

політехніка” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – 2016. – № 841. – С. 330–334.
8. Лурье Ю. Ю. *Справочник по аналитической химии*. – М., 1989. – 448 с. 9. *Практикум по физико-химическим методам анализа* / под ред. О. М. Петрухина. – М.: Химия. – 1987. – 246 с.
10. *Справочник химика*. – Т. 2: Основные свойства неорганических и органических соединений / под ред. Б. П. Никольского. – Л.: Химия, 1971. – 1168 с. 11. Сабадаш В. В., Гивлюд А. М., Гумницький Я. М. Динаміка адсорбції *α*-оксіпропіонової кислоти в апараті колонного типу // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Хімія, технологія речовин та їх застосування”*. – 2016. – № 841. – С. 330–334.

УДК 628.47

О. І. Козій, М. П. Петрук, Н. М. Витрикуш, О. М. Вахула
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра цивільної безпеки

ДІОКСИНОВА ПРОБЛЕМА СМІТТЄСПАЛЮВАННЯ

© Козій О. І., Петрук М. П., Витрикуш Н. М., Вахула О. М., 2017

Проведено аналіз техногенних джерел утворення поліхлорованих дібензодіоксинів, фуранів і біфенілів, їх шкідливі властивості та поширення у довкіллі. Узагальнено результати досліджень негативного впливу діоксинів на живі організми та труднощі визначення їх кількісних показників. Проаналізовано умови утворення діоксинів на сміттєспалювальних заводах під час утилізації твердих побутових відходів та рекомендовано запобіжні методи їх утворення. Вивчено методи додаткового очищення відхідних газів та сучасні технології поводження з відходами.

Ключові слова: діоксини, сміттєспалювальні заводи, тверді побутові відходи.

O. I. Koziy, M. P. Petruk, N. M. Vytrykush, O. M. Vakhula

DIOXIN PROBLEM OF WASTE INCINERATION

© Koziy O. I., Petruk M. P., Vytrykush N. M., Vakhula O. M., 2017

The formation of technogenic sources of polychlorinated dibenzodioxins, furans and biphenyls, their harmful properties and dissemination in the environment were analyzed in this work. The research results of dioxins negative impact on living organisms and the difficulty of determining their quantitative indicators were generalized. The conditions of the dioxins formation on the waste incineration plants during the utilizing of domestic wastes were analyzed and ways of preventing their formation have been proposed. The further purification methods of exhaust gases and modern technologies of waste management were studied.

Key words: dioxins, waste incineration plants, municipal solid waste.

Постановка проблеми. Зважаючи на гостроту проблеми утилізації твердих побутових відходів і загрозу забруднення довкілля, на особливу увагу заслуговує аналіз технологічних процесів сміттєспалювання та очищення відхідних газів. Серед продуктів згоряння ТПВ, які можуть потрапити в атмосферу, одними з найнебезпечніших є діоксини та фурани, кількість утворення яких залежить від температурного режиму та складу спалювальних відходів. Отже, основними

вимогами, що пред'являються до роботи сміттєспалювальних заводів, є контроль за граничними значеннями таких викидів в атмосферу, як оксиди сірки і азоту, хлористий і фтористий водень, газоподібні і пароподібні органічні речовини у вигляді органічного вуглецю, монооксид вуглецю, пил, важкі метали, діоксини і фурани. Проте, крім газів та пилу, не менш небезпечною є присутність частинок діоксинів у попелі і шлаках, які в подальшому піддаються полігонному захороненню.

