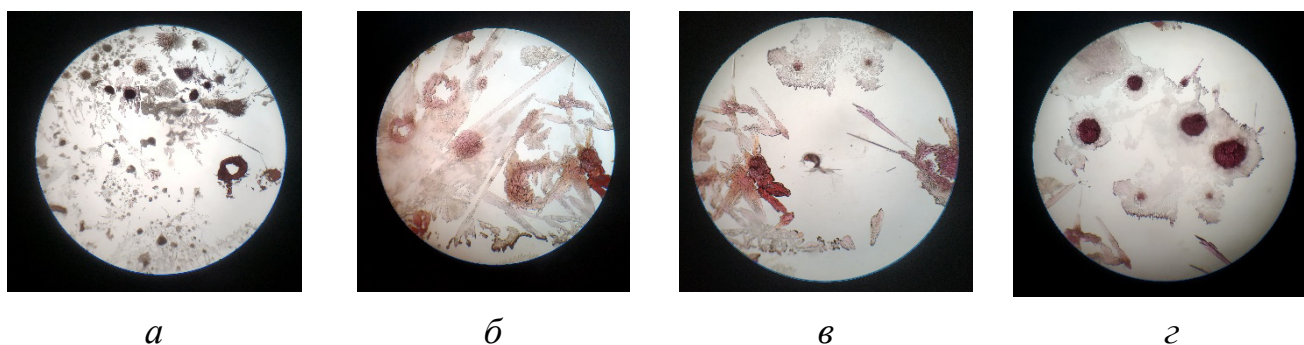


Рис. 6. Результати мікроскопування зразків авіаційних палив з мікробіологічним забрудненням, виявленим за допомогою реакції Руемана: *а* – паливо марки РТ; *б* – паливо марки ТС-1; *в* – паливо марки Jet A-1; *г* – бензин марки AVGAS 100LL

Проблемно-тематичний контент **третього** розділу, здебільшого, присвячено створенню практичних рекомендацій для забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив і збереження їх енергетичного потенціалу. Описано результати системного аналізу існуючих методів забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив.

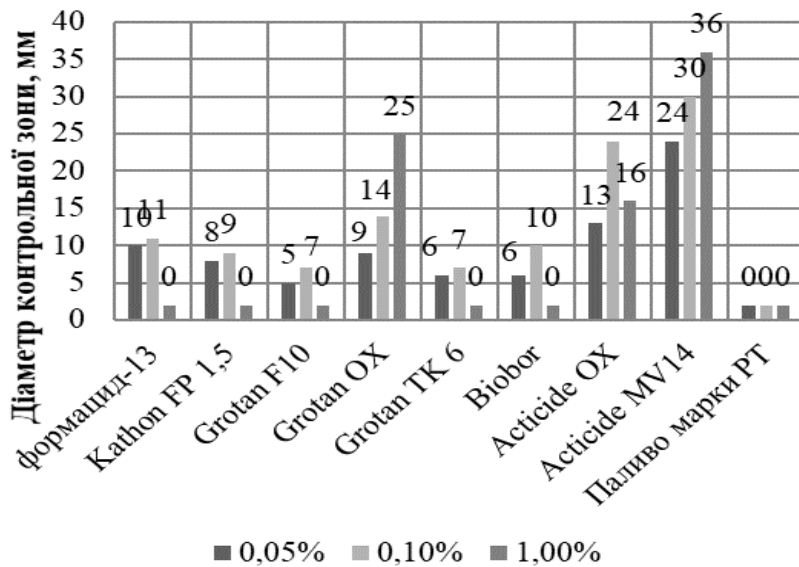
На підставі виконаного причинно-наслідкового аналізу з використанням методу *Cause and Effect Ishikawa Diagram* було систематизовано чинники, що сприяють виникненню та розвитку мікробіологічного забруднення в паливних системах літаків.

Збиток від біопошкодження виявляється у погіршенні якості палив, а також у корозії резервуарів, паливних систем, порушенні роботи насосів, забиванні паливних фільтрів тощо. Систематизовано взаємозв'язок мікроорганізмів та спричинених ними наслідків.

