

УДК 504.3:628.395, 504.4.054:371.777
№ держреєстрації 0119U102754
Інв. №

МІНІСТЕРСТВО ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ УКРАЇНИ

НАУКОВО-ДОСЛІДНА УСТАНОВА
«УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ»
(УКРНДІЕП)

61166, м. Харків, вул. Бакуліна, 6, тел./ факс. (057) 702 15 92

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор УКРНДІЕП
д-р геогр. наук, проф.
_____ А. В. Гриценко

грудня 2019 р.

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
за темою № 2/2.3-19
РОЗРОБКА МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК З РОЗРАХУНКУ ОБСЯГІВ ВИКИДІВ
ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПОЛІГОНІВ
ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ
(остаточний)

Науковий керівник НДР,
зав. лабораторії,
канд. техн. наук, доцент

Т.Ф. Жуковський

2019

Результати цієї роботи розглянуто Вченою радою УКРНДІЕП,
протокол від 05 грудня 2019 р. № 5

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник НДР, зав. лабораторії 2.3, к.т.н., доцент	Т. Жуковський (реферат, вступ, розділи 1-5, висновки)
Відповідальний виконавець, зав. сектору лабораторії 2.3	Г. Гутков (розділи 1-5, висновки)
Ст. науковий співробітник лабораторії 2.3, к.т.н.	О. Пшенічнова (розділи 1, 2, 5, висновки, Додаток А)
Науковий співробітник лабораторії 2.3	В. Юхно (розділи 4, 5.3, 5.4, 5.5 Додаток А)
Зав. сектору лабораторії 2.3	О. Ткачова (розділи 1, 2, 5, висновки)
Науковий співробітник лабораторії 2.3	В. Карцев (розділи 2, 4, 5, Додаток Б)
Провідний інженер лабораторії 2.3	О. Мироненко (розділ 5)
Провідний інженер лабораторії 2.3	В. Топчій (вступ, розділи 5.4, 5.5, висновки, Додаток А)
Інженер II категорії лабораторії 2.3	І. Овчарова (реферат, вступ, розділи 5.1, 5.2, перелік посилань)
Інженер II категорії лабораторії 2.3	Е. Гаджиєв (розділи 2, 5.3.3, 5.4, перелік посилань)
Пров. науковий співробітник лабораторії 1.5, к.т.н.	Л. Пісня (розділи 3, 5, висновки)
Аспірант УКРНДІЕП	І. Гончаренко (розділ 3)

РЕФЕРАТ

Звіт з НДР: 164 ст., 11 рис., 71 табл., 6 додатків, 44 джерела.

Ключові слова: ПОЛІГОНИ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ, АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ, НАТУРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ, ЗВАЛИЩНИЙ ГАЗ, БІОГАЗ, МЕТАН, ЕВОЛЮЦІЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЄВРОПЕЙСЬКЕ ЗАКОНОДАВСТВО, ЗАКОНИ УКРАЇНИ, ПРОГРАМА, МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ.

Об'єкт дослідження – утворення біогазу (CH_4) та забруднюючих речовин на полігонах твердих побутових відходів та промислових відходів (ТПВ та ПВ).

Предмет дослідження – оцінка можливості покращення системи інвентаризації забруднюючих речовин шляхом обліку в статистичній звітності результатів досліджень лабораторно-інструментальних вимірювань у місцях розташування полігонів ТПВ та розробка методичних вказівок з розрахунку обсягів викидів для їх обстеження.

Методи дослідження – застосовувалися лабораторно-аналітичні, розрахункові та теоретичні методи досліджень.

Виконано аналітичний огляд міжнародних методик моделювання генерації звалищного газу та визначення його компонентів.

Розроблена математична модель еволюції біогазу над полігоном твердих побутових відходів.

Проведені натурні (лабораторно-інструментальні) дослідження викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря з Роганського полігону ТПВ та ПВ (м.Харків).

Розроблені програма обстеження звалищ та полігонів ТПВ та ПВ та методичні вказівки з розрахунку обсягів викидів основних забруднюючих речовин (CH_4 , CO_2 , NH_3 , N_2O , H_2S) в атмосферне повітря (далі – Методичні вказівки).

