

УДК 628.47

О.І. Козій, М.П. Петрук, Н.М. Витрикуш

Інститут сталого розвитку ім. В.Чорновола Національного університету «Львівська політехніка», Україна

ЗНЕШКОДЖЕННЯ І ВИКОРИСТАННЯ ТВЕРДИХ ПРОДУКТІВ СМІТТЄСПАЛЮВАННЯ

Проведено огляд існуючих методів знешкодження твердих продуктів спалювання сміття з перспективою їх використання в будівельній галузі. Детоксикація золи і шлаку може здійснюватись методом вилучення вмісту сполук важких металів зі складу золи або їх стабілізації для зменшення вилугування і розчинення в ґрунті. Очищений шлак і зола можуть бути використані як мінеральна добавка в композиційних цементах і будівельних розчинах, як заповнювач в дорожньому будівництві, для влаштування гідротехнічних споруд.

Ключові слова: відходи, сміттєспалювання, інсінератор, знешкодження, зола, шлак, детоксикація

Стан проблеми

Термічне знешкодження (спалювання) є найбільш ефективним способом боротьби з екологічними загрозами твердих побутових відходів (ТПВ). Він дає можливість знизити обсяги відходів, які складаються на полігонах, у десятки разів. Сміттєспалювальні заводи (ССЗ) вирішують декілька завдань, які сприяють нормалізації стану довкілля. По-перше, в них переробляється і знищується та велика кількість сміття, яку щодня залишає після себе сучасне місто. По-друге, вони виробляють теплову енергію. І, по-третє, вони значно знижують обсяг залишків ТПВ, які вивозяться на полігони.

Основним способом поводження з ТПВ в Україні досі є захоронення на полігонах-звалищах в той час, як в розвинених країнах налагоджено їх сортування і подальша переробка. Відходи, що не підлягають переробці, піддають термічному знешкодженню з отриманням енергії відповідно до Директив ЄС [1]. Експлуатація двох українських сміттєспалювальних заводів (київська «Енергія» і Дніпро в минулому) не задовольняє сучасним екологічним вимогам, оскільки спалюється змішане органічне і неорганічне сміття без попереднього вилучення цінних вторинних ресурсів.

Проте будівництво екологічно безпечних сміттєспалювальних заводів сьогодні викликає все більше сумнівів у науковців та пересічних громадян через шкідливі викиди в довкілля та безповоротну втрату цінних вторинних ресурсів, тому найбільш перспективним варто вважати роздільне збирання ТПВ [2-4]. Внаслідок відсутності об'єктивної інформації про діяльність в сусідніх країнах сміттєспалювальних заводів в населення сформувалось негативне ставлення до об'єктів сортування і спалюван-

ня сміття. Лише в останнє десятиріччя переробляються окремо зібрані відходи паперу і ПЕТ-тари, а кваліфіковане поводження з ТПВ може заощадити різні види палива. Оптимальним варіантом утилізації ТПВ є експлуатація комплексу «сортування-спалювання» або відходносортувально-переробного комплексу [3,4, 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні роки у побутових відходах істотно зменшився вміст скляної і металевої тари, проте з використанням сучасних видів упаковки до 40-45% зріс обсяг паперу, пластику і полімерних матеріалів. А це вуглецева сировина, горіння якої відбувається з виділенням теплової енергії, тому технології сміттєспалювання широко використовуються для знешкодження ТПВ. Сміттєспалювальні заводи знайшли широке застосування в країнах з високою густиотою населення (ФРН, Японія, Швейцарія, Бельгія та ін.), в більшості розвинених країн переважає термічний спосіб знешкодження ТПВ (так, в Японії спалюється 82% сміття, в США - 81%, в Данії - 78%). Завдяки застосуванню найкращих доступних технологій, якими вважаються спалювання сміття в печах на механічних колошникових решітках і печах з вихровим киплячим шаром з багатоступеневою системою газоочищення, проблеми екологічної безпечної експлуатації ССЗ практично вирішені [5].

Проте експлуатація цих заводів у порівнянні зі сміттєпереробними підприємствами і полігонами потребує значно більших капітальних та експлуатаційних витрат. Особливо значна частина витрат іде на фільтри, що очищують викиди в повітря і роблять їх безпечними для довкілля. Крім того, складними і недостатньо надійними та ефективними є процеси очищення газів, а також утилізація та знешкодження

токсичної золи та шлаку, які утворюються при спалюванні ТПВ.

