

Технічні науки

УДК 614.841

Скоробагатько Тарас Миколайович

начальник науково-випробувального центру

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту

Скоробагатько Тарас Николаевич

начальник научно-испытательного центра

Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты

Skorobagatko Taras

Head of the Research centre

Ukrainian Civil Protection Research Institute

Антонов Анатолий Васильевич

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,

професор кафедри екологічного аудиту та експертизи

Державний заклад "Державна екологічна академія

післядипломної освіти та управління"

Антонов Анатолий Васильевич

доктор технических наук, старший научный сотрудник,

профессор кафедры экологического аудита и экспертизы

Государственное учреждение "Государственная экологическая академия

последипломного образования и управления"

Antonov Anatolii

Doctor of Technical Sciences, Senior Staff Scientist

State Institution "State Ecological Academy of

Postgraduate Education and Management"

Боровиков Володимир Олександрович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Український науково-дослідний інститут цивільного захисту

Боровиков Владимир Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты

Borovykov Volodymyr

Candidate of Technical Sciences, Senior Staff Scientist,

Senior Research Officer

Ukrainian Civil Protection Research Institute

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСІВ ГОРІННЯ ДИЗЕЛЬНОГО БІОПАЛИВА,
ЙОГО СУМІШЕЙ З НАФТОВИМ ДИЗЕЛЬНИМ ПАЛИВОМ ТА
ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ВОГНЕГАСНИХ РЕЧОВИН З ПОЛУМ'ЯМ
ПІД ЧАС ЇХ ГАСІННЯ**

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО
БИОТОПЛИВА, ЕГО СМЕСЕЙ С НЕФТЯНЫМ ДИЗЕЛЬНЫМ
ТОПЛИВОМ И ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ОГНЕТУШАЩИХ ВЕЩЕСТВ С ПЛАМЕНЕМ ПРИ ИХ ТУШЕНИИ
SPECIFIC FEATURES OF THE PROCESSES OF BURNING OF
DIESEL BIO FUEL, ITS MIXTURES WITH OIL-BASED DIESEL FUEL,
AND PROCESSES OF INTERACTION OF FIRE-EXTINGUISHING
AGENTS WITH FLAME WHEN PUTTING THEM OUT**

***Анотація.** Узагальнено аналітичні та експериментальні дані щодо пожежної небезпечності дизельного біопалива, його сумішей з нафтовим дизельним паливом, а також параметрів процесів їх горіння та особливостей взаємодії з традиційно використовуваними вогнегасними речовинами. Встановлено придатність вогнегасних речовин використаних типів для гасіння дизельного біопалива і визначено ряд параметрів, що характеризують їх ефективність під час гасіння дизельного біопалива. Виявлено, що за вмісту дизельного біопалива в його сумішах з нафтовим*

дизельним паливом до 30 % вогнегасна ефективність піни, генерованої з робочих розчинів піноутворювачів, практично не відрізняється від її ефективності під час гасіння нафтового дизельного палива без добавок.

Ключові слова: вогнегасна речовина, гасіння, горіння, дизельне біопаливо, дизельне паливо, складний ефір, жир, критична інтенсивність подавання, пожежна небезпечність, суміш.

Аннотация. Обобщены аналитические и экспериментальные данные по пожарной опасности дизельного биотоплива, его смесей с нефтяным дизельным топливом, а также параметрам процессов их горения и взаимодействия с традиционно используемыми огнетушащими веществами. Установлена пригодность огнетушащих веществ использованных типов для тушения дизельного биотоплива и определены ряд параметров, характеризующих их эффективность при тушении дизельного биотоплива. Установлено, что при содержании дизельного биотоплива в его смесях с нефтяным дизельным топливом до 30 % огнетушащая эффективность пены, генерируемой из рабочих растворов пенообразователей, практически не отличается от ее эффективности при тушении нефтяного дизельного топлива без добавок.

Ключевые слова: огнетушащее вещество, тушение, горение, дизельное биотопливо, дизельное топливо, сложный эфир, жир, критическая интенсивность подачи, пожарная опасность, смесь.

Summary. Analytical and experimental data on fire hazard of diesel bio fuel, its mixtures with oil-based diesel fuel, and parameters of processes of their burning and interaction with conventional fire-extinguishing agents are generalized. Applicability of the types of fire-extinguishing agents having been used for putting-out of diesel bio fuel was revealed and a number of parameters to describe their efficiency when extinguishing diesel bio fuel were determined. It was revealed that in case of diesel bio fuel content in its mixtures with oil-

based diesel fuel up to 30 % fire-extinguishing efficiency of foam generated from foam solutions nearly does not differ from that when extinguishing diesel fuel containing no additives.

Key words: *fire-extinguishing agent, extinguishing, burning, diesel bio fuel, diesel fuel, ester, fat, critical application rate, fire hazard, mixture.*

Вступ. Вибір вогнегасних речовин, протипожежного обладнання, а також способів і тактичних прийомів пожежогасіння у кожному конкретному випадку визначається рядом параметрів, зокрема, класом пожежі в цілому і властивостями горючих речовин і матеріалів, горіння яких відбувається. У теперішній час в Україні прийнято ДСТУ EN 2 [1], який передбачає поділ пожеж на такі класи: А – пожежі з горінням твердих матеріалів; В – пожежі з горінням рідин або твердих речовин, які переходять у рідкий стан під час нагрівання; С – пожежі з горінням газоподібних речовин; D – пожежі з горінням металів; F – пожежі з горінням речовин, які використовують для приготування їжі (рослинних і тваринних олій та жирів) і містяться в кухонних приладах.

На відміну від ГОСТ 27331 [2], розробленого ще за радянських часів, який наразі втратив чинність, поділ класів пожеж на підкласи не передбачено, натомість додано новий клас пожеж – F, що стосується горіння жирів, які безпосередньо містяться в кухонних приладах. До жирів належать складні ефіри, що являють собою продукти естерифікації вищих карбонових кислот (стеаринової, пальмітинової, маргаринової, олеїнової та ін.) і гліцерину (триатомний спирт). Рідкі жири рослинного походження загальновідомі як “олії”. Хімічні властивості жирів, у тому числі й характер перебігу і параметри реакції їх взаємодії з киснем повітря під час горіння, багато в чому відмінні від властивостей інших рідин і твердих речовин та матеріалів. Зокрема, енергія макроергічних зв’язків у молекулах жирів набагато вища, ніж у молекулах вуглеводнів, у зв’язку з

чим зруйнувати (зокрема, окислити) такі молекули важче. Висока молекулярна маса і низька леткість, потужна міжмолекулярна (ван-дер-Ваальсова) взаємодія між молекулами жирів та висока енергія хімічних зв’язків у них – це головні чинники, які зумовлюють високі значення температури спалаху олій та жирів (зазвичай понад 200 °C) і складність їх запалювання. З іншого боку, температура під час горіння таких речовин сягає 400 °C і вище, причому можливе розбризкування палаючого жиру з подальшим поширенням пожежі (зазвичай у разі спроби їх гасіння компактними струменями води), та інтенсивне виділення продуктів згоряння жирів. З цих, а також ряду інших причин тактичні прийоми гасіння пожеж вуглеводнів можуть бути недостатньо ефективними під час гасіння жирів.