Аналіз існуючих технологій показав, що утворення діоксинів та фуранів відбувається за низьких температур спалювання відходів. Сучасні системи газоочищення не можуть бути гарантом забезпечення екологічної безпеки сміттєспалювання, оскільки жодна з них не забезпечує повного видалення токсикантів. Тому важливо забезпечити умови, за яких утворення забруднювачів буде мінімальним. У такому випадку навантаження на систему газоочищення буде меншим, і кількість токсикантів, що надходять у довкілля, значно скоротиться. В останні роки в усіх країнах спостерігається інтерес до нових, екологічно безпечніших порівняно зі спалюванням безвідходних технологій термічного знешкодження ТПВ, за яких відбувається гарантоване руйнування діоксинів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Поліхлоровані дибензодіоксини (ПХДД), поліхлоровані дибензофурани (ПХДФ) під загальною назвою “діоксини” та поліхлоровані біфеніли (ПХБ) – це група токсичних та стійких хімічних речовин, вплив яких на здоров'я людини включає шкірну імунотоксичність, вплив на репродуктивну систему, тератогенність, згубний вплив на нервову систему та канцерогенність. Більше того, громадськість, наукова спільнота та законодавці серйозно занепокоєні тим, що діоксини та ПХБ навіть у дуже малих кількостях мають негативний вплив на здоров'я людей та довкілля за тривалого контакту [1–3].

На жаль, і в культурі ставлення до довкілля, і в нашому поведінні з відходами ми катастрофічно відстаємо від розвинених країн. Так, в останні роки у розвинених країнах світу стала дуже популярною стратегія поводження з відходами у країнах ЄС за назвою “Нуль відходів”. Згідно з цією стратегією, відходи не повинні потрапляти на звалища, натомість увесь їхній обсяг має бути повернений у господарський обіг. Завдяки сортуванню і роздільній утилізації сміття частина відходів йде на вторинну переробку, а небезпечні речовини не потрапляють у довкілля. Єдиним безпечним шляхом поводження з твердими побутовими відходами є мінімізація утворення сміття та його спрямування на “друге життя”. Проте навіть за високих темпів накопичення відходів українці й досі користуються застарілими способами утилізації сміття (до найшкідливіших та нерентабельних можна зарахувати складування сміття на полігонах та спалювання), і це при тому, що про “поховання” відходів у ґрунт у Європі забули ще у 2000, а сміттєспалювальні заводи у розвинених країнах доволі серйозно модернізуються: оснащуються найновітнішими фільтрами, переходять на плазмовий метод роботи, за якого кількість викидів у довкілля мінімальна [5, 6].

Світовий досвід свідчить, що безпечних сміттєспалювальних технологій не існує. Жодні санітарно-захисні зони не зможуть захистити людей від масштабних токсичних викидів. Такий спосіб поводження з відходами завдає шкоди довкіллю і є економічно витратним. Увесь світ прагне зменшувати кількість відходів, які постійно утворюються, якомога повніше переробляти їх і вже на стадії розроблення нових товарів знати шляхи їх утилізації. До того ж в жодній соціально і економічно розвиненій країні не ведеться спалювання “непідготовлених” відходів [1].

Мета роботи – проаналізувати умови утворення діоксинів як техногенних викидів під час сміттєспалювання, їх ідентифікацію в довкіллі, токсичну дію на живі організми для вироблення шляхів мінімізації забруднення довкілля.

Загальні відомості про діоксини. Діоксином в органічній хімії називають шестичленний гетероцикл, у якому два атоми кисню зв'язані двома подвійними карбон-карбоновими зв'язками. У токсикології під терміном “діоксин” розуміють похідну цієї сполуки, а саме – 2,3,7,8-тетрахлордibenзо-пара-діоксин, який є представником широкої групи надзвичайно небезпечних ксенобіотиків з числа поліхлорованих поліциклічних сполук – тетрачлордibenзодіоксинів (ТХДД),

тетрахлордифенілбензофуранів (ТХДФ), поліхлорованих біфенілів (ПХБФ). Вони ідентифіковані у водах Світового океану, у повітрі у завислих найдрібніших частинках, які осідають на поверхні ґрунту, піднімаються і далі переносяться вітром. Діоксини дуже добре адсорбуються на будь-яких матеріалах: їх адсорбційна здатність величезна. За низьких температур повітря діоксини краще адсорбуються завислими домішками, тому їх вміст у повітрі істотно знижується. Автори екологічних публікацій вважають доведеним фактом рух хлорорганічних забруднень з теплих широт до холодних з подальшою конденсацією. У воді діоксини завдяки гідрофобним властивостям адсорбуються твердими частинками і теж седиментують у намулах водойм [2–4].

