



Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Українському науково-дослідному інституті цивільного захисту (м. Київ).

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Антонов Анатолій Васильович**  
Державний заклад «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління», професор кафедри екологічного аудиту та експертизи

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Кириченко Оксана В'ячеславівна**  
Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, завідувач кафедри пожежно-профілактичної роботи

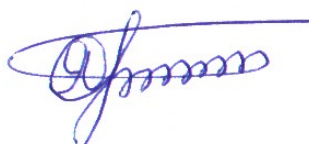
кандидат технічних наук  
**Грушовінчук Олександр Володимирович**  
Державний центр сертифікації Державної служби України з надзвичайних ситуацій, заступник начальника центру - начальник відділу інспектування у сфері пожежної та техногенної безпеки

Захист відбудеться “26” листопада 2020 року о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 35.874.01 у Львівському державному університеті безпеки життєдіяльності за адресою: 79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Львівського державного університету безпеки життєдіяльності (79007, м. Львів, вул. Клепарівська, 35).

Автореферат розіслано “\_\_” — hlgy\_2020 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н.



Р.С. Яковчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Однією з альтернатив видам палива є біопаливо, що виробляється з сировини природного походження. Це, зокрема, біодизельне паливо (надалі – БДП) – складні ефіри вищих жирних кислот, що може використовуватись як окремий вид палива або в суміші з нафтовим дизельним паливом (надалі – ДП). БДП, маючи подібні до ДП експлуатаційні властивості, відрізняється від нього хімічним складом та, ймовірно, показниками пожежонебезпечності і параметрами процесів горіння і, вочевидь, має свої особливості взаємодії з вогнегасними речовинами (надалі – ВР).

Статистика пожеж в Україні свідчить про те, що в державі щороку виникає близько 1,5 тис. пожеж, спричинених загорянням легкозаймистих і горючих рідин різної хімічної природи. Найбільш “резонансними” з них останніми роками були пожежі на нафтобазі “БРСМ-Нафта” (Київська область, 2015 рік), підприємстві “Дельта Вілмар”, що спеціалізується на виробництві продукції на основі жирів (Одеська область, 2018 рік), Зарубинецькому спиртозаводі (Тернопільська область, 2018 рік) тощо. Відомі випадки пожеж БДП за межами України, зокрема на заводі з виробництва БДП в м. Стюарт (США, 2015 рік), коли горіло понад 10 тис. галонів готової продукції, та на заводі Biomax Fuels Ltd (Індія, 2016 рік), коли горіло 12 резервуарів з БДП.

Значний обсяг теоретичних й експериментальних досліджень з вивчення процесів горіння та гасіння горючих рідин, а також розроблення систем забезпечення пожежної безпеки (надалі – СПБ) об’єктів їх виробництва та застосування викладено в роботах Антонова А.В., Баланюка В.М., Баратова А.М., Білкуна Д.Г., Боровикова В.О., Воєводи С.С., Горшкова В.І., Дунюшкіна В.О., Жартовського В.М., Казакова М.В., Кириченко О.В., Кіреєва О.О., Ковалишина В.В., Костенка В.К., Меркулова В.А., Ніжника В.В., Слуцької О.М., Соколова С.В., Федоровського В.В., Цапка Ю.В., Шароварникова С.А., G. Marlair, V. Moreno, T. Nobuyuki, R. Salvagni та інших, але процеси припинення горіння саме БДП і його бінарних сумішей з ДП залишилися поза їх увагою. Певною мірою це стосується й питань забезпечення пожежної безпеки об’єктів виробництва та застосування БДП, що може призводити до помилкових управлінських рішень і негативним чином відобразитись у статистиці пожеж.

Розкриття особливостей процесів припинення горіння БДП і його сумішей з ДП у разі взаємодії з ВР є актуальною науковою задачею, розв’язання якої є підґрунтям удосконалення СПБ об’єктів його виробництва та застосування.

**Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження проводилися відповідно до Програми забезпечення пожежної безпеки на період до 2010 року, затвердженої постановою КМУ від 01.07.2002 № 870, Державної цільової соціальної програми забезпечення пожежної безпеки на 2012 – 2015 роки, затвердженої постановою КМУ від 01.06.2002 № 590, у рамках виконання в Українському науково-дослідному інституті цивільного захисту (надалі – УкрНДЦЗ) НДР “Провести дослідження пожежної небезпеки моторного біопалива, процесів його горіння і обґрунтувати тактичні прийоми його гасіння” (№ держреєстрації 0109U005795), в якій здобувач був відповідальним виконавцем, НДР “Провести дослідження з розкриття особливостей процесів припинення горіння

горючих речовин під час застосування сучасних вогнегасних речовин та технологій їх подавання” (№ держреєстрації 0111U008299), в якій здобувач був виконавцем, а також НДР “Провести дослідження та розробити довідник керівника гасіння пожежі” (№ держреєстрації 0114U002477), в якій здобувач був виконавцем.

**Ідея роботи** полягає в удосконаленні систем забезпечення пожежної безпеки об’єктів виробництва і застосування біодизельного палива шляхом урахування його пожежонебезпечності й особливостей процесів припинення горіння у разі взаємодії з вогнегасними речовинами.

**Мета роботи** полягає у розкритті особливостей впливу чинників на пожежонебезпечність біодизельного палива і його бінарних сумішей з дизельним паливом, параметри процесів горіння, процеси його припинення у разі застосування вогнегасних речовин, а також на ефективність систем забезпечення пожежної безпеки об’єктів виробництва та застосування зазначених видів палива.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

– проаналізувати сучасний стан систем забезпечення пожежної безпеки об’єктів виробництва і застосування біодизельного палива та виявити можливі шляхи їх удосконалення;

– розробити методологію проведення досліджень, а також методики проведення експериментальних досліджень показників пожежонебезпечності біодизельного палива, процесів його горіння та припинення горіння у разі використання вогнегасних речовин;

– провести оцінювання рівня пожежонебезпеки типового об’єкта виробництва біодизельного палива і визначити можливі шляхи удосконалення систем забезпечення пожежної безпеки такого об’єкта;

– провести експериментальні дослідження впливу співвідношення компонентів біодизельного палива у його бінарних сумішах з дизельним паливом на показники їх пожежонебезпечності й параметри процесів горіння;

– провести експериментальні дослідження та обґрунтувати види вогнегасних речовин і параметри їх подавання для гасіння біодизельного палива та його бінарних сумішей з дизельним паливом;

– розробити пропозиції щодо удосконалення систем забезпечення пожежної безпеки об’єктів виробництва і застосування біодизельного палива, а також рекомендовані параметри подавання вогнегасних речовин для пожежогасіння на таких об’єктах.

**Об’єкт дослідження** – пожежонебезпечність біодизельного палива та його бінарних сумішей з дизельним паливом, процеси горіння і процеси його припинення із застосуванням вогнегасних речовин, а також системи забезпечення пожежної безпеки об’єктів виробництва та застосування зазначених видів палива.

**Предмет дослідження** – вплив чинників на пожежонебезпечність біодизельного палива та його бінарних сумішей з дизельним паливом, параметри процесів горіння і процеси його припинення у разі застосування вогнегасних речовин, а також на ефективність систем забезпечення пожежної безпеки об’єктів виробництва та застосування зазначених видів палива.

**Методи досліджень.** Під час виконання дисертаційної роботи використано комплексний метод досліджень, що передбачав аналізування статистики пожеж на

об'єктах з наявністю горючих (легкозаймистих) рідин, особливостей технологічного процесу виробництва БДП, пожежонебезпечності БДП, можливостей застосування ВР для його гасіння, а також аналізування та оцінювання рівня пожежонебезпеки об'єкта виробництва БДП та ефективності його СПБ. Оцінювання рівня пожежонебезпеки типового об'єкта виробництва БДП проводилось із використанням методу Гретенера і положень ДСТУ Б В.1.1-36. Дослідження з визначення показників пожежонебезпечності БДП та його бінарних сумішей з ДП, процесів їх горіння, а також припинення горіння проводилися за стандартизованими (ДСТУ 8829, ДСТУ EN ISO 1716, ДСТУ 3789, ДСТУ EN 615 (ДСТУ EN 3-7), ДСТУ 3958), а також валідованими в УкрНДЦЗ методиками. Під час досліджень застосовувалося метрологічно верифіковане обладнання та повірені (калібровані) засоби вимірювальної техніки. Обробляння результатів досліджень здійснювали з використанням програмного забезпечення Microsoft Office Excel та програмного продукту Matlab 2013.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в розкритті особливостей впливу чинників на пожежонебезпечність біодизельного палива і його бінарних сумішей з дизельним паливом, параметри процесів горіння, процеси його припинення у разі застосування вогнегасних речовин, а також на ефективність систем забезпечення пожежної безпеки об'єктів виробництва та застосування зазначених видів палива. За результатами досліджень одержано такі нові наукові результати.

*Уперше:*

– визначено показники пожежонебезпечності бінарних сумішей дизельного палива з біодизельним паливом з вмістом останнього від 10 % (об.) до 30 % (об.) і встановлено, що за максимально допустимого вмісту біодизельного палива у сумішевому паливі 30 % (об.) його пожежонебезпечність порівняно з дизельним паливом нижча, а температури спалаху в закритому/відкритому тиглі, займання і самозаймання становлять 77 °C/87 °C, 111 °C і 225 °C, відповідно, що дає змогу здійснювати фактичну оцінку рівня пожежонебезпеки об'єктів виробництва та застосування біодизельного та сумішевого палива;

– виявлено, що середні питомі масові швидкості вигорання біодизельного палива та бінарної суміші дизельного палива з біодизельним паливом з вмістом останнього 30 % (об.) становлять 0,017 кг/(м<sup>2</sup>·с) та 0,018 кг/(м<sup>2</sup>·с), відповідно, що майже удвічі менше аналогічного показника для дизельного палива (0,032 кг/(м<sup>2</sup>·с)), водночас значення максимальної температури полум'я становлять 651 °C для біодизельного палива, 866 °C для суміші дизельного палива з біодизельним паливом та 897 °C для дизельного палива, що дає змогу оцінити характер горіння такого палива порівняно із традиційними видами палива нафтового походження та рослинними оліями;

– встановлено, що піна середньої кратності, генерована з робочих розчинів піноутворювача загального призначення, є ефективним засобом гасіння як біодизельного палива, так і його бінарної суміші з дизельним паливом з вмістом біодизельного палива до 30 % (об.), а критична інтенсивність подавання робочого розчину дорівнює 0,012 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с) та 0,016 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с), відповідно; піна низької кратності, генерована з робочих розчинів піноутворювачів спеціального призначення, також є ефективним засобом гасіння як біодизельного палива, так і його бінарної