Будівництво і експлуатацію ССЗ, як правило, здійснюють енергетичні компанії, проблема енергетичної утилізації ТПВ практично вирішена, а основні дослідження спрямовані на підвищення енергоефективності таких сміттєспалювальних установок (інсінераторів) для отримання RDF палива (refuse derived fuel – паливо, отримане із відходів) Цікаво, що в азійсько-тихоокеанському регіоні кількість ССЗ збільшується в той час, як в Європі і США дещо зменшується або переобладнується через викиди в довкілля метану, що є парниковим газом. В зв'язку з бурхливим розвитком в останні десятиліття економіки Китаю і збільшенням обсягів ТПВ значна частина досліджень ефективності роботи ССЗ проведена в цій країні. Цей досвід може бути використаний і в Україні.

Під час роботи інсінераторів утворюються тверді (зола виносу і шлак), рідкі (стічні води, що утворюються під час мокрого очищення газів в скруберах) і газоподібні (суміш газів, з яких найнебезпечнішим є HCl, CO, SO₂) продукти сміттєспалювання. При високотемпературному спалюванні змішаних несортованих побутових відходів утворюється горючий синтез-газ (його спалюють з отриманням електроенергії і тепла), рідка фракція (суміш органічних і неорганічних компонентів), сухий залишок (карбамід, інші мінеральні речовини та хімічні елементи). Як наслідок, можна одержати сировину для палива і енергії, виробництва будівельних матеріалів та мінеральних добрив [7].

Метою статті є огляд вітчизняних та закордонних публікацій з питань складу і властивостей твердих продуктів (золи і шлаку) від спалювання несортованого комунального сміття в інсінераторах, знешкодження в них сполук важких металів і подальше їх використання як мінеральної сировини в будівельній та інших галузях.

Виклад основного матеріалу

Більшість установок для термічного знешкодження ТПВ в країнах Євросоюзу все ще є печами з колошниковими решітками в основі, куди завантажуються різноманітні відходи, що не підлягають повторному використанню. Вони містять, як правило, органічні і неорганічні компоненти, до складу яких входять небезпечні для довкілля сполуки важких металів. В результаті такого спалювання утворюються два основні тверді побічні продукти сміттєспалювання (СС): тонкодисперсна летка зола, що вловлюється на рукавних і електрофільтрах та потрапляє в стічні води при осадженні в скруберах, і грубодисперсний шлак, що накопичується під колошниковими решітками. Тверді продукти СС містять токсичні залишки таких важких металів як Pb,

Cu, Cr, Zn, Cd, які вилуговуються в воді при захороненні золи і шлаку на звалищах і, таким чином, можуть потрапити в ґрунт і ґрунтові води. [8]. Тому основною проблемою, що гальмує використання золи і шлаку як мінеральної сировини, є їх очищення або детоксикація (вилучення токсичних залишків).

До третини експлуатаційних витрат сміттєспалювальних заводів йде на оплату за захоронення золи, що утворюється при спалюванні відходів. Якщо менш токсичний шлак захоронюють на полігонах промислових відходів, то зола захоронюється в шахтах на глибині 700-800 м.

Аналіз хімічного складу шлаку і золи українських сміттєспалювальних заводів показав, що для них характерний значний вміст оксидів кремнію та кальцію. Це свідчить про те, що ці тверді продукти сміттєспалювання можуть використовуватися для виробництва будівельних матеріалів. Зразки золи Дніпропетровського сміттєспалювального заводу були досліджені на вміст 30 елементів, з яких було виявлено 18: барій, хром, свинець, олово, галій, нікель, цинк, цирконій, кобальт, титан, мідь, ванадій, германій, молібден, стронцій, марганець, вісмут, лантан. У відповідності з отриманими даними найбільший вміст серед металів, що знайдені в золі, відповідає барію, свинцю, олову, цинку, титану; в шлаку - барію, цинку, титану, марганцю. Оскільки ці компоненти забруднюють довкілля, важливою їх характеристикою є водорозчинність, що пов'язано із детоксикацією найбільшого за вмістом шкідливого компонента золи – плюмбуму.

При спалюванні і плавленні ТПВ сполуки таких важких металів як Ag, Bi, Ga, Ge, In, Sb, Te, Tl випаровуються у вигляді хлоридів, Sn – у вигляді сульфідів, які далі входять до складу золи [9].

