

*Азаров С.І., д.т.н., с.н.с.,
Сидоренко В.Л., к.т.н., доцент,
Демків А.М.*

РОЗРАХУНОК ВИКИДІВ МЕТАНУ В АТМОСФЕРУ ДЛЯ ОЦІНКИ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Досліджено якісні та кількісні характеристики інгредієнтного складу біогазу, визначені його фізико-хімічні властивості. Розглянуто умови утворення метану на полігоні твердих побутових відходів при стандартній процедурі зберігання. Зроблено розрахунок розсіювання компонентів викиду метану з полігону твердих побутових відходів. Встановлено, що викиди з полігонів твердих побутових відходів, які експлуатуються протягом тривалого часу, являють собою пожежну небезпеку для навколишнього середовища.

Ключові слова: біогаз, викиди метану, метан, пожежна небезпека, полігон ТПВ, тверді побутові відходи.

Постановка проблеми. На даний час захоронення твердих побутових відходів (ТПВ) в Україні є пріоритетним методом знешкодження відходів. Розміщення відходів у навколишньому середовищі призводить до того, що протягом тривалого часу на обмеженій площі концентрується значна кількість забруднюючих речовин. До сих пір на території України залишається велика кількість несанкціонованих і стихійних звалищ відходів і закритих поховань – об'єктів, які експлуатуються з порушенням екологічних та протипожежних вимог. Як правило, подібні території характеризуються високим ступенем емісії забруднюючих речовин в об'єкти навколишнього середовища, що пов'язано з відсутністю або низькою ефективністю елементів інженерного захисту. У депонованих ТПВ під впливом мікрофлори протікають процеси біодеструкції, випаровування летючих фракцій, хімічні реакції, характерні для анаеробних умов. Кінцевим продуктом є біогаз, основну об'ємну масу якого складають метан (40–70 %) і діоксид вуглецю (30–60 %), в помітно менших концентраціях містяться сірководень, аміак, оксид вуглецю, оксиди азоту і домішки органічного складу (нормальні і розгалужені алкани, нафтени й ароматичні вуглеводні, галогенотримуючі вуглеводні). Деякі його компоненти горючі і вибухопожежонебезпечні.

Питомі швидкості емісії газоподібних речовин з територій поховань відходів помітно перевищують інтенсивності потоків від природних екосистем. Характер і інтенсивність процесів, що протікають в масиві відходів, дозволяють розглядати об'єкти захоронення ТПВ як своєрідний „твердофазний ферментер геологічного масштабу” і найбільшу штучну систему, яка продукує метан.

Пожежна небезпека метану обумовлена можливістю його поширення на прилеглі до поховання території і, як наслідок, створенням вибухонебезпечних газоповітряних сумішей при досягненні концентрації від 5 до 15 % обсягу. На території захоронення ТПВ при порушенні технології (нерегулярної ізоляції, відсутності зволоження відходів в пожежонебезпечний період) метан сприяє загорянню відходів. Горіння ТПВ у низькотемпературному режимі (600–800 °С) і нестачі кисню веде до утворення високотоксичних галогенотримуючих з'єднань.

Вигорання відходів всередині звалищних відкладень може бути причиною загибелі людей і втрати техніки через раптові провалів поверхні. На українських полігонах і звалищах біогаз практично не збирається.

У зв'язку з викладеним, для захисту від загоряння метану і запобігання загрози вибухопожежних ситуацій необхідно утилізувати біогаз, що утворився в тілі полігону, не допускаючи його проникнення в атмосферу.

Аналіз останніх досліджень. Перші наукові праці у нашій країні щодо проектування полігонів ТПВ та розміщення сміттєзвалищ відносять до 60-70-х років минулого століття. Зараз над проблематикою експлуатації полігонів ТПВ, впливу їх на довкілля присвячено роботи багатьох вітчизняних і закордонних науковців і вчених (Абрамова Н.Ф., Баб'як Н.М., Грибанова Л.П., Гуман О.М., Любомирова В.Н., Орлова Т.А., Рябов Ю.В., Скорик Ю.І., Чонка І.І., Шишкина Я.С., J. Schmidt, P. Williams та ін.), але питанням їх пожежної небезпеки для навколишнього середовища приділяється ще недостатньо уваги.