Відомо, що для гасіння пожеж жирів у кухонному обладнанні традиційно використовують спеціальні вогнегасні речовини, відомі як “Wet Chemical”. Відповідно до NFPA 17A [3], з цією метою потрібно використовувати водні розчини карбонату, ацетату, цитрату натрію або суміші цих солей. В Європі чинний стандарт щодо монтування та експлуатування систем пожежогасіння кухонного обладнання EN 16282-7 [4], який прийнято також в Україні, але нормативний документ, який встановлює вимоги щодо самих систем, наразі перебуває на стадії розроблення. Разом з тим, пожежі з горінням жирів, що знаходяться поза межами кухонних приладів, згідно чинного національного стандарту [1] слід відносити до класу В. Принципові підходи до гасіння таких пожеж на олійно-екстракційних підприємствах, що передбачають використання дренчерних систем водяного або пінного пожежогасіння, відповідно до NFPA 36 [5] у цілому не відрізняються від гасіння пожеж за наявності розливів інших горючих рідин на промислових підприємствах, які регламентовано NFPA 16 [6].

Дизельне біопаливо являє собою складні ефіри вищих жирних кислот і нижчих одноатомних спиртів – метилового, етилового або ізопропілового. Для його одержання проводять переестерифікацію рослинної олії цими спиртами з подальшим ретельним очищенням суміші від води, гліцерину та інших технологічних домішок. Цей факт, а також результати описаних нижче досліджень свідчать про те, що дизельне біопаливо в чистому вигляді за характеристиками пожежної небезпечності, а також характером взаємодії вогнегасних речовин з полум'ям під час його гасіння, ближче до рослинних і тваринних жирів, ніж традиційне нафтове дизельне паливо. Разом з тим, зроблені теоретичні припущення потребували експериментального перевіряння.

Актуальність порушеного питання підтверджується інформацією про пожежі, що супроводжувалися горінням жирів та продуктів їх переробляння протягом останніх декількох років, про які йдеться нижче. Так, наприклад, 6 листопада 2018 року сталася пожежа на підприємстві “Дельта Вілмар” біля міста Південне Одеської області. Підприємство спеціалізується на виробництві продукції на основі жирів. Перші пожежно-рятувальні підрозділи встановили, що у цеху виробництва маргарину загорілися рослинна олія та горюча тара [7, 8]. 1 вересня 2014 року сталася пожежа на заводі з виробництва ріпакової олії в місті Антсла (Казахстан) [9]. За інформацією пожежних, вибух одного з контейнерів призвів до пожежі в виробничій будівлі заводу, а з інших зруйнованих вибухом контейнерів вилилось й загорілось близько 30 тон олії. 3 квітня 2015 року сталася пожежа на заводі з виробництва біодизелю в місті Стюарт (США) [10]. Горіло понад 10 тис. галонів біодизелю. В радіусі 1 км навколо місця інциденту було евакуйоване населення, до ліквідації пожежі залучені всі пожежні міста та округу. 6 лютого 2016 року сталася пожежа на заводі з виробництва біопалива в місті Альхемесі (Іспанія) [11, 12]. Пожежа виникла у виробничому цеху в результаті вибуху бункера для сировини,

унаслідок чого дві людини загинули і одна отримала важкі поранення та травми.

Мета роботи. Узагальнення аналітичних та експериментальних даних щодо пожежної небезпеки біодизельного палива, параметрів його горіння та особливостей взаємодії з основними вогнегасними речовинами з метою оцінювання можливостей їх використання на практиці і визначення напрямів подальших досліджень.

В преамбулі до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 року №605-р, зазначено, що у світі відбуваються зміни у підходах до формування енергетичної політики держав: здійснюється перехід від застарілої моделі функціонування енергетичного сектору, в якому домінували великі виробники, викопне паливо, неефективні мережі, недосконала конкуренція на ринках природного газу, електроенергії, вугілля до нової моделі, в якій створюється більш конкурентне середовище, вирівнюються можливості для розвитку й мінімізується домінування одного з видів виробництва енергії або джерел та/або шляхів постачання палива. Разом з цим, віддається перевага підвищенню енергоефективності й використанню енергії із відновлюваних та альтернативних джерел. Крім того, в Україні діє Закон України “Про альтернативні види палива”, який визначає правові, соціальні, економічні, екологічні та організаційні засади виробництва (видобутку) і використання альтернативних видів палива, й покликаний стимулювати збільшення частки їх використання від загального обсягу споживання палива. На додаток, в Україні розроблено й впроваджено національні стандарти щодо технічних вимог на метилові та етилові ефіри [13-14] і національний стандарт [15], який встановлює вимоги до процесу виробництва метилових ефірів з жирів природного походження.

Серед методів виробництва дизельного біопалива найбільш перспективним для України на сьогоднішній день вважається метод етерифікації рослинних або тваринних жирів нижчими жирними спиртами з утворенням їх моноефірів. Перебіг реакції відбувається в присутності каталізатора. Окрім біодизелю, цільовим продуктом реакції є гліцерин. Виробництво у цей спосіб характеризується простотою і невисокою вартістю технологічного обладнання, проте можливі труднощі з очищенням цільового продукту від технологічних домішок.

Найбільш розповсюдженою рослинною сировиною для використання у виробництві біодизельного палива вважається насіння ріпаку. В Україні є вітчизняні господарства, які виробляють дизельне біопаливо для власних потреб, використовуючи міні-заводи та дослідні установки [16]. Серед виробників біодизельного палива та розробників обладнання для його виробництва в Україні відомі такі підприємства як ТОВ “Запорізький біопаливний завод”, Фермерське господарство в с. Луки Львівської області, ТОВ “АГРО-НАФТА”, ТОВ “Біонафта”, ВАТ “Біодизельдніпро”, ТОВ “Укрбіоенергія”, ТОВ “Елерон” та інші.

Для виробництва дизельного біопалива вітчизняними підприємствами можуть використовуватись рослинні олії, тваринний жир, фритюрний жир та інші подібні продукти. Разом з тим, для одержання складних ефірів, які відповідають вимогам чинних нормативних документів, потрібно використовувати високоякісну сировину, а також ретельно дотримуватись вимог щодо проведення технологічного процесу.

