



DOI <https://doi.org/10.32447/20786662.46.2025.01>

В. О. Боровиков¹, О. М. Слуцька², Р. Ю. Сукач³, Д. П. Войтович³

¹ ГО «Українська федерація спеціалістів безпеки»,
м. Київ, Україна

² Національний університет цивільного захисту України,
м. Київ, Україна

³ Львівський державний університет безпеки життєдіяльності,
м. Львів, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6364-2428> – В. О. Боровиков

<https://orcid.org/0000-0003-1723-8181> – О. М. Слуцька

<https://orcid.org/0000-0003-4174-9213> – Р. Ю. Сукач

<https://orcid.org/0000-0002-2280-5585> – Д. П. Войтович

✉ foam2000@gmail.com

ВИКОРИСТАННЯ ПЛІВКОУТВОРЮВАЛЬНИХ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У СВІТЛІ ПОЛОЖЕНЬ СТОКГОЛЬМСЬКОЇ КОНВЕНЦІЇ ПРО СТІЙКІ ОРГАНІЧНІ ЗАБРУДНЮВАЧІ

Проблема. Прийнята 2001 року Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі встановила низку обмежень щодо виробництва і використання численних хімічних речовин, перелік яких розширюється за ступенем внесення змін до неї. До таких речовин належать і численні фторорганічні сполуки, у тому числі частина фторвмісних речовин, використовуваних у рецептурах плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж. Водночас обмеження або заборони щодо їх використання можуть призвести до зниження рівня протипожежного захисту об'єктів з наявністю горючих рідин.

Мета. Метою роботи було визначення кола задач, розв'язання яких забезпечить виконання вимог Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі без зниження рівня протипожежного захисту об'єктів стаціонарними системами пінного пожежогасіння.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження. Аналізуванню піддавали інформацію щодо токсичності фторвмісних та кремнійорганічних ПАР, а також піноутворювачів, їх біологічного розкладання, технологій знешкодження таких речовин та їх видалення з природних середовищ і переходу на безпечніші для довкілля плівкоутворювальні піноутворювачі, подану в наукових публікаціях і нормативних документах.

Основні результати дослідження. Встановлено, що нині плівкоутворювальні піноутворювачі незамінні в системах пожежогасіння «підшаровим» способом. З'ясовано, що наявні і потенційні альтернативи плівкоутворювальним піноутворювачам, що не містять фторорганічних сполук, придатні для використання в інших випадках, можуть бути не менш токсичними і такими, які повільно розкладаються в природних умовах. Виявлено перспективні технології вилучення фторвмісних складників піноутворювачів, що потрапили в природні екосистеми, та їх знешкодження. Обґрунтовано можливість розроблення рецептур плівкоутворювальних піноутворювачів з прийнятними показниками токсичності і здатності до біологічного розкладання.

Висновки. За результатами проведених досліджень показано, що плівкоутворювальні піноутворювачі є найефективнішими засобами гасіння неполярних горючих рідин, а можливість реалізації технології пожежогасіння «підшаровим» способом без їх використання досі не підтверджено. З'ясовано, що показники токсичності і здатності до біологічного розкладання різноманітних фторвмісних хімічних речовин, а також піноутворювачів, в яких вони використовуються, можуть значною мірою різнитися. За результатами проведених аналітичних досліджень виявлено, що швидкість руйнування таких речовин в природних екосистемах суттєво залежить від виду і низки характеристик останніх, а піноутворювачі, що не містять фторорганічних речовин, можуть не бути безпечнішими для довкілля. Також з'ясовано, що у світі розроблено технології ефективного знешкодження залишків плівкоутворюваль-

них піноутворювачів, що потрапили в об'єкти довкілля, та обґрунтовано можливість виконання вимог Стокгольмської конвенції без відмови від плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж.

Ключові слова: біологічне розкладання, гасіння пожеж, знешкодження, мікрофлора, піноутворювач, поверхнево-активна речовина, система пожежогасіння, стійкий органічний забруднювач, токсичність, фторвмісна сполука.

V. O. Borovykov¹, O. M. Slutska², R. Yu. Sukach³, D. P. Voytovych³

*¹Ukrainian Federation of Security Experts,
Kyiv, Ukraine*

*²National University of Civil Protection of Ukraine,
Kyiv, Ukraine*

*³Lviv State University of Life Safety,
Lviv, Ukraine*

USE OF FILM-FORMING FOAMING AGENTS FOR FIRE EXTINGUISHING IN THE LIGHT OF THE PROVISIONS OF THE STOCKHOLM CONVENTION ON PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS

Introduction. The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants which was adopted in 2001 has established a number of restrictions on the production and use of numerous chemicals, the list of which is expanding as amendments are made to it. Such substances include numerous organofluorine compounds, including some of the fluorine-containing substances used in formulations of film-forming foam concentrates for fire-fighting. At the same time, restrictions or bans on their use may lead to a decrease in the level of fire protection of facilities with the presence of flammable liquids.

Purpose. The purpose of the work was to determine the range of the tasks solution of which will ensure compliance with the requirements of the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants without reducing the level of fire protection of facilities with fixed foam fire-fighting systems.

Methods. We conducted desk studies. We analyzed information on the toxicity of fluorinated and organosilicon surfactants as well as foam concentrates, their biodegradation, technologies for neutralizing such substances and removing them from natural environments, as well as the transition to environmentally more sound film-forming foam concentrates being presented in appropriate scientific publications and regulatory documents.

Results. We established that film-forming foam concentrates were indispensable at present in fire-fighting systems employing the “subsurface” application method. It was found that existing and potential alternatives to film-forming foam concentrates containing no organofluoride compounds, suitable for use in other cases, might be no less toxic and be slowly degraded in natural conditions. Promising technologies for the extraction of fluorinated components of foam concentrates that have entered natural ecosystems and their disposal have been identified. The possibility of developing formulations of film-forming foam concentrates with acceptable toxicity and biodegradability performance was substantiated.

Conclusion. The results of the research having been conducted show that film-forming foam concentrates are the most efficient means of quenching non-polar flammable liquids, and the possibility of implementing “subsurface” application technology of fire-fighting without their use has not been confirmed so far. It was found that the toxicity and biodegradability performance of various fluorinated chemicals, as well as foam concentrates in which they are used, could differ significantly. It was revealed as result of desk studies having been conducted that the rate of degradation of such substances in natural ecosystems significantly depended on the type and a number of characteristics of the latter, but foam concentrates that do not contain organofluoride substances might not be more environmentally sound. We also revealed that a number of technologies were developed in the world for efficacious neutralization of residues of film-forming foam concentrates that have entered environmental objects, and the possibility of fulfilling the requirements of the Stockholm Convention without abandoning film-forming foam concentrates for fire-fighting has been substantiated.

Key words: biodegradation, fire-fighting, neutralization, microflora, foam concentrate, surfactant, fire-fighting system, persistent organic pollutant, toxicity, fluorinated compound

Постановка проблеми. Як відомо, основним засобом гасіння пожеж на об'єктах видобування та переробляння нафти, а також зберігання нафти і нафтопродуктів є піна. З часів появи ідеї щодо гасіння горючих рідин піною та перших спроб її реалізації як самі речовини, з яких отримували

піну, так і способи її одержання подолали тривалий шлях еволюції і зазнали низки принципових змін. Способи генерування піни в результаті перебігу хімічних реакцій і спінювання відповідних водних розчинів залишилися в минулому, натомість повсюдного застосування набуло генерування

повітряно-механічної піни з робочих розчинів піноутворювачів – концентратів, що складаються з поверхнево-активних речовин (ПАР), функціональних добавок і води [1]. До всіх типів піноутворювачів для гасіння пожеж, передбачених класифікацією [2–4], останніми роками додали водопінні вогнегасні речовини, які позначають як “F3” – це піноутворювачі, які розраховано на забезпечення відповідності класам за вогнегасною ефективністю і цільове застосування, подібне до піноутворювачів типів AFFF і (або) AR, без використання фторорганічних сполук. Основою цих піноутворювачів є суміші вуглеводневих ПАР і стабілізаторів, що не містять атомів фтору.

Як відомо, відомі типи піноутворювачів відрізняються перш за все хімічною природою поверхнево-активної основи і, відповідно, технологіями виробництва. Різна хімічна природа їхньої основи зумовлює суттєві відмінності у фізико-хімічних та реологічних властивостях таких піноутворювачів та їх робочих розчинів, отже, їх придатності для генерування піни низької та/або середньої та/або високої кратності з використанням тих чи інших технічних засобів. Не дивно, що й сама піна характеризується розмаїттям особливостей залежно від використовуваного піноутворювача і застосовуваних технологій та обладнання для її генерування. Відповідно, переважні сфери застосування піноутворювачів різних типів також значною мірою відрізняються.