Діоксини небезпечні з двох причин. По-перше, як найсильніша синтетична отрута вони відрізняються високою стабільністю, переносяться через харчові ланцюги (наприклад, водорості – планктон – риба – людина або ґрунт – рослини – тварини – людина). По-друге, навіть у порівняно нешкідливих для організму людини кількостях діоксини дуже підвищує активність ряду окислювальних залізовмісних ферментів печінки, які перетворюють багато речовин синтетичного і органічного походження у небезпечні для організму отрути [7].

Токсичність діоксинів. Це ксенобіотики – чужорідні людському організму речовини. Їх складно виявити сучасними аналітичними методами, боротися з ними це важче. Період напіврозпаду діоксину у ґрунті – 8–10 років, а період часткового виведення з організму людини – 6–8 років [3, 4].

Діоксини є універсальними клітинними отрутами, спорідненими з клітинними рецепторами, ключовими ферментами та гормонами. Вони пригнічують імунітет, провокують появу злоякісних пухлин, пришвидшують процеси старіння, порушують репродуктивну функцію у чоловіків та жінок, призводять до накопичення генетичних порушень, що передаються через кілька поколінь. Ксенобіотики діоксинового ряду – спроможні проникати в організм людини через шкіру (прання, купання), інгаляційним шляхом (із забрудненого повітря), з продуктами харчування тваринного походження (риба, м'ясо). Найбільшою мірою діоксини акумулюються у жировій тканині, оскільки саме жири накопичують діоксини. Досліди на щурах показали причини загибелі від діоксинів – крововиливи, некрози тканин, новоутворення.

Орієнтовна допустима добова доза (ДДД) потрапляння діоксинів в організм людини, згідно з Положенням про гігієнічне нормування діоксинів у воді і продуктах харчування № 142-9/105 від 05.7.91, становить 10 пг/кг (10^{-12} г/кг) від маси тіла людини. В Україні ці нормативи не переглядалися, хоча у 1998 р. ВООЗ рекомендувала знизити ДДД діоксинів до 4 пг/кг маси тіла людини.

Мінімальна токсична доза діоксину для людини за одноразового введення може бути у межах 0,1–1,0 мкг/кг. За даними інших авторів [10, 12], розрахункова середня смертельна доза діоксину за одноразового потрапляння до організму дорівнює 70 мкг/кг маси тіла; доза, що діє мінімально, орієнтовно становить 1 мкг/кг, що значно нижче порівняно з відповідними дозами усіх відомих синтетичних отрут.

Діоксини мають високу температуру плавлення, дуже низьку леткість, погано розчиняються у воді і краще – в органічних розчинниках. Особливістю діоксинів є їх висока стійкість до температури 750 °С, розклад вище 1200 °С і здатність до повторного синтезу за зниження температури. Діоксини можна зустріти фактично скрізь: у повітрі, ґрунті, у рибі, м'ясних і молочних продуктах тощо. Маленькими дозами, рік за роком діоксини накопичуються в організмі, поступово підриваючи імунну систему людини.

Джерела утворення діоксинів. Джерелами надходження діоксинів у довкілля є промислові підприємства. Вони утворюються при:

- виробництві пестицидів, гербіцидів і дефоліантів як побічний продукт;
- виробництві целюлози у процесах відбілювання, що передбачають хлорування (діоксини знайдені у пульпі, фільтратах, стічних водах, твердих відходах, у готовій продукції);
- електролітичних процесах отримання нікелю і магнію, литті сталі і міді;
- процесах нафтопереробки;

- спалюванні хлормістких сполук, а також під час загоряння та поламок електричного обладнання;
- спалюванні автомобільних олив і бензину, у викидних газах автомобілів, що працюють на бензині, який містить свинцеві присадки;
- порушенні правил захоронення промислових відходів.