Результати проведених досліджень у роботах [17-18] вказують на те, що зразки дизельного біопалива (“біодизелю”), виготовленого українськими виробниками, суттєво відрізняються між собою за показниками якості, особливо пожежної небезпеки, причому більшість з них мають надзвичайно низьку температуру спалаху, що свідчить про недостатність очищення від метанолу. Дослідженням було піддано зразок

естеру метилового жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів (ЕМЖК) та три зразки біодизелю різних вітчизняних виробників. Крім того, було проведено аналогічні дослідження зразка нафтового дизельного палива та його сумішей з ЕМЖК у різних пропорціях.

Результати експериментальних досліджень представлено в таблиці 1 у порівнянні з показниками, нормованими ДСТУ 6081 [12]. Показники пожежної небезпечності визначали згідно з методиками, унормованими ГОСТ 12.1.044 [19].

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень з визначення показників пожежної небезпечності окремих зразків дизельного біопалива

Речовина	Показник							
	Температура спалаху у відкритому тиглі, °С		Температура займання, °С		Температура спалаху у закритому тиглі, °С		Температура самозаймання, °С	
	Нормоване значення	Фактичне значення	Нормоване значення	Фактичне значення	Нормоване значення	Фактичне значення	Нормоване значення	Фактичне значення
Зразок ЕМЖК	не нормовано	164	не нормовано	194	не менше ніж 120	145	не менше ніж 320	228
Біодизель (зразок №1)		133		174		112		396
Біодизель (зразок №2)		106		140		88		280
Біодизель (зразок №3)		94		170		45		254

Як видно з таблиці, ЕМЖК є горючою рідиною. Нормативним документом на ЕМЖК [15] регламентовано два показники, які певною мірою характеризують його пожежну небезпечність, а саме: температура спалаху у закритому тиглі та температура самозаймання. За першим показником досліджений зразок ЕМЖК відповідає встановленим вимогам, проте температура самозаймання майже на 100 °С нижча за нормоване значення. Показники пожежної небезпечності зразків біодизелю суттєво

відрізняються між собою. 1-й і 2-й зразки класифікуються як горючі речовини, а 3-й зразок – як горюча легкозаймиста речовина, оскільки його температура спалаху у закритому тиглі менша за 61 °С. Порівнюючи результати експериментальних досліджень зразків біодизелю, перш за все, температури спалаху, можна припустити, що така розбіжність у показниках свідчить про наявність у їхньому складі залишкового метанолу (етанолу), що використовується під час перетерифікації, а також вказує на низький рівень очищення кінцевого продукту. На це непрямо вказує також надзвичайно велика розбіжність між температурами займання кожного з досліджених зразків у відкритому і закритому тиглі.

Як вже відзначалося, у світі діє ще декілька стандартів на дизельне біопаливо, наприклад EN 14214 [20], DIN V 51606 [21], ASTM D 6751 [22]. В таблиці 2 представлено значення температури спалаху біодизелю, регламентовані нормативними документами, а в таблиці 3 – значення, одержані експериментально.

Таблиця 2

Нормовані значення температури спалаху дизельного біопалива

Характеристика	Нормативні значення				
	ДСТУ 6081	ДСТУ 7178	EN 14214	DIN V 51606	ASTM D 6751
Температура спалаху, °С	не менше ніж 120	не менше ніж 101	не менше ніж 120	не менше ніж 110	не менше ніж 130

Таблиця 3

Результати визначення температури спалаху зразків біодизельного палива

Експериментальні значення				
Температура спалаху у закритому/відкритому тиглі, °С	ЕМЖК	Зразок №1	Зразок №2	Зразок №3
	145/164	112/133	88/106	45/94

З таблиці 2 видно, що мінімальна температура спалаху дизельного біопалива повинна бути не менше ніж 101 °С. Цим вимогам відповідає лише два зразки біодизелю вітчизняного виробництва (таблиця 3). Особливості його виробництва в Україні та недостатнє очищення кінцевого продукту від залишків спирту, імовірно, призводять до суттєвого зниження температури спалаху, і, відповідно в окремих випадках, до зміни групи горючості з горючої до легкозаймистої речовини (зразок №3).

Результати досліджень з визначення показників пожежної небезпечності нафтового дизельного палива, біодизельного палива та їх сумішей наведено в таблиці 4 і на рисунку 1.

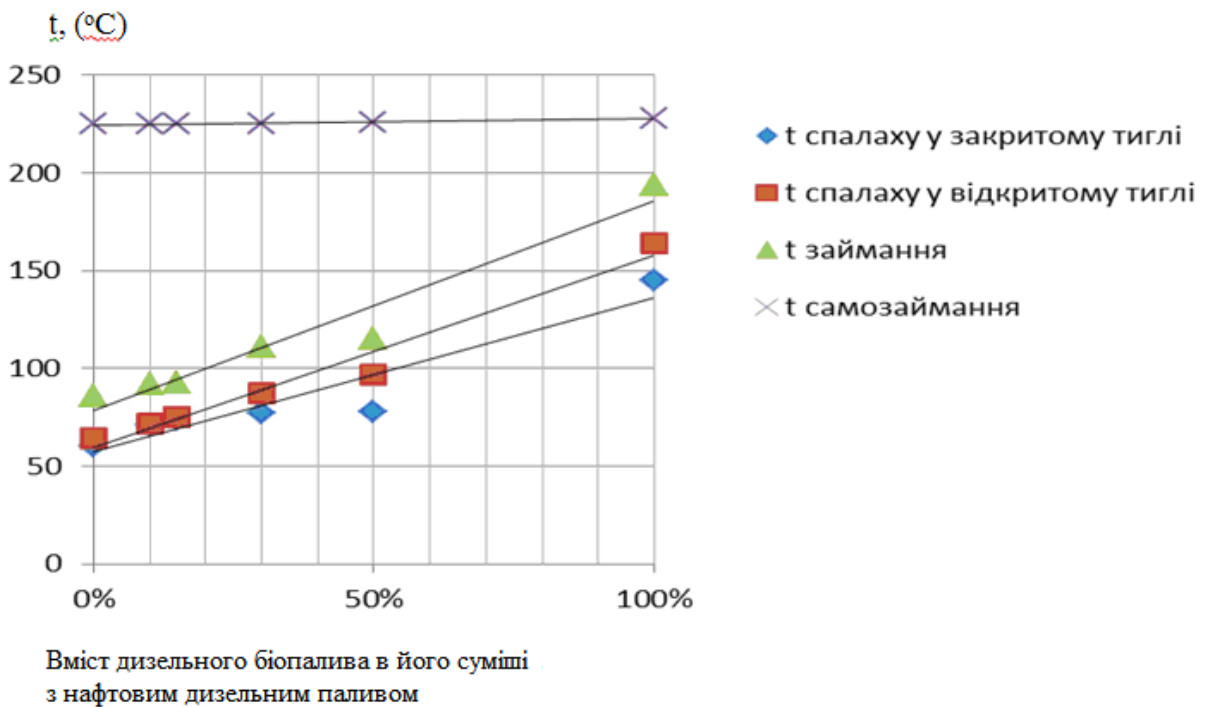


Рис. 1. Характер зміни показників пожежної небезпечності сумішей дизельного та біодизельного палива