суміші з дизельним паливом з вмістом біодизельного палива до 30 % (об.) за нормативної інтенсивності подавання робочих розчинів для гасіння водонерозчинних рідин з такими властивостями, що вказує на придатність традиційних підходів для гасіння біодизельного палива із застосуванням повітряно-механічної піни;

– встановлено, що тонкорозпилена вода та водні вогнегасні речовини з умістом карбонату калію (до 5 % (мас.)) або піноутворювача загального призначення для гасіння пожеж (до 0,5 %) придатні для гасіння як біодизельного палива, так і його бінарної суміші з дизельним паливом з умістом біодизельного палива до 30 % (об.), а критична інтенсивність їх подавання під час гасіння біодизельного палива дорівнює  $0,052 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,  $0,013 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  і  $0,012 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , відповідно, що дало підстави позиціонувати їх як найбільш ефективні вогнегасні речовини для гасіння біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом;

– *удосконалено* метод оцінювання рівня пожежонебезпеки об'єктів виробництва та застосування біодизельного палива в частині обґрунтованого вибору видів вогнегасних речовин для використання в автоматичних системах пожежогасіння;

– *набуло подальшого розвитку* застосування вогнегасних речовин з визначеними рекомендованими параметрами їх подавання в системах забезпечення пожежної безпеки об'єктів виробництва і застосування біодизельного палива.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в обґрунтуванні вимог до вибору виду й параметрів подавання вогнегасних речовин, придатних для гасіння пожеж на об'єктах виробництва та застосування біодизельного палива, зокрема у впровадженні пропозицій щодо удосконалення системи забезпечення пожежної безпеки заводу з виробництва біодизельного палива (відокремлений підрозділ “Агрономічна дослідна станція”, с. Пшеничне, Васильківський район Київської обл.) Національного університету біоресурсів і природокористування України (акт впровадження від 03.02.2020); у впровадженні в практичну діяльність пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України рекомендацій з гасіння пожеж на об'єктах з наявністю легкозаймистих та горючих рідин, які увійшли до “Довідника керівника гасіння пожеж” (ISBN 978-617-635-087-3, 2016 рік) (акт впровадження від 05.02.2020); у використанні в освітньому процесі підготовки фахівців для ДСНС України освітнього ступеня “бакалавр” за спеціальністю 261 “Пожежна безпека” під час вивчення дисципліни “Пожежна безпека територій будівель та споруд” і дисципліни “Пожежна безпека технологічних процесів” у Черкаському інституті пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України (акт впровадження від 21.01.2020) в розрізі тем, що стосуються забезпечення пожежної безпеки об'єктів виробництва і зберігання легкозаймистих та горючих рідин, про що є відповідні акти впровадження.

**Особистий внесок здобувача** полягає у визначенні мети і задач досліджень, самостійному аналізуванні літературних джерел, формулюванні ідеї роботи, проведенні теоретичних й експериментальних досліджень, обробленні їх результатів та виявленні наукової новизни, узагальненні висновків.

Перелік робіт, здійснених здобувачем у співавторстві, наведено у списку опублікованих праць за темою дисертації. Внесок здобувача в представлених наукових працях, які виконано у співавторстві, полягає в такому: у роботах [1- 3] провів літературний пошук та аналізування даних щодо пожежонебезпечних властивостей і можливих ефективних вогнегасних речовин для гасіння БДП, рослинної олії та взяв участь у проведенні експериментальних досліджень; у роботі

[4] проаналізував літературні дані щодо технологій виробництва БДП та провів експериментальні дослідження пожежонебезпечності бінарних сумішей БДП з ДП; у роботі [5] проаналізував метод Гретенера та провів розрахунки рівня пожежонебезпеки типового підприємства з виробництва БДП; у роботі [6] взяв участь у розробленні процедури експериментальних досліджень і безпосередньо в їх проведенні, узагальнив результати цих досліджень та взяв участь у формуванні висновків; у роботі [7] проаналізував нормативні документи щодо оцінювання пожежовибухонебезпеки будівель, споруд, приміщень, технологічних установок тощо, взяв участь у проведенні відповідних розрахунків й оцінюванні результатів для типового об'єкта виробництва БДП; у роботах [8] та [10] провів експериментальні дослідження та взяв участь в узагальненні їх результатів; у роботі [9] взяв участь у розробленні процедури експериментальних досліджень й безпосередньо в їх проведенні, узагальнив результати досліджень у порівнянні з даними літературних джерел та взяв участь у формуванні висновків; у роботах [11] та [12] здійснив систематизацію й аналіз результатів проведених раніше аналітичних й експериментальних досліджень.

**Апробація результатів дисертації.** Результати досліджень доповідалися та обговорювалися на: ІХ Міжнародній науково-практичній конференції “Пожежна безпека – 2009” (ЛДУ БЖД, м. Львів, 05-06 лист. 2009 р.); ІІ Міжнародній науково-технічній конференції “Хімія та технологія жирів. Перспективи розвитку масло-жирової галузі” (УкрНДІ масел та жирів УААН, м. Алушта, 21-25 верес. 2009 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту” (АПБ ім. Героїв Чорнобиля, м. Черкаси, 08 жовт. 2010 р.); ХХІ Международной научно-практической конференции “Актуальные проблемы пожарной безопасности” (ФГУ ВНИИПО МЧС России, г. Москва, 19-22 мая 2009 г.); Х Міжнародній науково-практичній конференції “Пожежна безпека – 2011” (НУЦЗУ, м. Харків, 17-18 лист. 2011 р.); VI Международной научно-практической конференции “Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация” (УГЗ МЧС Беларуси, г. Минск, 08-10 июня 2011 г.); Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених, студентів і аспірантів “Сучасні проблеми охорони праці і аерології гірничих підприємств” (ДНТУ, м. Донецьк, 24 лист. 2011 р.); 14 Всеукраїнській науково-практичній конференції рятувальників (ІДУ ЦЗ, м. Київ, 26-27 верес. 2012 р.); ІІ Міжнародній науково-технічній конференції “Пожежна безпека: теорія і практика” (АПБ ім. Героїв Чорнобиля, м. Черкаси, 12 жовт. 2012 р.); І Всеукраїнській науково-практичній конференції “Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту” (НУЦЗУ, м. Харків, 05 жовт. 2012 р.); ХІ Міжнародній науково-практичній конференції “Пожежна безпека – 2013” (УкрНДІ ЦЗ, м. Київ, 25-26 верес. 2013 р.); ХХІV Международной научно-практической конференции по проблемам пожарной безопасности, посвященной 75-летию создания института (ФГУ ВНИИПО МЧС России, г. Москва, 03-04 июля 2013 г.); ІV Міжнародній науково-практичній конференції “Надзвичайні ситуації: безпека та захист” (ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, м. Черкаси, 09-10 жовт. 2014 р.); науково-практичному семінарі “Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація” (НУЦЗУ, м. Харків, 21 лют. 2019 р.).

**Публікації.** Основний зміст роботи викладено в 10 наукових статтях у виданнях, віднесених до переліку фахових видань України, 2 наукових статтях у

періодичних наукових виданнях інших держав та 15 тезах доповідей на науково-практичних конференціях.

**Структура і обсяг дисертації.** Робота складається з анотації, змісту, вступу, 5-ти розділів, висновків, списку використаних джерел із 136 найменувань та 2-х додатків. Зміст роботи викладено на 151 сторінці, що включає 46 рисунків і 20 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведено актуальність, мету, ідею дисертаційної роботи, задачі, об'єкт і предмет досліджень, відображено наукову новизну отриманих результатів, дані щодо апробації, а також публікації її результатів.

**У першому розділі** проаналізовано сучасний стан теоретичних та експериментальних досліджень з вивчення процесів горіння і гасіння горючих рідин, а також забезпечення пожежної безпеки об'єктів їх виробництва й застосування. Встановлено, що процеси припинення горіння БДП і його бінарних сумішей з ДП, а також СПБ відповідних об'єктів залишилися поза їх рамками, що може призводити до помилкових управлінських рішень та негативно відобразитись у статистиці пожеж.

Також встановлено, що для України напрямок розвитку виробництв альтернативних видів палива є актуальним, зокрема це стосується й виробництва БДП. Розглянуто основні технології його виробництва та встановлено, що етерифікація рослинних або тваринних жирів нижчими жирними спиртами для України є найбільш прийнятним методом одержання такого альтернативного палива. Виявлено, що на національному рівні нормативні документи неповною мірою характеризують пожежонебезпечність БДП і його бінарних сумішей з ДП, а доступні літературні джерела не містять обґрунтованих даних щодо вогнегасних речовин, придатних для їх гасіння, що в свою чергу не дозволяє створювати ефективні СПБ об'єктів виробництва та застосування такого палива. Відповідно, можливими шляхами удосконалення СПБ об'єктів виробництва і застосування БДП є врахування особливостей його пожежонебезпечності, а також процесів припинення горіння, в тому числі у бінарних сумішах з ДП, з використанням ВР.

Виявлено, що в Україні згідно із ДСТУ 7688 передбачено додавання до ДП марки "Євро" до 7 % (об.) складних ефірів вищих жирних кислот, а максимально допустимий вміст такої добавки у сумішевому паливі, згідно з даними наукових публікацій, має бути не більшим за 30 % (об.). З урахуванням цієї інформації прийнято обсяги експериментальних досліджень.

За результатами аналізу наукових джерел, а також відповідних нормативних документів, висунуто ідею роботи, сформульовано мету і задачі досліджень.

**У другому розділі** розкрито методологію проведення досліджень, схематичне зображення якої подано на рисунку 1, та вибір відповідних методик.

Згідно з цією методологією досягнення мети роботи забезпечується проведенням аналітичних досліджень статистики пожеж на об'єктах з наявністю горючих рідин, особливостей реалізованих технологічних процесів їх виробництва, СПБ таких об'єктів тощо. Крім цього, передбачено проведення теоретичних досліджень із застосуванням методів оцінки рівня пожежонебезпеки об'єкту виробництва БДП та визначення категорій за вибухопожежною та пожежною небезпеками його окремих технологічних дільниць, а також комплексу відповідних експериментальних досліджень.