Є дані про те, що за певних умов потенційним джерелом діоксинів може бути хлорована водопровідна вода, тому цивілізований світ фактично відмовився від її хлорування.

Діоксини можуть утворюватися за присутності хлору і під час високотемпературних процесів у металургії і під час спалювання пластмас. Навіть під час куріння утворюється незначна кількість діоксинів. Їх знаходять навіть у грудному молоці матерів [10].

Утворення діоксинів на сміттєспалювальних заводах. Спалювання будь-яких комбінацій поліароматичних вуглеводнів (ПАВ) і полівінілхлориду (ПВХ) – гуми, поролону, лінолеуму, поліетиленової плівки, пластикового посуду тощо – супроводжуються утворенням і викидом в атмосферу діоксинів та інших канцерогенів. В Україні у структурі твердих побутових відходів частка полімерів становить близько 20 % і поступово збільшується [8].

Сміттєспалювальні заводи (ССЗ) спочатку набули поширення у світі як часткова альтернатива полігонам. Однак поступово стало очевидним, що експлуатація ССЗ – теж не найкращий спосіб поводження із ТПВ, оскільки спалювання різних відходів викликає іншу екологічну проблему – забруднення довкілля. Одночасно більша частина матеріалів, придатних для вторинного використання і переробки, буде втрачена, як і енергія з цих матеріалів. З результатів національних звітів економічно розвинених країн випливає, що близько 70 % від усіх викидів діоксинів забезпечують саме ССЗ [7, 12]. Зокрема, найбільше забруднюють довкілля Японія та США, а найменше Швеція – країна, де спалювання відходів на ССЗ фактично не використовується. Небезпечність ССЗ з погляду забруднення довкілля діоксинами зумовлюється їх технологічними особливостями. Так, згідно з [9, 11], за ефективності руйнування діоксинів у 99,999 % (згідно з вимогами Європейського Союзу), 0,001 % цих сполук таки потрапляє у повітря. А це означає, що 1 мг діоксинів на кожний спалений кілограм відходів надійде у повітряне середовище. Крім того, встановлено, що за існуючих технологій спалювання діоксини утворюються у зоні охолодження і на фільтрах. Варто також зазначити, що сьогодні для спалювання нерозділеного сміття відсутні технології і технічні рішення, які повністю унеможливають надходження діоксинів у довкілля [5–7].

Головним забрудненням довкілля у західних країнах від роботи ССЗ є зв'язаний діоксин – летка зола з електрофільтрів, мул із відстійників. Карбон, присутній у пилу, за каталітичної участі металів та оксидів металів з леткого попелу, реагує з HCl , O_2 , H_2O , утворюючи ПХДД і ПХДФ. Реакції каталітичного творення діоксинів відбуваються у холоднішій частині реактора за температури 300–400 °C.

Вміст діоксинів та їх аналогів у продуктах спалювання пропорційний до вмісту в ТПВ хлорорганічних речовин і хлорполімерів, особливо таких небезпечних попередників діоксинів, як поліхлорфеноли, поліхлорбензоли [7]. Склад викидів також залежить від систем очищення, що застосовуються на ССЗ: сміттєспалювальні установки повинні знаходитися на відстані не менше як 1000 м від житлових кварталів.

Отже, знешкодження твердих побутових відходів на ССЗ за умови дотримання санітарно-гігієнічних вимог щодо їх обладнання та експлуатації має гігієнічні, епідеміологічні та економічні переваги, які полягають у тому, що знешкодження відбувається радикально і швидко. Найефективнішим є процес піролізу ТПВ, який здійснюється у високотемпературних реакторах за температур понад 1600 °C в умовах дефіциту кисню і не вимагає їх попередньої підготовки [6, 13]. Висока температура забезпечує руйнування фактично усіх складних органічних речовин, перетворення їх у прості горючі (горючий газ) або негорючі (шлак) сполуки. Під час піролізу твердих побутових відходів шкідливі викиди у довкілля мінімальні, але вартість таких установок висока.