Як видно з таблиці 4, дизельне біопаливо має вищі значення температур спалаху, займання та самозаймання, ніж традиційне нафтове дизельне паливо, що свідчить про його меншу пожежну небезпечність. З іншого боку, таке паливо значно небезпечніше, ніж рослинна олія, з якої воно виготовляється. Зі збільшенням частки біодизельного палива в

дизельному паливі температура спалаху у закритому і відкритому тиглі, а також температура займання останнього збільшуються, натомість температура самозаймання для всіх досліджених сумішей майже однакова. Це пояснюється практично однаковими значеннями температури самозаймання використаних зразків дизельного палива та ЕМЖК і свідчить про відсутність процесів утворення асоціатів, комплексів, нових хімічних сполук тощо під час їх змішування.

Таблиця 4

Результати досліджень з визначення показників пожежної небезпечності дизельного, біодизельного палива та їх сумішей

Компонентний склад	Температура спалаху у закритому тиглі, °C	Температура спалаху у відкритому тиглі, °C	Температура займання, °C	Температура самозаймання, °C
Дизельне паливо – 100 %	64	60	86	227
Дизельне паливо – 90 %, дизельне біопаливо – 10 %	71	72	92	225
Дизельне паливо – 85 %, дизельне біопаливо – 15 %	74	75	93	225
Дизельне паливо – 70 %, дизельне біопаливо – 30 %	77	87	111	225
Дизельне паливо – 50 %, дизельне біопаливо – 50 %	78	97	115	226
Дизельне біопаливо 100 %	145	164	194	228

Інформацію щодо параметрів процесів горіння дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом висвітлено у роботі [23]. Отримані експериментальні дані щодо температури полум'я та масової швидкості вигорання біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом узагальнено у таблиці 5.

За результатами експериментальних досліджень параметрів процесів горіння дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом встановлено, що масова швидкість вигорання дизельного біопалива удвічі менша за аналогічний показник для нафтового дизельного палива. Також

встановлено, що масова швидкість вигорання дизельного біопалива суттєво змінюється залежно від тривалості його горіння та знаходиться у межах від 0,54 кг/(м²·хв) до 1,50 кг/(м²·хв) для дека модельного вогнища 34В. За вмісту 30 % дизельного біопалива у його суміші з нафтовим дизельним паливом (що фактично відповідає його граничному вмісту у традиційно використовуваному моторному паливі) масова швидкість вигорання і температури полум'я знижуються. Також слід наголосити, що під час горіння дизельного біопалива мають місце явища, характерні для нагрівання і горіння жирів рослинного та тваринного походження, зокрема, гучні потріскування та шипіння.

Таблиця 5

Експериментальні дані щодо температур полум'я та масової швидкості вигорання дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом

Зразок палива	Найвища температура полум'я, °С	Масова швидкість вигорання, кг/с	Питома масова швидкість вигорання у деку модельного вогнища пожежі 34В, кг/(м ² ·с)
“Зразок № 1” (дизельне біопаливо згідно з ДСТУ 6081 [13])	651,3 (на 68 с)	0,010...0,027	0,009...0,025
“Зразок № 2” (суміш 70 % дизельне палива згідно з ДСТУ 4840 [24] і 30 % дизельного біопалива згідно з ДСТУ 6081)	866,5 (на 239 с)	0,008...0,031	0,007...0,029
“Зразок №3” (дизельне паливо згідно з ДСТУ 4840 [24])	897,0 (на 250 с)	0,030...0,039	0,028...0,036

Процеси гасіння дизельного біопалива та його сумішей з нафтовим дизельним паливом різноманітними вогнегасними речовинами описано у роботах [25-29].

Відомо, що палаючий жир або олію теоретично можна погасити водою, вогнегасним порошком чи піною, але також відомо, що, наприклад, під час контактування води з гарячою олією може відбутися інтенсивне

розбризування останньої. Ці самі явища свого часу спонукали і до відмови від вогнегасного порошку як засобу гасіння жирів та олій. Гасіння піною також ускладнене через руйнування адсорбційних шарів у пінних плівках і закипання води у разі досягнення відповідних температур. Так, за результатами експериментальних досліджень, описаних у роботі [25], встановлено, що під час взаємодії піни з палаючою соняшниковою олією має місце майже миттєве її руйнування, відбувається спінювання всієї суміші, інтенсивне утворення водяної пари, розбризування горючої рідини. Гасіння у дослідах, які проводили з використанням осередків пожежі невеликої площі, досягалось, але підстав для перенесення цих результатів на реальні умови наразі немає.

Результати досліджень з визначення тривалості гасіння та критичної інтенсивності подавання розчину піноутворювача загального призначення "ПО-ЗНП" у разі гасіння традиційного дизельного пального, біодизелю та ЕМЖК наведено у таблиці 6, а також роботі [26].

Таблиця 6

Результати досліджень з визначення тривалості гасіння і критичної інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача "ПО-ЗНП" у разі гасіння нафтового дизельного палива, дизельного біопалива та ЕМЖК

Досліджуваний зразок	Діаметр модельного вогнища пожежі, мм	Інтенсивність подавання робочого розчину, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Тривалість гасіння, с (середнє значення)	Критична інтенсивність подавання робочого розчину ($I_{\text{кр}}$), $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
Дизельне паливо з АЗС мережі "Золотий гепард"	298,5	0,029	69	0,016
	339,4	0,022	85	
	358,2	0,020	128	
	381,2	0,018	215	
	426,3	0,014	не погашено	
Дизельне паливо з АЗС мережі "Лукойл"	298,5	0,029	72	0,016
	339,4	0,022	105	
	358,2	0,020	125	
	381,2	0,018	203	
	426,3	0,014	не погашено	

Дизельне біопаливо (зразок №1)	358,2	0,020	40	менше ніж 0,018
	381,2	0,018	31	
Дизельне біопаливо (зразок №2)	381,2	0,020	72	менше ніж 0,018
ЕМЖК	381,2	0,020	40	менше ніж 0,018
Суміш дизельного палива з АЗС мережі "Лукойл" (70 %) з ЕМЖК (30 %)	339,4	0,022	65	менше ніж 0,018
	381,2	0,018	110	
Суміш дизельного палива з АЗС мережі "Лукойл" (85 %) з ЕМЖК (15 %)	381,2	0,018	110	менше ніж 0,018