Постановка завдання. Метою дослідження є розрахунок викидів метану з полігонів ТПВ в атмосферу з метою прогнозу виникнення самовільних загорянь та утворення вибухопожежних ситуацій на них.

Виклад основного матеріалу.

Результати дослідження утворення біогазу і їх обговорення.

При розкладанні ТПВ на полігонах утворюється біогаз – газова суміш метану, вуглеводнів, вуглекислого газу, сірководню, ксилолу, аміаку та ін.

Процес біодеструкції органічної частини відходів відбувається нерівномірно і з різною інтенсивністю, про це свідчить нерівномірний розподіл концентрацій компонентів біогазу на глибині 1,5 м від поверхні тіла полігонів і різна швидкість емісії біогазу.

На кількісну характеристику викидів метану з полігонів відходів впливає велика кількість чинників, серед яких кількість завезених щорічно відходів, вологість відходів, потужність шару складованих відходів, кліматичні умови, склад відходів, співвідношення вуглецю і загального азоту тощо.

Складні органічні речовини, що входять до складу ТПВ, розкладаються до простих неорганічних сполук протягом тривалого часу. Продукти ферментативного розкладання органіки, такі як CO_2 , H_2 , CH_2OH , CH_3COOH служать субстратом для утворення метану за таких реакцій [1, 2]:



Прийнято виділяти 5 фаз розкладання відходів [3, 4]:

1 фаза – аеробне розкладання;

2 фаза – анаеробне розкладання без виділення метану (бродиння);

3 фаза – анаеробне розкладання з непостійним виділенням метану (змішане бродіння);

4 фаза – анаеробне розкладання з постійним виділенням метану (метанове бродіння);

5 фаза – загасання анаеробних процесів.

Фаза аеробного розкладання має місце в перші 10–15 днів з моменту розміщення відходів, 2 і 3 фази тривають від 180–500 днів до 2–10 років, 4-я фаза –

від 10 до 30 років, загасання метаногенеза і повна асиміляція звалищних відкладень можуть займати від 100 до 1000 років.

Дослідження процесів біодеструкції ТПВ показали, що на характер процесів їх розкладання, час протікання, кількість і швидкість виділення метану впливають ряд факторів:

- морфологічний, фракційний та хімічний склад ТПВ;
- умови метаногенеза (вологість ТПВ, густина, рН, температура, час);
- кліматичні і геологічні умови території;
- параметри полігону і умови поховання (площа, висота, ущільнення, ізоляція шарів);
- технологія дегазації масиву відходів (пасивна, активна).

В значній мірі метаногенез визначається морфологічним складом відходів та наявністю компонентів, здатних до біодеструкції. Зміст в складі ТПВ рослинних залишків, паперу, текстилю, деревини та інших органічних фракцій визначає кількість біогазу, що утворюється і концентрацію у ньому метану. Питома вага фракції з високим вмістом органічних речовин (СО), що легко розкладаються, визначає кількість поживних мікроелементів, потрібних для метаноутворюючих бактерій. Кількість біогазу пропорційно вологості відходів. Вологоутримання визначає активність анаеробних процесів в екосистемі масиву відходів. Розчинність діоксиду вуглецю у воді вище, ніж розчинність метану, тому високий рівень вологості ТПВ збільшує вміст метану в газовій фазі. Мінімальна вологість для початку процесу утворення газу складає 20 %. Максимальна кількість біогазу утворюється при значеннях вологості 60–80 %. Фактичне утримання вологи в депонованих відходах буде визначатися вихідною вологістю, заходами підготовки відходів до поховання, дотриманням технології поховання, в тому числі обов'язкової проміжної пошаровим ізоляцією складованих ТПВ.