Переробка легкої золи з метою детоксикації може здійснюватись двома шляхами: вилучення вмісту важких металів зі складу золи (вилуговування) або стабілізації катіонів важких металів в складі золи для зменшення їх вилуговування і розчинення в ґрунті.

Очищення легкої золи (ЛЗ) від токсичних сполук можна здійснювати різними способами. Важкі метали можна вилучати із золи-винусу шляхом термічної деструкції діоксинів при 500°C при низькому вмісті кисню [10], при цьому деструкція діоксинів складає 99%. В розчинах HCl при зменшенні розмірів частинок зольного залишку і рН до 3-4 відбувається кислотна екстракція катіонів Cd (89,0 ± 4,7%), Zn (60,3 ± 9,25), Cu (32,2 ± 1,7%) [8], а наступне осадження нерозчинних солей Cd і Zn дозволяє наблизити вилучення їх з розчинів до 100% [11]. Плавлення зольного залишку в дуговій полуменевій печі при 830-1030°C в присутності сполук сірки (NaSO₃, NaSO₄) і SiO₂ забезпечує утворення

стабільного обсклованого шламу, що задовільняє сучасним вимогам безпеки. При цьому абсорбція вмісту Cd складає 80-85%. Проведені експерименти показали можливість використання дрібних фракцій цеолітів в суміші з портландцементом для адсорбції водорозчинних сполук Pb, Cu, Cd, Zn [12].

Імобілізація важких металів в золі відбувається під час термічної обробки в обертових печах при 700-900°C з попереднім промиванням золи водою для зниження вилуговування сполук Pb з продукту випалу [13], обтоплення і обскловування на плазмовій установці [14, 15], мікрохвильового спікання [16]. Зольний залишок від спалювання ТПВ також стабілізують з допомогою гашеного вапна методом гідротермального твердіння під дією водяної пари при надмірному тиску і температурі 200°C [17]. Таким чином, в затверділих зразках стабілізуються важкі метали (Pb²⁺, Zn²⁺, Cr⁶⁺), зменшується їх вилуговування. Міцність зольного залишку впливає на імобілізацію важких металів.

Розроблено спосіб вологого просіювання і промивання ЛЗ з утворенням безпечної фракції [18]. Встановлено, що дрібніші частинки ЛЗ містять більше сполук важких металів, ніж грубіші, які можна захоронити на полігонах після тріступеневого промивання.

Зольний залишок (33) фракцій різного розміру піддавали прискореній карбонізації з метою утворення стійких сполук. Автори [19] подрібнювали зольний залишок до розмірів менше 425 мкм і порівнювали хімічний склад, визначений з допомогою РСТА, до і після карбонізації. Карбонізації більш піддатлива тонка фракція 33, з якої вилуговування катіонів Pb, Zn, Ca, Cr і органічних речовин знижувалось, що пов'язано з утворенням стійких вторинних мінералів.

Зольність ТПВ в Україні складає близько 35 %. За результатами досліджень якісного і кількісного складу твердих відходів Київського сміттєспалювального заводу "Енергія" за допомогою методу атомно-адсорбційного аналізу запропоновано технологію високотемпературної обробки легкої золи відходів сумісно з карбонатом кальцію з одержанням шлаку [20]. Така обробка зменшує токсичність відходів перед захороненням або застосуванням їх як домішок до будівельних матеріалів. Суттєвою перевагою цього шлаку є велика густина (2,7 - 3,5 г/см³), що виключає його розсіювання вітром. Позитивним є також спікання золи, що призводить до зменшення площі контакту між твердими відходами та доквіллям і відповідно до зменшення їх міграції.

Розтоплення шлаку в плазмовому процесорі з подальшим гранулюванням розплаву у воді є ефективним способом перетворення токсичних хімічних сполук Pb, Cr, Ni, Ta, Zr в інертний шлак; можлива взаємодія шлаку з ненасиченими полієфірними син-

тетичними смолами [21]. Після високотемпературного спалювання ТПВ в печах постійного струму пропонується плазмова обробка шлаків СС в дуговій печі з магнітодинамічним перемішуванням розплаву [22]. Вилуговування шлаку розчином NaCl і сорбція активованим вугіллям [23] дозволяє вилучити важкі метали в сорбційній колоні. В Японії метало-місткі фази шлаків (Fe, Cu) вводять в силікатне скло у вигляді корольків розмірами до 100 мкм і більше з утворенням інертного матеріалу. Досліджено, що концентрація важких металів в шлаках після піролізного топлення майже в 6 разів більша, ніж при плазмовому топленні [24].