З таблиці 6 видно, що критична інтенсивність подавання робочого піноутворювача загального призначення "ПО-ЗНП" майже однакова та досить низька як для традиційного дизельного палива та біодизелю, так і для ЕМЖК та його сумішей з традиційним дизельним паливом. Порівнянням одержаних даних з даними довідкової літератури [30] встановлено, що вони майже в чотири рази нижчі від рекомендованих. Але, не зважаючи на це, в процесі досліджень також встановлено, що характер взаємодії піни середньої кратності з полум'ям під час гасіння поверхневим способом нафтового дизельного палива, дизельного біопалива, ЕМЖК, а також його сумішей з нафтовим дизельним паливом суттєво відрізняється між собою. Так, у першому випадку на поверхні рідини відбувається накопичення піни, після чого вона рівномірно розподіляється поверхнею і не руйнується, гасіння модельного вогнища пожежі відбувається за рахунок ізоляції речовини, що горить, від доступу кисню. У другому випадку під час подавання піни її накопичення відбувалося повільно, частина піни руйнувалася, мало місце розлітання гарячих краплин рідини за межі дека, а після досягнення речовиною температури кипіння відбулося її скипання та руйнування всієї піни на поверхні. Гасіння модельного вогнища пожежі відбувалось за рахунок пароутворення.

Результати досліджень з визначення тривалості гасіння та критичної інтенсивності подавання розчину фторсинтетичного плівкоутворювального піноутворювача спеціального призначення "Tridol 6 –10°C" у разі гасіння нафтового дизельного палива, дизельного біопалива та ЕМЖК наведено в таблиці 7 і роботі [26].

Результати досліджень з визначення тривалості гасіння і критичної інтенсивності подавання розчину фторпротеїнового піноутворювача спеціального призначення "Fluoropolydol", що не має плівкоутворювальних властивостей, у разі гасіння біодизельного палива, наведено у таблиці 8 і роботі [26].

Таблиця 7

Результати досліджень з визначення тривалості гасіння і критичної інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача "Tridol 6 – 10°C" у разі гасіння нафтового дизельного палива, дизельного біопалива та ЕМЖК

Досліджуваний зразок	Діаметр модельного вогнища пожежі, мм	Інтенсивність подавання робочого розчину, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Тривалість гасіння, с (середнє значення)	Проміжок часу до повторного займання, с (середнє значення)	Критична інтенсивність подавання робочого розчину ($I_{\text{кр}}$), $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
Дизельне паливо з АЗС мережі "Лукойл"	589,0	0,046	30	690	менше 0,046
Дизельне біопаливо (зразок №3)	589,0	0,046	16	760	менше 0,046
Суміш дизельного палива з АЗС мережі "Лукойл" (70 %) з ЕМЖК	589,0	0,046	12	750	менше 0,046

Результати досліджень, наведені в таблицях 7 і 8, вказують на ефективність піни низької кратності, генерованої з розчинів піноутворювачів спеціального призначення "Tridol 6 –10°C" і "Fluoropolydol". Гасіння в усіх випадках відбувалось досить швидко – до

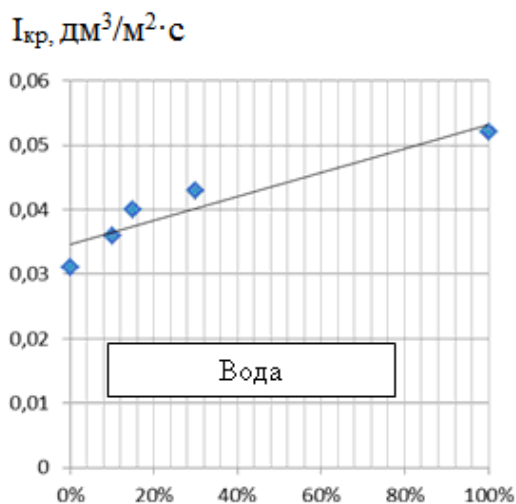
30 с з моменту початку подавання піни на поверхню речовини. Проміжок часу до повторного займання речовини досить тривалий і становить від 7 хв до 10 хв.

Таблиця 8

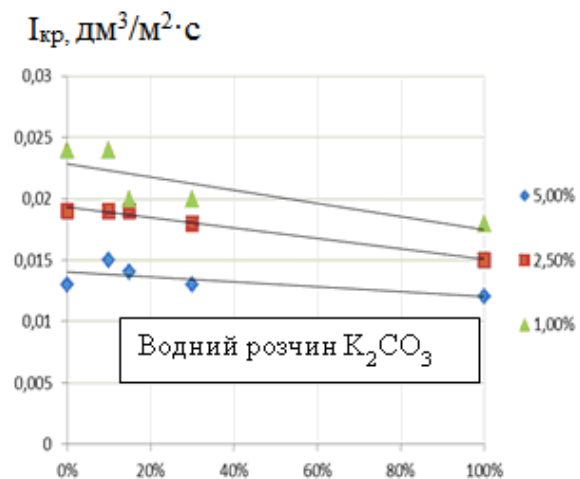
Результати досліджень з визначення тривалості гасіння та критичної інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача "Fluoropolydol" у разі гасіння дизельного біопалива

Досліджуваний зразок	Діаметр модельного вогнища пожежі, мм	Інтенсивність подавання робочого розчину, $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	Тривалість гасіння, с (середнє значення)	Проміжок часу до повторного займання, с (середнє значення)	Критична інтенсивність подавання робочого розчину ($I_{\text{кр}}$), $\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$
Дизельне біопаливо (зразок №3)	589,0	0,046	17	420	менше ніж 0,046

На рисунках 2 і 3 представлено результати експериментальних досліджень з визначення вогнегасної ефективності тонкорозпиленних водних вогнегасних речовин під час гасіння біодизельного та дизельного палива, а також їх суміші [27].