Температура, як і вологість, є визначальним фактором активності метаноутворюючих бактерій. Мезофільні групи метаноутворюючих бактерій активно працюють при температурі до 40 °С, термофільні – до 70 °С. Зростання температури в масиві відходів не пов'язаний зі зміною температури зовнішнього повітря і приблизно однаковий на глибині 2-4 м. При висоті складованих відходів більше 15 м нижні шари не схильні до впливу температур повітря. Зазвичай температура в „тілі” полігону становить 30-40 °С.

Органічні речовини, що містяться у відходах, володіють різною інтенсивністю розкладання. Так, гума, шкіра, полімерні матеріали тощо розкладаються мікроорганізмами дуже повільно, в той час як органічні складові відходів, що містять білкові речовини, крохмаль, розкладаються дуже швидко. Таким чином, можна вважати, що органічна складова відходів складається з „пасивної” (що не генерує) органічної речовини і „активної” (що генерує) органічної речовини. Активний органічний вуглець, що входить в формулу (1), відноситься до „активної” органіці і визначається в лабораторних умовах відповідно до [5].

В результаті реакції гідролізу утворюються низькомолекулярні органічні речовини, які протягом кількох тижнів проходять стадію киснево-нітратного окиснення і розкладаються в аеробних умовах до води, діоксиду вуглецю й азоту. При протіканні цих процесів у тілі полігону відзначається підвищення температури. Для анаеробних умов характерна стадія розпаду продуктів гідролізу. Тривалість цієї стадії – від 1 до 6 місяців. В результаті процесів ферментації та відновлення сульфатів органічні речовини руйнуються до низькомолекулярних кислот (утворюється,

зокрема, оцтова кислота), діоксиду вуглецю і сульфїду водню та в невеликих кількостях виділяється метан. При цьому утворюються проміжні продукти – карбонові кислоти і спирти. З'єднання, що утворилися, можуть потім використовуватися метаноутворюючими бактеріями для виробництва метану.

В тілі полігону ТПВ під впливом мікрофлори відбувається біотермічний анаеробний процес розпаду органічних складових відходів, здатних на 70-80 % до розкладання в анаеробних умовах. Кінцевим продуктом цього процесу є біогаз, основну об'ємну масу якого складають метан і діоксид вуглецю. Кількісний та якісний склад біогазу залежить від багатьох факторів, в тому числі від кліматичних і геологічних умов місця розташування полігону, морфологічного і хімічного складу відходів, умов складування (площа, обсяг, глибина поховання), вологості, густини і т.п., та підлягає уточненню в кожному конкретному випадку. Для розрахунку кількісних і якісних характеристик утворення біогазу для конкретного регіону (мегаполісу) в якості вихідних даних приймається морфологічний склад органічної частини відходів, утримання основних хімічних елементів у сухій речовині і кількість сухої речовини органічною складовою відходів, здатної до розкладання в анаеробних умовах. Зброджування без доступу кисню призводить до утворення етанолу, діоксиду вуглецю і виділення невеликої кількості тепла (в 12 разів менше, ніж при аеробному процесі). Тому на відміну від швидкого знезараження при аеробному процесі процес знезараження ТПВ при анаеробному зброджуванні досить повільний і вимагає великих витрат часу. Стадія анаеробного розкладання органічних речовин розтягнута в часі і триває протягом 8-40 років, причому перші три роки процес утворення метану протікає стійко. По мірі зниження виходу біогазу починається остання стадія розкладання органічних відходів – стадія утворення гумусу. Її тривалість – до 40 років.