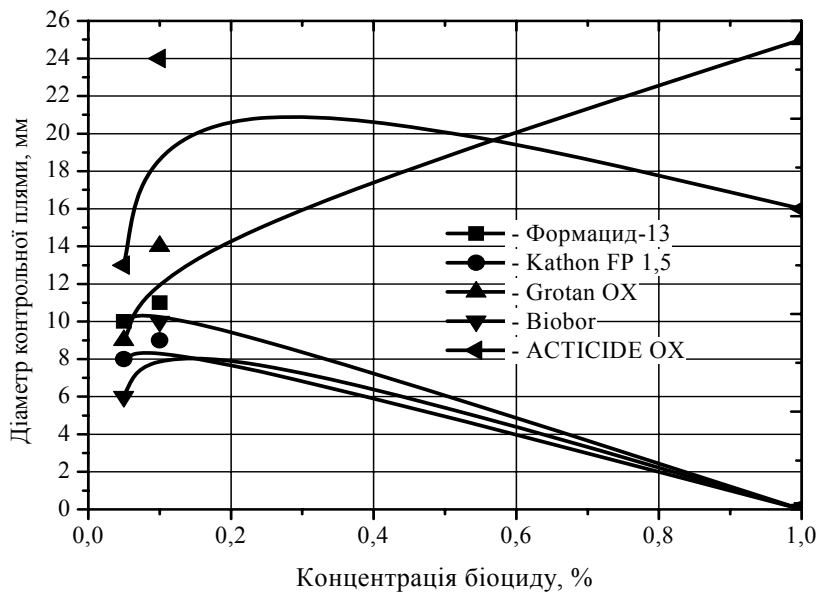
Основний суттєвий акцент матеріалу даного розділу присвячено опису організаційних і методичних заходів запобігання мікробіологічному ураженню авіаційних палив. Окремий блок досліджень присвячено виявленню ефективності біоцидних додатків до палив. Для порівняльної оцінки біоцидів проведено дослідження за методом зональної дифузії біологічної стійкості реактивного палива РТ, захищеного біоцидними присадками з різними концентраціями в чашці Петрі на ураженому поживному середовищі. Що більший діаметр зони інгібування, то ефективніше діє біоцидний додаток. Результати досліджень наведені на рис. 7.

Оцінка результатів порівняльних досліджень свідчать, що найкращі протимікробні властивості проявили такі додатки як: формацид-13, Kathon FP 1,5,

Grotan OX, Biobor, Akticide OX, Akticide MV14. Встановлено максимальну ефективну їх концентрацію – 0,1 %. Підвищення концентрації у більшості випадків виявило зворотний ефект.



*a*



*б*

Рис.7. Результати порівняльного дослідження дії (*a*) і ефективності (*б*) біоцидних додатків у різних концентраціях на паливо марки РТ

Подано ґрунтовний опис відомих методів виявлення мікробіологічного ураження та проведено порівняльний аналіз способів запобігання авіаційних палив мікробіологічній деструкції авіаційних палив.

Створено методологічне підґрунтя для розроблення методично-організаційних засад і практичних рекомендацій щодо запобігання мікробіологічному ураженню та пошкодженню авіаційних палив, що є однією з найважливіших компонент забезпечення хімотологічної надійності авіаційної техніки та безпеки польотів загалом (рис. 8).