Програма обстеження полігонів ТПВ та методичні вказівки призначені для використання при проведенні щорічної інвентаризації викидів ЗР в атмосферне повітря, розрахунку обсягів викидів ЗР в атмосферу для полігонів

ТПВ та ПВ, розробці проектів нормативів та отриманні дозволу на викиди ЗР полігонів, оцінці викидів ЗР від полігонів ТПВ і ПВ в проектній документації при будівництві нових та реконструкції існуючих об'єктів. Вони можуть застосовуватися підприємствами, які є власниками полігонів ТПВ.

Дійсні методичні вказівки поширюються на основні види забруднюючих речовин, які утворюються на полігонах в результаті анаеробного біотермічного процесу розпаду органічної складової ТПВ, та які виділяються з поверхні полігонів в атмосферне повітря у будь-якому районі України з урахуванням конкретних факторів районів розміщення полігонів та умов захоронення відходів.

Крім того, методичні вказівки можуть бути використані з метою державного обліку та регулювання у сфері емісії парникових газів в Україні.

Результати дослідження можуть бути впроваджені шляхом видачі Наказу Міністерством енергетики та захисту довкілля України про затвердження Методичних вказівок з розрахунку обсягів викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря для полігонів твердих побутових відходів та Програми їхнього обстеження.

Результати роботи оформлені у відповідності з ДСТУ 3008:2015 «Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення».

ЗМІСТ

	Назва розділу	с.
	Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів.....	7
	Вступ.....	8
1	Аналітичний огляд та аналіз міжнародних методик моделювання генерації звалищного газу та визначення його компонентів	11
2	Порівняльна характеристика морфологічного складу твердих побутових відходів у різних регіонах України.....	67
3	Еволюція біогазу над полігоном твердих побутових відходів.....	78
4	Результати натурних досліджень генерації звалищного газу на Роганському полігоні ТПВ (м. Харків).....	89
4.1	Апаратура та обладнання для відбору та аналізу проб біогазу на полігоні ТПВ.....	89
4.2	Результати польових дослідження газоутворення на Роганському полігоні ТПВ.....	92
5	Методичні вказівки з розрахунку обсягів викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря для полігонів твердих побутових відходів.....	102
5.1	Терміни та визначення.....	102
5.2	Загальні положення.....	105
5.3	Програма обстеження полігонів.....	108
5.3.1	Фактори, які впливають на генерацію звалищного газу.....	110
5.3.2	Кліматичні та геологічні характеристики району розміщення полігону ТПВ.....	113
5.3.3	Характеристика відходів, що захороняються на полігоні.....	116
5.4	Проведення інвентаризації викидів на полігоні ТПВ.....	117
5.5	Визначення обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря для полігонів ТПВ.....	119

5.5.1 Визначення обсягів викидів парникових газів та забруднюючих речовин, які виділяються у атмосферу з полігону ТПВ, при проведенні інструментальних вимірів	119
5.5.2 Визначення обсягів викидів парникових газів та забруднюючих речовин, які виділяються у атмосферу з полігону ТПВ розрахунковим методом.....	126
Висновки.....	134
Перелік посилань.....	136
Додаток А.Приклад розрахунку обсягів викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря з Роганського полігону ТПВ.....	142
Додаток Б. Карта-схема Роганського полігону ТПВ.....	153
Додаток В.....	154
Додаток Г.....	156
Додаток Д.....	158
Додаток Е.....	160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

РКИК	–	Рамкова Конвенція ООН по зміні клімату
ООН		Організація Об'єднаних Націй
БГ	–	біогаз
ЗГ	–	звалищний газ
ЗР	–	забруднюючі речовини
ПГ	–	парникові гази
ТПВ	–	тверді побутові відходи
ПВ	–	промислові відходи
НПС	–	навколишнє природне середовище
АП	–	атмосферне повітря
CH₄	–	метан
NH₃	–	аміак
H₂S	–	сірководень
CO₂	–	вуглекислий газ
АВ	–	ароматичні вуглеводні
ГАВ	–	галогено-ароматичні вуглеводні
мг/м³	–	концентрація інгредієнту в 1 м ³
т	–	тонна
°C	–	градус Цельсія
Дж	–	джоуль
т/т	–	тонна умовного палива
НМЛОС	–	неметанові леткі органічні сполуки
ТЧ₁₀	–	тверді частинки, розміри яких не перевищують 10 мікрон
ТЧ_{2,5}	–	тверді частинки, розміри яких не перевищують 2,5 мікрон
N₂O	–	оксид азоту

ВСТУП

Проблема твердих побутових відходів стає однією із найгостріших природоохоронних та господарських проблем в Україні (м.Львів, Харків, Маріуполь, Дніпро). За останні роки збільшується кількість побутових відходів, які не піддаються швидкому розкладанню і потребують значних площ для їхнього розміщення. Це пов'язано з труднощами утилізації несортованого потоку відходів. Попереднє сортування ТПВ в Україні практично не проводиться, а глибоке механічне сортування складне у технологічному плані. Тому, основним методом поводження з ТПВ в Україні є їхнє захоронення на звалищах і полігонах.