Біохімічна деструкція органіки в тілі полігону і місцях захоронення ТПВ, яка пояснює стадії розкладання органічних складових ТПВ, може бути представлена наступними теоретичними поясненнями. Щодобове перекриття ТПВ шарами інертного ґрунту, з одного боку, захищає атмосферу від забруднення, а з іншого – припиняє доступ кисню до ТПВ, покладеним в тіло полігону. Однак ТПВ є пористим матеріалом, тому запасу повітря в їх порах достатньо, щоб перший час (до 3 місяців) в тілі полігону протікали аеробні процеси. При цьому відбувається розігрів тіла полігону до температури 20-40 °С і основними продуктами аеробних процесів є діоксид вуглецю і вода. Поступово, по мірі використання запасів кисню в порах ТПВ активність аеробних процесів падає і в ТПВ, що починають переважати анаеробні процеси, викликані діяльністю анаеробних мікроорганізмів. Ці процеси йдуть повільно і переважно в харчових відходах і інших органічних сполуках. Анаеробні мікроорганізми не використовують молекулярний кисень повітря для окислення органічних речовин, а отримують необхідну для життєдіяльності енергію в результаті розщеплення органічних речовин. Ці процеси отримали назву анаеробного зброджування. Анаеробне зброджування – це комплекс біохімічних процесів, що перетворюють органічні сполуки ТПВ в стабільний продукт.

Модель прогнозу утворення біогазу і оцінки його емісії з території поховання ТПВ.

В більшості моделей прогнозу утворення біогазу й оцінки його емісії з території поховання ТПВ враховується вплив зазначених чинників, встановлених розрахунковими, статистичними і експериментальними даними [5-7].

Для оцінки біогазового потенціалу полігонів ТПВ був застосований метод

визначення потенційної кількості біогазу. Кількість біогазу, що виділяється з тіла полігону можна визначити за формулою [5]:

$$V = N Q_w (1 - ft), \quad (4)$$

де V – кількість біогазу, що виділяється з полігону ТПВ, т/рік; N – кількість складованих відходів, т; Q_w – питомий вихід біогазу, т/т; f – кількість активної органічної речовини, що розкладається за рік; t – період складування відходів, рік.

Для практичних розрахунків зручніше користуватися відомим рівнянням виходу біогазу при метановому бродінні [5]:

$$Q_w = 10^{-6} R (100 - W) (0,92 Ж + 0,62 B + 0,34 Б), \quad (5)$$

де Q_w – питомий вихід біогазу за період активного виходу, кг/кг відходів; W – природна вологість відходів, %; R – середній вміст органічної складової у відходах на суху масу, %; $Ж$ – вміст жироподібних речовин в органіці відходів, %; B – вміст вуглеводородоподібних речовин в органіці відходів, %; $Б$ – вміст білкових речовин в органіці відходів, %; $W, R, Ж, B$ і $Б$ визначаються аналізами відібраних проб відходів.

Відповідно до проведених досліджень було встановлено, що вміст органічної складової в розглянутих відходах – $R = 55$ %; вміст жироподібних речовин – $Ж = 2$ %; вміст вуглеводородоподібних речовин – $B = 80$ %; вміст білкових речовин – $Б = 15$ %; середня вологість відходів – $W = 60$ %.

Обсяг біогазу (Q_t , м³/т ТПВ) можна також визначити з виразу [6]:

$$Q_t = \frac{1,88 G_0 (1 - 10^{kt})}{[1 - (W - 60) / 13]^4}, \quad (6)$$

де W – вологість відходів, %; G_0 – метановий потенціал, кг/т ТПВ; k – стала розкладання, що дорівнює відношенню вуглецю до загального азоту (C/N) та визначається згідно з [3]; t – тривалість періоду стабілізованого виходу біогазу (четверта фаза), роки.

Метановий потенціал ТПВ визначає ймовірність появи метану при розкладанні органічної компоненти відходів в анаеробних умовах. Лабораторними, польовими дослідженнями і розрахунковим шляхом встановлено широкий діапазон середніх значень G_0 для європейських і американських полігонів – від 6,2 до 270 м³/т ТПВ і залежить від змісту органічного вуглецю і умов розкладання [7]:

$$G_0 = 1,868 C_{акт.} (0,014T + 0,28), \quad (7)$$

де $C_{акт.}$ – активний органічний вуглець, г/т відходів; T – температура в тілі полігону, °C (коливається від 28 до 32 °C).