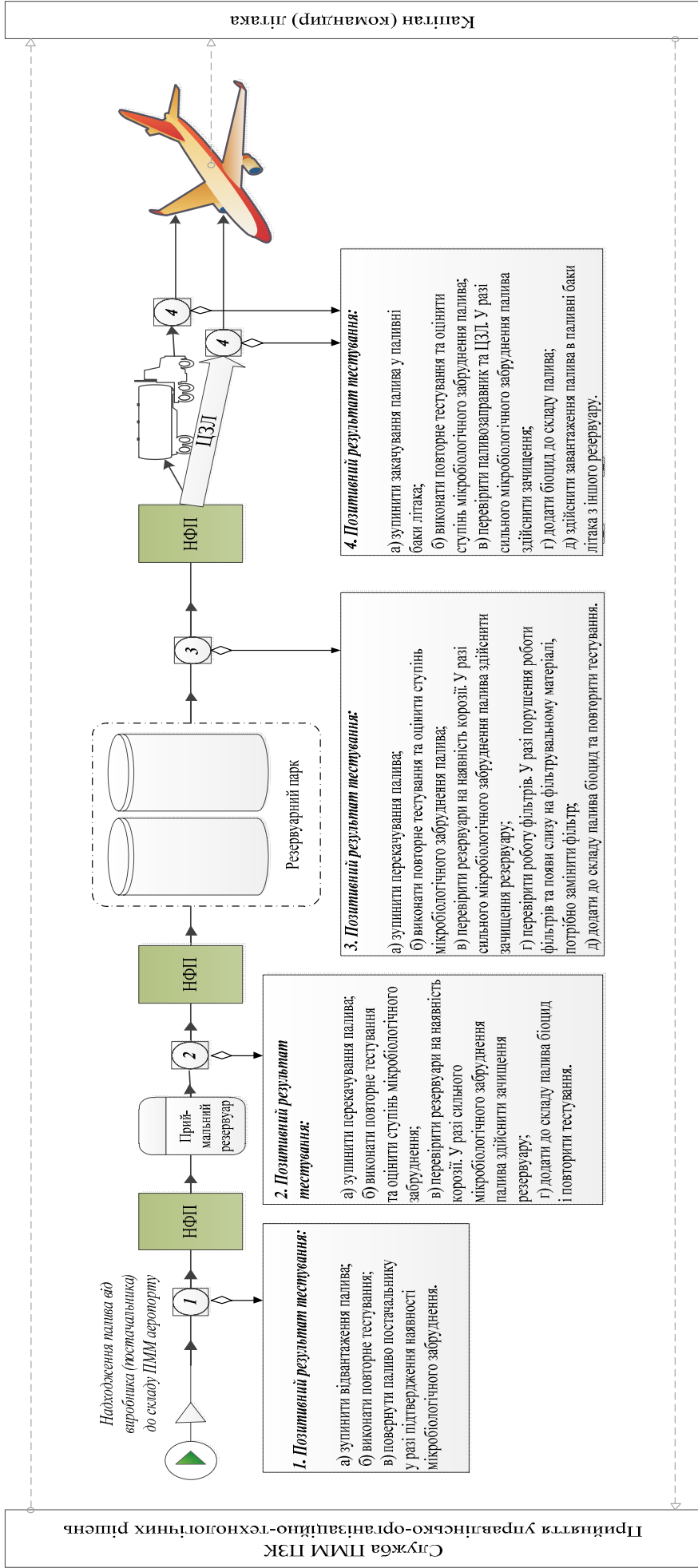


Рис. 8. Феноменологічна чотириступенева модель моніторингу мікробіологічного забруднення авіаційного палива.

1 2 3 4

– місце відбирання зразка для оперативного тесту на наявність мікробіологічного ураження;  
 НФП – насосно-фільтраційний пункт; ЦЗЛ – централізоване управління літака

Для забезпечення хімотологічної надійності авіаційної техніки за показником біологічної стабільності авіаційного палива вирішальну роль відіграє комплексне забезпечення запобігання мікробіологічному ураженню. Системні організаційно-методичні заходи запобігання мікробіологічному ураженню на кожному етапі життєвого циклу авіаційного палива забезпечують виконання цього завдання. Вчасне виявлення мікробіологічного забруднення авіаційних палив унеможливить ураження паливної системи та заправлення авіаційної техніки некондиційним паливом.

## ВИСНОВКИ

Вирішено важливе науково-прикладне завдання, що характеризується науковою новизною, практичним значенням і пов'язане з розвитком наукових основ хімотології, удосконаленням технологій збереження та забезпечення відповідності фізико-хімічних показників встановленому рівню якості моторних палив, а також хімотологічної надійності авіаційної техніки за біологічною стабільністю:

1. Запропоновано та обґрунтовано науково-методичний підхід до визначення мікробіологічного ураження авіаційного палива, що полягає у застосуванні комплексного аксіоматично-феноменологічного опису процесу біодеструкції з позиції формальної кінетики відомих фізико-хімічних і біологічних процесів. Встановлено причини, джерела, умови виникнення та поширення мікробіологічного забруднення авіаційних палив. Визначальними чинниками розвитку мікробіологічного ураження в авіаційних паливах є наявність вологи та температура ( $\sim 28$  °C). Показано, що *Hormoconis resiniae* зберігає життєздатність за температури 60 °C протягом трьох діб. А його активність зростання в паливі не змінюється при короткочасних коливаннях температури від мінус 60 °C до плюс 60° C. Показано, що вміст мікроорганізмів до  $10^4$  клітин/м<sup>3</sup> палива вважається безпечним та не становить ризику для безпеки польотів.

2. Визначено видовий склад мікроорганізмів-деструкторів, що здатні засвоювати вуглеводні авіаційного палива. Це гриби, бактерії та дріжджі. Найпоширенішими є гриби, що за здатністю до зростання в паливі були розподілені на три групи: 1 – активні деструктори (наприклад, *Hormoconis resiniae*); 2 – потенційні деструктори (наприклад, *Aspergillus ustus*); 3 – частково адаптовані до середовища та випадкові мікроміцети.