Дослідження з визначення показників пожежонебезпечності (температури спалаху в закритому й відкритому тиглі, температури займання та самозаймання, теплоти згоряння) БДП та його бінарних сумішей з ДП проводили з використанням обладнання і стандартизованих методів випробувань згідно з 7.5 – 7.7, 7.9 ДСТУ 8829 та 8.3 ДСТУ EN ISO 1716.

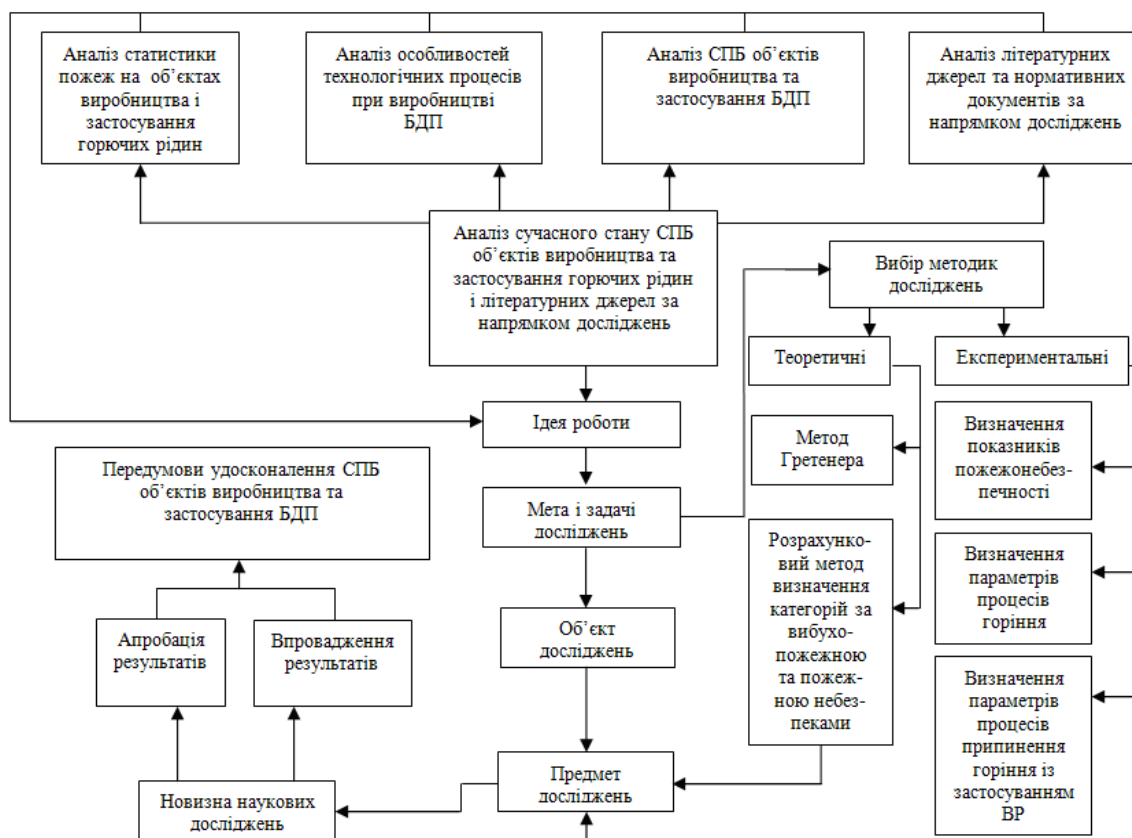
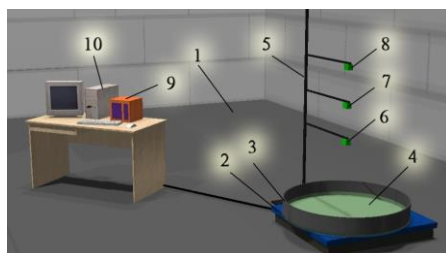


Рисунок 1 – Методологія проведення дисертаційних досліджень

Експериментальні дослідження параметрів процесів горіння (температури полум'я та масової швидкості вигорання) проводили з використанням модельного вогнища 34В (площа поверхні горіння  $1,07 \text{ м}^2$ ), встановленого на ваги (рисунок 2). Для визначення температури полум'я використовували вимірювальну систему на базі модуля типу ADAM 4118 і три термомпари типу ТХА (Т1, Т2, Т3), розміщені вздовж вертикальної осі дека модельного вогнища пожежі. Зміну маси зразка палива у процесі горіння фіксували за допомогою ваг. За температуру полум'я приймали найбільше значення температури, виміряної однією з трьох термомпар упродовж проміжку часу горіння зразка палива.



- 1 – випробувальний бокс;
- 2 – ваги;
- 3 – модельне вогнище класу В;
- 4 – досліджуване паливо;
- 5 – штатив;
- 6 – термопара Т1;
- 7 – термопара Т2;
- 8 – термопара Т3;
- 9 – інформаційно-вимірювальна система;
- 10 – персональний комп'ютер

Рисунок 2 – Схема розміщення обладнання для дослідження параметрів процесів горіння зразків палива

Для визначення масової швидкості вигорання зразків палива було застосовано підхід, який передбачає оброблення одержаних експериментальних даних, а саме набір пар значень (тривалість горіння – маса зразка) за допомогою математичного процесора MATLAB 2013 та побудови за його допомогою рівняння регресії:

$$m(t) = a \cdot t^6 + b \cdot t^5 + c \cdot t^4 + d \cdot t^3 + e \cdot t^2 + g \cdot t + j \quad (1)$$

де  $t$  – час, с;

$a, b, c, d, e, g, j$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Масову швидкість вигорання ( $G_m$ ) визначали як похідну маси за часом:

$$G_m = dm/dt \quad (2)$$

Дослідження процесу взаємодії повітряно-механічної піни середньої кратності з полум'ям під час гасіння досліджуваного палива проводили згідно з 10.7 ДСТУ 3789, яким передбачено визначення тривалості гасіння модельних вогнищ пожежі класу В циліндричної форми за фіксованої витрати піни з кратністю близько 100. Досліди проводили з метою визначення критичної інтенсивності ( $I_{кр}$ ) подавання ВР.

Інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача під час гасіння ( $I$ ) та критичну інтенсивність його подавання ( $I_{кр}$ ) розраховували за формулами

$$I = \frac{q}{S} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q}{d^2} = 1,27 \cdot \frac{q}{d^2} \quad (3)$$

де  $q$  – витрата робочого розчину,  $\text{дм}^3/\text{с}$ ;

$S$  – площа поверхні модельного вогнища пожежі,  $\text{м}^2$ ;

$d$  – діаметр модельного вогнища пожежі, м.

$$I_{кр} = \frac{I_1 + I_2}{2} = 0,64 \cdot q \cdot \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2} \right) \quad (4)$$

де  $I_1$  – інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача, за якої гасіння модельного вогнища пожежі настає не більше ніж за 300 с,  $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$I_2$  – інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача, за якої гасіння модельного вогнища пожежі не настає або настає у проміжок часу понад 300 с,  $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$d_1$  – діаметр модельного вогнища, що відповідає інтенсивності  $I_1$ , м;

$d_2$  – діаметр модельного вогнища, що відповідає інтенсивності  $I_2$ , м.

Дослідження процесів взаємодії повітряно-механічної піни низької кратності з полум'ям проводили згідно з методикою визначення вогнегасної ефективності піни низької кратності, яка передбачає визначення тривалості гасіння і проміжку часу до повторного займання модельних вогнищ пожежі класу В циліндричної форми. Результат гасіння вважається позитивним, якщо припинення горіння модельного вогнища пожежі досягнуто під час подавання піни або сталося протягом  $(300 \pm 5)$  с після завершення її подавання, а проміжок часу до повторного займання перевищує 60 с. Піну подавали “жорстким” способом у центральну частину модельного вогнища пожежі. Інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача ( $I$ ) під час гасіння розраховували за формулою (3).

Дослідження процесу взаємодії вогнегасного порошку з полум'ям проводили згідно з 8.3 ДСТУ EN 615 (ДСТУ EN 3-7), здійснюючи гасіння модельного вогнища пожежі 34В порошком, що подається оператором через стандартний розпилювач переносного вогнегасника, з фіксацією тривалості гасіння і розрахунком інтенсивності подавання вогнегасного порошку ( $I$ ) та його питомої витрати ( $Q$ ).

Інтенсивність подавання вогнегасного порошку ( $I$ ) розраховували за формулою

$$I = \frac{m}{\tau \cdot S} \quad (5)$$

де  $m$  – маса витраченого вогнегасного порошку, кг;

$\tau$  – тривалість гасіння, с;

$S$  – площа поверхні горіння модельного вогнища пожежі, м<sup>2</sup>.

Питому витрату вогнегасного порошку ( $Q$ ) розраховували за формулою

$$Q = \frac{m}{S} \quad (6)$$

де  $m$  – маса витраченого вогнегасного порошку, кг;

$S$  – площа поверхні горіння модельного вогнища пожежі, м<sup>2</sup>.

Процеси взаємодії газових вогнегасних речовин (надалі – ГВР) з полум'ям оцінювали згідно з 10.3 ДСТУ 3958, використовуючи досліджувані види палива.

Значення мінімальної вогнегасної концентрації ГВР ( $C_{м.в.}$ ) визначали за формулою

$$C_{м.в.} = \frac{V_G \cdot 100}{(V_G + V_O)} \quad (7)$$

де  $V_G$  – мінімальна витрата ГВР, за якої досягається гасіння полум'я, дм<sup>3</sup>/с;

$V_O$  – витрата окисника, дм<sup>3</sup>/с.

Розрахункову питому витрату ГВР ( $V_p$ ), зведену до нормальних умов, визначали за рівнянням газового стану.

Процеси взаємодії тонкорозпиленої води (надалі – ТРВ) та тонкорозпилених водних вогнегасних речовин (надалі – ВВР) з полум'ям проводили згідно методикою, сутність якої полягає у визначенні критичної інтенсивності ( $I_{кр}$ ) подавання ВР як відношення її витрати до максимальної площі модельного вогнища пожежі, яке вдалося погасити протягом не більше ніж 30 с. Тиск у посудині для ВР становив 0,6 МПа, витрата ВР – 0,391...0,421 см<sup>3</sup>/с, тривалість вільного горіння горючої речовини – 30 с, діаметри модельних вогнищ пожежі класу В – 0,100...0,250 м. Критичну інтенсивність подавання тонкорозпилених ВВР розраховували за формулою (3).