З іншого боку, загальна кількість біогазу ($Q_{об.}$, м³/т ТПВ), що виділився за період з початку експлуатації полігону до моменту розрахунку, враховує час відсутності газової емісії (2 роки) можна визначити за формулою [8]:

$$Q_{об.} = P_t (t - 2) V, \quad (8)$$

де P_t – загальна кількість відходів за час експлуатації, т; t – період з початку експлуатації до моменту розрахунку, рік; V – вихід біогазу при метановому бродінні.

Визначення обсягу біогазу на полігонах ТПВ.

Морфологічний склад складованих відходів наступний [1-4]: харчові відходи – 20,7-31 %; деревина – 0,4-1,0 %; макулатура – 30,2-38,3 %; текстиль – 5,1-6,2 %; шкіра – 0,35-0,40 %; гума – 0,35-0,45 %; полімерні матеріали – 11,2-13,1 %; чорні і кольорові метали – 7,6-9,8 %; скло – 5,8-7,4 %; будівельне сміття – 8,6-11,6 %; інші – 9,7-12,7 %.

Вихідна вологість ТПВ складає в середньому 55-60 % і залежить від кількості органічних складових у відходах і їх густини.

Для розрахунку обсягів утворення метану в складі біогазу Грибовицького полігону побутових відходів, який знаходиться на околиці села Великі Грибовичі (Жовківський район) в 3 кілометрах від Львова і Хмельницького міського полігону побутових відходів були використані наступні дані [8].

Площа Грибовицької полігону побутових відходів – 30 га; площа Хмельницького міського полігону побутових відходів – 18 га. Обсяг складованих побутових відходів становить: 50 млн. м³ – Грибовицький полігон; 2850 тис. м³ – Хмельницький полігон. Річний обсяг твердих побутових відходів становлять: 2353 тис. м³ – Грибовицький полігон; 1854 тис. м³ – Хмельницький полігон.

Макрокомпонентами біогазу були метан і вуглекислий газ. На Грибовицькому полігоні в закритій зоні концентрація CH₄ складала 489,2 г/м³, CO₂ змінювалася у межах (0,59-1031,2) г/м³, у функціонуючій зоні CH₄ змінювалася у межах (0,36-487,1 г/м³), CO₂ змінювалася від 1,57 до 1088,2 г/м³. На Хмельницькому полігоні в закритій зоні максимальна концентрація CH₄ змінювалася від 405,8 до 495,6 г/м³, CO₂ – від 429,1 до 743,2 г/м³, у функціонуючій зоні CH₄ – від 340,2 до 476,4 г/м³, CO₂ змінювалася від 530,6 до 883,5 г/м³. Приблизний склад основних компонентів біогазу в % мас: метан (CH₄) – 40-75 (зазвичай 50–60); діоксид вуглецю (CO₂) – 30-40; азот (N) – 0,8-1,0; сірководень (H₂S) – 1-2, кисень (O₂) – 1-2, інші токсичні сполуки – в невеликих кількостях.

Проведені обчислення за формулами (1-8) дозволили встановити, що вихід біогазу з полігонів буде спостерігатися до 2020 року, максимальний вихід біогазу з двох полігонів доводиться на 2016 року і становить для Грибовицької полігона 197 500 т/рік, для Хмельницького полігона – 68 600 т/рік. Загальна кількість біогазу, який надійшов в атмосферу у період з 2010 по 2016 роки з Грибовицької полігону складає 1 700 000 т, з Хмельницького полігону – 800 000 т.

Біогаз, що знаходиться у вільних порожнинах полігонів ТПВ при утриманні метану 5-12 % мас і 12 % кисню утворює вибухопожежну суміш. Прикладами тому мають місце загоряння на полігонах ТПВ та середніх і великих міст України у 2016 році.