На полігонах, у товщі твердих побутових відходів, під дією мікроорганізмів в анаеробних умовах відбувається біотермічний процес розпаду органічної складової відходів. У результаті цього процесу утворюється біогаз (звалищний газ), основну масу якого складають метан (40-60 %) і діоксид вуглецю (10-35 %). На ряду з основними компонентами біогаз містить оксид вуглецю, пари води, оксиди азоту, аміак, сірководень, вуглеводні, які мають шкідливий вплив на здоров'я людини та стан навколишнього природного середовища. Вплив місць захоронення ТПВ на якість атмосферного повітря полягає, в основному, у виділенні біогазу (метану), який є одним з перспективних альтернативних джерел енергії. Крім того, метан є одним із агресивних парникових газів та сприяє утворенню озонових дір в атмосфері. За сучасними підрахунками внесок полігонів ТПВ і звалищ в глобальну емісію метану досягає 15 %.

Населені пункти поблизу полігонів твердих побутових відходів знаходяться в зоні постійного ризику. Продукти розпаду ТПВ несуть небезпеку не тільки для навколишнього природного середовища, але і для здоров'я населення [1–4]. Біогаз піднімається вгору, переноситься вітром на досить великі відстані, у тому числі і в сторону населених пунктів. Це може призвести до масового отруєння людей [5].

Хімічне забруднення атмосферного повітря над територією полігонів ТПВ відбувається за рахунок виділення біогазу, основною складовою якого є метан. До складу біогазу входять легкозаймісті, токсичні речовини, які створюють загрозу виникнення пожеж, вибухів [6-9]. Дані виникнення пожеж і інших надзвичайних ситуацій у місцях видалення відходів [10-11] свідчать про недосконалість сучасних заходів по попередженню та мінімізації впливу джерела техногенно-екологічної небезпеки для навколишнього природного середовища та здоров'я населення.

У Харківській області протягом 2017 року утворилося близько 1800 т ТПВ, основна частина яких захороняється на полігонах (Роганському, Дергачівському, та звалищі у смт. Нова Водолага). Полігони експлуатуються вже понад 30 років, тому планується їх закриття, рекультивація землі існуючих полігонів і будівництво сміттєпереробного комплексу.

Міжнародна співпраця у питаннях запобігання зміни клімату у рамках Кіотського протоколу до Рамкової Конвенції ООН по зміні клімату (РКИК ООН) дозволяє Україні залучати інвестиції в модернізацію енергоємких підприємств та впровадження нових технологій по зменшенню викидів парникових газів в атмосферу.

У рамках міжнародної співпраці із залученням інвестицій у м. Дергачі в теперішній час будується сучасний сміттєпереробний комплекс. Усі роботи будуть завершені до осені 2020 року [12]. Планується почати рекультивацію діючого полігону ТПВ. Вся площа полігону буде вкрита спеціальною геомембраною, яка попереджує виділення в атмосферу звалищного газу (біогазу). На полігоні (в тілі полігону) буде укладена система дренажу, збору звалищного газу. Крім того, в тілі полігону будуть пробурені приблизно 35 скважин, з яких будуть добувати біогаз. Вся ця площа буде закрита шарами дренажного піску і землі (приблизно 0,5 м), а зверху шаром 30 см плідної землі. Потім цю площу засіють травою та насадять 2500 дерев. Таким чином, шкідливих виділень з полігону в атмосферу не буде, а зібраний біогаз буде перетворюватися в електроенергію, якої за розрахунками спеціалістів буде

достатньо для роботи всього сміттєпереробного комплексу. Будівництво сучасного сміттєпереробного полігона із сучасними європейськими технологіями дозволить не лише значно знизити викиди шкідливих для здоров'я людини речовин, але і отримати додаткову електроенергію.