Вміст дизельного біопалива в його суміші з нафтовим дизельним паливом



Вміст дизельного біопалива в його суміші з нафтовим дизельним паливом

Рис. 2. Результати експериментальних досліджень вогнегасної ефективності тонкорозпиленої води та водного розчину K_2CO_3 під час гасіння дизельного біопалива, дизельного палива та їх сумішей

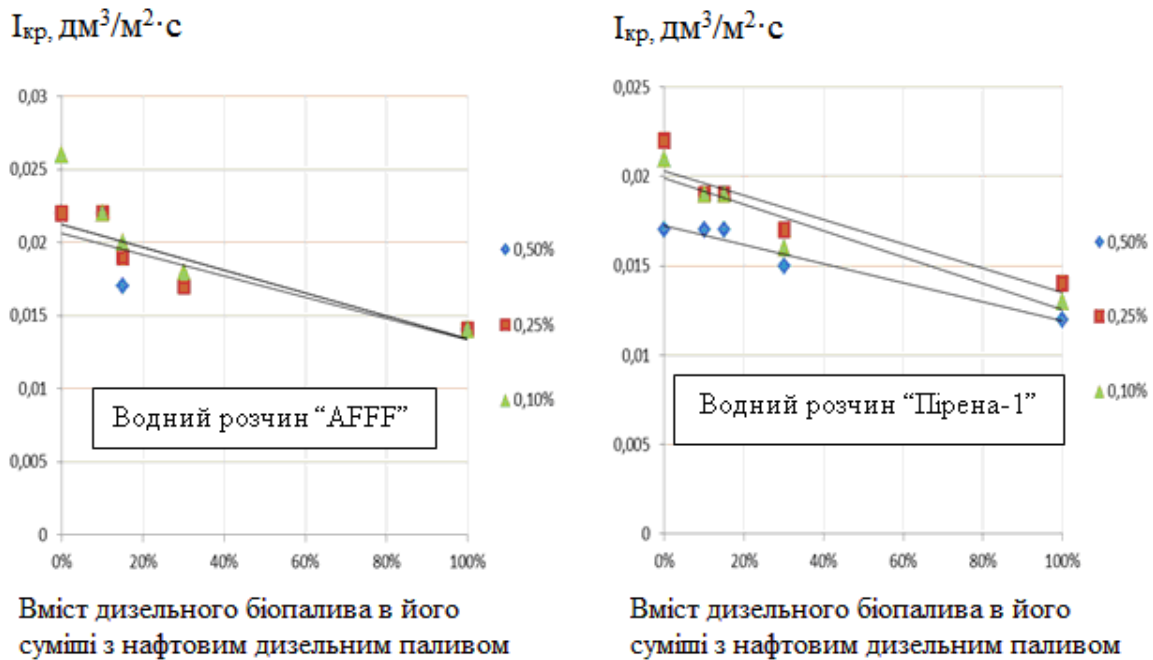


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень вогнегасної ефективності водних розчинів піноутворювача типу "AFFF" та піноутворювача "Пірена-1" під час гасіння дизельного біопалива, дизельного палива та їх сумішей

З рисунка 2 видно, що критична інтенсивність подавання тонкорозпиленої води під час гасіння дизельного біопалива складає $0,052 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. У порівнянні з аналогічним показником для дизельного палива ($0,031 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$), її значення більше на 40 %. Це означає, що гасіння дизельного біопалива тонкорозпиленою водою без добавок можливе, але менш ефективне, ніж гасіння дизельного палива. Разом з тим, з додаванням біодизельного палива до дизельного палива, значення критичних інтенсивностей подавання досліджуваних тонкорозпилених водних вогнегасних речовин (окрім води без добавок) зменшується.

У разі гасіння дизельного біопалива тонкорозпиленим водним розчином карбонату калію з концентрацією 5,0 %, 2,5 % та 1,0 % критична інтенсивність подавання вогнегасної речовини складає $0,013 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $0,016 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ та $0,018 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, відповідно. Таким чином, додавання до води певної кількості карбонату калію (K_2CO_3) дає змогу підвищити її

вогнегасну ефективність під час гасіння біодизельного палива у декілька разів.

З рисунка 3 видно, що у разі гасіння біодизельного палива водним розчином фторсинтетичного плівкоутворювального піноутворювача класу “AFFF” (“Tridol 6 –10°C”) з концентрацією 0,5 %, 0,25 % та 0,1 % критична інтенсивність подавання вогнегасної речовини складає $0,014 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ для всіх трьох концентрацій. Критична інтенсивність подавання водного розчину з концентрацією 0,5 %, 0,25 % та 0,1 % піноутворювача загального призначення “Пірена-1” під час гасіння біодизельного палива складає $0,012 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, $0,014 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ і $0,013 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, відповідно. Відповідно, як і у разі використання піноутворювача класу “AFFF”, вогнегасна ефективність тонкорозпиленої води під час гасіння біодизельного палива у разі додавання синтетичного піноутворювача загального призначення підвищується у декілька разів.

Таким чином, експериментально підтверджено можливість підвищення вогнегасної ефективності тонкорозпиленої води під час гасіння дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом приблизно в чотири рази шляхом додавання до її складу карбонату калію або синтетичних чи фторсинтетичних піноутворювачів.

На рисунку 4 представлено залежності інтенсивності подавання та витрати вогнегасного порошку класу “ABC-70” від об’ємної частки дизельного біопалива в його суміші з дизельним паливом [28].

За результатами цих досліджень встановлено, що багатоцільовий вогнегасний порошок класу “ABC-70” придатний для гасіння пожеж дизельного біопалива згідно з ДСТУ 6081 [13]. Визначено, що інтенсивність його подавання і питома витрата на гасіння дизельного біопалива, дизельного палива та їх сумішей за однакових умов гасіння відрізняються.

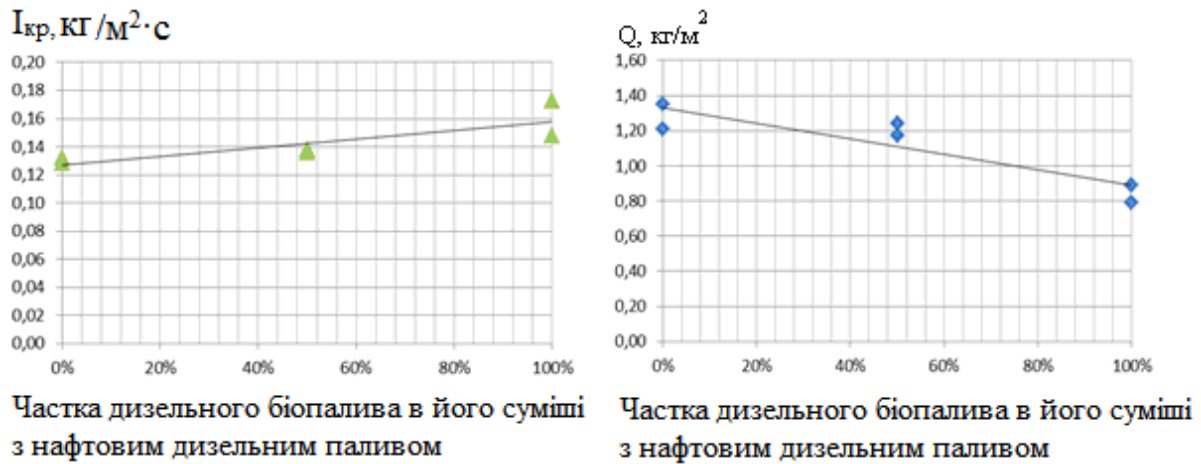


Рис. 4. Критична інтенсивність подавання і питома витрата на гасіння вогнегасного порошку під час гасіння дизельного біопалива, дизельного палива та їх сумішей

На рисунку 5 представлено залежності мінімальної вогнегасної концентрації газових вогнегасних речовин (ГВР) від складу суміші (відсоткових об'ємних часток) біодизельного (БД) і дизельного (ДП) палива [29].