Середні значення показника розміру краплин ( $D_{v0,9}$ ) визначали за методом, наведеним в ДСТУ SEN/TS 14972.

На рисунку 3 зображено схему установки для визначення вогнегасної ефективності ТРВ та тонкорозпилених ВВР.

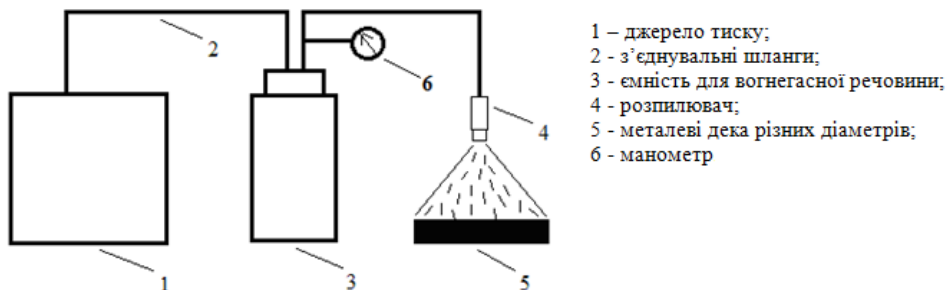


Рисунок 3 – Схема установки для визначення вогнегасної ефективності ТРВ та тонкорозпилених ВВР

Запропоновану методологію застосовано під час проведення теоретичних та експериментальних досліджень.

У третьому розділі оцінено рівень пожежонебезпеки типового об'єкта виробництва БДП з використанням метода Гретенера. Згідно з цим методом основними показниками пожежної небезпеки об'єкта є чисельні значення параметрів  $\Pi$  (пожежонебезпека) та  $У$  (рівень пожежонебезпеки), які розраховують за формулами (8) та (9)

$$\Pi = P \cdot A / Z = O_n / Z \quad (8)$$

$$У = \Pi / \Pi_{\text{д}} \quad (9)$$

де  $\Pi$  – пожежонебезпека об'єкта;

$У$  – рівень пожежонебезпеки об'єкта;

$P$  – потенційна небезпека, що враховує вплив усіх основних чинників, які впливають на виникнення і розвиток пожежі;

$A$  – фактор активації, що відображує ймовірність виникнення пожежі, пов'язану з використанням об'єкта;

$O_n$  – загроза виникнення пожежі;

$Z$  – чинник пожежозахищеності, що враховує вплив вже реалізованих протипожежних заходів;

$\Pi_{\text{д}}$  – допустиме значення пожежонебезпеки, величина якого враховує загрозу для людей.

Якщо розрахункове значення  $\Pi$  не перевищує  $\Pi_{\text{д}}$  та відповідно  $У < 1$ , то об'єкт вважається достатньо захищеним.

На технологічному майданчику типового об'єкта виробництва БДП розміщено (рисунок 4): виробничу будівлю (дільниця етерифікації), що складається з двох основних виробничих приміщень (перше приміщення – це реакторне відділення, в якому змішують каталізатор і ріпакову олію та отриману суміш відстоюють, друге приміщення – це приміщення приготування каталізатора), а також відкритий склад БДП і гліцерину (побічний продукт виробництва) та підземний склад метанолу.

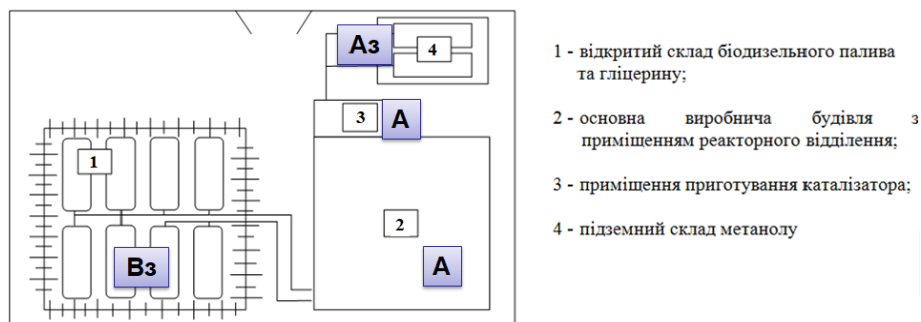


Рисунок 4 – Схема технологічного майданчика типового об'єкта виробництва БДП

Проведеним розрахунком за формулами (9), (10) вперше встановлено, що умови  $\Pi \leq \Pi_{\text{д}}$  та  $У < 1$  для основної виробничої будівлі не виконуються: значення пожежонебезпеки ( $\Pi$ ) сягнуло 1,5, допустиме значення пожежонебезпеки ( $\Pi_{\text{д}}$ ) – 1,3, а рівень пожежонебезпеки ( $У$ ) – 1,2.

Водночас, як недолік застосованого методу під час розрахунків наголошено на неможливість урахування диференційної оцінки впливу на рівень пожежонебезпеки об'єкта результату вибирання ВР для використання в автоматичних системах пожежогасіння (надалі – АСПГ) об'єкта.

Також з метою оцінювання пожежовибухонебезпеки типового об'єкта виробництва БДП за вітчизняними нормами, вперше проведено розрахунок категорій за вибухопожежною та пожежною небезпекою його основних виробничих дільниць з урахуванням можливих аварійних ситуацій, характерних для них, і запропоновано технічні заходи, спрямовані на зниження наслідків ймовірних аварій.

За результатами теоретичних досліджень зроблено висновок про недостатність вимог чинних в Україні нормативних документів для забезпечення мінімально допустимого рівня пожежонебезпеки об'єктів виробництва та застосування біодизельного палива.

**У четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення пожежонебезпечності БДП, а також впливу співвідношення БДП в його бінарних сумішах з ДП на пожежонебезпечність останнього. Також наведено результати експериментальних досліджень параметрів процесів горіння цих видів палива й особливостей їх припинення у разі застосування ВР.

Результати експериментальних досліджень показників пожежонебезпечності товарного продукту (ефірів метилових жирних кислот – ЕМЖК), а також БДП різних вітчизняних виробників у порівнянні з показниками, нормованими ДСТУ 6081, подано в таблиці 1, а на рисунку 5 наведено залежність цих показників від вмісту в сумішевому паливі БДП.

Результати експериментальних досліджень вказують, що досліджені зразки БДП різних виробників суттєво відрізняються між собою за показниками пожежонебезпечності, що свідчить про недостатність очищення кінцевого продукту від метанолу. ЕМЖК (товарний продукт) за критеріями ДСТУ 8829 класифікується як горюча речовина, разом з тим температура його самозаймання майже на 100 °С нижча за нормоване значення. Зразок В БДП за визначеною температурою спалаху у закритому тиглі класифікується як легкозаймиста речовина. Відповідно ці дані свідчать, що БДП може бути як горючою, так і легкозаймистою рідиною.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень показників пожежонебезпечності БДП

Зразок палива	Показник							
	Температура спалаху у відкритому тиглі, °С		Температура займання, °С		Температура спалаху в закритому тиглі, °С		Температура самозаймання, °С	
	Нормоване значення	Фактичне значення	Нормоване значення	Фактичне значення	Нормоване значення	Фактичне значення	Нормоване значення	Фактичне значення
ЕМЖК	не нормовано	164	не нормовано	194	не менше ніж 120	145	не менше ніж 320	228
БДП (виробник А)		133		174		112		396
БДП (виробник Б)		106		140		88		280
БДП (виробник В)		94		170		45		254

Розширена невизначеність результатів визначення показників не перевищувала 5 °С.

Дані, наведені на рисунку 5, вказують на те, що БДП має вищі значення температур спалаху, займання та самозаймання, ніж ДП, що свідчить про його меншу пожежонебезпечність. З іншого боку, з огляду на довідкові дані щодо показників пожежонебезпечності рослинної олії, з якої таке паливо виготовляється, воно значно небезпечніше.

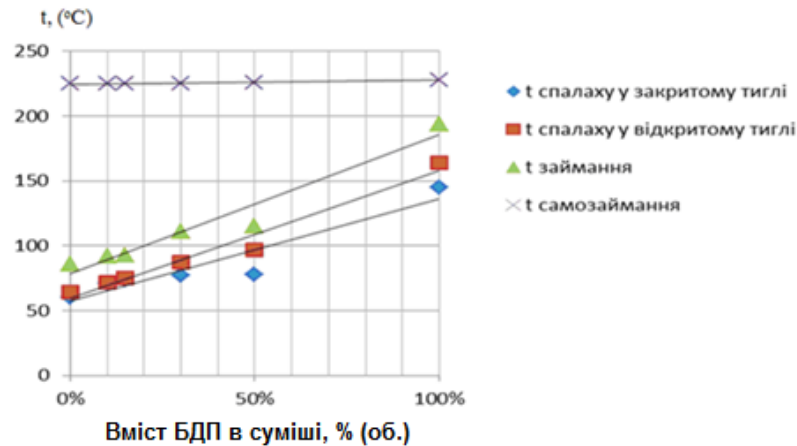


Рисунок 5 – Залежність показників пожежонебезпечності від вмісту БДП у бінарних сумішах з ДП

Зі збільшенням частки БДП температура спалаху в закритому і відкритому тиглі, а також температура займання останнього збільшуються, натомість температура самозаймання для всіх досліджених сумішей майже однакова. Це свідчить про відсутність процесів утворення асоціатів, комплексів, нових хімічних сполук тощо під час їх змішування. Також, для зразка БДП (ЕМЖК) та його бінарної суміші з ДП з вмістом ЕМЖК 30 % (об.) експериментально визначено вищу теплоту згоряння, яка склала відповідно 36,5 МДж/кг та 38,2 МДж/кг.

Результати експериментальних досліджень параметрів процесів горіння БДП та його бінарних сумішей з ДП подано на рисунку 6 і в таблиці 2.