Встановлено доцільність використання зеленої каолініто-гідрослюдистої глини у якості сорбенту як спосіб захисту довкілля від продуктів спалювання ТПВ, який забезпечує перехід важких металів у нерозчинну та нерухому форму та перешкоджає міграції небезпечних компонентів у довкілля [25].

З досвіду роботи європейських сміттєспалювальних заводів відомо, що шлак від спалювання ТПВ використовують при будівництві насипних гребель, доріг, тротуарів, стоянок. Найважливішою перевагою таких шлаків є доступна вартість, що дозволяє розглядати продукти спалювання ТПВ як джерело сировини для будівельної галузі.

Так, були проведені дослідження золошлакової суміші від спалювання ТПВ та отримані технічні, фізико-механічні і хімічні характеристики заповнювачів для бетонів. Отримані різні склади бетонів та гіпсобетонів з використанням заповнювачів із продуктів спалювання ТПВ.

Розбавлена і капсульована зола може вводиться у склад бетонів при застосуванні спеціальних добавок [9]. Зольний залишок після вилуговування (видалення важких металів) використовується в дорожньому будівництві [26].

Вивчено використання легкої золи як заміника метакаоліну при виготовленні геополімерів [27]. Введення до 40% золи змінює реакційну здатність і склад геополімерів на основі метакаоліну (Al₂O₃·2SiO₂·2H₂O), що утворюється при термообробці каоліну. Так, заміна 10% метакаоліну легкою золою збільшує реакційну здатність, на 15% збільшує міцність на стиск матеріалу після 28 діб його стабілізації і його пористість із збільшенням вмісту золи.

Досліджено вплив механохімічної стабілізації легкої золи на перебіг хімічних реакцій в цементному розчині [2]. Так, при дослідженні будівельних розчинів з вмістом легкої золи встановлено, що подрібненням вихідного матеріалу досягається стабілізація важких металів в розчині, збільшується питома пористість цементних зразків, знижується вміст Ca(OH)₂ і відбувається утворення силікат-гідрату кальцію.

Часткова заміна цементу шлаком (до 20 %) в складі шлакоцементних розчинів можлива при підвищенні його основності за рахунок модифікування з допомогою СаСО₃ (введення шлаку в розплав карбонату кальцію). В такому випадку рання міцність зразків зі шлаком наближається до міцності на стиск цементних зразків [23, 30].

Для використання шлаку від спалювання ТПВ в якості ґрунтів слід визначити його фізико-хімічні властивості для порівняння зі звичайними геологічними типами ґрунтів. Слід врахувати, що шлак є сумішшю різних речовин [29].

В НУ «Львівська політехніка» в рамках українсько-французької співпраці проводились дослідження шлаку ССЗ, розташованого поблизу м. Сержі-Понтуаз (Франція), з метою його подальшого використання в будівельній індустрії. Встановлено [31], що шлак має алюмосилікатну основу (до 70%) з домішками металів, золи і солей, частина з яких є розчинними (сульфати і хлориди натрію, калію та кальцію), а також невелику кількість солей важких металів (Pb, Zn, Cd та ін.). В результаті проведеного комплексу досліджень в технічному університеті м. Сержі-Понтуаз та НУ «Львівська політехніка» була вивчена можливість введення таких шлаків до складу композиційних цементів і як заповнювач до бетонів. В композиційних цементах частина клінкеру (найдорожчого компонента) замінювалася активними мінеральними добавками, зокрема, і промисловими відходами, в т.ч. і шлаком ССЗ. Так, при оптимальному підборі складу композиції і поєднанні компонентів за рахунок синергізму було досягнуто високих технологічних та фізико-механічних характеристик композиційних цементів.

Висновки

Таким чином, під час будівництва і експлуатації існуючих і нових ССЗ в Україні слід врахувати екологічні проблеми, пов'язані з утворенням твердих продуктів сміттєспалювання.

