

ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ СТІЙКИМИ ОРГАНІЧНИМИ ЗАБРУДНЮВАЧАМИ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Бондар О.І.¹, Четвериков В.В.², Риженко Н.О.¹, Любимов А.Ф.¹

¹Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²Інститут газу Національної академії наук України
вул. Дегтярівська, 39, 03113, м. Київ
erdu@ukr.net, chvvingas@gmail.com

Вивчено вплив військових дій на формування нових джерел та зміну обсягів емісії стійких органічних забруднювачів (СОЗ) в Україні. Зазначено, що руйнування об'єктів накопичення СОЗ, зокрема складів заборонених пестицидів та електро-технічного обладнання, наповненого поліхлорованими дифенілами (ПХД), призводить до їх неконтрольованого потрапляння у ґрунти, ґрунтові води та атмосферне повітря. Особливу увагу приділено процесам утворення діоксинів і фуранів під час пожеж на промислових та цивільних об'єктах, де присутні хлоровмісні сполуки або матеріали на основі полівінілхлориду (ПВХ).

Означені основні механізми утворення токсичних речовин під час термічної деструкції органічних матеріалів, зокрема при піролізі ПХД та хлорованих ароматичних речовин. З'ясовано, що значна частина діоксинів переноситься разом із частинками сажі та осідає в безпосередній близькості до осередків горіння, формуючи локальні зони високого забруднення. Окремо розглянуті ризики, пов'язані з підтопленням складів пестицидів, що сприяє активній міграції СОЗ у водні екосистеми.

На основі аналізу даних запропоновані підходи щодо вдосконалення методології ідентифікації та інвентаризації забруднених територій, зазначена необхідність відбору проб не лише ґрунту та води, але й сажі та пилу. Обґрунтовано доцільність використання транспортбельних технологічних комплексів для оперативної ліквідації наслідків забруднення, що поєднують механіко-хімічну обробку, термодесорбцію та термодеструкцію.

У довгостроковій перспективі запропоновано впровадження комплексних стратегій відновлення територій із застосуванням біодеградації, фіторе mediaції та інших екологічно безпечних методів. Отримані результати можуть використовуватися для оновлення Національного плану дій з виконання Стокгольмської конвенції та розробці ефективних заходів з мінімізації екологічних ризиків, спричинених військовими діями. *Ключові слова:* стійкі органічні забруднювачі, ПХД, діоксини, військові дії, пожежі, забруднення довкілля, ремедіація.

Environmental Pollution by Persistent Organic Pollutants as a Result of Military Activities. Bondar O., Chetverykov V., Ryzhenko N., Liubimov A.

This study investigates the impact of military activities on the emergence of new sources and changes in emission volumes of persistent organic pollutants (POPs) in Ukraine. It is shown that the destruction of facilities for the storage and accumulation of POPs, including warehouses of obsolete pesticides and electrical equipment containing polychlorinated biphenyls (PCBs), leads to their uncontrolled release into soils, groundwater, and the atmosphere. Particular attention is paid to the formation of dioxins and furans during fires at industrial and civilian facilities where chlorine-containing compounds or polyvinyl chloride (PVC)-based materials are present. The main mechanisms of toxic compound formation during the thermal degradation of organic materials are analyzed, particularly in the processes of PCB pyrolysis and the decomposition of chlorinated aromatic compounds. It has been established that a significant portion of dioxins is transported with soot particles and deposited in close proximity to fire sources, forming localized zones of high contamination. Special consideration is given to the risks associated with the flooding of pesticide storage sites, which enhances the migration of POPs into aquatic ecosystems.

Based on the analysis of available data, approaches are proposed to improve methodologies for the identification and inventory of contaminated areas, including the need to collect not only soil and water samples but also soot and dust. The feasibility of using transportable technological systems for rapid remediation is substantiated; such systems combine mechanochemical treatment, thermal desorption, and thermal destruction processes.

In the long term, the implementation of comprehensive land restoration strategies is proposed, including biodegradation, phytoremediation, and other environmentally safe methods. The obtained results can be applied in updating the National Implementation Plan under the Stockholm Convention and in developing effective measures to minimize environmental risks caused by military activities. *Key words:* persistent organic pollutants, PCBs, dioxins, military activities, fires, environmental pollution, remediation.



Визначення масштабів проблеми.