Труднощі визначення вмісту діоксинів у відхідних газах ССЗ. Трудність аналітичного контролю діоксинів полягає у тому, що через токсичність кількісні межі їх визначення в рази менші за більшість методів аналізу. Важливими також є структурні відмінності досліджуваних речовин (деякі ізомери можуть істотно відрізнятись за токсичністю) та наявність інших сполук в аналізованих суміші. Сучасні аналітичні методики розроблені для аналізу діоксинів включають високоефективне очищення від фонових речовин, екстракцію, хроматографічне розділення і мас-спектрометричне визначення. Крім того, що такі аналізи є надзвичайно дорогі, трудомісткі і тривалі, для їх проведення необхідно використовувати спеціальні приміщення та обладнання з врахуванням дуже жорстких правил з техніки безпеки.

Сьогодні тільки обмежена кількість лабораторій індустріальних країн здатні проводити аналізи будь-якої складності та кількісно аналізувати зразки різного типу. Розвиток хроматографічних і спектрометричних методів аналізу уможливив кількісне визначення вмісту діоксинів у біологічних зразках. Зараз в аналітичних лабораторіях розвинених країн (Швейцарія, Бельгія, Німеччина, Великобританія, США та ін.) є різні методики визначення слідових кількостей ПХДД і ПХДФ, у т.ч. й найтоксичніших 2,3,7,8-заміщених конгенерів. За усієї різноманітності існуючих методик вони включають низку обов'язкових етапів, які використовуються під час визначення будь-яких токсикантів в об'єктах навколишнього середовища, сільськогосподарській і продовольчій сировині, харчових продуктах і біологічному матеріалі. Ці етапи включають екстракційну витяжку діоксинів із аналізованих матриць, ефективне очищення отриманих екстрактів від коекстрактивних речовин, які заважають визначенню цільових компонентів, розділення суміші конгенерів діоксинів за допомогою високороздільної газової хроматографії та ідентифікацію і кількісне визначення діоксинів за допомогою мас-спектрометрії високого розділення [10, 12].

Контроль за вмістом діоксинів та фуранів – складне аналітичне завдання, трудомістке, дороге і тривале (близько 7 днів), оскільки необхідно визначати ультрамалі кількості цих супертоксикантів. Наразі методи аналізу діоксину та діоксиноподібних ПХБ є дорогими та трудомісткими. Відтак потрібно розробити маловитратні та менш трудомісткі методи, які б унеможливили б у плановому порядку проводити аналіз великої кількості зразків і швидко та з малими витратами одержувати достовірні результати щодо присутності цих сполук у навколишньому середовищі, кормах та харчових продуктах [4].

Шляхи зниження вмісту діоксинів під час сміттєспалювання. В останні роки у багатьох країнах були введені нові стандарти на викиди в атмосферу забруднювальних речовин, що призвело до закриття чи переобладнання багатьох ССЗ [8, 13]. Наприклад, у Великобританії із 780 ССЗ, що функціонували на початку 1990-х рр., у 2001 р. залишилось усього 12 заводів зі спалювання ТПВ. Найдосконаліші німецькі технології, розроблені на початку 1990-х років, зменшили викиди в атмосферу у 10 разів. Для запобігання утворенню діоксинів сучасні ССЗ повинні бути обладнані суперсучасними спеціальними системами очищення відхідних газів, а у печах необхідно підтримувати відповідний температурний режим, адже діоксини руйнуються за температур понад 1200 °С.

Згідно з Нормативами Європейського Союзу [11], геометрія гарячої зони камери спалювання повинна забезпечити перебування газів у зоні з температурою, не нижчою за 850 °С протягом не менше як 2 с (правило 2-х секунд) за концентрації кисню – не менше як 6 %. Варто зазначити, що це дуже жорстка вимога і дотримуватись її непросто. Особливо важко домогтись високого вмісту кисню у зоні горіння. При цьому потрібно дотримуватись, що вимога 2-х секунд передбачає, що концентрація діоксинів у відхідних газах повинна бути прийнятною для їх очищення до регламентованих 0,1 нг/м³ (за 11 % кисню у газах). Однак при цьому не враховується особлива властивість діоксинів – здатність до повторного синтезу у холодній зоні. Для більшості відходів неможливо під час спалювання виконати межові значення викидів діоксинів (0,1 нг/м³) тільки за рахунок первинних заходів спалювання. Тому необхідні вторинні заходи вловлювання шкідливих викидів у довкілля.