Збір біогазу та вироблення додаткової електроенергії також відбувається на полігонах ТПВ міст Маріуполя, Луганська та с. Підгірці (Київська обл.). Потенціал звалищного газу в Україні 1 млрд.м³ на рік. Система збору біогазу і подальше його використання для виробництва тепла і електроенергії дозволяє скоротити кількість викидів метану в атмосферу і є найефективнішим засобом боротьби з глобальним потеплінням.

Особливу актуальність набувають дослідження з оцінки об'ємів викидів забруднюючих речовин з полігонів ТПВ і ПВ, їхній вплив на навколишнє природне середовище, зокрема, оцінка емісії парникових газів (CH₄, CO₂, N₂O) і ЗР в атмосферне повітря з місць захоронення відходів.

Україна як сторона РКІК ООН щорічно публікує методики і результати розрахунків викидів ПГ у міжнародному звіті "Національний кадастр антропогенних викидів із джерел і абсорбції поглиначами парникових газів в Україні" (далі – Кадастр) [13]. Згідно вимогам РКІК ООН Україна зобов'язана покращувати якість розрахунків шляхом удосконалення існуючих та розробленням національних методик обліку викидів ПГ із різних джерел. Дані дослідження спрямовані на оцінку викидів парникових газів з урахуванням нових кількісних даних натурних вимірів на полігоні ТПВ, враховуючи фактори, що впливають на кількісну характеристику викидів забруднюючих речовин в атмосферу.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ МІЖНАРОДНИХ МЕТОДИК МОДЕЛЮВАННЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЗВАЛИЩНОГО ГАЗУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО КОМПОНЕНТІВ

Джерелом утворення звалищного газу на полігонах ТПВ є відходи, які можуть розкладатися біологічним шляхом, тобто аеробними та анаеробними бактеріями. До таких відходів відносяться: харчові, садово-паркові відходи, макулатура, текстиль, інші целюлозовміщуючі відходи, кількість яких варіюється від 60 до 80 відсотків від маси ТПВ.

Швидкість та повнота протікання процесів біодеструкції відходів залежить від:

- морфологічного складу;
- хімічного складу;
- клімато-географічних умов;
- стадій життєвого циклу полігону.

Процес біологічного розкладення ТПВ включає аеробну та анаеробну фази.

Аеробна фаза протікає на глибині 50-80 см при доступі кисню. Аеробні бактерії достатньо швидко здійснюють гідроліз та окислення харчових відходів, які містять жири, білки та протеїни. Виділяється біогаз у невеликій кількості, який складається у основному з двоокису вуглецю, азоту та парів води.

Анаеробний процес, який призводить до утворення звалищного газу, поділяється на 5 етапів:

1 етап тривалістю 2-7 років після початку захоронення відходів – початок процесів метаногенезу;

2 етап експоненціального розвитку протягом 12-17 років, при якому рН фільтрату встановилося на рівні 8, емісія метану досягає максимуму;

3 етап становить 25-30 років, коли спостерігається стабільне утворення звалищного газу;

4 етап характеризується затуханням анаеробних процесів, зниженням утворення звалищного газу до безпечних рівнів по метану;

5 етап – стадія біологічної інертності.

Анаеробні процеси метанового бродіння протікають при участі наступних груп мікроорганізмів: *MethanococcusVanniellii* (відновлення CO₂ воднем); *MethanobacteriumOmeiianskii* (зброджування спиртів); *Methanococcusmazei*, *Methanosarcinamethanica*, *MethanobacteriumSohngeni* (зброджування солей органічних кислот) та інші.

Можна виділити наступні фази анаеробної біодеструкції відходів:

- гідроліз, при якому під дією ферментативних бактерій полімери руйнуються до мономерів, здійснюється гідроліз целюлозовміщуючих відходів (папір, садово-паркові відходи, деревина). До складу біогазу входять: аміак, водень, пари води, сірководень;

- ацетогенез, при якому рН фільтрату 4,5-6,5, протягом 4-5 років проходить подальше розкладання целюлози, утворюються оцтова та пропіонова кислоти, вуглекислий газ та вода. Біогаз містить вуглекислий газ, азот, аміак, вуглеводневі, низькомолекулярні спирти та альдегіди, кетони;

- метаногенез включає дві стадії: активну та стабільну. У активній протікає ферментативне розкладання кислот, що утворилися при ацетогенезі. При цьому інтенсивно виділяються: метан, вуглекислий газ, меркаптани, аміак, сірководень та інші речовини. Концентрація метану у звалищному газі зростає до 40-60 відсотків. Максимальна генерація метану спостерігається після двох років захоронення відходів у товщі полігону;

- стабільна стадія метаногенезу характеризується наявністю 50 та більше відсотків метану у звалищному газі. Процес протікає стабільно з незмінним об'ємом генерації звалищного газу постійного складу. На цьому етапі біодеструкції піддається 50-70 відсотків целюлози.