В Україні досить загрозливим потенційним джерелом надходження СО₃ в ґрунт та ґрунтові води може стати електротехнічне обладнання, що містить поліхлоровані дифеніли. Так, згідно з інвентаризацією, проведеною під час розроблення першої редакції національного плану дій (НПД) з виконання Стокгольмської конвенції про СО₃ [1], на двох маріупольських металургійних комбінатах знаходилося (станом на 2022 рік) 250 трансформаторів, заповнених поліхлорованими дифенілами загальною вагою близько 600 т. Зважаючи на масштаби руйнування цих комбінатів значна частка таких ПХД потрапила на будівельні конструкції, ґрунт або разом з продуктами горіння мігрувала за межі об'єктів руйнування.

Небезпечними джерелами забруднення ґрунтів та ґрунтових вод стійкими органічними забруднювачами можуть стати місця накопичення відходів та некондиційних хімічних засобів захисту рослин, що містять СО₃. Зокрема, станом на початок повномасштабної російської військової агресії проти України, на складах з незадовільними умовами зберігання знаходилося близько 8 тисяч тонн непридатних до використання або заборонених засобів захисту рослин. Сприятливі умови для міграції СО₃-вмісних пестицидів склалися в Херсонській області. Внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС місця зберігання 1900 т пестицидів [2] опинилися в зоні підтоплення.

Потужне джерело емісії СО₃ у повітря може виникнути під час пожежі на підприємствах хімічної промисловості, де використовується хлор, який, взаємодіючи з продуктами горіння, призводить до синтезу діоксинів та фуранів. Навіть під час пожежі на об'єктах, що не використовувалися у виробництві, хлорвмісні реагенти, синтез діоксинів та фуранів може відбуватися завдяки наявності в будівельних конструкціях полівінілхлоридів (ПВХ). Джерелом хлору для синтезу діоксинів та фуранів також можуть стати компоненти палива твердопаливних ракет або продукти його згоряння.

Базові заходи до оновленого плану дій вже були сформовані напередодні повномасштабних військових дій в Україні [2]. Обґрунтування заходів спиралося на результати попередніх інвентаризацій, скорегованих з урахуванням даних, наведених у регіональних доповідях про стан навколишнього природного середовища та екологічних паспортах областей за останні передвоєнні роки. Остаточне визначення заходів НПД стане можливим тільки після проведення комплексної інвентаризації СО₃ у відповідності до вимог Стокгольмської конвенції заходами обстеження територій забруднених внаслідок військових дій. Але перед цим мають бути заповнені деякі методичні прогалини щодо оцінки емісії СО₃ під час пожеж на промислових об'єктах та визначення оптимальних технічних рішень із очищення ґрунтів з урахуванням специфіки забруднення в Україні.

Емісія СО₃ під час пожеж на промислових об'єктах.

Пожежі на промислових об'єктах відрізняються одна від одної за характером протікання термічних процесів, тому механізми утворення ПХДД/ПХДФ можна окреслити в досить узагальненому вигляді. Методичний посібник щодо виявлення та кількісної оцінки викидів діоксинів, фуранів та інших ненавмисно утворених СО₃ [1] розроблений на замовлення виконавчого органу Стокгольмської конвенції, не дає інформації щодо оцінки емісії СО₃ під час пожеж. Тому основою для експертних оцінок можуть бути дані отримані при вивченні наслідків реальних пожеж та лабораторні дослідження процесів деструкції та синтезу СО₃ від термічних умов.

Пожежі на об'єктах з електрообладнанням, що містить ПХД.

В Україні використовуються у великих обсягах конденсатори, просочені соволом (синтетичний діелектрик на базі пентахлордифенілу) та трансформатори, заповнені совтолом-10, що містить 10% трихлорбензолу та 90% соволу. Існує небагато інформації стосовно емісії СО₃ при пожежах на об'єктах з електрообладнанням заповненим ПХД. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що ПХД є вогнестійкими оливами і тому створення умов для синтезу вторинних СО₃ можливе лише через їх піроліз та наступних хімічних перетворень продуктів піролізу. Забруднення навколишнього середовища ПХДФ та ПХДД майже повністю зумовлене рухом сажі, що утворилася під час пожежі.