Первинні способи запобігання утворенню ПХДД/Ф.

Основною умовою запобігання утворенню ПХДД/Ф є добре регульований процес спалювання, що унеможливорює утворення попередників діоксинів і фуранів. Він включає контроль якості і

підготовку відходів до спалювання (встановлення вхідних обмежень для складу і розмірів відходів, перевірка, відбір проб і випробування вхідних відходів). На підставі ідентифікації вхідних ризиків оператор термічної установки регулює режим спалювання і очищення відхідних газів, що, відповідно, знижує ризик утворення діоксинів.

Правильно вибрана технологія і добре контрольоване спалювання сприяють деструкції вихідних речовин і самих ПХДД/Ф. У зоні охолодження установки (утилізації енергії) основним завданням є підтримування відповідного температурного (450–200 °С) режиму для запобігання їх повторному утворенню.

Вторинні (додаткові) способи газоочищення.

Температура на вході у стадію видалення пилу (електрофільтри і рукавні фільтри) повинна підтримуватись нижчою за 200 °С, оскільки ПХДД/Ф добре зчеплюються з частинками пилу. Це досягається додатковим охолодженням і зменшенням часу перебування пилу за вищих температур (додаткове зрошування, загартування до 70 °С, додатковий теплообмін). Крім того, застосовуються фізико-хімічні методи: каталітичне окиснення для знешкодження ПХДД/Ф у каталітичних рукавних фільтрах та адсорбція за допомогою вугілля (інжекція активованим вугіллям, мокрий чи сухий нерухомий вугільний шар, використання матеріалів, просочених карбоном, або вугільної суспензії у мокрому газоочищенні). Поєднання пиловидалення і деструкції сприяють мінімізації викидів ПХДД/Ф у повітря.

Отже, можна виділити кілька напрямків підвищення екологічної безпеки процесу сміттєспалювання:

- вдосконалення системи термічної утилізації, а саме – застосування високотемпературних процесів;

- вдосконалення системи утилізації теплоти;

- вдосконалення системи газоочищення.

Реально знижують вміст діоксинів у відхідних газах тільки вугільні фільтри, на яких діоксини незворотно зв'язуються, а також спеціальні каталітичні допалювачі. Саме через труднощі їх уловлювання на сучасних ССЗ очисні споруди коштують дуже дорого.

Запобігання викидам діоксинів у довкілля. Для запобігання утворенню і викидам діоксинів у довкілля стратегія Комісії ЄС [9] передбачає:

- збір даних про рівень забруднення довкілля (повітря, води, ґрунту) з врахуванням потенційних значних викидів у неприєднаних до ЄС країнах внаслідок відсталих технологій (зокрема, збір епідеміологічних та токсикологічних даних);

- моніторинг рівня зараження довкілля діоксинами (напрацювання єдиної методології моніторингу забруднення з поєднанням епідеміологічних даних для розвитку системи швидкого реагування на загрозу);

- управління ризиками забруднення довкілля (заміна хлормістких матеріалів, зменшення промислових викидів під час спалювання відходів, моніторинг вмісту діоксинів у продуктах харчування і в кормах тварин).

Директива ЄС [11] передбачає до 2020 року перероблення (рециклінг) 50 % ТПВ (до 70 % будівельних відходів) в країнах-членах ЄС і досягнення рівня енергоефективності 65 % під час перетворення відходів в енергію.