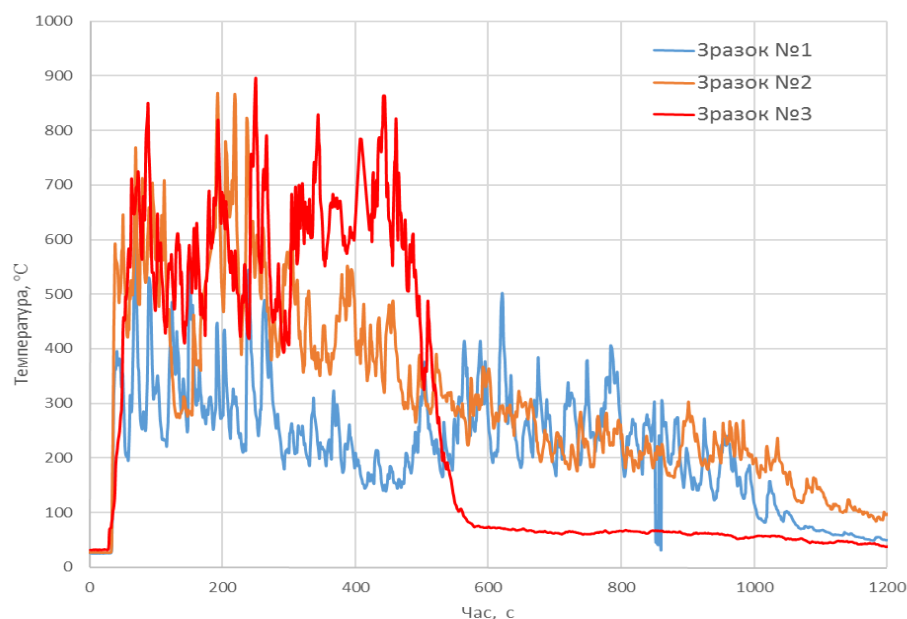


Рисунок 6 – Залежність температури полум'я від тривалості горіння досліджуваних зразків палива

Таблиця 2 – Узагальнені дані результатів визначення температури полум'я та масової швидкості вигорання БДП та його бінарних сумішей з ДП

Зразок палива	Максимальна температура полум'я, °С	Масова швидкість вигорання, кг/с	Питома масова швидкість вигорання, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Середня питома масова швидкість вигорання, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
Зразок № 1 (ЕМЖК)	651,3 (на 68 с)	0,010...0,027	0,009...0,025	0,017
Зразок № 2 (суміш 70 % (об.) ДП, 30 % (об.) ЕМЖК)	866,5 (на 239 с)	0,008...0,031	0,007...0,029	0,018
Зразок № 3 (ДП)	897,0 (на 250 с)	0,030...0,039	0,028...0,036	0,032

Розширені невизначеності результатів визначення температури, проміжку часу та маси не перевищували 5,0 °С, 1,4 с та 0,1 кг відповідно.

Зокрема, вперше встановлено, що значення максимальних температур полум'я сягнули 651 °С (БДП), 866 °С (сумішеве паливо) та 897 °С (ДП). Середні питомі масові швидкості вигорання БДП та бінарної суміші ДП з БДП з вмістом останнього 30 % (об.) становлять 0,017 кг/(м<sup>2</sup>·с) та 0,018 кг/(м<sup>2</sup>·с), що майже удвічі менше за аналогічний показник для ДП (0,032 кг/(м<sup>2</sup>·с)). Крім того, візуальні спостереження показали, що за характером процесу горіння БДП більш подібне до горіння жирів рослинного та тваринного походження, аніж до ДП.

Враховуючи ці результати і той факт, що досліджуване БДП менш пожежонебезпечне, ніж ДП, потребувала обґрунтування та перевірки висунута гіпотеза про те, що таке паливо можна гасити з використанням традиційно застосовуваних засобів і ВР (зокрема повітряно-механічної піни), параметри подавання яких регламентовано нормативними документами і подано в довідковій літературі.

Результати визначення показників вогнегасної ефективності піни середньої кратності, генерованої з робочого розчину піноутворювача загального призначення "ПО-ЗНП", у разі гасіння ДП, БДП, а також їх бінарних сумішей наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Експериментальні дані, одержані під час досліджень з визначення показників вогнегасної ефективності піни середньої кратності у разі гасіння БДП, ДП, а також їх бінарних сумішей

Зразок палива	Діаметр модельного вогнища пожежі, мм	Інтенсивність подавання робочого розчину, дм <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)	Тривалість гасіння, с (середнє значення)	Критична інтенсивність подавання робочого розчину, дм <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·с)
ДП (виробник А)	381,5	0,018	215,3	0,016
	436,2	0,013	не погашено	
ДП (виробник Б)	381,5	0,018	203,0	0,016
	436,2	0,013	не погашено	
БДП (виробник В)	436,2	0,013	119,2	0,012
	477,9	0,011	не погашено	

Закінчення таблиці 3

БДП (виробник Г)	436,2	0,013	204,5	0,012
	477,9	0,011	не погашено	
ЕМЖК	381,5	0,018	98,2	0,012
	436,2	0,013	196,3	
Суміш ДП 70 % (об.), ЕМЖК 30 % (об.)	477,9	0,011	не погашено	0,016
	381,5	0,018	110,0	
Суміш ДП 85 % (об.), ЕМЖК 15 % (об.)	436,2	0,013	не погашено	0,016
	381,5	0,018	123,6	

Розширені невизначеності результатів визначення тривалості гасіння та критичної інтенсивності подавання робочого розчину не перевищували 12 с та  $0,001 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  відповідно.

Отже, ефективність піни середньої кратності в усіх випадках доволі висока, водночас характер її взаємодії з полум'ям різний. Так, під час гасіння ДП відбувається накопичення піни на поверхні та її рівномірний розподіл, тоді як у випадку БДП накопичення піни відбувається повільно, частина її руйнується, має місце розлітання краплин рідини, але гасіння БДП настає приблизно удвічі швидше.

Результати визначення показників вогнегасної ефективності піни низької кратності, генерованої з робочих розчинів піноутворювачів спеціального призначення “Tridol 6 –10°C” і “Fluoropolydol”, у разі гасіння ДП, БДП, а також їх бінарних сумішей, залитих у циліндричне модельне вогнище пожежі діаметром 589,0 мм, за інтенсивності подавання робочих розчинів  $(0,046 \pm 0,002) \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Експериментальні дані, одержані під час досліджень з визначення показників вогнегасної ефективності піни низької кратності

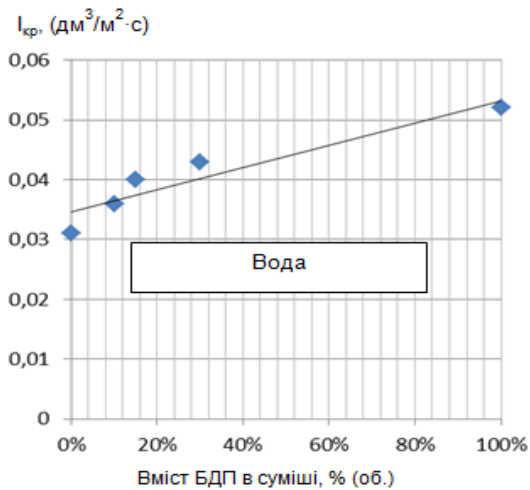
Зразок палива	Марка піноутворювача	Тривалість гасіння, с (середнє значення)	Проміжок часу до повторного займання, с (середнє значення)
ДП (виробник А)	“Tridol 6 –10°C”	30,4	690,2
БДП (виробник В)	“Tridol 6 –10°C”	16,0	760,5
БДП (виробник В)	“Fluoropolydol”	17,1	420,6
Суміш ДП 70 % (об.), ЕМЖК 30 % (об.)	“Tridol 6 –10°C”	12,6	750,8

Розширені невизначеності результатів визначення тривалості гасіння і проміжку часу до повторного займання не перевищували 1,3 с та 26,5 с відповідно.

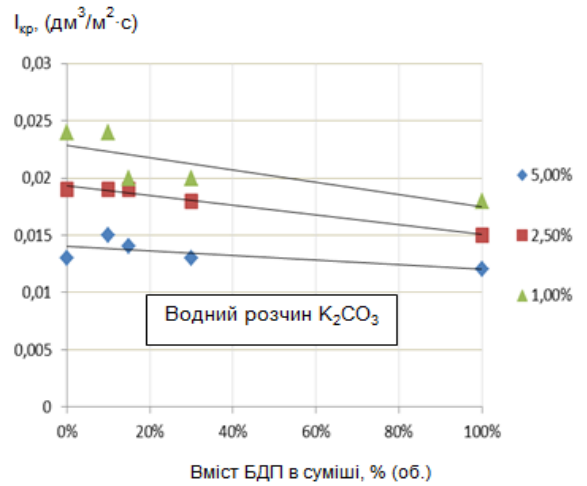
Дані, що наведені в таблиці 4, підтверджують високу ефективність піни низької кратності, генерованої з робочих розчинів піноутворювачів спеціального призначення, у разі гасіння нею досліджуваних зразків палива за інтенсивності подавання робочого розчину навіть нижчої за нормативну  $(0,05 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}))$ .

Оскільки процес горіння БДП за характером більш подібний до процесу горіння жирів, зроблено припущення, що ефективним засобом гасіння БДП та його бінарних сумішей з ДП може бути ТРВ, у тому числі з функціональними добавками (карбонат калію, піноутворювачі), що використовуються в таких випадках. Результати досліджень щодо перевіряння цього припущення, подано на рисунках 7, 8.





а)

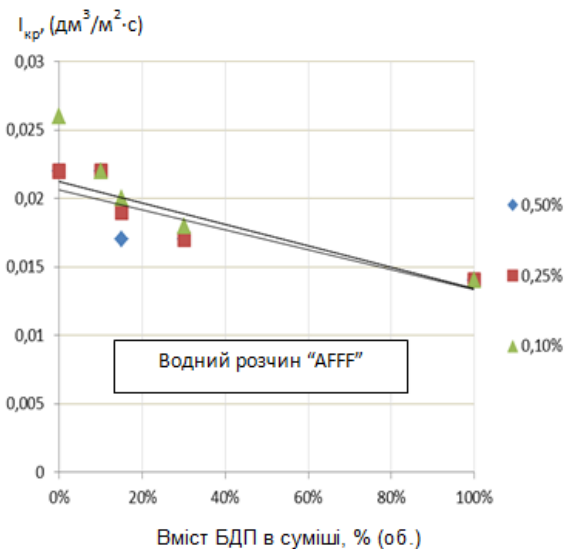


б)

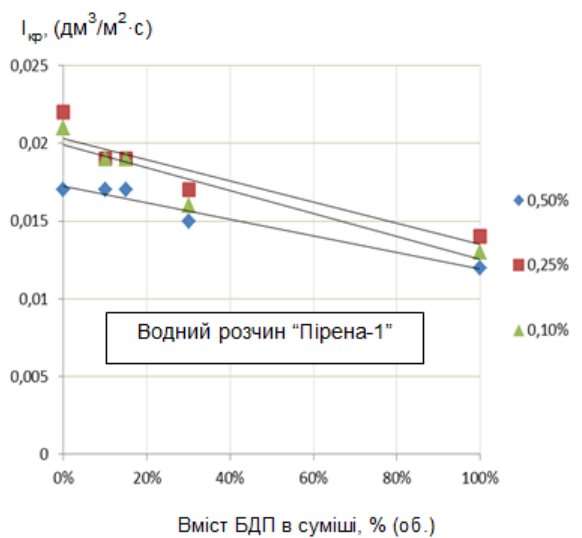
Рисунок 7 – Вогнегасна ефективність ТРВ (а) та тонкорозпиленого водного розчину  $K_2CO_3$  (б) за різного вмісту БДП в суміші з ДП

Таким чином, вперше встановлено, що критична інтенсивність подавання ТРВ у разі гасіння БДП становить  $0,052 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . У порівнянні з аналогічним показником для ДП ( $0,031 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) її значення більше на 40 %. Це означає, що гасіння БДП ТРВ без добавок можливе, але менш ефективне, ніж гасіння ДП. Разом з тим, також встановлено, що у разі змішування БДП (до 30 % (об.)) з ДП значення критичної інтенсивності подавання досліджених ВВР (окрім ТРВ без добавок) зменшуються.