Результати досліджень підтверджують придатність для гасіння дизельного біопалива та його сумішей з дизельним паливом таких ГВР як діоксид вуглецю, азот та галон 2402 (хладон 114B2). Також в ході досліджень визначено мінімальні вогнегасні концентрації та розрахункові витрати досліджуваних ГВР, за яких досягається гасіння зазначених речовин. Встановлено, що зі збільшенням частки дизельного біопалива в суміші мінімальні вогнегасні концентрації як інертних розріджувачів (діоксида вуглецю, азоту), так і інгібітору горіння (галон 2402), дещо знижуються.

У таблиці 9 подано узагальнені результати проведених експериментальних досліджень щодо гасіння дизельного та біодизельного палива традиційно використовуваними вогнегасними речовинами.

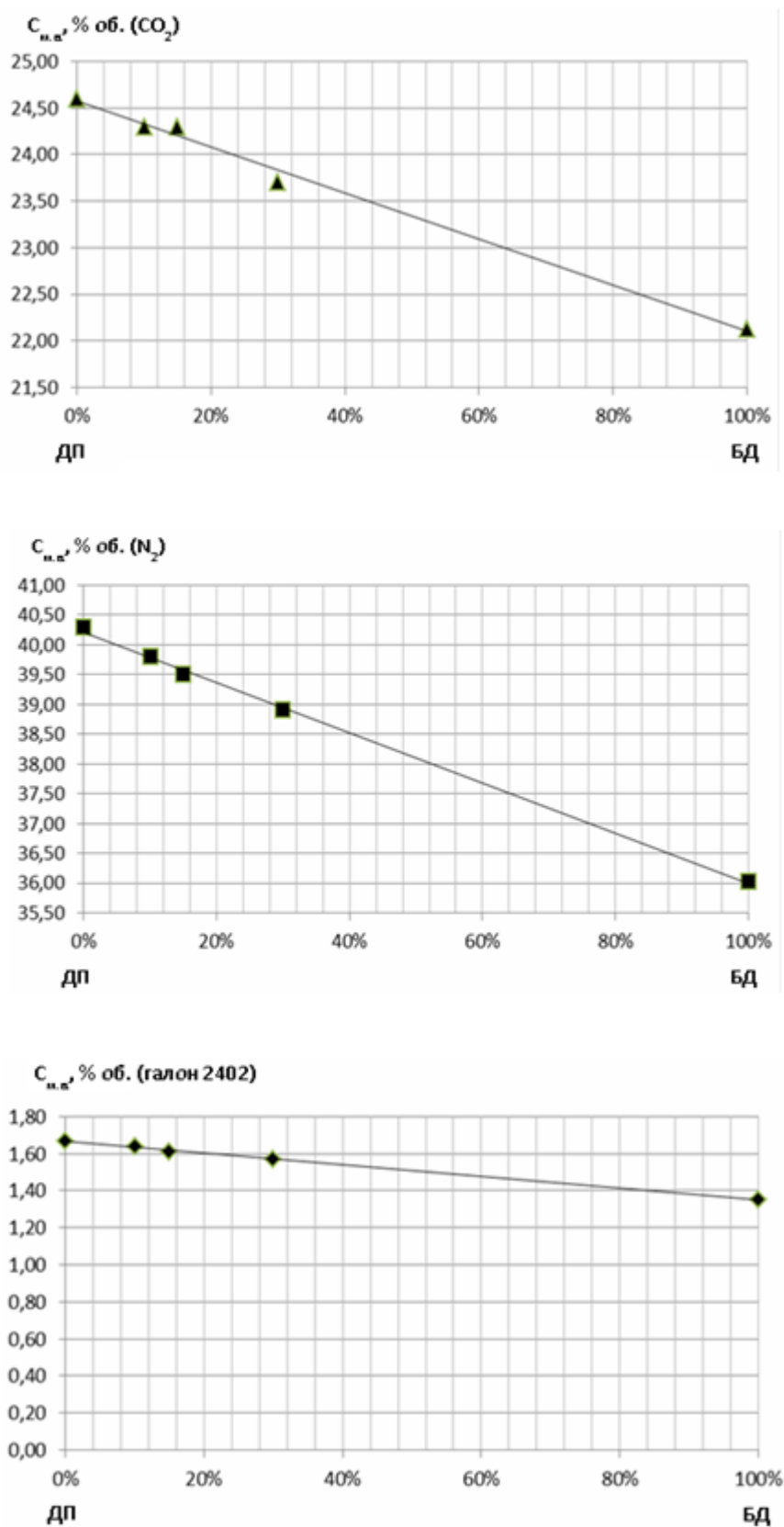


Рис. 5. Залежності мінімальних вогнегасних концентрацій діоксиду вуглецю, азоту та галону 2402 від складу сумішей біодизельного і дизельного палива

Таблиця 9

**Результати експериментальних досліджень щодо параметрів
подавання вогнегасних речовин для припинення горіння
біодизельного та дизельного палива**

Вид вогнегасної речовини (засобу пожежогасіння)	Інтенсивність подавання (витрата)	
	Дизельне паливо	Біодизельне паливо
Піна середньої кратності, генерована з водного розчину піноутворювача загального призначення	0,016 дм ³ /(м ² ·с)	менше ніж 0,018 дм ³ /м ² ·с (гасіння відбувається за рахунок пароутворення)
Піна низької кратності, генерована з водного розчину плівкоутворювального піноутворювача	0,046 дм ³ /(м ² ·с)	менше ніж 0,046 дм ³ /(м ² ·с)
Тонкорозпилена вода (Д _{0,9} від 95 мкм до 145 мкм)	0,31 дм ³ /(м ² ·с)	0,52 дм ³ /(м ² ·с)
5 % водний розчин K ₂ CO ₃	0,013 дм ³ /(м ² ·с)	менше ніж 0,013 дм ³ /(м ² ·с)
0,1 % водний розчин піноутворювача загального призначення	0,015 дм ³ /(м ² ·с)	менше ніж 0,014 дм ³ /(м ² ·с)
Вогнегасний порошок	0,13 кг/(м ² ·с)	0,16 кг/(м ² ·с)
Діоксид вуглецю	0,44 кг/(м ² ·с)	0,40 кг/(м ² ·с)
Азот	0,47 кг/(м ² ·с)	0,42 кг/(м ² ·с)
Галон 2402	0,18 кг/(м ² ·с)	0,15 кг/(м ² ·с)

Висновки. Проведені аналітичні та експериментальні дослідження дали змогу оцінити показники пожежонебезпечності дизельного біопалива (температури спалаху, займання і самозаймання), а також параметри процесів його горіння (швидкість вигорання, температура полум'я) у порівнянні з нафтовим дизельним паливом. Результати цих досліджень показали, що дизельне біопаливо є менш пожежонебезпечним у порівнянні з нафтовим дизельним паливом, але особливістю процесу його горіння є наявність ознак, характерних для процесів нагрівання і горіння жирів рослинного та тваринного походження.