Отже, для генерування піни в усіх випадках використовуються піноутворювачі з вмістом ПАР, більшість яких у природі не зустрічаються. Це стосується синтетичних вуглеводневих, фторвмісних ПАР, кремнійорганічних сполук і навіть ПАР, що є основою протеїнових піноутворювачів та виготовляються із сировини природного походження. Очевидно, що будь-яка хімічна речовина, тим більше така, що не зустрічається в природі, може характеризуватися високою стійкістю в об'єктах довкілля, водночас справляючи шкідливий вплив на живі організми. Чи не найбільше проблем пов'язано з плівкоутворювальними піноутворювачами, які містять (можуть містити) фторвмісні сполуки, що регулюються Стокгольмською конвенцією про стійкі органічні забруднювачі (СОЗ) [5], ратифікованою, зокрема, Україною (Закон України від 18 квітня 2007 року).

До прийняття 2001 року Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі (Persistent Organic Pollutants – POPs), а також низки подальших змін до неї спонукало усвідомлення того, яку небезпеку являє собою велика кількість органічних сполук, що мають високі показники токсичності та хімічної стійкості, для довкілля та людини. Ця Конвенція стала однією з міжнародних угод, спрямованих на послаблення антропогенного впливу на довкілля. До початкового списку регульованих нею речовин входила низка високотоксичних пестицидів (ДДТ, хлордан, токсафен тощо), поліхлоровані біфеніли, а також поліхлоровані дібензодіоксини та дібензофурані. В подальшому список СОЗ, виробництво і використання яких регулюється Стокгольмською конвенцією (зокрема, додатками А, В до неї), неодноразово доповнювався, в ньому з'явилися деякі фторвмісні сполуки, а обмеження щодо використання стійких органічних забруднювачів з часом ставали все жорсткішими. Серед цих сполук розрізняють поліфторовані (тобто такі, в яких частину атомів гідрогену (водню), зв'язаних з атомами карбону (вуглецю), заміщено атомами флуору (фтору)), і перфторовані (тобто такі, в яких атомами флуору (фтору) заміщено всі атоми гідрогену (водню)). Саме перфторовані сполуки мають найвищу стійкість, і використання частини з них обмежене або заборонене Стокгольмською конвенцією.

Наприклад, серед таких речовин наразі є перфтороктансульфонова кислота (рис. 1 (а)) включно з ізомерами, її похідні, а також сполуки, в результаті руйнування яких названі речовини утворюються. Конвенцією заборонено як виробництво, так і використання таких речовин. Щодо перфтороктанової кислоти (рис. 1 (б)), її ізомерів та похідних, які донедавна повсюдно використовувалися в рецептурах плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж, то їх виробництво для використання у складі водопінних вогнегасних речовин наразі заборонено, натомість використання наявних запасів з дотриманням установлених обмежень сьогодні дозволено.

Обмеження і навіть заборона на використання та/або виробництво багатьох таких речовин спричинили спроби створити замінники плівкоутворювальних піноутворювачів, що не містять таких сполук (зокрема, піноутворювачів типу F3).

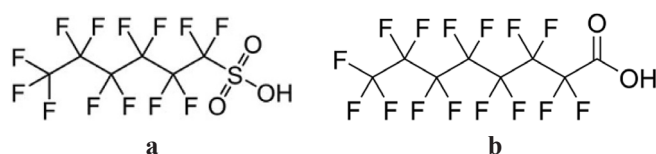


Рис. 1. Структурні формули молекул перфторгексансульфонової (а) і перфтороктанової (б) кислот

Натомість залишається відкритим питання, чи застосовні такі замітники в пожежогасінні повсюдно.

Також актуальними є питання, пов'язані з оцінюванням впливу синтетичних фторвмісних сполук, якими забруднено об'єкти довкілля, на живі організми, і пошуком шляхів видалення таких забруднень. Не менший інтерес являє собою пошук більш безпечних фторорганічних ПАР, придатних для використання у складі плівкоутворювальних піноутворювачів. Можна очікувати, що винайдення таких альтернатив, а також розроблення ефективних методів знешкодження небезпечних фторвмісних складників плівкоутворювальних піноутворювачів, які потрапили в об'єкти довкілля, дадуть змогу не посилювати обмеження/не встановлювати заборони щодо використання відповідних ПАР у рецептурах піноутворювачів під час внесення подальших змін і доповнень до Стокгольмської конвенції. В такому разі можна буде й надалі реалізовувати всі переваги, які забезпечує застосування плівкоутворювальних піноутворювачів у пожежогасінні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Відомо, що гасіння горючих рідин піною відбувається переважно за рахунок ізолювання їхніх поверхонь від кисню повітря, а також охолодження поверхневих, а іноді й глибинних шарів горючих рідин. Завдяки такому ізолюванню інтенсивність дифузії горючих парів у газову фазу значною мірою знижується, в результаті чого вона збіднюється на горючі речовини. Як наслідок, за належних інтенсивності, способу і тривалості подавання піни горіння рідини припиняється. Водночас, потрапляючи на поверхню горючої рідини, піна руйнується не тільки через надлишкову енергію її як дисперсної системи, але й під впливом самої горючої рідини (десорбції молекул ПАР з пінних плівок, їх контактного втягування в об'єм рідини), а також унаслідок теплового впливу (нагрівання під час контактування з горючою рідиною, теплового випромінювання полум'я тощо). Внесок кожного з цих чинників залежить від природи і хімічного складу горючої рідини, її кількості і тривалості вільного горіння, різновиду піноутворювача, обладнання, використовуваного для генерування і подавання піни, та інших параметрів.

Гасіння горючої рідини піною теоретично можливе, якщо швидкість надходження піни на палаючу поверхню ($\text{дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) перевищує швидкість її руйнування, а тривалість подавання піни достатня для ізолювання та (або) охолодження горючої рідини такою мірою, щоб забезпечувалося припинення її горіння. На практиці ж гасіння

горючих рідин навіть за дуже високої інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача (питомої витрати піни) може бути неможливим через наявність перешкод для покриття піною всією поверхнею рідини. Доволі типовими прикладами є часткове занурення стаціонарних покрівель резервуарів у рідину через їх пошкодження вибухами, з яких зазвичай починаються пожежі на таких об'єктах. В результаті утворюються закриті зони з незалежним від основної маси рідин тепло- і масообміном, подати піну в які традиційними способами або без вжиття додаткових і вкрай небезпечних заходів не вдається. Чи не складнішими можуть бути випадки, коли через тривале горіння нафти (нафтопродукту) відбувається затоплення понтону або плаваючої покрівлі резервуарів, які ними споряджено [1; 6].

Свого часу справжній прорив у пінному пожежогасінні стався з появою плівкоутворювальних піноутворювачів (класів AFFF та FFFP, про які вже йшлося вище). За наявними даними [1], винахідником перших зразків таких вогнегасних речовин була компанія «3М» (США), яка також першою синтезувала фторвмісні ПАР – речовини, що пізніше набули повсюдного застосування в різноманітних галузях, і ввела їх до рецептур піноутворювачів. На відміну від решти видів ПАР, фторвмісні сполуки здатні знижувати поверхневий натяг водних розчинів до значень, нижчих за поверхневий натяг вуглеводнів. За таких умов виникає термодинамічна можливість утворення тонкої (товщиною до приблизно 40 мкм) водної плівки, що формується під час руйнування піни на поверхні вуглеводневої рідини [1; 7; 8]. Така плівка, постійно оновлюючись у процесі поступового руйнування піни, ізолює поверхню горючої рідини, охолоджує її та пригнічує випаровування рідини. В результаті досягається не тільки припинення горіння, але й захист рідини від повторного запалювання під впливом теплового випромінювання від нагрітих будівельних конструкцій.

Дані щодо порівняльної вогнегасної ефективності та ізолювальної здатності піни, генерованої з робочих розчинів сучасних піноутворювачів різних типів, подано в табл. 1. І клас у цій таблиці відповідає найвищій, III клас – найнижчій вогнегасній ефективності піни. Аналогічно рівень А означає найвищий опір піни повторному запалюванню рідини, а рівень С – найнижчий рівень цього опору.