Системний аналіз випадків пожеж на електротехнічному обладнанні з ПХД, наведений в праці [2] (таблиця 1). Пожежі на електрообладнанні характеризувалися викидом значної кількості маслянистої чорної сажі навіть при д незначному вогні. Як наслідок пожежі, що виникла на трансформаторах з поліхлорованими дифенілами та поліхлорованими бензолами (ПХБ), були зафіксовані як ПХДД, так і ПХДФ. На пожежах, що торкнулися конденсаторів, були означені тільки ПХДФ, ПХДД – відсутні. Окрім ПХДФ та ПХДД на деяких пожежах також були зафіксовані утворення хлорованих біфеніленів (ПХБп) та хлорованих піренів (ПХПі).

Можливість утворення тих чи інших СО₃ в процесі піролізу ПХД була перевірена в лабораторних дослідженнях [4]. Так, приміром, під час нагрівання ПХД (Aroclor 1248) у герметичній ємності було помічено, що ПХДФ утворюються за температури понад 270°C та досягають максимального рівня за близько 300°C. Основними компонентами продуктів піролізу були ди- та трихлордибензофурани. Отже, було зроблено висновок, що для перетворення необхідні температури вище 270°C, але за температури вище 330°C ПХДФ розкладаються. Варто зазначити, що в продуктах була підтверджена наявність 2,3,7,8-тетрахлордибензофурану на рівні близько 80 ppm.

Таблиця 1

Пожежі на електрообладнанні, наповненого ПХД

Місце	Причина	Умови	Аналіз проб	Коментарі
Торонто, Онтаріо підземне сховище	Несправність електричного обладнання	Розлилося приблизно 100 галонів аскорилю; частина випарувалася під дією вогню	приблизно 5 ppm ПХДФ	Зразки сажі містили приблизно 10000 ppm ПХД
Бінгемтон, Нью-Йорк офісна будівля	Несправність електричного обладнання	Руйнування трансформатора, розлилося приблизно 180 галонів аскорилю	2,3,7,8-ТХДФ – 12-270 ppm; загальні ПХДФ 765-2160 ppm; 2,3,7,8-TCDD 0,6-2,8 ppm; загальний вміст PCDD 20 ppm	Було також виявлено хлорований біфенілен (ПХБп) у кількості 54 ppm
Стокгольм, Швеція трансформаторна станція	Несправність електричного обладнання	В зоні пожежі опинилися 18 конденсаторів з ПХД; деякі вибухнули	Проби стирання: 2,3,7,8-ТХДФ 150 нг/м ² загальний вміст ПХДФ 1,4 г/м ² ПХДД не виявлено	Було також виявлено хлорований біфенілен (ПХБп) та хлоровані пірени (ПХПі) і
Сковде, Швеція конденсаторна батарея на заводі з обробки металу	Несправність електричного обладнання	В зоні пожежі опинилися 21 конденсатор; 12 конденсаторів з ПХД зруйновані вогнем	загальний вміст ПХДФ – 800 нг/м ² 2,3,7,8-TCDF – 100 нг/м ² ПХДД не виявлено	Виявлено хлоровані пірени ПХПі (ПХБп) не виявлено
Сурахаммар, Швеція сталеливарний завод	Вибух у сталеплавильній печі	Постраждало 500 конденсаторів: 200 з ПХД; 300 з мінеральними оливами	Проби стирання в залі конденсаторів показали рівень 4 нг/м ² . ТХДФ; ПХДД не виявлено	Також виявлені ПХПі

Під час піролізу поліхлорованих бензолів, що також можуть бути складовою трансформаторних олив, розкладання становило для трихлорбензолу > 95%, для тетрахлорбензолу приблизно 90% і для пентахлорбензолу приблизно 50% [4]. Окрім хлорбензолів, мас-спектральний аналіз піролізатів засвідчив наявність інших хлорованих сполук, у тому числі ПХДФ, хлорфеноли, а також, в деяких випадках, – поліхлоровані нафталіни (головним чином гепта- та октахлор), поліхлоровані стиролі (гепта- та октахлор) та поліхлоровані дифеніли. Поліхлоровані дифенілові ефіри та поліхлоровані дифеніліни не спостерігалися.

Пожежі, що призводять до синтезу ПХДД/ПХДФ.