3. Встановлено основні закономірності та механізм біодеструкції авіаційних палив. Встановлено, що механізм біодеструкції вуглеводнів авіаційних палив залежить від адаптивних ферментів мікроорганізмів, тому вони мають до різних вуглеводнів властивість вибіркового відношення, що визначається не тільки структурою вуглеводню, а й кількістю вуглеводневих атомів в його структурі, і різними напрямками метаболізму. Найбільший рівень біодеструкції виявлено на *Hormoconis resiniae* у алканових вуглеводнів з більш довгим вуглецевим ланцюгом.

4. Розвинуто уявлення про мікробіологічне ураження авіаційних палив як про процес, що складається з трьох послідовних взаємозалежних етапів: *взаємодії (адгезії) мікроорганізмів з паливами – розвиток мікроорганізмів у середовищі вуглеводнів палива – зміна властивостей палива*. Доведено незворотну зміну

показників якості авіаційних палив унаслідок мікробіологічного ураження. Інструментальними фізико-хімічними дослідженнями визначено зміну кислотності (збільшення у 1,5–70,0 разів), корозійної активності, вмісту фактичних смол (збільшення у 2,6–4,2 рази), термоокиснювальної стабільності (зменшення у 1,3–3,5 разів), теплоти згорання (зменшення на 1–5 %), температури початку кристалізації (збільшення на 2–15 %), кінематичної в'язкості (підвищення на 2–4 %) сучасних авіаційних палив під впливом мікробіологічного забруднення.

5. Дістало подальшого розвитку теоретичне уявлення щодо мікробіологічної стабільності моторних палив. Ураховуючи різну деструктивну активність культур мікроорганізмів і вуглеводневий склад, досліджені палива за мікробіологічною стабільністю проранжовано (у порядку зростання) у такий ряд: *автомобільний бензин – паливо для реактивних двигунів – дизельне паливо – авіаційний бензин*. Вищий рівень стійкості до ураження у авіаційного бензину пояснюється наявністю у його складі ТЕС, що чинить токсичний вплив на живі організми.

6. Уперше виявлено, що наявність біокомпонентів (етиліві естери жирних кислот) пришвидшує розвиток мікробіологічної фази у складі авіаційних палив через доступність естерів для мікроорганізмів і слабкі хімічні зв'язки в молекулах біокомпонентів, що сприяє активному розмноженню мікроорганізмів. Реформульовані реактивні палива (сумішеві, що містять FAME), більш чутливі до мікробіологічного ураження через їх підвищену гігроскопічність та вміст етилових/метилових естерів жирних кислот. Легкість окиснення та здатність до біодеструкції цього палива обґрунтовує обов'язкове використання біоцидів для сумішевих палив.

7. Запропоновано та експериментально обґрунтовано можливість використання біохімічних колориметричних реакцій для визначення наявності мікроорганізмів в авіаційних паливах. Розроблену на базі реакції Руемана методику мікробіологічного забруднення перевірено та підтверджено її дієвість та надійність за допомогою відомого методу тестування MicrobMonitor2. Рівень валідації методики за внутрішньолабораторною відтворюваністю становить 98 %;

8. Систематизовано чинники, що сприяють виникненню та розвитку мікробіологічного забруднення в паливних системах літальних апаратів. Оцінено ефективність біоцидних додатків як одного з економічних і дієвих способів забезпечення необхідного рівня біологічної стабільності авіаційних палив. Найефективнішими виявились біоциди товарних марок формацид-13, Kathon FP 1,5, Grotan OX, Biobor, Akticide OX, Akticide MV14 з максимальною ефективною концентрацією 0,1 %.

9. Розроблено модель та систему моніторингу мікробіологічного забруднення авіаційних палив для прогнозування та управління ризиками та попередження ураження мікроорганізмами палива паливно-заправних комплексів і паливних систем транспортних засобів.

Дисертація визначає перспективні напрями удосконалення технології забезпечення якості авіаційних палив, відповідно хімотологічної надійності техніки через обґрунтування способів запобігання мікробіологічному ураженню.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Розділи монографій

1. Microbiological corrosion and importance of monitoring of microbial contamination for reliability aviation technology / I. Shkilniuk, S. Boichenko // Transport 2016. Systems and means of motor transport. Monografia № 7. – Rzeszow (Poland), 2016.– С. 291–300.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідження, аналізуванні результатів та формулюванні висновків*

2. Biological risks of aviation fuel supply / I. Shkilniuk, S. Boichenko // Transport 2019. Systems and means of motor transport. Monografia № 19. – Rzeszow (Poland), 2019.– Р. 67–74.