Легко побачити, що плівкоутворювальні (як фторсинтетичні, так і фторпротеїнові) піноутворювачі характеризуються найвищою вогнегасною ефективністю. Більш того, аналізування технічних описів, складених виробниками численних

Типові показники вогнегасної ефективності та ізолювальної здатності піни, генерованої з робочих розчинів піноутворювачів, під час гасіння вуглеводневих рідин (за даними [2])

Тип піноутворювача	Клас за вогнегасною ефективністю	Рівень опору повторному запалюванню	Плівкоутворювальна здатність
AFFF (не AR)	I	C	Наявна
AFFF (AR)	I	A або B	Наявна
FFFP (не AR)	I	B	Наявна
FFFP (AR)	I	A або B	Наявна
FP (не AR)	II	A або B	Відсутня
FP (AR)	II	A або B	Відсутня
P (не AR)	III	B	Відсутня
P (AR)	III	B	Відсутня
S (не AR)	III	C	Відсутня
S (AR)	III	C	Відсутня
F3 (не AR)	I або II	C	Відсутня
F3 (AR)	I або II	B/C	Відсутня

піноутворювачів, а також результати експериментальних досліджень, проведених авторами, свідчать про існування великої кількості піноутворювачів класу AFFF, що характеризуються найвищим (A, а не B і тим більше не C) рівнем опору повторному запалюванню. Це наводить на думку про можливу друкарську помилку, припущену в європейських нормах, на основі яких прийнято серію національних стандартів [2].

З цієї таблиці також видно, що піна, генерована з робочих розчинів «спиртостійких» піноутворювачів, за інших однакових умов у середньому ефективніша за піну, генеровану з піноутворювачів тієї самої хімічної природи, які для гасіння полярних рідин непридатні. Це пояснюється додатковою стабілізацією пінних шарів і водних плівок водорозчинними полімерами з тікостропними властивостями, що зазвичай використовуються у складі «спиртостійких» піноутворювачів [1; 7; 8].

Плівкоутворювальні піноутворювачі зазвичай використовують для гасіння саме горючих рідин, генеруючи з їх робочих розчинів піну низької кратності [9; 10]. Наявність плівкоутворювальної здатності в таких розчинів зумовлює відносно слабке контактне втягування і, відповідно, змішування та забруднення одержаної з них піни вуглеводневими рідинами. З цієї причини «плівкоутворювальна» піна характеризується найвищою вогнегасною ефективністю. Саме це свого часу спонукало дослідників здійснити спроби її подавання на гасіння не тільки з нанесенням на поверхню горючої рідини, але й з нагнітанням піни безпосередньо в шар нафти (нафтопродукту) через технологічні трубопроводи резервуарів або так звані пінопроводи. Такий спосіб, що виявився успішним, назвали підшаровим.

Спливаючи крізь шар неполярної горючої рідини, піна, одержана з робочих розчинів

плівкоутворювальних піноутворювачів, відносно слабо забруднюється вуглеводнями та зберігає вогнегасну ефективність. Надалі відбувається розтікання піни поверхнею палаючої рідини з її покриванням пінним шаром і подальшим гасінням. Введення піни «підшаровим» способом дає змогу подати її навіть у закриті зони, що утворилися через пошкодження конструкцій резервуара внаслідок пожежі, і забезпечити припинення горіння. Такий спосіб гасіння пожеж у резервуарах безпечніший за гасіння «поверхневим» способом, виключає можливість пошкодження обладнання системи пожежогасіння вибухами та полум'ям, а також унеможливорює винос піни за межі резервуара вітром і конвекційними потоками продуктів згорання (що може бути у разі застосування лафетних стволів).

З іншого боку, застосовність «підшарового» способу гасіння пожеж у резервуарах обмежена. Так, чинні в Європі норми, прийняті в Україні як ДСТУ EN 13565-2 [9], прямо забороняють використання задля цього піноутворювачів, що не мають плівкоутворювальних властивостей. Це зумовлено високою інтенсивністю змішування піни, одержаної з їх робочих розчинів, з вуглеводневими рідинами. Крім того, чинні норми [9] забороняють (п. 5.2.4) застосування «підшарового» способу для гасіння полярних горючих рідин (спиртів, кетонів, деяких сумішевих розчинників тощо), як неполярних горючих рідин з температурою спалаху нижче +25 °C і точкою кипіння нижче за +40 °C. Фактично це означає можливість гасіння «підшаровим» способом більшості сортів нафти і темних нафтопродуктів та неможливість гасіння таким чином, наприклад, автомобільного бензину і деяких сортів дизельного та іншого палива. Річ у тім, що струмені піни, що піднімаються крізь шар горючої рідини, неодмінно

виносять певну кількість цієї рідини на поверхню, а буруни, що утворюються в цей час на ній, не дають змоги покрити горючу рідину шаром піни належної товщини, за якої можливе припинення горіння. І якщо важку нафту та нафтопродукти з температурою спалаху вище $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ і точкою кипіння вище за $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ для гасіння достатньо охолодити піною до температури довкілля, то в разі легких нафти та нафтопродуктів досягти цього за подавання піни «підшаровим» способом практично неможливо.

Спроби застосування для гасіння «підшаровим» способом звичайних вуглеводневих піноутворювачів тривають. Певні успіхи, досягнуті в лабораторних умовах, описано в дисертаційній роботі [11]. Зокрема, в результаті експериментів встановлено, що подавати робочі розчини таких піноутворювачів на гасіння «підшаровим» способом необхідно з інтенсивністю не нижче ніж $0,135\text{ л/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Натомість чинні у США і Канаді норми NFPA 11 [10] забороняють введення піни під шар горючих рідин за інтенсивності подавання робочого розчину піноутворювача більше ніж $0,14\text{ л/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$. Це зумовлено надмірною турбулізацією потоків і створенням умов, не сприятливих для припинення горіння рідини (навіть у разі використання плівкоутворювальних піноутворювачів). Як видно, ці дві величини практично збігаються. Натурні випробування з використанням синтетичних піноутворювачів та реалізацією пропонованих параметрів не проводили, що зумовлює відсутність належних підстав для ствердних висновків про можливість застосування піноутворювачів, що не мають плівкоутворювальних властивостей, для гасіння горючих рідин «підшаровим» способом. Іншими словами, необхідні подальші дослідження. Жодних результатів, які б спростовували вищезгадані заборони щодо використання вуглеводневих піноутворювачів для гасіння «підшаровим» способом, в інших літературних джерелах також не знайдено.

На підставі викладених фактів можна стверджувати, що плівкоутворювальні піноутворювачі (звичайні або «спиртостійкі») сьогодні, безумовно, є найефективнішими засобами гасіння неполярних горючих рідин (здебільшого нафти і нафтопродуктів), що зберігаються в резервуарах, як «поверхневим», так і «підшаровим» способом. Решта видів піноутворювачів для гасіння «поверхневим» (і, можливо, «напівпідшаровим») способом також придатні, але вони здебільшого менш ефективні. Одержані досі дані не дають підстав для ствердних висновків про можливість застосування піноутворювачів, що не мають плівкоутворювальних властивостей, для гасіння горючих

рідин «підшаровим» способом. Нарешті, авторам цієї роботи не доводилося бачити жодного технічного опису жодного піноутворювача, що не має плівкоутворювальних властивостей, в якому його виробник декларував би (як це передбачають норми [2; 9]) придатність такого піноутворювача для гасіння рідин «підшаровим» способом. Відповідно, до нормативного врегулювання зазначеного питання можна буде вдатися тільки у разі належного експериментального підтвердження придатності піноутворювачів, які не мають плівкоутворювальних властивостей, для гасіння «підшаровим» способом.

Іншими словами, альтернативи плівкоутворювальним піноутворювачам під час гасіння горючих рідин «підшаровим» способом наразі не існує, а їх гасіння «поверхневим» способом із застосуванням піноутворювачів, що не мають плівкоутворювальних властивостей, може бути менш ефективним. Як вже зазначалося, однією з переваг «підшарового» способу гасіння є можливість гасіння пожеж в резервуарах за наявності зон з незалежним від основної маси рідин тепло-і масообміном, гасіння яких подаванням піни безпосередньо на поверхню рідини вкрай складне або навіть неможливе. Отже, повна відмова від плівкоутворювальних піноутворювачів наразі якщо й можлива, то однаково пов'язана з негативними наслідками для ефективності протипожежного захисту деяких об'єктів. Тому актуальними залишаються питання, пов'язані з усіма аспектами мінімізації шкідливого впливу плівкоутворювальних піноутворювачів на довкілля задля забезпечення можливості їх подальшого використання в пожежогасінні.