До утворення великих обсягів ПХДД/ПХДФ можуть призвести пожежі на тих об'єктах, де використовуються або зберігаються у значних обсягах полівінілхлориди (ПВХ). У методичному посібнику UNEP³ наводиться лише один приклад, коли в результаті пожежі було знищено 600 тон ПВХ-пластику та 100 тонн ПВХ-плівки. Внаслідок неповного згоряння відбувся викид ПХДД/ПХДФ. Сажка, що утворилася під час розкладання ПВХ-кабелів, вміщувала до 200 нг ПХДД/ПХДФ на один грам її ваги.

Пожежі в будинках.

Полівінілхлорид у великих обсягах застосовується при виготовленні віконних рам, елементів трубопроводів, підлогових покриттів, а також для ізоляції дроту, тому пожежі в житловому секторі можуть призводити до синтезу ПХДД/ПХДФ та діоксиноподібних ПХД². Дослідження механізмів їх утворення дозволило визначити два взаємодоповнюючі шляхи їх утворення: через попередників із структурами, подібними до структур діоксинів

(хлорфенол, хлорбензол, ПХД, ПАВ тощо) та через синтез *de novo*, починаючи з аморфного вуглецю та проходячи через каталітичне хлорування з подальшим окисленням. Дослідження впливу температури нагрівання ПВХ на утворення діоксинів [3]: температура 300°C виявилася занадто низькою для інтенсивного піролізу; при 600°C концентрації діоксинів були високими; а вище 900°C їх розкладання відбувалося швидше, ніж утворення.

Оцінка щорічного утворення діоксинів [6] у США в результаті горіння ПВХ під час пожеж у будинках, спираючись на статистику пожеж та результати лабораторних аналізів зразків сажі та золи, засвідчила утворення діоксинів в діапазоні 0,47–23 г TEQ на рік, що склало незначну частку від 20–50 кг TEQ річного осадження з повітря, визначеного Агентством з охорони навколишнього середовища США. Однак дослідження лише залишків сажі або золи не враховують легкі викиди діоксинів і можуть значно занижувати обсяги викидів від реальних пожеж [4].

Пожежі на звалищах та неконтрольоване горіння побутових відходів.

Особливості викидів тієї чи іншої пожежі визначаються численними факторами, таким як кількість та морфологія відходів, ступінь їх розкладання та інше. Тому узагальнення рівнів викидів для різних сміттєзвалищ не є доцільним. Деякі особливості емісії ПХДД/ПХДФ сміттєзвалищами були встановлені під час пожеж на двох сміттєзвалищах в Мексиці [7]. Методом вуглецевого балансу для відібраних проб було встановлено коефіцієнт викидів ПХДД/ПХДФ, що дорівнює 823 нг (TEQ)/кг, що щонайменше в п'ять разів вище, ніж у попередніх дослідженнях

спалювання побутових відходів у бочках, і приблизно в 2000 разів вище, ніж у димарях сучасних спалювальних установок побутових відходів. Такі коефіцієнти викидів, обумовлені тим, що для сміттєзвалищ характерне тліюче горіння, що дає більш високі коефіцієнти викидів ніж від полум'я.

Розповсюдження продуктів горіння під час пожеж.

Розміри зони високої концентрації продуктів горіння при пожежах залежать головним чином від погодних умов під час пожежі. Концентрація забруднювачів залежить від наявності опадів, температури повітря, швидкості вітру. Встановлено, що стійкі органічні забруднювачі можуть переноситися на великі відстані, але їх концентрації при цьому не обумовлюють великі екологічні ризики. Значна частина діоксинів при пожежах переноситься частинками сажі та пилу та осідають на ґрунт в безпосередній близькості від зони горіння.

В рамках вивчення потенціальних ризиків для здоров'я людини досліджувалися зміни в концентраціях ПХДД/ПХДФ у просторі та часі на прикладі пожежі у 24-поверховій будівлі у Великобританії [6]. Проби з 6 локацій на відстані до 1,2 км від будівлі разом із зразками напівспалених уламків були зібрані через один та шість місяців після пожежі. Крім того через 17 місяців були зібрані зразки пилу і конденсату з будівлі, що знаходилася на відстані 160 м від зони займання. Результати дослідження засвідчили, що основними джерелами забруднення токсикантами є частинки діаметром понад 100 мкм, що осіли на відстані до 200 м від зони займання. Зразки зібрані в межах 140 м від зони займання показали, що концентрація поліхлорованих дібензо-*p*-діоксин в ґрунті в 60 разів більше, ніж в іншій міській місцевості Великобританії.