Підтверджено можливість застосування для гасіння дизельного біопалива традиційно використовуваних вогнегасних речовин (робочих розчинів піноутворювачів загального та спеціального призначення, вогнегасних АВС-порошків, газових вогнегасних речовин-інертних

розріджувачів та інгібіторів горіння). Встановлено можливість використання з цією метою тонкорозпиленої води, а також виявлено можливість підвищення ефективності гасіння нею дизельного біопалива та його сумішей з нафтовим дизельним паливом шляхом додавання карбонату калію або піноутворювачів загального або спеціального призначення для гасіння пожеж у відповідних концентраціях. Встановлено, що суміші дизельного біопалива з нафтовим дизельним паливом, що містять перший з названих компонентів у кількості до 30 %, можна гасити повітряно-механічною піною із збереженням традиційно застосовуваних параметрів подавання робочих розчинів піноутворювачів.

Подальші дослідження передбачено спрямувати на обґрунтування (уточнення) нормованих параметрів подавання вогнегасних речовин під час гасіння пожеж на об'єктах з наявністю дизельного біопалива з метою розроблення нормативних документів або рекомендацій щодо протипожежного захисту об'єктів виробництва та зберігання дизельного біопалива, а також гасіння пожеж на них пересувною протипожежною технікою.

Література

1. ДСТУ EN 2:2014 Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT).
2. ГОСТ 27331-87 Пожарная техника. Классификация пожаров.
3. NFPA 17A Standard for Wet Chemical Extinguishing Systems.
4. EN 16282-7 Equipment for commercial kitchens – Components for ventilation in commercial kitchens – Part 7: Installation and use of fixed fire suppression systems.
5. NFPA 36 Standard for Solvent Extraction Plants.
6. NFPA 16 Standard for the Installation of Foam-Water Sprinkler and Foam-Water Spray Systems.

7. URL: <https://prm.ua/pid-odesoyu-masshtabna-pozhezha-na-maslopererobnomu-zavodi-lyudey-evakuyuyut-pershi-video-ta-podrobitsi>.
8. URL: https://espreso.tv/news/2018/11/07/v_odesi_stalasya_masshtabna_pozhezha_na_maslopererobnomu_zavodi.
9. URL: <http://rus.delfi.ee/daily/criminal/foto-spasateli-desyat-chasov-tushili-pozhar-na-zavode-v-antsla?id=69656083>.
10. URL: <https://ru.tsn.ua/auto/video/video-novini/vo-floride-gorit-zavod-po-proizvodstvu-biodizelya.html>.
11. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/1961199-v-ispanii-stavsa-vibuh-na-zavodi-biopaliva-e-zertvi.html>.
12. URL: <https://www.rbc.ua/ukr/news/vzryv-ispanii-zavode-biotopliva-zhertvy-postradavshie-1454768292.html>.
13. ДСТУ 6081:2009 Паливо моторне. Ефіри метилові жирних кислот олій і жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги.
14. ДСТУ 7178:2010 Паливо альтернативне. Естери етилові жирних кислот олій та жирів для дизельних двигунів. Технічні вимоги та методи контролювання.
15. ДСТУ ISO 5509-2002. Жири та олії тваринні і рослинні. Приготування метилових ефірів жирних кислот (ISO 5509:2000, IDT).
16. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D1%96%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%B7%D0%B5%D0%BB%D1%8C>.
17. Скоробагатько Т.М. Шляхи забезпечення протипожежного захисту процесів виробництва рідкого моторного біопалива та об'єктів з його наявністю / Т.М.Скоробагатько, В.О Боровиков, Д.Г Білкун // Науковий вісник. – К.: УкрНДІЦЗ, 2011 – №2 (24). – С. 124-131.
18. Звіт про НДР “Провести дослідження пожежної небезпеки моторного біопалива, процесів його горіння і обґрунтувати тактичні прийоми його гасіння” // УкрНДІПБ МНС України, 2011.

19. ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
20. EN 14214:2003 Automotive fuels – Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines – Requirements and test methods.
21. DIN V 51606 Liquid fuels, diesel fuel of vegetable oil methylester (PME), requirements.
22. ASTM D 6751 Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels.
23. Скоробагатько Т.М. Дослідження параметрів горіння біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом / Т.М.Скоробагатько, С.Ю.Огурцов, І.Г.Стилик, В.С.Бенедюк // К.: Науковий вісник УкрНДІЦЗ, 2015 – №2 (32). – С. 95-100.
24. ДСТУ 4840:2007 Паливо дизельне підвищеної якості. Технічні умови.
25. Білкун Д.Г. Пожежна небезпека дизельного палива та проблемні питання його гасіння / Боровиков В.О., Скоробагатько Т.М. // К.: Науковий вісник УкрНДІПБ, №2 (20), 2009. – С. 52-56.
26. Скоробагатько Т.М. Результати експериментальних досліджень гасіння окремих зразків моторного біопалива та палива моторного сумішевого пінами середньої та низької кратності / Т.М.Скоробагатько, В.О.Боровиков, Д.Г.Білкун // К.: Науковий вісник УкрНДІПБ, 2010 – №2 (22). – С. 142-147.
27. Скоробагатько Т.М. Ефективність гасіння бінарних сумішей дизельного та біодизельного палива тонкорозпиленими водними вогнегасними речовинами / Т.М.Скоробагатько, А.В.Антонов, М.І.Копильний // К.: Науковий вісник УкрНДІЦЗ, 2013 – №1 (27). – С. 92-99.
28. Скоробагатько Т.М. Ефективність гасіння вогнегасним порошком біодизельного палива та його суміші з дизельним паливом /

Т.М.Скоробагатько., М.І.Копильний, І.Г.Маладика // К.: Науковий вісник УкрНДІЦЗ, 2015 – №2 (32). – С. 77-81.

29. Скоробагатько Т.М. Ефективність гасіння деякими газовими вогнегасними речовинами біодизельного палива та його сумішей з дизельним паливом / Т.М.Скоробагатько, М.І.Копильний, В.О.Боровиков // К.: Науковий вісник УкрНДІЦЗ, 2017 – №1 (3). – С. 73-76.