- зниження біологічної активності викликано зменшенням кількості органічних відходів, що можуть розкладатися мікроорганізмами. Поступово

вміст метану у звалищному газі зменшується до безпечних для навколишнього середовища рівнів.

Склад звалищного газу дуже складний та різноманітний. Він постійно змінюється у залежності від віку полігону. Тому, в його складі були відселені речовини з найбільш високою концентрацією. Склад біогазу у залежності від життєвого циклу полігону наведено на рис. 1.1.

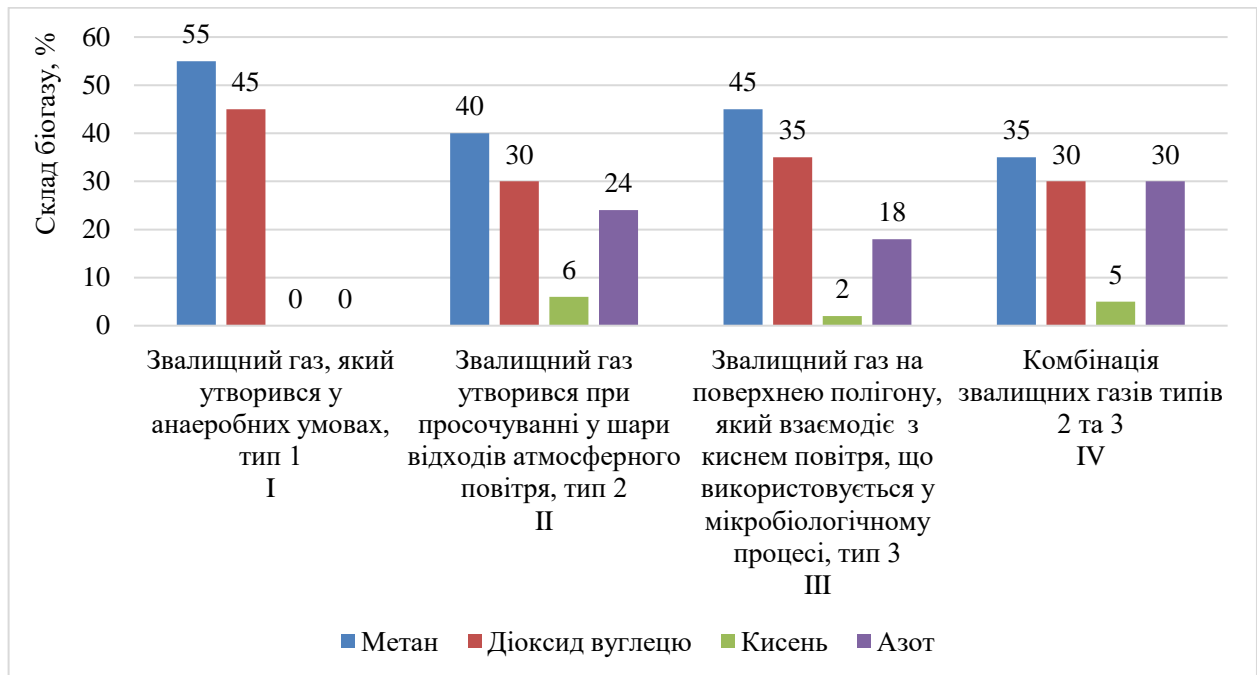


Рисунок 1.1 – Склад біогазу у залежності від життєвого циклу полігону [14]

На I етапі захоронення ТПВ при відсутності доступу кисню відбувається зростання вмісту метану у звалищному газі, йде процес метаногенезу. Вміст метану у звалищному газі досягає максимуму орієнтовно через 20 – 25 років. На II етапі у випадку незначного доступу кисню відбувається зменшення вмісту метану у газах, що відходять, і, відповідно, вуглекислого газу. На III етапі у випадку зменшення кількості кисню відбувається збільшення вмісту метану у газах, що відходять; IV етап – це комбінація 2 та 3 типів.