*Особистий внесок автора полягає у визначенні біологічних ризиків, узагальненні інформації та формулюванні висновків*

3. Identification and Assessment of Biological Risk of Aviation Fuel Supply / Iryna Shkilniuk, Sergii Boichenko, Tetiana Kondratiuk, Nataliia Shevchuk // Selected aspects of providing the chemo-tological reliability of the engineering: Monograph – S. Boichenko, O. Aksionov, P. Topilnitskyi, Andrii Pushak, K. Lejda. – K.: Center of Educational Literature. – 2019. – Р. 197–214.

*Особистий внесок автора полягає у визначенні та ідентифікації біологічних ризиків, узагальненні інформації та формулюванні висновків*

### Статті у фахових вітчизняних наукових журналах з переліку МОН

4. Нова присадка для підвищення стабільності вуглеводневих палив / Чугуй В. О., Іванощук, Т. О., Шкільнюк І. О. // Вісник НАУ, 2009. – № 2. – С. 153–156.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні порівняльних досліджень, аналізуванні результатів та узагальненні інформації*

5. Дослідження механізму біодеструкції авіаційних палив / Безпальчук О. В., Шкільнюк І. О., Бойченко С. В. // Наукоємні технології. – 2013. – № 1(17). – С. 44–49.

*Особистий внесок автора полягає в аналізуванні літератури та узагальненні інформації, формулюванні висновків*

6. Систематизація видового складу мікробіологічної фази у складі авіаційних палив / Бойченко С. В., Шкільнюк І. О., Новак А. О. // Наукоємні технології. – 2014. – Том 21. – № 1 (2014). – С. 5–9.

*Особистий внесок автора полягає в аналізуванні літератури та узагальненні інформації*

7. Аналіз екологічних властивостей компонентів традиційних і альтернативних авіаційних бензинів / С. Бойченко, Л. Павлюх, І. Шкільнюк, А. Яковлева, І. Матвеева, А. Гудзь // Наукоємні технології, 2019. – № 2(42). – С. 195–206.

*Особистий внесок автора полягає в аналізуванні та узагальненні взаємодії вуглеводнів з біологічними структурами*

### Статті у закордонних періодичних виданнях

8. Methodically organizational principles of biological stability providing of aviation fuel / Shkilniuk I., Boichenko S. // Transactions of the Institute of aviation of Warsaw. – 2014. – № 4 (237). – Р. 76–83.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідження, аналізуванні та узагальненні результатів, формулюванні висновків*

9. Traditional and Alternative Jet Fuels: Problems of Quality Standartization / Iakovlieva A., Boichenko S., Vovk O., Shkilniuk I., Lejda K. // Petroleum and Environmental Biotechnology. – 2013. – Volume 4, № 3. – P. 1–5.

*Особистий внесок автора полягає у формулюванні вимог до чистоти та якості авіаційних палив*

10. Investigation of the microbiological stability of traditional and alternative aviation fuels / Shkilniuk Iryna // Int. J. Sustainable Aviation, Vol. 2. – № 2, 2016. – P. 111–118.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідження, порівнянні результатів та узагальненні отриманої інформації, формулюванні висновків*

#### **Статті у закордонних фахових виданнях, що входять до науково-метричних баз даних**

11. The problems of biopollution with jet fuels and the way of achiving solution / Boichenko S., Shkilniuk I., Turchak V. // Transport. – 2008. – № 23 (3). – P. 253–257.

*Особистий внесок автора полягає в аналізуванні літератури, виконанні дослідження та узагальненні результатів*

12. Vacuum distillation of rapeseed oil esters for production of jet fuel bioadditives / Iakovlieva A., Boichenko S., Vovk O., Shkilniuk I., Lejda K. // Procedia Engineering. – 2017. – Vol.187. – P. 363–370.

*Особистий внесок автора полягає у формулюванні вимог до чистоти та стабільності палив*

#### **Тези та матеріали вітчизняних і міжнародних конференцій**

13. Исследование влияния микробиологической стабильности топлив для воздушно-реактивных двигателей на надёжность работы топливной системы самолёта / Шкильнюк И. А., Романов С. Ф., Гринько В. В. // Проблеми хімотології: IV Міжнародна науково-технічна конференція, 24–28 вересня 2012 р.: тези доп.–Рибаче, 2012. – С. 370–373.