У разі гасіння БДП тонкорозпиленим водним розчином карбонату калію з концентрацією 5,0 %, 2,5 % та 1,0 % критична інтенсивність подавання ВР становить  $0,013 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,  $0,016 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  та  $0,018 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  відповідно. Відповідно, додавання до води карбонату калію дає змогу підвищити її вогнегасну ефективність у разі гасіння БДП у декілька разів.



а)



б)

Рисунок 8 – Вогнегасна ефективність тонкорозпиленого водного розчину піноутворювача типу "АFFF" (а) та піноутворювача загального призначення "Пірена-1" (б) за різного вмісту БДП в суміші з ДП

Дані рисунка 8 вказують на те, що у разі гасіння БДП тонкорозпилим водним розчином піноутворювача класу “AFFF” (“Tridol 6 –10°C”) з концентрацією 0,5 %, 0,25 % та 0,1 %, критична інтенсивність подавання ВР сягає  $0,014 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  для всіх трьох концентрацій. Критична інтенсивність подавання тонкорозпиленого водного розчину з концентрацією піноутворювача загального призначення “Пірена-1” 0,5 %, 0,25 % та 0,1 % під час гасіння БДП сягає  $0,012 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ,  $0,014 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  і  $0,013 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  відповідно, тобто вогнегасна ефективність води також підвищується у декілька разів.

Відповідно це підтверджує той факт, що додавання до води всіх використаних функціональних добавок змінює характер залежності критичної інтенсивності подавання тонкорозпиленої ВВР від вмісту БДП в суміші на протилежний.

На рисунку 9 подано результати досліджень вогнегасної ефективності вогнегасного порошку під час гасіння БДП, ДП та їх бінарної суміші.

Встановлено, що вогнегасний порошок придатний для гасіння БДП. Разом з тим, його питомі витрати у разі гасіння БДП, ДП та їх бінарної суміші за однакових умов відрізняються і знаходяться в межах  $0,79 \dots 0,89 \text{ кг/м}^2$ ,  $1,21 \dots 1,35 \text{ кг/м}^2$  та  $1,17 \dots 1,24 \text{ кг/м}^2$  відповідно.

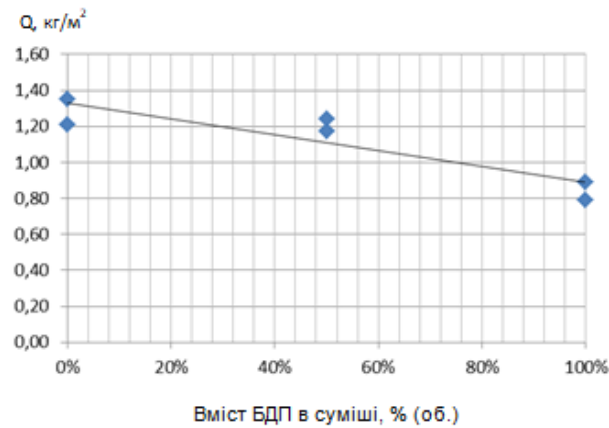


Рисунок 9 – Питома витрата вогнегасного порошку за різного вмісту БДП в суміші з ДП

На рисунку 10 подано залежності питомої розрахункової витрати ГВР, за яких досягається гасіння, від вмісту БДП в сумішах з ДП.

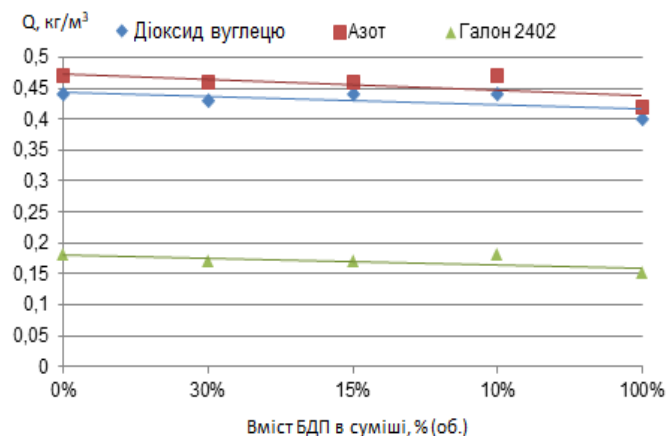


Рисунок 10 – Питома розрахункова витрата ГВР, за якої досягається гасіння, за різного вмісту БДП в суміші з ДП

В результаті досліджень визначено мінімальні вогнегасні концентрації та розрахункові питомі витрати діоксиду вуглецю, азоту та галону 2402 для гасіння БДП, ДП та їх бінарних сумішей. Встановлено, що зі збільшенням частки БДП в суміші з ДП мінімальні вогнегасні концентрації та питомі розрахункові витрати як інертних розріджувачів (діоксид вуглецю, азот), так й інгібітору горіння (галон 2402) дещо знижуються. Значення питомої розрахункової витрати у разі гасіння бінарної суміші ДП з БДП із вмістом останнього 30 % (об.) становлять: для діоксиду вуглецю – 0,43 кг/(м<sup>2</sup>·с), для азоту – 0,46 кг/(м<sup>2</sup>·с) та для галону 2402 – 0,17 кг/(м<sup>2</sup>·с). Результати цих досліджень підтверджують придатність ГВР класів інгібіторів горіння та інертних розріджувачів для гасіння БДП і його бінарних сумішей з ДП.

Отримані експериментальні дані щодо пожежонебезпечності БДП та його бінарних сумішей з ДП, а також дані щодо параметрів процесів горіння цих видів палива й особливостей їх припинення у разі застосування ВР у подальшому дадуть змогу здійснювати фактичну оцінку рівня пожежонебезпеки об'єктів виробництва біодизельного палива та забезпечувати побудову ефективних СПБ таких об'єктів із використанням найбільш ефективних ВР та забезпеченням необхідних параметрів їх подавання.

У п'ятому розділі наведено інформацію щодо впровадження результатів, одержаних під час виконання дисертаційної роботи. Зокрема, з урахуванням результатів теоретичних і експериментальних досліджень було запропоновано удосконалення методу Гретенера в частині доповнення одного з чинників пожежозахищеності об'єкта (3), а саме чинника спеціальних протипожежних заходів ( $S_5$ ), новими числовими значеннями з урахуванням виду ВР, використовуваної в АСПГ. Результати оцінювання пожежонебезпеки типового об'єкта виробництва БДП за удосконаленим методом Гретенера використано для обґрунтування способів удосконалення СПБ таких об'єктів, при цьому встановлено, що умови  $II \leq II_d$  та  $U < 1$  для приміщення реакторного відділення дільниці етерифікації виконуються у разі  $S_5 = 2,00$ , тобто за наявності АСПГ ТРВ або тонкорозпиленою ВВР. Значення пожежонебезпеки ( $II$ ) сягнуло 1,3, тобто знизилося до допустимого рівня ( $II_d$ ), а рівень пожежонебезпеки ( $U$ ) становив 1,0, що не перевищило допустимих значень. У подальшому цей метод може бути впроваджений у роботу органів з інспектування, діяльність яких здійснюється відповідно до вимог ДСТУ EN ISO/IEC 17020.

Експериментально визначені показники пожежонебезпечності БДП запропоновано використовувати під час розроблення технологічних регламентів об'єктів його виробництва, а обґрунтовані в роботі значення рекомендованих параметрів подавання ВР – для гасіння пожеж із застосуванням технічних засобів пожежогасіння на об'єктах виробництва і застосування БДП та його бінарних сумішей з ДП.

Також, у розділі наведено пропозиції щодо удосконалення СПБ об'єктів виробництва та застосування БДП, у т.ч. для заводу з виробництва БДП, що створений у відокремленому підрозділі “Агрономічна дослідна станція” (с. Пшеничне, Васильківський район, Київська обл.) Національного університету біоресурсів і природокористування України.

Крім того, результати досліджень запропоновано до використання в освітньому процесі підготовки фахівців для ДСНС України освітнього ступеня “бакалавр” за

спеціальністю 261 “Пожежна безпека” під час вивчення дисципліни “Пожежна безпека територій будівель та споруд” і дисципліни “Пожежна безпека технологічних процесів” в розрізі тем, що стосуються забезпечення пожежної безпеки об’єктів виробництва і зберігання легкозаймистих та горючих рідин.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі, яка є завершеною кваліфікаційною науковою працею, вирішено прикладну наукову задачу, яка полягає в розкритті особливостей впливу чинників на пожежонебезпечність БДП і його бінарних сумішей з ДП, параметри процесів горіння, процеси його припинення у разі застосування ВР як наукового підґрунтя удосконалення СПБ об’єктів виробництва та застосування такого палива.

Отримано наукові та практичні результати, які наведено нижче.

1. Встановлено, що питання стану СПБ об’єктів виробництва та застосування альтернативних видів біопалива, зокрема БДП, є актуальним й потребує вивчення та виявлення можливих шляхів їх удосконалення. Зокрема, це підтверджується відсутністю обґрунтованих нормативних та літературних даних щодо параметрів подавання ВР для гасіння саме БДП та його бінарних сумішей з ДП, недостатнім вивченням з точки зору побудови СПБ об’єктів виробництва такого палива на лініях етерифікації рослинної олії, додавання присадок, зберігання тощо, а також відсутністю інформації стосовно пожежонебезпечних характеристик БДП та його бінарних сумішей з ДП, що в цілому унеможлиблює побудову ефективних СПБ та комплексу протипожежних заходів для об’єктів де таке паливо обертається.