З огляду на викладене **метою роботи** було визначення кола задач, розв'язання яких забезпечить виконання вимог Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі без зниження рівня протипожежного захисту об'єктів стаціонарними системами пінного пожежогасіння.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети проводили теоретичні дослідження. Аналізуванню піддавали інформацію щодо токсичності фторвмісних та кремнійорганічних ПАР, а також піноутворювачів, їх біологічного розкладання, технологій знешкодження таких речовин та їх видалення з природних середовищ, а також переходу на безпечніші для довкілля плівкоутворювальні піноутворювачі, подану в наукових публікаціях і нормативних документах.

Результати роботи. Цілком очевидно, що очікувати послаблення вимог Стокгольмської конвенції навряд чи варто. Отже, за інших однакових умов доцільно принаймні розглядати питання

щодо можливої відмови від піноутворювачів, що містять фторвмісні ПАР (особливо у випадках, коли вони не мають плівкоутворювальних властивостей). Така відмова передбачає перехід на використання вогнегасних речовин, які не мають у своєму складі хімічних речовин, що регулюються зазначеною Конвенцією, в ідеалі – піноутворювачів, які не містять жодних фторвмісних сполук. Залежно від передбачуваної сфери застосування, це можуть бути як плівкоутворювальні (AFFF, FFFP) піноутворювачі, так і піноутворювачі, що не містять фторвмісних сполук (в тому числі, типу F3), тобто такі, які розраховано на забезпечення відповідності класам за вогнегасною ефективністю і цільове застосування, подібне до піноутворювачів типів AFFF і (або) AR [2]. Як вже зазначалося, такі вогнегасні речовини не містять фторорганічних (як поліфторованих, так і перфторованих) хімічних речовин органічної природи, які в науково-технічній літературі зазвичай позначають збиральною аббревіатурою “PFAS”. Залишається зазначити, що інформацію щодо переліку складників піноутворювачів для гасіння пожеж, а також небезпечності цих складників наводять їхні виробники в паспортах безпечності (Material Safety Data Sheet – MSDS), вимоги щодо яких в Україні регламентовано стандартом [12].

Висока хімічна стійкість фторвмісних органічних хімічних сполук зумовлює можливість їх тривалого існування в природних екосистемах та переміщення на великі відстані. Так, наприклад, гасіння пожеж із застосуванням плівкоутворювальних піноутворювачів може призводити до надходження фторвмісних речовин в системи каналізації, водойми та ґрунтові води, а також ґрунти. В подальшому ці речовини можуть виявлятися на значній віддалі від місця первинного надходження в об'єкти довкілля в ґрунтах і водоймах (зокрема, у донних відкладах водойм), в тому числі в джерелах господарсько-питного водопостачання [13]. Аналогічні дані наводять автори роботи [14]. Крім того, в дослідженні [15] виявлено високу забрудненість ґрунтів на тренувальному полігоні навіть через 15 років після припинення навчань з використанням фторсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів. Цілковито природно, що наявність поверхнево-активних властивостей може зумовлювати адсорбцію таких речовин на ґрунтах, різноманітних речовинах і матеріалах, а також технологічному обладнанні (в тому числі, на очисних спорудах). Відповідно, наявність високих концентрацій фторвмісних речовин у ґрунтах на цьому полігоні дивними не здається.

Також варто зазначити, що фторвмісні ПАР можуть залишатися у великих кількостях

і в трубопроводах стаціонарних систем пожежогасіння після заміни плівкоутворювального піноутворювача іншою вогнегасною речовиною [16]. Тоді промивання системи може бути недостатнім, і для практично повного видалення залишків фторвмісних ПАР можуть знадобитися спеціальні мийні засоби, оброблення лужними розчинами і температурні впливи. Подібні маніпуляції необхідні задля уникнення забруднення нового піноутворювача (зазвичай класу F3) залишками старого піноутворювача класу AFFF, яке може супроводжуватися зниженням показників вогнегасної ефективності нової вогнегасної речовини [16]. Водночас промивання стаціонарної системи пожежогасіння неодмінно супроводжуватиметься утворенням значної кількості рідких відходів, які також потребуватимуть знешкодження.

Серед численних наукових робіт, присвячених дослідженню забруднення довкілля фторвмісними ПАР, варто назвати дослідження [17], у якому йдеться про біологічне перетворення однієї з фторвмісних речовин (фтортеломерного спирту), що використовується у складів синтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів, в аеробних (з доступом кисню повітря) умовах після забруднення нею ґрунтів. Актуальність досліджень автори мотивують тим, що фторвмісні речовини антропогенного походження виявляють навіть в атмосферному повітрі. Крім того, відзначено їх накопичення в очисних спорудах, зокрема в активному мулі, очищених стічних водах, що скидаються з них, донних відкладах водойм і, звичайно ж, у надлишковому мулі, який періодично видаляють з очисних споруд з подальшим розміщенням на полях фільтрації, відповідних полігонах, могильниках чи звалищах. Водночас у результаті експериментів встановлено можливість доволі швидкого розкладання дослідженої речовини аборигенною мікрофлорою ґрунтів. Відповідно, автори з'ясували складність руйнування дослідженої фторвмісної речовини на біологічних очисних спорудах, а також отримали нові дані про можливість її руйнування певними видами ґрунтової мікрофлори. Ці дані можуть стати корисними під час подальших прикладних досліджень, спрямованих на розроблення технологій знешкодження подібних сполук в об'єктах довкілля.

Високу стійкість синтетичних фторвмісних речовин в природних умовах можна пояснити насамперед високою енергією міжатомного зв'язку C–F. Додатково до повільного біологічного розкладання такі сполуки характеризуються доволі високою гострою токсичністю і здатністю накопичуватися в тканинах живих організмів. Так, наприклад, у роботі [18] підвищений вміст

відповідних речовин у сироватці крові виявлено в працівників пожежно-рятувальних підрозділів, які тривалий час гасили пожежі із застосуванням плівкоутворювальних піноутворювачів. Автори [19] досліджували вплив окремих плівкоутворювальних піноутворювачів на ріпчасту цибулю. В результаті досліджень було виявлено цито- та генотоксичні впливи, а також збільшення кількості хромосомних аберацій.

У роботі [20] проводили дослідження задля оцінювання токсикологічного впливу фторсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів на рибу породи *поеліція сімчаста*, виявлення пошкоджень молекул ДНК у їхніх клітинах, а також оцінювання ступеня пероксидного окислення ліпідів в організмах риби. Авторами було виявлено, що токсичність піноутворювачів різних марок значною мірою відрізняється, проте в усіх випадках переважаючим чинником є гострий токсикологічний вплив, що призводить до пошкодження клітинних мембран, тоді як решта ефектів майже відсутня. Незважаючи на суттєву різницю в токсичності, усі досліджені піноутворювачі охарактеризовано як такі, що спричиняють загибель риби в концентраціях, значно нижчих за ті, що рекомендовані виробниками до застосування під час гасіння пожеж. Характерно, що поштовхом для цієї роботи стала пожежа в порту Сантос (Бразилія), внаслідок якої та гасіння якої сталося значне забруднення акваторії горючими речовинами та плівкоутворювальними піноутворювачами, що супроводжувалося масовим мором риби.

Крім експериментальних досліджень, автори [20] проаналізували відповідну літературу і з'ясували, що станом на 2017 рік серед складників плівкоутворювальних піноутворювачів були відомі 57 фторвмісних речовин, 40 з яких повільно розкладаються у природних умовах. Більше того, в результаті руйнування таких речовин в об'єктах довкілля утворюється понад 100 вторинних небезпечних хімічних сполук. Автори роботи дійшли висновку, що фторсинтетичні піноутворювачі загалом можуть завдавати суттєвої шкоди об'єктам довкілля, особливо у разі надходження в гірла річок і морські середовища.

Водночас роботу [21], в якій як піддослідну рослину використовували ріпу городню, присвячено оцінюванню токсичності замінників піноутворювачів типу AFFF. Актуальність досліджень вмотивовано фактичною відсутністю даних щодо шкідливого впливу піноутворювачів типу F3 на живі організми і довкілля загалом. Для досліджень використано 6 зразків речовин, що не містять атомів фтору, та 1 зразок речовини, що містить їх. З'ясувалося, що п'ять з шести таких

речовин виявилися більш токсичними для рослин, ніж використана для досліджень фторвмісна речовина, а їхній шкідливий вплив відображався як на вегетації, так і на розмноженні ріпи городньої. У повній кореляції з більш високою токсичністю в надземних тканинах рослин було виявлено більшу кількість метаболітів п'яти більш токсичних речовин, ніж у разі двох безпечніших препаратів.