*Особистий внесок автора полягає в аналізуванні літератури, виконанні дослідження та узагальненні результатів*

14. Research of influence of microbiological stability of fuels for jet engines on reliability of work of airplanes fuel system / Shkilniuk I., Grinko V., Boichenko S. // Systems and means of motor transport”, № 3 Seria: Transport (Poland). – 2012. – P. 291–294.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідів, обробленні та узагальненні інформації*

15. Dependance of the aircraft fuel system reliability from microbiological contamination of fuels / Shkilniuk I., Boichenko S. // “Systems and means of motor transport”, № 4 Seria: Transport (Poland). – 2013. – P. 309– 311.

*Особистий внесок автора полягає в обробленні та узагальненні інформації, систематизації наслідків, формулюванні висновків*

16. Видовий склад мікробіологічної фази у паливах для повітряно-реактивних двигунів / Шкільнюк І. О., Бойченко С. В., Кондратюк Т. О., Новак А. О. //

XI Міжнародна науково-технічна конференція «Авіа-2013» 21–23 травня 2013, Київ. – С. 31.107–31.110.

*Особистий внесок автора полягає в аналізуванні літератури, обробленні та узагальненні інформації*

17. Biodegradation and biostability of mineral and biological fuels / Shkilniuk I., Kondratuk T., Voichenko S. // World Congress Petrochemistry and Chemical Engineering, 18–23 november 2013. – San-Antonio, USA, 2013. – P. 48.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідів, обробленні та узагальненні інформації, формулюванні висновків*

18. Проблеми мікробіологічного забруднення та стандартизації у сфері забезпечення чистоти авіаційних палив / Шкільнюк І., Бойченко С., Нікітін А. // Поступ у нафто-, газопереробній та нафтохімічній промисловості – 2014: VII Міжнародна науково-технічна конференція, 19–24 травня 2014 р.: тези доповідей. – Львів, 2014. – С. 43.

*Особистий внесок автора полягає в аналізуванні нормативних документів, обробленні та узагальненні інформації*

19. Розроблення технічного регламенту щодо вимог до авіаційного бензину та палива для реактивних двигунів / Бойченко С., Яковлева А., Азаренкова А., Шкільнюк І. // Поступ у нафто-, газопереробній та нафтохімічній промисловості – 2014: VII Міжнародна науково-технічна конференція, 19–24 травня 2014 р.: тези доп. – Львів, 2014. – С. 106.

*Особистий внесок автора полягає в обробленні та узагальненні інформації*

20. Проблеми чистоти та мікробіологічного забруднення у сфері авіапаливозабезпечення / Шкільнюк І. О., Фесак Т. А. // Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних та альтернативних паливно-мастильних матеріалів: IV Міжнародна науково-технічна конференція, 6–10 жовтня 2014 р.: тези доп., Рибаче, 2014. – С. 94–96.

*Особистий внесок автора полягає в обробленні та узагальненні інформації*

21. Research of the biodegradation mechanism of petroleum hydrocarbons / Shkilniuk I., Voichenko S. // «From Biotechnology to Environmental Protection»: 9<sup>th</sup> International Conference of Young Naturalists, 06-08 november 2014, Zielona Gora (Poland). – P. 66–67.

*Особистий внесок автора полягає в описанні механізму біодеструкції та узагальненні інформації, формулюванні висновків*

22. Дослідження корозійної активності авіаційного палива з мікробіологічним забрудненням / Шкільнюк І. О., Бойченко С.В., Терещенко В. А. // “Systems and means of motor transport”, № 6 Seria: Transport (Poland). – 2015. – P. 269–274.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідів, обробленні та узагальненні інформації*

23. Investigation of the microbiological stability of traditional and alternative aviation fuels / Shkilniuk I. // International Symposium on Sustainable Aviation 2015, Istanbul (Turkey), 31 may-3 june 2015.– P. 134.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідів, обробленні та узагальненні інформації, формулюванні висновків*

24. Evolution of aviation fuel biocide additives / Shkilniuk I., Boichenko S. // ABIA-2015: XII Міжнародна науково-технічна конференція, 28-29 квітня 2015 р.: тези доп. – Київ, 2015. – С. 29.26 – 29.30.

*Особистий внесок автора полягає в обробленні та узагальненні інформації*

25. Microbiological control in the system of civil aviation jet fuel supply / Iryna Shkilniuk, Sergii Boichenko, Kazimierz Lejda / Proceedings of the 19th Conference for Junior Researchers ‘Science – Future of Lithuania’ TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 6 May 2016, Vilnius, Lithuania. – P. 90–94.