Летка зола і шлак як інертний матеріал після спалювання несортованих комунальних відходів можуть утилізуватись в будівельній та інших галузях лише після їх детоксикації – знешкодження сполук важких металів та інших токсичних речовин, що неминуче утворюються під час роботи інсінераторів. Таке знешкодження можна проводити шляхом вилучення важких металів зі складу золи і шлаку або їх стабілізації для зменшення вилуговування і розчинення в ґрунті. Очищений шлак і зола можуть бути використані як мінеральна добавка в композиційних цементах і цементних будівельних розчинах, як заповнювач в бетонах в дорожньому будівництві, як компонент геополімерів для влаштування набережних, дамб та інших гідротехнічних споруд.

Література

1. Козій, О.І. Термічне знешкодження твердих побутових відходів: європейський досвід [Текст] / О.І. Козій, М.П. Петрук, О.М. Вахула // Комунальне господарство міст - Харків, 2015. - 120(1). - С. 122-125.
2. Радовенчик, Я.В. Поверхова система роздільного збирання твердих побутових відходів [Текст] / Я.В. Радовенчик, В.В. Гончар, В.М. Радовенчик // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 2017. - №1. - С. 73-77.
3. Горлицкий, Б.А. Сфера обращения с отходами [Текст] / Б.А. Горлицкий // Тверд. быт. Отходы. - 2008. - №6. - С. 38-40.
4. Іщенко, В.А. Способи поводження з твердими побутовими відходами у містах України [Текст] / В.А. Іщенко // Екологічна безпека та природокористування. - 2015. - № 2 (18). - С. 21-30.
5. Тузов, А.Н. Опыт использования твердых коммунальных отходов в энергетике (обзор) [Текст] / А.Н. Тузов // Теплоэнергетика. - 2015. - № 12. - С. 13-22.
6. Фоменко, О.О. Аналіз технологій переробки твердих побутових відходів [Текст] / О.О. Фоменко, В.С. Маслова. // Науковий вісник будівництва, 2016. - № 3(85). - С. 267-270.
7. Гелетуха, Г.Г. Екологічно чиста технологія газифікації ТПВ [Текст] / Г.Г. Гелетуха // Наука та інновації: науково-практичний журнал. - 2006. - Т. 2. - №4. - С. 9-10.
8. Chiang Kung-Yogh, Jin Jeer-Chuan, Chen Ming-Dear (2008). The acid extraction of metals from municipal solid waste incinerator products. *Hydrometallurgy*, 93, 16-22.
9. Щерблякина, Т.П. Эколого-гигиенические аспекты утилизации золошлаковых отходов от сжигания ТКО [Текст] // Т.П. Щерблякин, В.А. Марьев, Г.Н. Фрейберг, М.Н. Горбовец // Тверд. быт. Отходы. - 2017. - №8 (133) - С. 63-67.
10. Lundin, L., Marklund, S. (2007). Thermal degradation of PCDD/F and HCB in municipal solid waste ash. *Chemosphere*, 67, 474-481.
11. Deegan, D.E., Chapman, C.D., Ismail, S.A., Wise, M.L.H., Ly, H., Philips, P.S. (2006). A radical new environmentally acceptable approach to hazardous waste management in the UK: A case study of plasma arc technology. *J. Solid Waste Technol. and Manag.*, 32, 246-256.
12. Ok Yong-Sick, Yang Jae E., Zhang Yong-Zeon, Kim Sin-Jung, Chung Doug-Yong. (2007). Heavy metal adsorption by a formulated zeolite-Portlandcement mixture. *J. Hazardous Mater.*, 147, 91-96.
13. Wey Ming-Yen, Liu Kuang-Yu, Tsai Tsung-Hsun, Chou Ling-Tong (2006). Thermal treatment of the fly ash from municipal solid waste incinerator with rotary kiln. *J. Hazardous Mater.*, - 137, 981-989.
14. Moustrakas, K., Xydis, G., Malamis, S., Haralambous, K.-J., Loizidou, M.J. (2008). Analysis of results from the operation of a pilot plasma gasification/vitrification unit for optimizing its. *J. Hazardous Mater.*, 151, 473-480.
15. Бернадинер, И.М. Обезвреживание и утилизация тяжелых металлов при сжигании ТКО [Текст] / И.М. Бернадинер, М.Н. Бернадинер // Тверд. быт. отходы, 2016. - №6. - С. 20-23.
16. Chou Sun-Yu, Lo Shang-Lien, Hsieh Ching-Hong, Chen Ching-Lung (2009). Sintering of MSWI fly ash by microwave energy. *J. Hazardous Mater.* - 163, 357-362.
17. Jing Zhenzi, Fan Xinwei, Zhou Lei, Fan Junjie et al. (2013). Hydrothermal solidification behavior of municipal solid waste incineration bottom ash without any additives. *Waste Manag.*, 33, 1182-1189.