Обсяг емісії біогазу прийнятий в якості вихідних даних для моделювання переносу і розсіювання метану як компонента, що обумовлює вибухопожежну небезпеку для території в зоні впливу полігону захоронення ТПВ.

Наприклад, полігон, де заскладовано 20 млн. т ТПВ, може слугувати, за прогнозними оцінками, джерелом отримання від $3,5 \cdot 10^9$ до $6,0 \cdot 10^9$ м³ біогазу, а відповідно до 50 % мас метану (CH₄) з питомою теплотою згоряння 15-20 МДж/м³, що відповідає приблизно 50 % теплоти згоряння природного газу 38,2 МДж/м³ (7-11 кКал/м³). При цьому середня вологість біогазу – 35-40 % мас.

Пожежі виникають на полігонах зазвичай при досягненні мінімально допустимої вибухо або пожежонебезпечної концентрації метану в атмосфері полігону, що становить 5–15 об. %. Основним джерелом загоряння можуть бути осколки скла, наявні на поверхні полігонів і які викликають місцевий перегрів, підвищення температури в місці виходу біогазу з тіла полігону, а також людський чинник. Незважаючи на різноманіття чинників, що впливають на утворення біогазу, якісний склад його приблизно постійний, але в залежності від циклу життя полігону концентрація компонентів може варіювати в широкому діапазоні. Надходження біогазу на денну поверхню залежить в основному від стану верхнього шару відходів і

ступеня їх ізоляції від атмосферного повітря. Змішання біогазу з повітрям відбувається в верхніх, більш пухких шарах полігону. При ущільненні верхніх шарів або ж наявності герметичного покриття полігону біогаз виділяється на схилах поверхні полігону.

Висновки.

Результати досліджень показали, що стандартна процедура тривалого зберігання відходів та обсяги утворення біогазу на полігонах ТПВ обумовлюють достатньо велику ймовірність виникнення осередків загорянь або навіть вибухів, що може призвести до масштабних пожеж з відповідним негативним впливом на оточуюче навколишнє середовище.

Вчасна оцінка рівня пожежонебезпечності полігонів ТПВ дасть змогу завчасно попереджувати загоряння ТПВ та запобігати пожежам на них.

Список використаних джерел

1. Горбатюк О.В. Ферментеры геологического масштаба / О.В. Горбатюк, О.И. Минько, А.Б. Лифшиц и др. // Природа. – 1989. – № 39. – С. 71-79.
2. Органическая химия атмосферы / В.А. Исидоров – СПб.: Химия, 1992. – 288 с.
3. Минько О.И. Экологические и геохимические характеристики свалок твердых бытовых отходов / О.И. Минько, А.Б. Лифшиц // Экологическая химия. – 1992. – № 2. – С. 37-47.
4. Вайсман Я.И. Управление метаногенезом на полигонах твердых бытовых отходов / Я.И. Вайсман, О.Я. Вайсман, С.В. Максимова – Пермь: ПГТУ, 2003. – 232 с.
5. Gendebien A. and others. Landfill gas. Comission of the European Communi ties. Brussels, 1992. – 865 p.
6. Методические указания по расчету количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых отходов. – М.: АКХ им. К.Д. Памфилова, 1995. – 25 с.
7. Абрамов Н.Ф., Санников Э.С., Русаков Н.В. и др. Методика расчета количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов. – М.: Академия коммунального хозяйства имени К.Д. Памфилова, 2004.
8. Источник: Информационное агентство „Вчасно” — <http://vchasnoua.com/donbass/40621-v-donetskoj-oblasti-zagorelsya-poligon-tverdykh-bytovykh-otkhodov-pozhar-tushili-54-cheloveka2> HYPERLINK „<http://vchasnoua.com/donbass/40621-v-donetskoj-oblasti-zagorelsya-poligon-tverdykh-bytovykh-otkhodov-pozhar-tushili-54-cheloveka2>”