Наведений аналіз існуючої інформації щодо забруднення повітря та ґрунтів стійкими органічними забруднювачами під час пожеж дозволяє означити пріоритетні заходи до НПД з ідентифікації та інвентаризації місць забруднення СОЗ, зокрема, й збір інформації щодо стану електротехнічного обладнання заповненого ПХД. Також, спираючись на результати попередніх інвентаризацій, необхідно зібрати інформацію щодо місць накопичення заборонених до використання пестицидів, що могли опинитися в зоні підтоплення після руйнування Каховської ГЕС. На базі отриманої інформації має бути розроблений план обстежень потенційно забруднених ділянок. Обстеження забруднених ділянок має здійснюватися у відповідності до Методичних рекомендацій щодо визначення територій, що містять стійкі органічні забруднювачі [5]. Необхідно взяти не тільки проби ґрунту та ґрунтових вод на прилеглих ділянках але й сажі, що осіла на стіни будівель, що знаходяться поруч із зоною горіння. Дані результатів обстежень вносяться до інвентаризаційних реєстрів та використовуються для оцінки ризиків з подаль-

шим визначенням пріоритетів щодо здійснення заходів із відновлення забруднених ділянок.

Визначення найефективніших технічних рішень щодо відновлення забруднених ділянок.

Методологія визначення заходів щодо відновлення ґрунтів та ґрунтових забруднених стійкими органічними забруднювачами в Україні попередньо окреслена в роботі [6]. Розглянуті можливості застосування таких методів відновлення як фізико-хімічна деградація, біодеградація, термічна обробка, фіторе mediaція, ізоляція. Для кожного методу проаналізовані варіанти застосування *in-situ* (процес обробки здійснюється безпосередньо в ґрунті або ґрунтових водах) та *ex-situ* (процес обробки здійснюється після екскавації ґрунту або відкачування води). Зважаючи на поточний обсяг та особливості локації забруднень, означені у минулі роки, найбільш прийнятним для України варіантом розв'язання проблеми є використання *ex-situ* транспортбельних установок для термічного знешкодження забруднювачі [11]. Високу ефективність використання транспортбельної установки має забезпечити сполучення модулів непрямої термічної десорбції та термодеструкції в розплавах сполук лужних металів.

Внаслідок масштабних пожеж під час бойових дій до проблеми забруднення ґрунтів та ґрунтових вод додалась проблема великої кількості відходів руйнування будівель, забруднених синтезованими діоксинами. У настановах з найкращих наявних методів та передових екологічних практик управління територіями, забрудненими стійкими органічними забруднювачами [7] згадується лише один випадок застосування установок непрямої термічної десорбції для видалення СОЗ з будівельних відходів в Чеській Республіці. Але застосування такої технології має обмеження щодо габаритів відходів і не може бути застосовано для очищення стін будівель. У цьому випадку можливо доцільно застосувати досвід очищення приміщень, в яких виконувались операції з СОЗ-вмісними пестицидами або обладнанням, заповненим ПХД. Згідно з стандартами та процедурами, затвердженими агентством охорони навколишнього середовища США, для знезараження обладнання забрудненого ПХД можуть бути застосовані органічні знезаражуючі рідини, зокрема: гас, дизельне паливо, терпенові вуглеводні тощо. Відомо, що гас також ефективно видаляє сажу, що адсорбувала діоксини. Відпрацьована рідина термічно знешкоджується, що забезпечить руйнування адсорбованих СОЗ.

Технічні пропозиції щодо відновлення забруднених ділянок.

Запропонована раніше базова конфігурація обладнання у складі транспортбельного технологічного комплексу [13] для очищення ґрунтів з певним вдосконаленням може застосовуватися для усунення наслідків військових дій. Блок-схема вдосконаленої установки наведена на рисунку 1.