Серед найважливіших результатів, одержаних дослідниками у зазначеній роботі, варто згадати окремі відомості, виявлені ними в результаті літературного пошуку. Зокрема, наведено дані, які свідчать про нижчу за інших однакових умов токсичність перфторованих речовин з більш коротким вуглецевим ланцюгом, проте стійкість таких сполук у природних умовах залишається такою самою високою. Також автори зазначають практичну відсутність даних щодо токсичності піноутворювачів типу F3 як замінників AFFF.

Отже, відсутність фторвмісних сполук у піноутворювачі загалом не є свідченням його нижчої токсичності і меншої небезпечності для довкілля. Автори іншої роботи [22] зазначають, що як поверхнево-активна основа піноутворювачів типу F3 можуть використовуватися кремнійорганічні ПАР, які також є такими, що не зустрічаються в природі, хімічними речовинами. Вони також можуть бути токсичними та/або біологічно «жорсткими» (тобто такими, які повільно розкладаються під впливом мікрофлори водойм і ґрунтів).

Цінну інформацію щодо розкладання фторорганічних сполук у природних умовах наведено в роботі [23]. Об'єктом досліджень була та сама хімічна речовина, яку розглядали у статті [17]. Автори систематизували результати проведених раніше досліджень з оцінювання швидкості її руйнування чистими і такими, якими населено активний мул, біологічних очисних споруд, бактеріальними культурами, мікрофлорою річкових відкладів, мулу заболочених місць, фільтрату сміттєзвалищ, а також ґрунтів. З'ясувалося, що швидкість руйнування шкідливої речовини в різних середовищах різко відрізняється. Так, наприклад, період до розкладання половини її кількості становив 5 діб для річкових донних відкладів, 86 діб у фільтраті сміттєзвалищ і 2 роки в активному мулі біологічних очисних споруд. Використана у згаданих дослідженнях чиста бактеріальна культура забезпечила розкладання понад 99 % фторвмісної речовини упродовж лише 7 діб за наявності обмеженої кількості сполук сірки, тоді як за наявності сульфатів біологічне розкладання цієї речовини не відбувалося взагалі. Виявлені авторами факти дали змогу дійти висновку, що

декларована виробниками безпечність тих чи інших препаратів для довкілля насправді може бути не цілком коректною, оскільки вона визначається умовами їх перебування в природних екосистемах. На вкрай низьку швидкість розкладання фторвмісних органічних речовин у біологічних очисних спорудах вказують також автори публікації [24], які з'ясували це в результаті аналітичних досліджень.

Автори [25] вивчали процеси біологічного розкладання низки фторвмісних сполук, а також піноутворювачів, які містять такі сполуки, у стічних водах, застосовуючи для цього ті самі методи, якими оцінюють здатність звичайних синтетичних ПАР до біологічного розкладання. З'ясувалося, що за таких умов усі три досліджені зразки піноутворювачів відповідають установленим методикою критеріям віднесення до біологічно «м'яких» речовин, оскільки ступінь їх розкладання у 28-добовому циклі дослідження становив від 77 % до 96 %. Натомість зазначено, що обсяги утворення в результаті перебігу цих процесів органічних речовин, що не містять атомів фтору, набагато нижчі за очікувані, тобто хімічні зв'язки C–F руйнуються не повністю і багато метаболітів фторвмісних ПАР однаково залишаються фторвмісними органічними речовинами.

Доволі висока токсичність і відносно низька здатність до біологічного розкладання численних фторорганічних сполук, у тому числі складників плівкоутворювальних піноутворювачів, не могли не стимулювати спроб штучного прискорення їх руйнування. Так, наприклад, у роботі [26] досліджували можливість зниження концентрації двох широко використовуваних фторвмісних сполук, а також одного зразка плівкоутворювального піноутворювача в піску, забрудненому ними, подрібненням цього піску в кульковому млині, в тому числі з попереднім додаванням до піску калію гідроксиду (KOH). Такими сполуками були перфтороктанова (PFOA) і перфтороктансульфонові (PFOS) кислоти, які, за даними авторів, найчастіше зустрічаються в рецептурах плівкоутворювальних піноутворювачів для гасіння пожеж. З'ясовано, що додавання цієї речовини сприяє перебігу процесу, але навіть без неї оброблення в кульковому млині дає змогу зруйнувати до 98–99 % забруднювачів. З'ясовано, що наявність води знижує глибину перетворення, а сам факт руйнування фторорганічних сполук пояснено їхньою взаємодією з хімічно активними частинками, що утворюються під час подрібнення піску в кульковому млині.

У статті [27] викладено результати досліджень процесів руйнування речовин, що утворюються

під час розкладання піноутворювачів на основі двох щойно названих перфторованих кислот, а також інших фторвмісних сполук, використовуваних у промисловості, під час піролізу. В результаті їх проведення з'ясовано, що вже за відносно невисоких температур формується близько 30 сполук, що не містять атомів фтору (двоатомні спирти, прості ефіри тощо). В умовах піролізу за більш високих температур виявлено утворення гетероциклічних сполук з атомами кисню та азоту. Загалом з'ясовано, що найменша кількість подібних шкідливих речовин утворюється за температури +890 °C, яка відповідала верхній межі діапазону, в якому проводили дослідження.

Автори [28] для вилучення PFAS із забруднених ними ґрунтів запропонували використовувати намагнічене активоване вугілля. Проводити його намагнічування запропонували задля вилучення з обробленого ґрунту найбільш активованого вугілля після його насичення фторорганічними сполуками, оскільки вони після зв'язування адсорбентом можуть зберігати здатність до відновлення рухливості з поверненням у субстрат, з якого їх було видалено сорбцією в умовах тривалого перебування активованого вугілля в ґрунті. Установлено, що такий процес дає змогу знизити концентрацію забруднювачів на більш ніж 80 % за умови, що вміст води в ґрунті не перевищує 7 % за масою. Знешкодження ж речовин, адсорбованих активованим вугіллям, після його магнітної сепарації запропоновано здійснювати гідротермічним обробленням.

Доволі оригінальний спосіб очищення ґрунтів від забруднення PFAS, а також фторсинтетичними плівкоутворювальними піноутворювачами запропонували автори [29]. Він полягає в нагріванні забрудненого ґрунту високочастотним випромінюванням і являє собою, за їхніми твердженнями, нову енергоефективну технологію видалення забруднювачів, яка дає змогу швидко й ефективно вилучати фтормісні речовини з ґрунту незалежно від типів як самого цього ґрунту, так і забруднювача. Зазначено швидке і практично повне (понад 99,9 %) розкладання PFAS з коротким і довгим вуглецевим ланцюгом, речовин, використовуваних для синтезу цих сполук, та інших речовин упродовж 1–2 хвилин перебігу процесу. Більше того, концентрація забруднювачів у ґрунті, а також тип самого ґрунту майже не впливала на повноту перетворення. Проміжних продуктів розкладання фторорганічних сполук в обробленому ґрунті розробники методу не виявили, а ризики надходження первинних фторованих сполук в атмосферу через швидкий перебіг процесу також оцінено як мінімальні.

У тій самій роботі також наведено короткий огляд відомих методів очищення ґрунтів від органічних сполук, і зазначено, що не всі вони придатні для вилучення з ґрунтів саме фторвмісних речовин. Зазначено, що такий метод, як зняття шару забрудненого ґрунту з його вивозом на звалище хімічних відходів, хоча й дає змогу здійснити рекультивацію забруднених ділянок, однаково не забезпечує руйнування забруднювачів, а передбачає лише їх переміщення. До того ж подібні операції пов'язані як з великими витратами, так і з небезпекою втрати частини забрудненого ґрунту під час його транспортування. Альтернативою вивезенню ґрунту може бути його промивання водою, проте у разі забрудненості ПАР воно може бути малоефективним через їх адсорбцію на твердих частинках ґрунтів. Водночас промивання ґрунту водою, яке також пов'язане з високими витратами коштів та часу, призводить до утворення рідких відходів і, природно, не забезпечує руйнування самих забруднювачів. Нарешті, ефективність процесу додатково залежить від типу ґрунту і ступеня його забрудненості, що вкрай ускладнює розроблення технологічних регламентів оброблення забруднених ґрунтів, які б насправді забезпечили його високу ефективність і стабільність одержуваних результатів.