2. Теоретичним розрахунком за методом Гретенера для типового об’єкта виробництва біодизельного палива встановлено, що з урахуванням вимог вітчизняної нормативної бази значення пожежонебезпеки об’єкта ( $I$ ) становить 1,5, а рівень пожежобезпеки ( $U$ ) – 1,2, що перевищує граничні значення цих показників й вказує на недостатній рівень СПБ такого об’єкта. Зроблено припущення, що удосконалення СПБ об’єкта виробництва БДП можливо досягти підвищенням ефективності її окремих елементів, зокрема, раціональним вибором виду і кількості ВР для АСПГ такого об’єкта. Запропоновано удосконалення методу Гретенера для об’єктів з наявністю БДП, що дає змогу проводити розрахунки більш коректно і, відтак, обґрунтовано визначати шляхи зниження рівня пожежонебезпеки таких об’єктів.

3. Проведені експериментальні дослідження дали змогу оцінити пожежонебезпечність БДП у порівнянні з ДП. Їх результати показали, що БДП є менш пожежонебезпечним, але особливістю процесу його горіння є наявність ознак, характерних для процесів горіння жирів рослинного та тваринного походження. Зі збільшенням частки БДП у бінарній суміші з ДП до 30 % (об.) пожежонебезпечність останньої зменшується, а температури спалаху в закритому/відкритому тиглі, займання і самозаймання становлять 77 °C/87 °C, 111 °C і 225 °C, відповідно. З’ясовано, що за параметрами процесів горіння БДП більше подібне до рослинних жирів, аніж до ДП, причому питома масова швидкість вигорання БДП удвічі менша за аналогічний показник для ДП та знаходиться у межах від 0,009 кг/(м<sup>2</sup>·с) до 0,025 кг/(м<sup>2</sup>·с), а її середнє значення становить 0,017 кг/(м<sup>2</sup>·с).

4. Встановлено, що значення критичної інтенсивності подавання робочих розчинів піноутворювача загального призначення під час гасіння піною середньої кратності як для БДП, так і його бінарних сумішей з ДП знаходиться в межах від  $0,012 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  до  $0,016 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Гасіння піною низької кратності, генерованою з робочих розчинів піноутворювачів спеціального призначення, досягається у всіх випадках за інтенсивності подавання, що є нижчою за нормативну.

5. Виявлено, що найбільш ефективними тонкорозпиленими ВВР для гасіння БДП є водні розчини карбонату калію з концентрацією до 5 % і водні розчини піноутворювачів для гасіння пожеж з концентрацією до 0,5 %, критична інтенсивність їх подавання становить  $0,013 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  та  $0,012 \dots 0,014 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  відповідно. До того ж, додавання до води цих добавок призводить до інверсії характеру залежності критичної інтенсивності подавання ВВР від вмісту БДП в його бінарних сумішах з ДП.

6. Показано, що питома витрата вогнегасного порошку для гасіння БДП менша, ніж для ДП, і становить у середньому  $0,84 \text{ кг/м}^2$ . Аналогічний показник для бінарної суміші ДП з БДП із вмістом останнього 50 % (об.) дорівнює  $1,30 \text{ кг/м}^2$ . Питомі витрати діоксиду вуглецю, азоту та галону 2402, за яких досягається гасіння БДП, становлять не менше ніж  $0,40 \text{ кг/м}^3$ ,  $0,42 \text{ кг/м}^3$  та  $0,15 \text{ кг/м}^3$ , відповідно, при цьому виявлено, що питома витрата ГВР класів “інгібітори горіння” та “інертні розріджувачі” майже не залежить від компонентного складу суміші БДП з ДП.

7. З урахуванням особливостей пожежонебезпечності та процесів припинення горіння БДП та його бінарних сумішей з ДП розроблено пропозиції щодо удосконалення СПБ об'єктів виробництва та застосування БДП, зокрема за рахунок вибору найбільш ефективних для їх гасіння ВР та обґрунтовано рекомендовані параметри їх подавання технічними засобами пожежогасіння.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях

1. Білкун Д.Г., Боровиков В.О., Скоробагатько Т.М., Чеповський В.О. Проблеми пошуку ефективних засобів гасіння біобензину. *Збірник наукових праць: Пожежна безпека, ЛДУ БЖД*. 2009. № 15. С. 101–107.

2. Скоробагатько Т.М., Білкун Д.Г., Боровиков В.О. Пожежна небезпека дизельного палива та проблемні питання його гасіння. *Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал*. 2009. № 2 (20). С. 52–56.

3. Скоробагатько Т.М., Боровиков В.О., Білкун Д.Г. Результати експериментальних досліджень гасіння окремих зразків моторного біопалива та палива моторного сумішевого пінами середньої та низької кратності. *Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал*. 2010. № 2 (22). С. 142–147.

4. Скоробагатько Т.М., Боровиков В.О., Білкун Д.Г. Шляхи забезпечення протипожежного захисту процесів виробництва рідкого моторного біопалива та об'єктів з його наявністю. *Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал*. 2011. № 2 (24). С. 124–131.

5. Скоробагатько Т.М., Антонов А.В., Білкун Д.Г. Оцінка пожежної небезпеки дільниці етерифікації підприємства з виробництва біодизельного палива методом Гретенера. *Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал*. 2012. № 1 (25). С. 54–59.

6. Скоробагатько Т.М., Антонов А.В., Копильний М.І. Ефективність гасіння бінарних сумішей дизельного та біодизельного палива тонкорозпиленими водними вогнегасними речовинами. *Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал*. 2013. № 1 (27). С. 92–99.

7. Скоробагатько Т.М., Білошицький М.В., Маладика І.Г. Категорування за вибухопожежною та пожежною небезпекою підприємства з виробництва біодизельного палива. *Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал*. 2014. № 2 (30). С. 23–29.

8. Скоробагатько Т.М., Огурцов С.Ю., Стилик І.Г., Бенедюк В.С. Дослідження параметрів горіння біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом. *Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал*. 2015. № 2 (32). С. 95–100.

9. Скоробагатько Т.М., Копильний М.І., Маладика І.Г. Ефективність гасіння вогнегасним порошком біодизельного палива та його суміші з дизельним паливом. *Науковий вісник УкрНДІПБ: Науковий журнал*. 2015. № 2 (32). С. 77–81.

10. Скоробагатько Т.М., Копильний М.І., Боровиков В.О. Ефективність гасіння деякими газовими вогнегасними речовинами біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2017. № 1 (3). С. 73–76.

#### **Статті у міжнародних виданнях**

11. Скоробагатько Т.М., Антонов А.В., Боровиков В.О. Особливості процесів горіння дизельного біопалива, його сумішей з нафтовим дизельним паливом та процесів взаємодії вогнегасних речовин з полум'ям під час їх гасіння. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука"*. 2019. № 11 (73), том 2. С. 52–63.

12. A. Antonov, T. Skorobagatko, R. Yakovchuk, O. Sviatkevych Interaction of fire-extinguishing agents with flame of diesel bio fuel and its mixtures. *Zeszyty Naukowe SGSP*. 2020. 73 (1). P. 7–24.

#### **Матеріали наукових конференцій**

13. Білкун Д.Г., Скоробагатько Т.М. Пожежна небезпека моторних біопалив в Україні. *Пожежна безпека – 2009: зб. тез доповідей IX Міжнар. наук.-практ. конф.*, 05-06 лист. 2009 р. Львів, 2009. С. 150–151.

14. Білкун Д.Г., Боровиков В.О., Скоробагатько Т.М. Проблеми пожежної безпеки біодизелю та його гасіння. *Хімія і технологія жирів. Перспективи розвитку масло-жирової галузі: зб. тез доповідей II Міжнарод. наук.-техн. конф.*, 21-25 верес. 2009 р. Алушта, 2009. С. 88–90.

15. Боровиков В.О., Білкун Д.Г., Скоробагатько Т.М. Пожежна небезпека окремих видів дизельного біопалива. *Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: зб. тез доповідей IV Міжнарод. наук.-практ. конф.*, 08 жовт. 2010 р. Черкаси, 2010. С. 106–107.

16. Білкун Д.Г., Скоробагатько Т.Н., Боровиков В.А. Проблемы пожарной опасности моторного биотоплива в Украине. *Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXI Междунар. науч.-практ. конф.*, 19-22 мая 2009 г. Москва, 2010. С. 128–130.

17. Скоробагатько Т.М., Боровиков В.О., Білкун Д.Г. Ефективність гасіння деякими вогнегасними речовинами моторного біопалива. *Пожежна безпека – 2011:*

матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф., 17-18 лист. 2011 р. Харків, 2011. С. 202–203.

18. Скоробагатько Т.Н., Боровиков В.А. Особенности применения пены для тушения пожаров жидких моторных биотоплив. *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сборник тезисов докладов VI Междунар. науч.-практ. конф.*, 08-10 июня 2011 г. Минск, 2011. С. 192–194.

19. Скоробагатько Т.М. Основні результати досліджень характеру взаємодії вогнегасних речовин з поверхнею горіння деяких видів моторного біопалива. *Сучасні проблеми охорони праці та аерології гірничих підприємств: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф. молодих вчених, студентів і аспірантів*, 24 лист. 2011 р. Донецьк, 2011. С. 13–17.

20. Скоробагатько Т.М., Антонов А.В., Білкун Д.Г. Пожежна небезпека дільниці етерифікації підприємства з виробництва біодизельного палива. *XI Міжнародний виставковий форум “Технології захисту-2012”*: матеріали 14 Всеукраїнської. наук.-практ. конф. рятувальників, 26-27 верес. 2012 р. Київ, 2012. С. 359–361.

21. Скоробагатько Т.М. До питання оцінки пожежонебезпеки дільниці етерифікації підприємства з виробництва біодизельного палива. *Пожежна безпека: теорія і практика: зб. тез доповідей II Міжнарод. наук.-практ. конф.*, 12 жовт. 2012 р. Черкаси, 2012. С. 92–95.