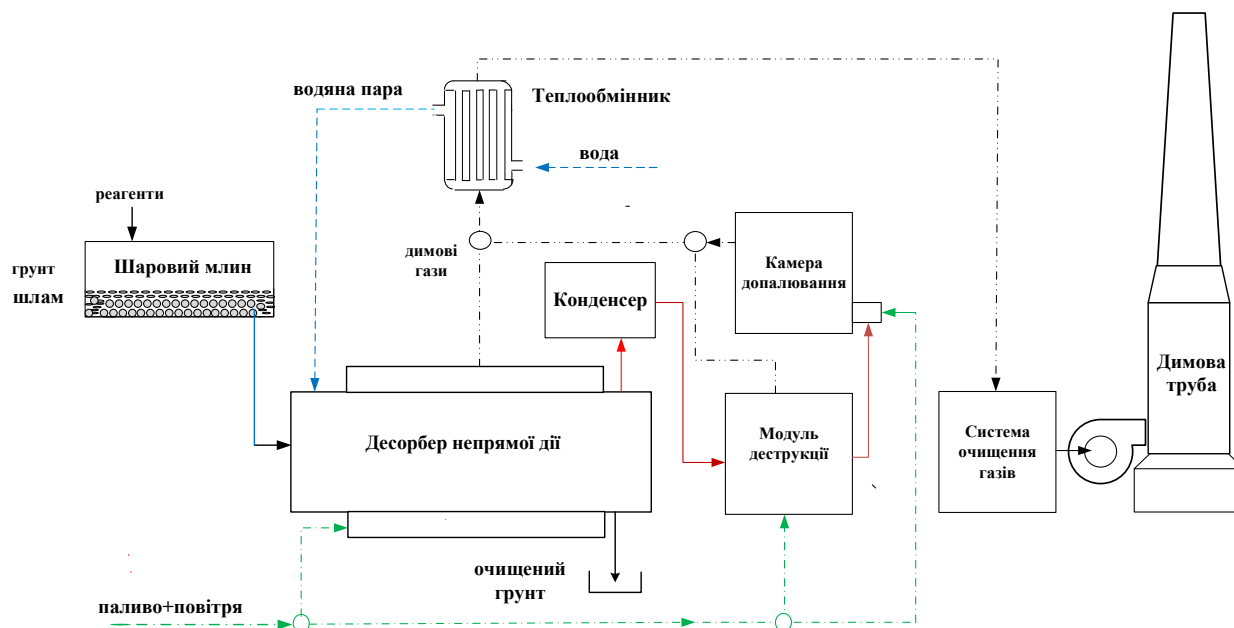


Рис. 1. Технологічна схема термічної обробки ґрунтів, забруднених CO_2

На значних площах ґрунтів з високими концентраціями ПХД, що утворилися наслідок руйнування трансформаторів, або з високими концентраціями ДДТ (в результаті підтоплення складів), забезпечити загальну ефективність очищення здатний модуль механіко-хімічного дегалегування [6]. Випробування технології Radicalplanet підтвердили ефективність деструкції висококонцентрованих CO_2 вище 99%.

Внаслідок змивання сажі з будівельних конструкцій можуть утворитися великі обсяги розчинників, забруднених сажею з адсорбованими на ній CO_2 . Шлам, що утворився, може бути змішаним з забрудненим ґрунтом та пройти всі етапи механіко-хімічної та термічної обробки.

Для термічного знешкодження забруднених будівельних відходів, подрібнених до відносно невеликих розмірів, може застосовуватися технологічний комплекс на базі обертової печі [2]. В рамках виконання проекту ГЕФ/ЮНІДО «Екологічно обґрунтоване управління та остаточне видалення поліхлорованих дифенілів (ПХД) в Україні» обґрунтовано використання технологічного комплексу на основі обертової печі для термічного знешкодження твердих та рідких відходів з вмістом хлору до 2%. Використання комплексу планувалося для термічного знешкодження попередньо подрібнених корпусів ПХД-вмісних конденсаторів. Для ефективного використання такого комплексу для очищення ґрунтів, забруднених CO_2 , необхідно зробити деякі зміни в конфігурацію обладнання та здійснення окремих технологічних операцій. Технологічний комплекс спроектований для спалювання відходів із серед-

ньою теплотворною здатністю 3500 ккал/кг. Для досягнення такої величини раціональним рішенням є додавання забруднених ґрунтів з місць руйнування ємкостей для зберігання нафтопродуктів. З метою убезпечення утворення діоксинів/фуранів комплекс доцільно доповнити модулем механіко-хімічної обробки ґрунтів.

Запропоновані технічні рішення дозволяють забезпечити в короткостроковій перспективі усунення найбільших екологічних ризиків від емісії CO_2 . Під час розроблення оновленого Національного плану дій мають враховуватися також середньострокові та довгострокові заходи з остаточного відновлення забруднених ділянок з використанням таких методів, як біодеградація, фіторе mediaція та інші.

Висновки.