Фізичні властивості звалищного газу наведені у таблиці 1.1.

Звалищний газ має різноманітний склад та містить як парникові гази так і забруднюючі речовини, фізичні властивості яких наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.1 – Фізичні властивості звалищного газу

Найменування	Одиниця вимірювання	Кількісний показник
Густина	кг/м ³	1,24755
В'язкість	Не / м ²	1,15*10 ⁻⁵
Теплота згоряння очищеного від домішок звалищного газу	кДж/м ³	1800-25100
Теплота згоряння звалищного газу, який містить 50% метану та 45% діоксиду вуглецю	кДж/м ³	18500
Вологість біогазу	%	25-45

Таблиця 1.2 – Фізичні властивості компонентів звалищного газу

Фізичні властивості	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	CO	N ₂
Відносна густина, кг/м ³	0,555	1,520	0,069	1,190	0,967	0,967
Горючість	є	немає	є	є	є	немає
Вибуховість*, %	5-15	немає	4-75,6	4,3-45,5	74	немає
Температура горіння, °C	650	-	560	270	605	-
Запах	немає	немає	немає	є	немає	немає
Токсичність	немає	є	є	є	є	немає
Інертність	є	-	є	-	-	є

*вибуховість компонентів газу в суміші з повітрям вказана для температури 20°C та тиску 1 атм. у верхньої та нижньої границях вибуху.

Звалищний газ здатен переміщуватися на значні відстані під впливом градієнта тиску та молекулярної дифузії. У горизонтальному напрямку він розповсюджується слабо проникненому (синтетичному) покритті і не ущільненій основі полігону. У вертикальному напрямку - навпаки. На міграцію звалищного газу впливають: пористість ґрунтів (чим більший об'єм пор, тим більше емісія газу); вологість (рихлий ґрунт з малою вологістю сприяє емісії газу); склад відходів; конструкція полігону.

Огляд найбільш поширених методик розрахунку емісії звалищного газу та його компонентів з місць захоронення твердих побутових відходів здійснено у статті «Оценка эмиссии парниковых газов из мест захоронения ТБО: критический анализ методик и адаптация к условиям Одесской области» співаторами Одеського державного екологічного університету [15].

Авторами відмічається, що викиди метану з місць захоронення твердих побутових відходів за період 1990-2013 роки зросли на 23,66 %. Тому особливу актуальність мають дослідження з оцінки впливу місць захоронення ТПВ на довкілля, зокрема оцінка емісії парникових газів.

У теперішній час найбільш поширеними моделями для оцінки емісії звалищного газу та його компонентів є:

1. Модель, запропонована Міжурядовою групою експертів зі змін клімату (МГЕЗК, IPCC);

2. Модель емісії біогазу (Landfill Emission Gas Model – Land GEM), розроблена Агентством з захисту навколишнього середовища США та адаптована до українських умов (Ukraine LFG Model) в рамках програми U.S. EPA's Landfill Methane Outreach Program.

В Україні нормативним документом з оцінки емісії метану з місць видалення відходів є «Національний Кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2016 роки». Оцінка емісії метану з місць захоронення ТПВ здійснюється за Національною багатокомпонентною моделлю на основі метода затухання першого порядку третього рівня деталізації (далі – Національна модель) [16]. Ця модель була розроблена в Інституті технічної теплофізики НАН України і використовується в розрахунках викидів метану при складанні Національного кадастру.

В основу моделі положено залежність утворення метану від характеристик відходів та умов їх захоронення, які визначають кількість органічного вуглецю, який має здатність біологічно розкладатися та переходити у метан.

Основним джерелом вуглецю для утворення метану служать компоненти ТПВ, які містять біодоступний вуглець, а саме: папір, картон, харчові відходи, деревина, садово-паркові відходи, текстиль, шкіра, гума, а також засоби особистої гігієни.

В Україні розроблена Національна модельна методика оцінки емісії метану, яка базується на рекомендаціях МГЕІК.

Ця модель має додаткові властивості:

- у моделі наведено склад відходів за замовчуванням, який базується на детальному аналізі відходів, які заховорюються на звалищах;
- встановлено коефіцієнт k (швидкість розкладання відходів), який відповідає місцевим значенням відповідно до середнього рівня атмосферних опадів та визначеній кліматичній зоні (однієї з чотирьох);
- введені поправки для обліку долі аеробного розкладання ТПВ (MCF) та впливу можливих пожеж на неконтрольованих звалищах;
- визначені показники k та L_o для чотирьох категорій відходів з різною швидкістю розкладання.