Як спосіб часткового звільнення забруднених ґрунтів від фторвмісних та інших органічних сполук у роботі [29] назване їх зв'язування активним вугіллям або іншими матеріалами, що можуть відігравати роль адсорбентів (про це вже йшлося вище). Проте подібні технології забезпечують лише зв'язування забруднювачів, а не їх видалення, до того ж не виключають можливого повторного надходження забруднювачів у ґрунти. Сам адсорбент може потребувати регулярної заміни, що також створює додаткові труднощі, а повнота вилучення речовини залежить від численних чинників і не є стабільною.

Технології, що передбачають окислення, як-от окислення водою в надкритичному стані, електрохімічне окислення або фотокаталітичне видалення забруднень, можуть забезпечувати руйнування PFAS за достатнього рівня вологості ґрунтів, проте неефективні в умовах дефіциту води, до того ж можуть потребувати суворого дотримання умов проведення технологічних процесів.

Біологічні методи оброблення забруднених ґрунтів задля видалення фторорганічних ПАР автори [29], спираючись на літературні дані, називають обмежено придатними через високу хімічну стійкість таких сполук, а також вибіркову придатність тих чи інших культур мікроорганізмів до їх розкладання. Крім того, біологічне розкладання

таких ПАР може супроводжуватися утворенням розмаїття інших небезпечних хімічних речовин, впоратися з видаленням яких може бути ще складніше. Рекультивацію ґрунтів вирощуванням певних рослин названо потенційно перспективною технологією, проте вказано на обмежену придатність цього підходу у великих масштабах.

Саме нездоланні недоліки усіх вищезгаданих процесів привели авторів до висновку про необхідність швидкого нагрівання забрудненого фторвмісними сполуками ґрунту задля швидкого і повного їх руйнування з мінімальними обсягами утворення вторинних небезпечних хімічних речовин, для чого й було застосовано технологію височастотного нагрівання забруднених ґрунтів.

У роботі [30] досліджували процеси вилучення PFAS з водних розчинів, що містили фторсинтетичні плівкоутворювальні піноутворювачі, пропусканням таких розчинів крізь спеціальні мембрани під тиском, реалізуючи процеси нанофільтрації та зворотного осмосу. В результаті виконання робіт, під час яких використовували 42 сполуки, досягнуто ступінь їх вилучення з водних розчинів понад 97 %. Вибір на користь таких технологій було зроблено у зв'язку з тим, що проведений дослідниками аналіз літературних даних показав низьку ефективність більшості інших відомих способів вилучення забруднень з води.

Набагато простіший підхід запропоновано у статті [31]: видалення ПАР із забрудненої води запропоновано здійснювати пропусканням через неї повітря, в результаті чого відбувається спінювання (отже, збагачення поверхневого шару на молекули фторвмісних ПАР) з одночасним видаленням піни, що утворюється. За даними авторів, з води в такий спосіб вдавалося вилучити близько 96 % PFOS, якою цю воду було забруднено.

Автори [32] описують запропонований ними спосіб вилучення PFOA з води електрокоагуляцією з використанням електрода, на який нанесено губчасте залізо. Для інтенсифікації процесу до забрудненої води додавали персульфат натрію, а також додатково обробляли її ультрафіолетовим випромінюванням. Згідно з поданою інформацією, упродовж 60 хв оброблення концентрація фторвмісної сполуки знизилася на 87,5 %, причому 54,6 % від її кількості перетворилися на речовини, що не містять атомів фтору.

У роботі [33] запропоновано обробляти воду, забруднену PFAS, у реакторі в умовах нагрівання за наявності луку. Дослідникам вдалося домогтися руйнування численних сполук цього класу з різною довжиною вуглецевого ланцюга з утворенням сполук, що не містять атомів фтору.

Відзначено високий ступінь вилучення забруднювачів з оброблюваної води.

Висновки. Результати проведених аналітичних досліджень дають підстави сформулювати такі висновки.

1) Найефективнішим сучасним засобом гасіння неполярних горючих рідин є піна низької кратності, генерована з робочих розчинів плівкоутворювальних піноутворювачів, що може подаватися «поверхневим», а іноді – також «підшаровим» та/або «напівпідшаровим» способом. Гіпотетичне припинення виробництва фторвмісних речовин, використовуваних в їх рецептурах, призведе до неможливості реалізації «підшарового» способу.

2) Фторвмісні поверхнево-активні речовини, використовувані у виробництві піноутворювачів, значною мірою відрізняються між собою за показниками токсичності і здатності до біологічного розкладання. На швидкість їх руйнування в природних екосистемах і на очисних спорудах, а також на якісний і кількісний склад метаболітів можуть впливати наявні культури мікрофлори і забрудненість середовищ іншими речовинами.

3) Сьогодні наявно обмаль даних щодо здатності різноманітних фторорганічних речовин до біологічного розкладання. Водночас зрозуміло, що гомологи з меншою довжиною вуглецевого ланцюга загалом менш шкідливі. Серед них чимало відносно безпечних сполук, придатних до використання в рецептурах піноутворювачів.

4) Наявні дані не дають підстав стверджувати, що наявні піноутворювачі типу F3, які вважають заміниками плівкоутворювальних піноутворювачів, безпечніші за них з точки зору впливу на довкілля. Зокрема, кремнійорганічні сполуки можуть бути більш токсичними, ніж фторвмісні, і біологічно «жорсткими» через своє неприродне походження.

5) Відомі методи очищення стічних і промивних вод, а також ґрунтів від забруднень можуть не бути достатньо ефективними під час видалення з них фторвмісних поверхнево-активних речовин. Водночас підтверджено можливість їх ефективного видалення з води низкою методів. Найбезпечнішим методом знешкодження таких сполук є їх високотемпературне спалювання в печах, призначених для знешкодження токсичних відходів.

6) Для мінімізації впливу на довкілля фторвмісних складників піноутворювачів необхідно першочергово вживати заходів щодо недопущення їх розливання в процесі виробництва, транспортування та зберігання, а також мінімізації надходження таких речовин в довкілля під час гасіння пожеж. Методи оброблення забруднених ділянок

слід вибирати залежно від хімічного складу піноутворювача й обставин, що наявні в конкретному випадку.

7) Для обґрунтування і забезпечення можливості подальшого використання плівкоутворювальних піноутворювачів необхідні всебічні дослідження, спрямовані на вдосконалення методів їх знешкодження, а також пошук заміників хімічних речовин, використовуваних у рецептурах. Це дасть змогу зберегти ефективність засобів пінного пожежогасіння з одночасним виконанням вимог Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Боровиков В. О. Одержання та застосування екологічно безпечних піноутворювачів для гасіння пожеж: дис. ... канд. техн. наук. Київ: УкрНДІПБ МВС України, 2002. 237 с.

2. ДСТУ EN 1568:2018 (усі частини) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі [чинний від 2019-01] (Інформація та документація).

3. ДСТУ 8615:2016 Пожежна безпека. Піноутворювачі для гасіння пожеж. Настанови щодо поводження з вогнегасними речовинами, використовуваними у стаціонарних системах пінного пожежогасіння [чинний від 2017-07] (Інформація та документація).

4. ДСТУ 9215:2023 Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Настанови щодо використання, зберігання, утилізування та випробування [чинний від 2023-11] (Інформація та документація).

5. Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі. URL: <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> (дата звернення 22.12.2024).

6. Інструкція про порядок застосування і випробування піноутворювачів для пожежогасіння, затверджена наказом МНС України від 24 листопада 2008 року № 851 [чинна від 2008-11-24] (Інформація та документація).

7. Слуцька О. М. Удосконалення системи оцінювання якості піноутворювачів для гасіння пожеж: дис. ... канд. техн. наук. Львів : ЛДУБЖД ДСНС України, 2019. 212 с.

8. Ковалишин В. В., Васильєва О. Е., Козяр Н. М. Пінне гасіння: навчальний посібник Львів : Сполом, 2007. 168 с.

9. ДСТУ EN 13565-2:2022 (EN 13565-2:2018+AC:2019, IDT) Стаціонарні системи пожежогасіння. Пінні системи. Ч. 2: Проектування, будівництво та обслуговування [чинний від 2024-01] (Інформація та документація).

10. NFPA 11 (2024 edition) Standard for low-, medium and high-expansion foam [чинний від 2024-01] (Інформація та документація).

11. Войтович Т. М. Вдосконалення технології «підшарового» пожежогасіння в резервуарах з

нафтопродуктами: дис. ... докт. філософії. Львів : ЛДУБЖД ДСНС України, 2020. 216 с.

12. ДСТУ ГОСТ 30333:2009 Паспорт безпечності хімічної продукції. Загальні вимоги (ДСТУ 30333-2007, IDT).