Значна кількість електротехнічного обладнання, що містить ПХД, опинилася в зоні обстрілів. Отже, є висока вірогідність забруднення ґрунту внаслідок руйнування обладнання та витоку оливи. Інший шлях забруднення довкілля – перенесення із сажею продуктів піролізу ПХД.

Потенційними джерелами масштабного забруднення ґрунтів та ґрунтових вод CO_2 також можуть стати об'єкти накопичення CO_2 -вмісних пестицидів, що опинилися в зоні підтоплення внаслідок руйнування гідротехнічних споруд.

З метою усунення в короткостроковій перспективі екологічних ризиків, викликаних емісією CO_2 , доцільно використовувати транспортабельні технологічні комплекси з модулями механіко-хімічного оброблення, термодесорбції та термодеструкції забруднювачів.

Література

1. National Implementation Plan for the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants URL: <http://www.pops.int/Implementation/NationalImplementationPlans/NIPTransmission/tabid/253/Ukraine> (дата звернення: 23.03.2026).
2. Chetverykov V. V., Holoubek I., Panykh K. K. The current state of the issue of persistent organic pollutants in Ukraine and approaches for its resolution. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2021. № 2. С. 80–86. DOI: 10.33070/etars.2.2021.07.
3. Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional POPs. – UNEP, 2013. URL: <https://chm.pops.int/Implementation/UnintentionalPOPs/ToolkitforUPOPs/Overview/tabid/372/Default.aspx> (дата звернення: 23.03.2026).
4. Hutzinger O., Choudhry G. G., Chittim B. G., Johnston L. E. Formation of polychlorinated dibenzofurans and dioxins during combustion, electrical equipment fires and PCB incineration. Environmental Health Perspectives. 1985. Vol. 60. P. 3–9.
5. Zhang M., Buekens A., Jiang X., Li X. D. Dioxins and polyvinyl chloride in combustion and fires Waste Management & Research. 2015. Vol. 33(7). P. 630–643. DOI: 10.1177/0734242X15590651.
6. Kim K.-S., Hong K.-H., Ko Y.-H., Kim M.-G. Emission characteristics of PCDD/Fs, PCBs, chlorobenzenes, chlorophenols, and PAHs from polyvinyl chloride combustion at various temperatures. Journal of the Air & Waste Management Association. 2004. Vol. 54. P. 555–562. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470925.
7. Carroll W. F. PVC in house fires: the great unknown source of dioxin? Fire and Materials. – 1996. Vol. 20. P. 161–166. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1018(199607)20:4<161::AID-FAM563>3.0.CO;2-7.
8. Ruokojärvi P., Aatamila M., Ruuskanen J. Toxic chlorinated and polyaromatic hydrocarbons in simulated house fire Chemosphere. 2000. Vol. 41(6). P. 825–828. DOI: 10.1016/S0045-6535(99)00549-4.
9. Gullett B. K. et al. PCDD/F, PBDD/F, and PBDE emissions from open burning of a residential waste dump. Environmental Science & Technology. 2010. Vol. 44(1). P. 394–399. DOI: 10.1021/es902676w.
10. Stec A. A., Dickens K., Barnes J. L. J., Bedford C. Environmental contamination following the Grenfell Tower fire. Chemosphere. 2019. Vol. 226. P. 576–586. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.03.153.
11. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо визначення територій, що містять стійкі органічні забруднювачі: наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 12.10.2021 № 668. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0668926-21#Text> (дата звернення: 23.03.2026).
12. Бондар О. І., Риженко Н. О., Четвериков В. В. Методичні засади очищення забруднених ділянок від стійких органічних забруднювачів. Екологічні науки. 2024. № 4(55). – С. 70–78. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.11>
13. Четвериков В. В. Термічна обробка ґрунтів ex-situ з метою видалення стійких органічних забруднювачів. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2025. № 1. – С. 118–124. DOI: 10.33070/etars.1.2025.
14. POPs contaminated sites guidance URL: <https://chm.pops.int/Implementation/BATandBEP/POPscontaminatedsites/Guidance/tabid/9649/Default.aspx> (дата звернення: 23.03.2026).
15. New POPs technology specification and data sheets: Radicalplanet technology (mechanochemical principle) URL: http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/DEFSBCFactSheetRadicalPlanet_070608_includedMTKJune2009.pdf (дата звернення: 23.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 10.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026