Висновок. На підставі вищевикладеного потрібно зазначити, що сьогодні для спалювання нерозділеного сміття відсутні технології і технічні рішення, які повністю унеможливають надходження діоксинів у довкілля. До того ж проектування, будівництво і функціонування ССЗ, які відповідали б вимогам ЄС, у неприєднаних країнах на цьому етапі економічно неприйнятне. Ціна комплексної, а отже, безпечної системи позбавлення від пилу й очищення газів дорівнює ціні устаткування для термічної утилізації, що дуже обмежує його встановлення. Звідси випливає також тенденція, яку зараз можна спостерігати щодо побудови сміттєспалювальних заводів малої потужності у регіональному масштабі.

Відсутність в Україні лабораторій для виявлення діоксинів, низький рівень очищення викидів та скидів техногенних забруднювачів, недостатня поінформованість щодо токсикантів, як науковців, так і пересічних громадян, на тлі економічної стагнації і нехтування владою здоров'ям нації – це передумови проникнення в біосферу різних ксенобіотиків, зокрема, хлорпохідних екотоксикантів діоксинової групи. Знання причин, джерел і механізмів надходження їх у біосферу, а також можливих методів знешкодження або зниження їх емісії може істотно покращити ситуацію із надходженням цих надтоксичних речовин до біосфери.

1. Юдин А. Г. *Сжигать или не сжигать – вот в чем вопрос* / А. Г. Юдин // *Обзорная инф. “Научные и технические аспекты охраны окружающей среды”*. – 2015. – № 3. – С. 10–34.
2. Mastalerz P. *Krótki kurs historii POP/P*. Mastalerz, A. Kluchyk // *Wiad.Chem.* – 2003. – № 57(671). – С. 82–130.
3. Mastalerz, P. *The true story of DDT, CB and dioxine* / P. Mastalerz Wyd. Chemichne. – Wroclaw, 2005. – 226 p.
4. Falandysh, J. *Polichlorowane bifenile w środowisku: chemia, analiza, toksyczność, stężenia i ocena ryzyka* / J. Falandysh. Fundacja Rozwoju Uniwersytetu Gdańskiego. – Gdańsk, 1999. – 312 p.
5. Петрук М. П. *Перспективи знешкодження твердих побутових відходів в Україні* / М. П. Петрук, О. І. Козій, О. М. Вахула О. М., І. В. Мусак // *Зб. наук. пр. XV Міжнар. конф. “Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука і практика”*. – К., 2016. – С. 198–202.
6. Козій О. І. *Термічне знешкодження твердих побутових відходів: європейський досвід* / О. І. Козій, М. П. Петрук, Я. І. Вахула // *Зб. “Комунальне господарство міст”*. – Харків, 2015. – 120(1). – С. 122–125.
7. Mukherjee A. *A Review on Technologies of Removal of Dioxins and Furans from Incinerator Flue Gas* / A. Mukherjee, B. Debnath, Sadhan Kumar Ghosh // *Procedia Environmental Sciences*. – 2016. – V. 35. – P. 528–540.
8. Іщенко В. А. *Способи поводження з твердими побутовими відходами у містах України* / В. А. Іщенко // *Екологічна безпека та природокористування*. – 2015. – № 2 (18). – С. 21–30.
9. *Стратегія Комісії щодо діоксинів, фуранів та поліхлорованих біфенілів* / Повідомлення Комісії європейських співтовариств для Ради Європейського парламенту, економічно-соціального комітету. – Брюссель, 2001. – 31 с.
10. Безвозюк І. І. *Аналіз властивостей деяких стійких органічних забруднювачів* / І. І. Безвозюк, Р. В. Петрук, Т. В. Мельник // *Наукові праці ВНТУ*. – 2014. – № 3. – С. 1–5.
11. *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives* // *Official Journal of the European Union*. – 2008. – L 312. – P. 3–30.
12. Левчук І. В. *Визначення поліхлорованих біфенілів (ПХБ) в оліях та жирах* / І. В. Левчук // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2014. – № 1. – С. 113–120.
13. Гелетуха Г. *Екологічно чиста технологія газифікації* / Г. Гелетуха // *Наука та інновації*: – 2006. – Т. 2, № 4. – С. 9–10.