13. Mattias Sörengård, Sofia Bergström, Philip MCleaf, Korin Wiberg, Lutz Ahrens (2022). Long-distance transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Swedish drinking water aquifer (2022). *Environmental Pollution*. 2022. Volume 311. 119981. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119981>

14. Jennifer Bräunig, Christine Baduel, Amy Heffernan, Anna Rotander, Eric Donaldson, Jochen F. Mueller (2017). Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater. *Science of the Total Environment*. 2017. Volume 596–597. P. 360–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>

15. Åse Høisæter, Anja Pfaff, Gijs D. Breedveld (2019). Leaching and transport of PFAS from aqueous film-forming foam (AFFF) in the unsaturated soil at a firefighting training facility under cold climatic conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2019. Volume 222. P. 112–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.02.010>

16. Johnsie R. Lang, Jeffery McDonough, T. C. Guillet, Peter Storch, John Anderson, David Liles, Robert Prigge, Jonathan A. L. Miles, Craig Divine (2022). Characterization of per- and polyfluoroalkyl substances on fire suppression system piping and optimization of removal methods. *Chemosphere*. Volume 308. Part 2. December 2022. 136254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136254>

17. Sheng Dong, Peng-Fei Yan, Chen Liu, Katherine E. Manz, Melissa P. Mezzari, Linda M. Abriola, Kurt D. Pennell, Natalie L. Cápiro (2023). Assessing aerobic biotransformation of 8:2 fluorotelomer alcohol in aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted soils: Pathways and microbial community dynamics. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. Volume 446. 130629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130629>

18. Anna Rotander, Leisa-Maree L. Toms, Lesa Aylward, Margaret Kay, Jochen F. Mueller (2015). Elevated levels of PFOS and PFHxS in firefightersexposed to aqueous film forming foam (AFFF). *Environment International*. 2015. Volume 82. P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.05.005>

19. Panneerselvam Logeshwaran, Anithadevi Kenday Sivaram, Mallavarapu Megharaj, Ravi Naidu (2016). Evaluation of cyto- and genotoxic effects of Class B firefighting foam products: Tridol-S 3 % AFFF and Tridol-S 6 % AFFF to *Allium cepa*. *Environmental Technology & Innovation*. 2016. Volume 6. P. 185–194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.10.003>

20. Maysa Ueda de Carvalho, Lucas Buruaem Moreira, Denis Moledo de Souza Abessa (2023). Are fire suppressants “nontoxic”? Acute toxicity, DNA damage and lipid peroxidation in fish (*Poecili areticulata*) exposed to low concentrations. *Journal of Hazardous*

Materials Advances. 2023. Volume 9. 100238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100238>

21. Xiaoqin Wu, Helen Nguyen, Damian Kim, Hui Peng (2022). Chronic toxicity of PFAS-free AFFF alternatives interrestrial plant *Brassica rapa*. *Science of the Total Environment*. 2022. Volume 850. 158100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158100>

22. Brian D. Etz, Maleigh Mifkovic, Shubham Vyas, Manoj K. Shukla (2022). High-temperature decomposition chemistry of trimethylsiloxane surfactants, a potential Fluorine-Free replacement for fire suppression. *Chemosphere*. 2022. Volume 308. Part 2. 136351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136351>

23. Peng-Fei Yan, Sheng Dong, Katherine E. Manz, Matthew J. Woodcock, Chen Liu, Melissa P. Mezzari, Linda M. Abriola, Kurt D. Pennell, Natalie L. Cápiro (2024). Aerobic biotransformation of 6:2 fluorotelomer sulfonate in soils from two aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites. *Water Research*. 2024. Volume 249. 120941. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120941>

24. Donovan S. Vitale, Donald M. Reeves, Ethan S. Coffin, Garrett W. Link, Daniel P. Cassidy, Steven M. Rochow (2023). Long-duration monitoring and mass balance of PFAS at a wastewater treatment plant following the release of aqueous film-forming foam concentrate. *Water Research*. 2023. Volume 242. 120268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120268>

25. A. Bourgeois, J. Bergendahl, A. Rangwala (2015). Biodegradability of fluorinated fire-fighting foams in water. *Chemosphere*. 2015. Volume 131. P. 104–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.042>

26. Lauren P. Turner, Bernard H. Kueper, Kevin M. Jaansalu, David J. Patch, Nick Battye, Omneya El-Sharnouby, Kevin G. Mumford, Kela P. Weber (2021). Mechanochemical remediation of perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) amended sand and aqueous film-forming foam (AFFF) impacted soil by planetary ball milling. *Science of the Total Environment*. 2021. Volume 765. 142722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142722>

27. Bin Yao, Runze Sun, Ali Alinezhad, Alena Kubátová, Matt F. Simcik, Xiaohong Guan, Feng Xiao (2022). The first quantitative investigation of compounds generated from PFAS, PFAS-containing aqueous film-forming foams and commercial fluorosurfactants in pyrolytic processes. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Volume 436. 129313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129313>

28. Chih-Hsuan Shih, Jinha Kim, Shih-Hung Yang, Ori Soker, Timothy J. Strathmann, Kung-Hui Chu (2024). Remediation of PFAS-impacted soils using magnetic activated carbon (MAC) and hydrothermal alkaline treatment (HALT). *Science of the Total Environment*. 2024. Volume 912. 168931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168931>

29. Runze Sun, Samuel Babalol, Ruichong Ni, Alireza Arhami Dolatabad, Jiefei Cao, Feng Xiao (2024). Efficient and fast remediation of soil contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) by high-frequency heating. *Journal of Hazardous Materials*. 2024. Volume 463. 132660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132660>

30. Charlie J. Liu, Timothy J. Strathmann, Christopher Bellona (2021). Rejection of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in aqueous film-forming foam by high-pressure membranes. *Water Research*. 2021. Volume 188. 116546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116546>

31. Pingping Meng, Shubo Deng, Ayiguli Maimaiti, Bin Wang, Jun Huang, Yujue Wang, Ian T. Cousins, Gang Yu (2018). Efficient removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous film-forming foam solution by aeration-foam collection. *Chemosphere*. 2018. Volume 203. P. 263–270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.183>

32. Dan Zhang, Yiming Li, Limei Dong, Xiuping Chen, Yihao Guan, Wei Liu, Zhining Wang (2022). Efficient degradation of PFOA in water by persulfate-assisted and UV-activated electrocoagulation technique using Fe foam electrode. *Electrochimica Acta*. 2022. Volume 434. 141296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141296>

33. Brian R. Pinkard, Conrad Austin, Anmol L. Purohit, Jianna Li, Igor V. Novosselov (2023). Destruction of PFAS in AFFF-impacted fire training pit water, with a continuous hydrothermal alkaline treatment reactor. *Chemosphere*. 2023. Volume 314. 137681. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137681>

REFERENCES

1. Borovykov, V. O. (2002). Odezhannta ta zastosuvannia ekolohichno bezpechnykh pinoutvoriuvachiv dlia hasinnia pozhezh: dis. ... kand. tekhn. nauk [Obtaining and use of environmentally safe foaming agents for fire extinguishing: PhD thesis]. Kyiv, UkrNDIPB MVS Ukrainy. 237 s. [in Ukrainian].

2. DSTU EN 1568:2018 (usi chastyny). Vohnehasni rehovyny. Pinoutvoriuvachi [Fire extinguishing agents. Foaming agents] [Effective from 2019-01]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

3. DSTU 8615:2016. Pozhezhna bezpeka. Pinoutvoriuvachi dlia hasinnia pozhezh. Nastanovy shchodo povodzhennia z vohnehasnymy rehovynamy, vykorystovuvanyu u statsionarnykh systemakh pinnoho pozhezhohasinnia [Fire safety. Foaming agents for fire extinguishing. Guidelines for handling extinguishing agents used in stationary foam fire suppression systems] [Effective from 2017-07]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

4. DSTU 9215:2023. Vohnehasni rehovyny. Pinoutvoriuvachi. Nastanovy shchodo vykorystannia, zberihannia, utylizuvannia ta vyprovuvannia [Fire extinguishing agents. Foaming agents. Guidelines for use, storage, disposal, and testing] [Effective from 2023-11]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

5. Stokholmska konventsiiia pro stiiki orhanichni zabrudniuvachi [Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants]. Retrieved December 22, 2024, from <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx> [in Ukrainian].