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідів, обробленні та узагальненні інформації*

26. Исследование влияния микробиологического загрязнения на коррозионные свойства традиционных и альтернативных моторных топлив / Шкільнюк І. А., Бойченко С. В., Лейда К. // VI Международная научно-техническая конференция «Проблемы химмотологии: от эксперимента к математическим моделям высокого уровня»: Тезисы докладов. 17–19 октября 2016, г. Москва. – С. 92.

*Особистий внесок автора полягає в виконанні дослідів, обробленні та узагальненні інформації, формулюванні висновків*

27. Влияние микробиологического загрязнения на кислотность традиционных и альтернативных авиационных топлив // Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів: монографія // Сергій Бойченко, Казимир Лейда, Василь Матейчик, Петро Топільницький / за заг. ред. проф. С. Бойченка. – К.: Центр учбової літератури, 2017. – С. 341–346.

*Особистий внесок автора полягає в виконанні дослідів, обробленні та узагальненні інформації*

28. Вплив мікробіологічного забруднення на компонентний склад авіаційних палив // Поступ в нафтогазовій та нафтопереробній промисловості, 14–18.05.2018, м. Львів: Матеріали конференції // Шкільнюк І.О. – Л.: Видавництво «Львівська політехніка». 2018. – С. 92–94

*Особистий внесок автора полягає у виконанні дослідів, обробленні та узагальненні інформації, формулюванні висновків*

29. Біологічні ризики в системі авіапаливозабезпечення // Поступ в нафтогазовій та нафтопереробній промисловості, 18–23.05.2020, м. Львів: Матеріали конференції // Шкільнюк І., Бойченко С. – Л.: Видавництво «Львівська політехніка». 2018. – С. 60–64.

*Особистий внесок автора полягає в обробленні та узагальненні інформації, формулюванні висновків*

### **Патент**

30. Методика визначення мікробіологічного забруднення авіаційних палив / Бойченко С.В., Шкільнюк І. О., Новак А.О. // Пат. 94190 Україна, заявл. 16.10.2013; опубл. 10.11.2014. – Бюл. № 21. – 2 с.

## АНОТАЦІЯ

**Шкільнюк І. О. Розроблення методично-організаційних засад біологічної стабільності авіаційного палива. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.07 – хімічна технологія палива і паливно-мастильних матеріалів. – Національний авіаційний університет, Київ, 2020.

Роботу присвячено розвитку наукових засад хімотології, зокрема, удосконаленню технологій збереження та забезпечення якості авіаційних палив, а також технологічних аспектів підтримання хімотологічної надійності авіаційної техніки, спрямованих на забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив.

Запропоновано аксіоматично-феноменологічний опис механізму біодеструкції авіаційних палив. Найбільший рівень біодеструкції виявлено на *Hormoconis resinae* у алканових вуглеводнів з більш довгим вуглецевим ланцюгом.

Розвинуто уявлення про мікробіологічне ураження авіаційних палив як про процес, що складається з трьох послідовних взаємозалежних етапів: *взаємодії (адгезії) мікроорганізмів з паливами – зростання у середовищі вуглеводнів палива – зміна властивостей палива.*

За мікробіологічною стабільністю досліджені палива проранжовано (у порядку зростання) у такий ряд: *автомобільний бензин – паливо для реактивних двигунів – дизельне паливо – авіаційний бензин.*

Доведено незворотну зміну показників якості авіаційних палив (кислотності, корозійної активності, вмісту фактичних смол, термоокиснювальної стабільності, теплоти згорання, температури початку кристалізації, кінематичної в'язкості унаслідок мікробіологічного ураження. Серед мікроорганізмів-деструкторів найпоширенішими є гриби (1 – активні деструктори (наприклад, *Hormoconis resinae*); 2 – потенційні деструктори (наприклад, *Aspergillus ustus* і *Geotrichum candidum*); 3 – частково адаптовані до середовища та випадкові мікроміцети).

Визначальними чинниками розвитку мікробіологічного ураження в авіаційних паливах є температура (~ 28 °С) та наявність вологи. Показано, що вміст мікроорганізмів до 10<sup>4</sup> клітин/м<sup>3</sup> палива вважається безпечним та не становить ризику для безпеки польотів.

Виявлено, що наявність біокомпонентів (етиліві естери жирних кислот) пришвидшує розвиток мікробіологічної фази у складі авіаційних палив.