18. De Boom, A., Degrez, M. (2015). Combining sieving and washing, a way to treat MSWI boiler fly ash. *Waste Manag.*, 39, 179-188.
19. Lin Wenlin Yvonne, Heng Kim Soon, Sun Xiaolong, Wang Jing-Yuan. Accelerated carbonation of different size fractions of MSW IBA and the effect on leaching// *Waste Manag.*, 41, 75-84.
20. Макаров, А.С. Переробка золи сміттєспалювальних заводів [Текст] / А. С. Макаров, С. Д. Борук, В.А.Завгорордний // *Экотехнологии и ресурсосбережение – 2006.* - №1. - С.46-48.
21. Kuo Yi-Ming, Tseng Ho-Jung, Chang Juu-En, Wang Jian-Wen, Wang Chin-Ta, Chen Hung-Ta (2008). An alternative approach for reusing slags from a plasma vitrification process. *J. Hazardous Mater.*, 156, 442-447.
22. Планковський, С.И. Переработка шлаков мусоросжигательных заводов [Текст] / С.И.Планковский // *Тверд. быт. отходы.* – 2008. - №6, - С.16-22.
23. Lee Tzen-chin, Wang Wie-Jer, Shih Ping-Yu, Lin Kae-Long (2009). Enhancement in early strengths of slag-cement mortars by adjusting basicity of the slag prepared from fly-ash of MSWI. *Cem. and Concr. Res.*, 39, 651-658.
24. Dimech, C., Cheeseman, C.R., Cook, S., Simon, J., Vaccaccini, A.R. (2008). Production of sintered materials from air pollution control residues from waste incineration. *J. Mater. Sci.*, 43, 4143-4151.
25. Борисовська, О.О. Удосконалення методів захисту довкілля від продуктів спалювання твердих побутових відходів з використанням гірських порід [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : / О.О.Борисовська; Нац. гірн. ун-т. - Д., 2009. - 19 с.
26. Дорофеев, В.С. Сучасні рішення по переробці твердих побутових відходів та досвід утилізації їх в будівельній галузі [Текст] / В.С.Дорофеев, О.Ф.Майстренко // *Вісник ОДАБА, Одеса, 2015.* - №53. - С. 131-134.
27. Zhang Zuhua, Wang Hao, Zhu Yingcan, Reid Andrew et al (2014). Using Fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis. *Appl. Clay Sci.*, 88-89, 194-201.
28. Chen Cheng-Gang, Sun Chang-Jung, Gan Sue-Huai, Wu Ching-Wei et al. (2013). The effects of the mechanical-chemical stabilization process for municipal solid waste incinerator fly ash in the chemical reactions in cement paste. *Waste Manag.*, 33, 858-865.
29. Schlom, S.-H. *Geotechnical aspects of waste combustion slag in use as soil material / Schlom S.-H., Turczynski U.* // *Вест. ПНИПУ. Стр-во и архитектура.* 2015, №2. – с. 40-49.
30. Aubert, J.E., Husson, B., Sarramone, N.J. (2007). Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Pt.2. Mechanical strength of mortars and environmental impact. *J. Hazardous Mater.*, 146, 12-19.
31. Петрук, М.П. Вирішення проблем утилізації твердих побутових відходів та продуктів їх спалювання [Текст] / М.П.Петрук // *Хімія, технологія речовин та їх застосування.* – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2011. - №700. - С.275-279.
4. Ishchenko, V. A. (2015). Methods of solid household waste management in the cities of Ukraine. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 2(18), 21-30.
5. Tugov, A. N. (2015). Experience of using municipal solid waste in the energy industry (An Overview). *Thermal Engineering*, 12, 13–22.