6. Instruksiiia pro poriadok zastosuvannia i vyprovuvannia pinoutvoriuvachiv dlia pozhezhohasinnia, zatverdzhena nakazom MNS Ukrainy vid 24.11.2008 № 851 [Instruction on the procedure for the use and testing of foaming agents for fire extinguishing, approved by the order of the Ministry of Emergency Situations of Ukraine dated 24.11.2008 No. 851] [Effective from 2008-11-24]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

7. Slutska, O. M. (2019). Udoshkonalennia systemy otsiniuvannia yakosti pinoutvoriuvachiv dlia hasinnia pozhezh: Dys. ... kand. tekhn. nauk [Improvement of the quality assessment system of foaming agents for fire extinguishing: PhD thesis]. Lviv, LDUBZhD DSNS Ukrainy. 212 s. [in Ukrainian].

8. Kovalishyn, V. V., Vasyliieva, O. E., & Koziar, N. M. (2007). Pinne hasinnia [Foam extinguishing]. Navch. posibnyk – Lviv, Spolom. 168 s. [in Ukrainian].

9. DSTU EN 13565-2:2022 (EN 13565-2:2018+AC:2019, IDT). Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Pinni systemy. Chastyna 2. Proiektuvannia, budivnytstvo ta obsluhovuvannia [Fixed firefighting systems. Foam systems. Part 2. Design, construction, and maintenance] [Effective from 2024-01]. (Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation). [in Ukrainian].

10. National Fire Protection Association (NFPA). (2024). *NFPA 11: Standard for low-, medium-, and high-expansion foam* [Effective from 2024-01]. [in English].

11. Voitovych, T. M. (2020). Vdoskonalennia tekhnolohii “pidsharovoho” pozhezhohasinnia v rezervuarakh z naftoproduktamy: Dys. ... doktora filosofii [Improvement of the “sub-layer” fire extinguishing technology in oil product tanks: PhD thesis]. Lviv, LDUBZhD DSNS Ukrainy. 216 s. [in Ukrainian].

12. DSTU GOST 30333:2009. (2009). Pasport bezpechnosti khimichnoi produktsii. Zahalni vymohy (GOST 30333-2007, IDT) [Safety data sheet for chemical products. General requirements] – Informatsiia ta dokumentatsiia – Information and documentation. [in Ukrainian].

13. Sörengård, M., Bergström, S., McCleaf, P., Wiberg, K., & Ahrens, L. (2022). Long-distance

- transport of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in a Swedish drinking water aquifer. *Environmental Pollution*, 311, 119981. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119981>
14. Bräunig, J., Baduel, C., Heffernan, A., Rotander, A., Donaldson, E., & Mueller, J. F. (2017). Fate and redistribution of perfluoroalkyl acids through AFFF-impacted groundwater. *Science of the Total Environment*, 596–597, 360–368. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.095>
 15. Høisæter, Å., Pfaff, A., & Breedveld, G. D. (2019). Leaching and transport of PFAS from aqueous film-forming foam (AFFF) in the unsaturated soil at a firefighting training facility under cold climatic conditions. *Journal of Contaminant Hydrology*, 222, 112–122. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2019.02.010>
 16. Lang, J. R., McDonough, J., Guillette, T. C., Storch, P., Anderson, J., Liles, D., Prigge, R., Miles, J. A. L., & Divine, C. (2022). Characterization of per- and polyfluoroalkyl substances on fire suppression system piping and optimization of removal methods. *Chemosphere*, 308 (Part 2), 136254. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136254>
 17. Dong, S., Yan, P.-F., Liu, C., Manz, K. E., Mezzari, M. P., Abriola, L. M., Pennell, K. D., & Cápiro, N. L. (2023). Assessing aerobic biotransformation of 8:2 fluorotelomer alcohol in aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted soils: Pathways and microbial community dynamics. *Journal of Hazardous Materials*, 446, 130629. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130629>
 18. Rotander, A., Toms, L.-M. L., Aylward, L., Kay, M., & Mueller, J. F. (2015). Elevated levels of PFOS and PFHxS in firefighters exposed to aqueous film forming foam (AFFF). *Environment International*, 82, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.05.005>
 19. Logeshwaran, P., Sivaram, A. K., Megharaj, M., & Naidu, R. (2016). Evaluation of cyto- and genotoxic effects of Class B firefighting foam products: Tridol-S 3 % AFFF and Tridol-S 6 % AFFF to *Allium cepa*. *Environmental Technology & Innovation*, 6, 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.10.003>
 20. de Carvalho, M. U., Moreira, L. B., & de Souza Abessa, D. M. (2023). Are fire suppressants “nontoxic”? Acute toxicity, DNA damage and lipid peroxidation in fish (*Poecilia reticulata*) exposed to low concentrations. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9, 100238. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100238>
 21. Wu, X., Nguyen, H., Kim, D., & Peng, H. (2022). Chronic toxicity of PFAS-free AFFF alternatives in terrestrial plant *Brassica rapa*. , 158100. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158100>
 22. Etz, B. D., Mifkovic, M., Vyas, S., & Shukla, M. K. (2022). High-temperature decomposition chemistry of trimethylsiloxane surfactants, a potential fluorine-free replacement for fire suppression. *Chemosphere*, 308 (Part 2), 136351. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136351>
 23. Yan, P.-F., Dong, S., Manz, K. E., Woodcock, M. J., Liu, C., Mezzari, M. P., Abriola, L. M., Pennell, K. D., & Cápiro, N. L. (2024). Aerobic biotransformation of 6:2 fluorotelomer sulfonate in soils from two aqueous film-forming foam (AFFF)-impacted sites. *Water Research*, 249, 120941. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120941>
 24. Vitale, D. S., Reeves, D. M., Coffin, E. S., Link, G. W., Cassidy, D. P., & Rochow, S. M. (2023). Long-duration monitoring and mass balance of PFAS at a wastewater treatment plant following the release of aqueous film-forming foam concentrate. *Water Research*, 242, 120268. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120268>
 25. Bourgeois, A., Bergendahl, J., & Rangwala, A. (2015). Biodegradability of fluorinated fire-fighting foams in water. *Chemosphere*, 131, 104–109. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.02.042>
 26. Turner, L. P., Kueper, B. H., Jaansalu, K. M., Patch, D. J., Battye, N., El-Sharnouby, O., Mumford, K. G., & Weber, K. P. (2021). Mechanochemical remediation of perfluorooctanesulfonic acid (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) amended sand and aqueous film-forming foam (AFFF) impacted soil by planetary ball milling. *Science of the Total Environment*, 765, 142722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142722>
 27. Yao, B., Sun, R., Alinezhad, A., Kubátová, A., Simeik, M. F., Guan, X., & Xiao, F. (2022). The first quantitative investigation of compounds generated from PFAS, PFAS-containing aqueous film-forming foams and commercial fluorosurfactants in pyrolytic processes. *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129313. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129313>
 28. Shih, C.-H., Kim, J., Yang, S.-H., Soker, O., Strathmann, T. J., & Chu, K.-H. (2024). Remediation of PFAS-impacted soils using magnetic activated carbon (MAC) and hydrothermal alkaline treatment (HALT). *Science of the Total Environment*, 912, 168931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168931>
 29. Sun, R., Babalol, S., Ni, R., Arhami Dolatabad, A., Cao, J., & Xiao, F. (2024). Efficient and fast remediation of soil contaminated by per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) by high-frequency heating. *Journal of Hazardous Materials*, 463, 132660. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132660>
 30. Liu, C. J., Strathmann, T. J., & Bellona, C. (2021). Rejection of per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in aqueous film-forming foam by high-pressure membranes. *Water Research*, 188, 116546. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116546>
 31. Meng, P., Deng, S., Maimaiti, A., Wang, B., Huang, J., Wang, Y., Cousins, I. T., & Yu, G. (2018). Efficient removal of perfluorooctane sulfonate from aqueous film-forming foam solution by aeration-foam collection. *Chemosphere*, 203, 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.183>

32. Zhang, D., Li, Y., Dong, L., Chen, X., Guan, Y., Liu, W., & Wang, Z. (2022). Efficient degradation of PFOA in water by persulfate-assisted and UV-activated electrocoagulation technique using Fe foam electrode. *Electrochimica Acta*, 434, 141296. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141296>

33. Pinkard, B. R., Austin, C., Purohit, A. L., Li, J., & Novosselov, I. V. (2023). Destruction of PFAS in AFFF-impacted fire training pit water, with a continuous hydrothermal alkaline treatment reactor. *Chemosphere*, 314, 137681. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137681>

© В. О. Боровиков, О. М. Слуцька, Р. Ю. Сукач, Д. П. Войтович, 2025.

Оглядова стаття.

Надійшла до редакції 30.04.2025.

Прийнято до публікації 04.06.2025.