Розроблену на базі реакції Руемана колориметричну методику мікробіологічного забруднення перевірено та підтверджено її дієвість і надійність порівняно з відомим методом тестування MicrobMonitor2. Рівень валідації методики за внутрішньолабораторною відтворюваністю становить 98 %.



Розвинуто уявлення про ефективність біоцидних додатків. Найефективнішими виявились біоциди товарних марок формацид-13, Kathon FP 1,5, Grotan OX, Biobor, Akticide OX, Akticide MV14 з максимально ефективною концентрацією 0,1 %.

Проблемно-тематичний контент праці, переважно, присвячено створенню практичних рекомендацій для забезпечення біологічної стабільності авіаційних палив.

**Ключові слова:** паливо, мікробіологічне ураження, авіація, хімотологія, надійність, довговічність, стабільність, властивості, біодеструкція, окиснення, якість, колориметричний індикаторний метод, біоциди, моніторинг, рекомендації, модель.

## ANNOTATION

**Irina O. Shkilnyuk. Development of the methodological and organizational basis for the biological stability of aviation fuel.** – Manuscript.

Ph.D. Thesis in Engineering Sciences Majoring in 05.17.07 – Fuels and Lubricants Chemical Engineering. – National Aviation University, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the development of scientific principles of chemotology, in particular, to the improvement of saving technologies and quality assurance of aviation fuels, as well as technological aspects of maintaining chemotological reliability of aviation equipment aimed at ensuring biological stability of aviation fuels.

An axiomatic-phenomenological description of the mechanism of biodegradation of aviation fuels is proposed. The highest level of biodegradation was found on *Hormoconis resiniae* in alkane hydrocarbons with a longer carbon chain.

Microorganisms have the selective ability related to various hydrocarbons, and this ability is determined not only by the difference in the structure of substance, and even the number of carbon atoms that are the part of their structure.

Developed understanding of microbial damage jet fuel as a process consisting of three interconnected stages in series: *interaction (adhesion) of microorganisms with fuels - growth in the environment of fuel hydrocarbons - change of fuel properties.*

According to microbial stability, the studied fuels are ranked (in ascending order) in the following order: *automobile gasoline - jet fuel - diesel fuel - aviation gasoline.*

An irreversible change in the quality indicators of aviation fuels (acidity, corrosion activity, the content of actual resins, thermo-oxidative stability, heat of combustion, temperature of the beginning of crystallization, kinematic viscosity) due to microbial damage. A biocorrosion of the fuel system and aircraft structures is part of the problem fuel with microbiological contamination.

Among the destructive microorganisms, the most common are fungi. They are systematized into three groups: *1 – active destructors (for example, Hormoconis resiniae); 2 – potential destructors (for example, Aspergillus ustus and Geotrichum candidum); 3 – partially adapted to the environment and random micromycetes.*

Determining factors for the development of microbiological damage in aviation fuels are temperature ( $\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and moisture. It is shown that the content of microorganisms up to  $10^4\text{ cells/m}^3$  is considered safe and does not pose a risk to flight safety.

It was found that the presence of biocomponents (ethyl esters of fatty acids) accelerates the development of the microbial phase in aviation fuels.

The colorimetric method of microbiological contamination developed on the basis of Rueman's reaction is checked and its efficiency and reliability in comparison with the known method of testing MicrobMonitor2 is checked and confirmed. The level of validation of the method for intra-laboratory reproducibility is 98 %.

Developed understanding of the effectiveness of biocide applications. The most effective were biocides of the brands formacid-13, Kathon FP 1,5, Grotan OX, Biobor, Akticide OX, Akticide MV14 with the maximum effective concentration of 0,1 %.

Problem-thematic content of the work is mainly devoted to the creation of practical recommendations for ensuring the biological stability of aviation fuels. An important component of this recommendations is the frequent checks of drainage systems, as well as regular testing and monitoring of microbiological contamination of the fuel and fuel system.

**Key words:** fuel, microbial damage, aviation, chemmotology, reliability, durability, stability, properties, biodegradation, oxidation, quality, colorimetric indicator method, biocides, monitoring, recommendations, model.

Підп. до друку 22.10.2020. Формат 60×84/16. Папір офс.  
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,39. Обл.-вид. арк. 1,5.  
Тираж 100 пр. Замовлення № 82-1.

Видавець і виготівник  
Національний авіаційний університет  
03680, Київ–58, проспект Любомира Гузара, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру серія ДК № 977 від 05.07.2002