6. Fomenko, O. O., Maslova, V. S. (2016). Analysis of technologies of processing of solid domestic waste. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 3(85), 267-270.
7. Geletukha, G. (2006). Environmentally friendly gasification of municipal solid wastes. *Science and Innovation*, 2, 9-10.
8. Chiang Kung-Yogh, Jin Jeer-Chuan, Chen Ming-Dear (2008). The acid extraction of metals from municipal solid waste incinerator products. *Hydrometallurgy*, 93, 16-22.
9. Shcheblykyna, T. P., Marev, V. A., Freiberh, H. N., Horbovets, M. N. (2017). Ecological and hygienic aspects of utilization of ash and slag wastes from incineration. *Tverdye bytovye otkhody*, 8, 63-67.
10. Lundin, L., Marklund, S. (2007). Thermal degradation of PCDD/F and HCB in municipal solid waste ash. *Chemosphere*, 67, 474-481.
11. Deegan, D.E., Chapman, C.D., Ismail, S.A., Wise, M.L.H., Ly, H., Philips, P.S. (2006). A radical new environmentally acceptable approach to hazardous waste management in the UK: A case study of plasma arc technology. *J. Solid Waste Technol. and Manag.*, 32, 246-256.
12. Ok Yong-Sick, Yang Jae E., Zhang Yong-Zeon, Kim Sin-Jung, Chung Doug-Yong. (2007). Heavy metal adsorption by a formulated zeolite-Portlandcement mixture. *J. Hazardous Mater.*, 147, 91-96.
13. Wey Ming-Yen, Liu Kuang-Yu, Tsai Tsung-Hsun, Chou Ling-Tong (2006). Thermal treatment of the fly ash from municipal solid waste incinerator with rotary kiln. *J. Hazardous Mater.*, - 137, 981-989.
14. Moustarakas, K., Xydis, G., Malamis, S., Haralambous, K.-J., Loizidou, M.J. (2008). Analysis of results from the operation of a pilot plasma gasification/vitrification unit for optimizing its. *J. Hazardous Mater.*, 151, 473-480.
15. Bernadyner, Y. M., Bernadyner, M. N. (2016). Decontamination and utilization of heavy metals during combustion of MSW. *Tverdye bytovye otkhody*, 6, 20-23.
16. Chou Sun-Yu, Lo Shang-Lien, Hsieh Ching-Hong, Chen Ching-Lung (2009). Sintering of MSWI fly ash by microwave energy. *J. Hazardous Mater.* - 163, 357-362.
17. Jing Zhenzi, Fan Xinwei, Zhou Lei, Fan Junjie et al. (2013). Hydrothermal solidification behavior of municipal solid waste incineration bottom ash without any additives. *Waste Manag.*, 33, 1182-1189.
18. De Boom, A., Degrez, M. (2015). Combining sieving and washing, a way to treat MSWI boiler fly ash. *Waste Manag.*, 39, 179-188.
19. Lin Wenlin Yvonne, Heng Kim Soon, Sun Xiaolong, Wang Jing-Yuan. Accelerated carbonation of different size fractions of MSW IBA and the effect on leaching// *Waste Manag.*, 41, 75-84.
20. Makarov, A. S., Boruk, S. D., Zavorordnii, V. A. (2006). Makarov AS. Processing of ashes of incinerator plants. *Ekotekhnologii i resursosberezhenie*, 1, 46-48.
21. Kuo Yi-Ming, Tseng Ho-Jung, Chang Juu-En, Wang Jian-Wen, Wang Chin-Ta, Chen Hung-Ta (2008). An alternative approach for reusing slags from a plasma vitrification process. *J. Hazardous Mater.*, 156, 442-447.
22. Plankovskiy, S. Y. (2008). Processing of slags of incineration plants. *Tverdye bytovye otkhody*, 6, 16-22.
23. Lee Tzen-chin, Wang Wie-Jer, Shih Ping-Yu, Lin Kae-Long (2009). Enhancement in early strengths of slag-cement mortars by adjusting basicity of the slag prepared from fly-ash of MSWI. *Cem. and Concr. Res.*, 39, 651-658.