22. Скоробагатько Т.М., Боровиков В.О., Білкун Д.Г. Забезпечення протипожежного захисту виробництв рідкого моторного біопалива. *Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту: матеріали I Всеукраїнської наук.-практ. конф.*, 05 жовт. 2012 р. Харків, 2012. С. 228–233.

23. Скоробагатько Т.Н., Антонов А.В., Боровиков В.А., Білкун Д.Г. Обеспечение противопожарной защиты технологических процессов производства жидкого моторного биотоплива: материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам пожарной безопасности, посвященной 75-летию создания института, 03-04 июля 2013 г. Москва, 2013. С. 126–128.

24. Скоробагатько Т.М., Антонов А.В., Копильний М.І. Ефективність гасіння бінарних сумішей дизельного та біодизельного палива тонкорозпиленими водними вогнегасними речовинами. *Пожежна безпека-2013: матеріали XI Міжнарод. наук.-практ. конф.*, 25-26 верес. 2013 р. Київ, 2013. С. 282–284.

25. Скоробагатько Т.М. Удосконалення методу Гретенера. *Пожежна безпека-2013: матеріали XI Міжнарод. наук.-практ. конф.*, 25-26 верес. 2013 р. Київ, 2013. С. 541–545.

26. Скоробагатько Т.М., Антонов А.В., Білошицький М.В. Вибухопожежна та пожежна небезпека типового підприємства з виробництва біодизельного палива. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: матеріали IV Міжнарод. наук.-практ. конф.*, 09-10 жовт. 2014 р. Черкаси, 2014. С. 41–44.

27. Скоробагатько Т.М., Боровиков В.О. До питання горіння та гасіння жирів (олій) і продуктів їх переробляння. *Запобігання надзвичайним ситуаціям та їх ліквідація: матеріали наук.-практ. семінару*, 21 лют. 2019 р., Харків, 2019. С. 301–304.

## АНОТАЦІЯ

**Скоробагатько Т.М. Удосконалення систем забезпечення пожежної безпеки об'єктів виробництва та застосування біодизельного палива. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.02 – пожежна безпека. – Український науково-дослідний інститут цивільного захисту, Київ – 2020.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-технічної задачі щодо розкриття особливостей впливу чинників на пожежонебезпечність БДП та його бінарних сумішей з ДП, параметри процесів горіння, процеси його припинення у разі застосування ВР як наукового підґрунтя удосконалення СПБ об'єктів виробництва та застосування таких палив. Встановлено, що для типового об'єкта виробництва БДП з урахуванням вимог вітчизняної нормативної бази, рівень пожежонебезпеки є неприйнятним, а СПБ потребує удосконалення. Визначено основні показники пожежонебезпечності БДП та вплив співвідношення компонентів БДП в бінарних сумішах з ДП на ці показники, а також на параметри процесів їх горіння. Експериментально визначено параметри подавання різних видів ВР у разі гасіння пожеж БДП та його бінарних сумішей з ДП. Удосконалено метод оцінювання рівня пожежонебезпеки об'єктів з наявністю БДП. Сформовано пропозиції по удосконаленню СПБ об'єктів виробництва та застосування БДП. Запропоновано рекомендовані параметри подавання ВР для гасіння БДП та його бінарних сумішей з ДП із застосуванням технічних засобів пожежогасіння.

**Ключові слова:** альтернативне паливо, біодизельне паливо, вогнегасна ефективність, гасіння, горіння, дизельне паливо, етерифікація, припинення горіння, пожежонебезпека, суміш.

## АННОТАЦИЯ

**Скоробагатько Т.Н. Усовершенствование систем обеспечения пожарной безопасности объектов производства и применения биодизельного топлива. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 21.06.02 – пожарная безопасность. – Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты – 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи по раскрытию особенностей влияния факторов на БДТ и его бинарных смесей с нефтяным ДТ, параметры процессов горения, процессы его прекращения с применением ОВ как научной основы совершенствования СПБ объектов производства и применения таких веществ.

Отмечено, что статистика пожаров в Украине свидетельствует о том, что в государстве среди разнообразия объектов возникновения пожаров, а также причин и условий их возникновения важное место занимает сегмент пожаров, сопровождающихся наличием и непосредственным горением легко-воспламеняющихся и горючих жидкостей, к которым относятся как продукция переработки нефти, так и продукция масложировой промышленности, в том числе и альтернативные виды жидкого топлива, к которым относится и БДТ. Ежегодно в этом сегменте в стране возникает около 1,5 тыс. пожаров, материальный ущерб от



которых достигает 500-600 млн. грн. Также установлено, что ограниченность, а в некоторых случаях и вообще отсутствие информации о пожароопасных показателях БДП и его бинарных смесей с ДТ, а также данных об особенностях процессов прекращения их горения с применением традиционных ОВ, делает невозможным построение эффективной СПБ и комплекса противопожарных мероприятий для объектов их производства и применения. При этом с использованием метода Гретенера установлено, что для типового объекта по производству БДТ, с учетом требований отечественной нормативной базы, уровень пожароопасности является неприемлемым, а СПБ требует совершенствования.

Установлено, что БДТ менее пожароопасно в сравнении с ДТ, но особенностью процесса его горения является наличие признаков, характерных для процессов горения жиров растительного и животного происхождения. При этом в случае максимально допустимого содержания БДП в смесевом топливе его температуры вспышки в закрытом/открытом тигле, воспламенения и самовоспламенения составляют 77 °С /87 °С, 111 °С и 225 °С соответственно, а средние удельные массовые скорости выгорания БДП и его бинарной смеси с ДП 0,017 кг/(м<sup>2</sup>·с) и 0,018 кг/(м<sup>2</sup>·с) соответственно, что почти вдвое меньше аналогичного показателя для ДТ.

Экспериментально определены параметры подачи различных видов ОВ при тушении пожаров БДТ и его бинарных смесей с ДТ, и на их основе предложены рекомендуемые параметры подачи ВР для тушения БДП и его бинарных смесей с ДТ с применением технических средств пожаротушения, которые составляют соответственно: для тонкораспылённой воды  $\geq 0,13$  дм<sup>3</sup>/(м·с<sup>2</sup>) и  $\leq 0,13$  дм<sup>3</sup>/(м·с<sup>2</sup>); для тонкораспылённого раствора пенообразователя общего назначения  $\geq 0,030$  дм<sup>3</sup>/(м·с<sup>2</sup>) и  $\geq 0,040$  дм<sup>3</sup>/(м·с<sup>2</sup>); для пены средней кратности, генерированной с рабочих растворов пенообразователей общего назначения  $\geq 0,041$  дм<sup>3</sup>/(м·с<sup>2</sup>) и  $\geq 0,041$  дм<sup>3</sup>/(м·с<sup>2</sup>); для пены низкой кратности, генерированной с рабочих растворов пенообразователей специального назначения  $\geq 0,046$  дм<sup>3</sup>/(м·с<sup>2</sup>) и  $\geq 0,046$  дм<sup>3</sup>/(м·с<sup>2</sup>); для огнетушащего порошка  $\geq 1,09$  кг/м<sup>2</sup> и  $\geq 1,57$  кг/м<sup>2</sup>; для диоксида углеводорода  $\geq 0,52$  кг/м<sup>3</sup> и  $\geq 0,56$  кг/м<sup>3</sup>; для азота  $\geq 0,55$  кг/м<sup>3</sup> и  $\geq 0,60$  кг/м<sup>3</sup>; для галона 2402  $\geq 0,20$  кг/м<sup>3</sup> и  $\geq 0,22$  кг/м<sup>3</sup>.

Усовершенствован метод оценки уровня пожароопасности объектов с наличием БДТ, что позволяет при правильном выборе вида и параметров подачи ОВ АСПТ снизить значение пожароопасности объекта до допустимого уровня, а также обеспечить соответствующую противопожарную защиту. Сформулировано предложения по усовершенствованию СПБ объектов производства и применения БДТ. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты будут способствовать усовершенствованию СПБ отечественных объектов производства и применения БДТ путем их учета при наполнении подсистем СПБ конкретными обоснованными организационными мерами, проектными, техническими и технологическими решениями и т.д., влияющими на уровень пожароопасности этих объектов, что в свою очередь, направлено на реализацию "Энергетической стратегии Украины на период до 2035 года" Безопасность, энергоэффективность, конкурентоспособность".

Результаты исследований также предложены для использования в

образовательном процессе подготовки специалистов образовательного степени "бакалавр" по специальности 261 "Пожарная безопасность" при изучении дисциплин "Пожарная безопасность территорий зданий и сооружений" и "Пожарная безопасность технологических процессов" в разрезе тем, связанных с обеспечением пожарной безопасности объектов производства и хранения легковоспламеняющихся и горючих жидкостей.

**Ключевые слова:** альтернативное топливо, биодизельное топливо, огнетушащая эффективность, тушение, горение, дизельное топливо, этерификация, прекращение горения, пожароопасность, смесь.

### ABSTRACT

**Skorobahatko T.M. Improvement of the systems of fire safety of the facilities for biodiesel fuel manufacture and application. – Typescript.**

Dissertation for the competition of the scientific degree of Candidate of Technical Sciences by specialty of 21.06.02 – fire safety. – Ukrainian Civil Protection Research Institute, Kyiv – 2020.

The dissertation is dedicated to the solution of an actual scientific and technical problem as to revelation of the specific features of the factors' influence on the fire hazard of the BDF and its binary mixtures with DF, parameters of burning processes, and processes of their cessation in case of application of FEA as scientific substantiation of FSS improvement to protect facilities for the production and use of such the fuels. It was revealed that the fire safety level of a typical facility for the BDF production was insufficient taking into consideration requirements of the national normative base, but its FSS required some improvement. Principal fire hazard indices of BDF were determined as well as influence of the proportion of the BDF components in its binary mixtures with DF on these indices and their burning parameters. Parameters of application of various fire-extinguishing agents in case of extinguishing of BDF and its mixtures with DF were determined experimentally. Method of estimation of fire hazard level of the facilities with BDF availability was improved. A number of proposals for the improvement of the FSS of the facilities performing production and use of BDF were formulated. Recommended parameters of FEA application for the extinguishing of BDF and its binary mixtures with DF using technical fire-fighting equipment were proposed.

**Key words:** alternative fuel, bio diesel fuel, fire-fighting efficiency, extinguishing, burning, diesel fuel, etherification, cessation of burning, fire hazard, mixture.

---

Підписано до друку 23.10.2020  
Друк різнограф  
Наклад 100 прим.

Формат 60x80/16  
Ум. друк. арк. 1,0  
Зам. №03/2020