References

1. Koziy, O. I., Petruk, M. P., Vakhula, O. M. (2015). Thermal neutralization solid Waste: European Experience V zb. *Komunalne hospodarstvo mist, Kharkiv*, 120(1), 122-125.
2. Radovenchyk, Ya. V., Honchar, V. V., Radovenchyk, V. M. (2017). Storied separate collection systems solid waste. *Proceedings of the NTUU "Igor Sikorsky KPI". Series: Chemical engineering, ecology and resource saving*, 1, 73-77.
3. Gorlytskyi, B. A. (2008). Scope of waste management. *Tverdye bytovye otkhody*, 6, 38-40.

24. Dimech, C., Cheeseman, C.R., Cook, S., Simon, J., Boccaccini, A.R. (2008). Production of sintered materials from air pollution control residues from waste incineration. *J. Mater. Sci.*, 43, 4143-4151.
25. Borysovska, O. O. Improvement of environmental protection methods from products of incineration of solid domestic wastes by using rocks : avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : /; Nats. hirn. un-t. - D., 2009, 19.
26. Dorofeiev, V. S., Maistrenko, O. F. (2015). Modern solutions for the recycling of solid household waste and their utilization experience in the construction industry. *Proceedings of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. Zb. nauk. prats, Odesa*, 53, 131-134.
27. Zhang Zuhua, Wang Hao, Zhu Yingcan, Reid Andrew et al (2014). Using Fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis. *Appl. Clay Sci.*, 88-89, 194-201.
28. Chen Cheng-Gang, Sun Chang-Jung, Gan Sue-Huai, Wu Ching-Wei et al. (2013). The effects of the mechanical-chemical stabilization process for municipal solid waste incinerator fly ash in the chemical reactions in cement paste. *Waste Manag.*, 33, 858-865.
29. Schlom, S.-H. & Turczynski, U. (2015) Geotechnical aspects of waste combustion slag in use as soil material. *Vest. PNIPU. Str-vo i arhitektura*, 2, 40-49.
30. Aubert, J.E., Husson, B., Sarramone, N.J. (2007). Utilization of municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash in blended cement. Pt.2. Mechanical strength of mortars and environmental impact. *J. Hazardous Mater.*, 146, 12-19.
31. Petruk, M. P. (2011). Solving the problems of solid domestic wastes utilization and products of their incineration.

Visn. NULP «Khimiia, tekhnolohiia rechovyn ta yikh zastosuvannia», 700, 275-279.

Рецензент: д-р техн. наук проф. Х.С. Соболев, НУ «Львівська політехніка», Інститут будівництва та інженерії довкілля, Львів, Україна

Автор: КОЗІЙ Оксана Іванівна
кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки
Інститут сталого розвитку ім. В.Чорновола НУ «Львівська політехніка»
E-mail – oksanakoziy@gmail.com

Автор: ПЕТРУК Марія Петрівна
кандидат технічних наук, доцент кафедри цивільної безпеки
Інститут сталого розвитку ім. В.Чорновола НУ «Львівська політехніка»
E-mail – petrukmp@ukr.net

Автор: ВИТРИКУШ Наталія Миронівна
кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри цивільної безпеки
Інститут сталого розвитку ім. В.Чорновола НУ «Львівська політехніка»
E-mail – vytrykush@ukr.net

DISPOSAL AND USE OF SOLID WASTE INCINERATION PRODUCTS

O. Koziy, M. Petruk, N. Vytrykush

Viacheslav Chornovil Institute of Sustainable Development Lviv Polytechnic National University, Ukraine

The thermal decontamination (incineration) is the most effective way to deal with the environmental hazards from municipal solid waste (MSW). Solid (fly-ash and slag) as well as liquid and gaseous products of incineration are formed during incineration plants (incinerators). Most incinerators in the Europe Union are still furnaces with grates at the base, where non-recyclable waste is loaded. They contain usually organic and inorganic components, which comprise hazardous to the environment heavy metals.

As a result of combustion of unsorted garbage, two main solid by-products of incineration are formed: a fine-grained fly-ash, which is captured on the sleeve and electrofilters and the wastewater after the deposition in a scrubber, and the coarse dispersion slag accumulated under the furnace grates. Solid products contain toxic residues of heavy metals such as Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, which are dissolved in water during the dumping of ash and slag in landfills, and thus can get into the soil and groundwater.

The main problem hampering the use of solid incineration by-products as mineral raw materials is their purification or detoxification (removal of toxic residues). An overview of existing methods of detoxification of ash and slag, which are obtained as a result of waste incineration, with subsequent use in the construction industry, is carried out in this work. The ash recycling for detoxification can be carried out in two ways: removal of heavy metals from the ash (leaching) or their stabilization in the ash to reduce leaching and dissolution in the soil.

The chemical analysis of the slag and ashes composition from Ukrainian waste incinerators has shown that they have a significant content of silicon and calcium oxides. It does indicate that those solid waste incineration products can be used for the production of building materials. The refined slag and ash can be used as a mineral additive in composite cements and cement mortars, as an addition to concrete in road construction, as a component of geopolymers for the installation of embankments, dams and other hydrotechnical structures.

Keywords: waste, combustion, incinerator, fly-ash, slag, detoxification