Модель враховує утворення метану при розкладанні відходів, які заховорені на полігоні за поточний та попередні роки. Утворення метану розраховується за формулою:

$$Q(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A * k_j * MWS_i * MWS_{i,j} * L_{0i,j} * e^{-k_j(t-x)} \quad , \quad (1.1)$$

де $Q(t)$ – кількість метану, який утворився за час t , тонн;

A – нормалізуючий множник, який визначається за формулою:

$$A = (1 - e^{-k_j}) / k_j \quad , \quad (1.2)$$

де k_j – постійна темпів утворення метану для j -го компонента ТПВ, рік⁻¹;

MWS_i – загальна маса ТПВ, які заховоренні за рік i , тонн/рік;

$MWS_{i,j}$ – вміст j -го компонента у ТПВ в i -м році, %;

t – розрахунковий рік (якщо розрахунки виконуються за один рік, то $t=1$), рік;

x – період, за які вносяться данні, рік;

$L_{0i,j}$ – потенціал утворення метану за рік i , тонн CH_4 /тонн ТПВ.

Потенціал утворення метану за рік визначається за формулою:

$$L_{0j} = DOC_j * DOC_F * F * 16/12 * MCF_i, \quad (1.3)$$

де DOC_j – загальна кількість органічного вуглецю, здатного до біологічного розкладання у j -ій фракції, т С/т ТПВ;

DOC_F – частина вуглецю, яка бере участь у реакціях розпаду ($DOC_F = 0,5$);

F – вміст метану у звалищному газі ($F = 0,5$);

$16/12$ – коефіцієнт перерахунку вуглецю у метан;

MCF_i – фактор корегування утворення метану, який залежить від умов захоронення ТПВ.

Постійна темпів утворення метану для j -го компонента ТПВ (k_j) – це одна з констант моделі, яка визначає швидкість розкладання відходів і швидкість генерації звалищного газу. Вона визначається по кожному компоненту і залежить від вологості, рН відходів, вмісту біогенних елементів та температури, тобто від кліматичних умов території, де розташовано місце захоронення відходів, та визначається по таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Константи постійних темпів утворення метану для різних компонентів ТПВ

№	Компонент	$k_j, \text{рік}^{-1}$		
		За замовчуванням*	Національний рівень**	Регіональний рівень***
1	Папір, картон	0,060	0,048	0,024
2	Текстиль	0,060	0,048	0,024
3	Харчові відходи	0,185	0,110	0,120
4	Деревина	0,030	0,024	0,012
5	Садово-паркові відходи	0,100	0,070	0,060
6	Засоби особистої гігієни	0,100	0,048	0,120
7	Шкіра, гума	-	0,048	0,012

* Керівні принципи національних інвентаризацій парникових газів МГЕІК, т.5 Відходи;

** Національний Кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2013 роки;

*** SwapuraGanguli, G. AlexStege (Eds). UkraineLandfillGasModel Ver.1.0: User'sManual.

Потенціал утворення метану ($L_{0i,j}$) визначається за кожним компонентом та залежить від умов захоронення відходів (MCF_i) та вуглецю, здатного до біорозкладання (DOC_j). Фактор корегування утворення метану, який залежить від умов захоронення ТПВ, наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Значення показника MCF_i

Типи полігонів і звалищ ТПВ	MCF_i
Контрольовані анаеробні	1,0
Напіванаеробні контрольовані	0,5
Неконтрольовані глибокі (> 5 м відходів та/або з високим рівнем ґрунтових вод)*	0,8
Неконтрольовані неглибокі (< 5 м відходів)	0,4
Поза категорією	0,6

Згідно Національного Кадастру антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2013 роки середнє значення для України, починаючи з 2008 року, встановлено на рівні 0,726.

Маса вуглецю, який піддається біотрансформуванню в метан, залежить від компонентів ТПВ (DOC_j). Дані вмісту DOC_j наведені у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Вміст біорозкладаємих компонентів у загальній масі ТПВ

№	Компонент	DOC _j , тоннС/тонн ТПВ	Вміст компонентів ($MWS_{i,j}$), %		
			Східна Європа	Національний рівень	Регіональний рівень
1	Папір, картон	0,40	21,8	14,6	15,0
2	Текстиль	0,24	4,70	4,00	3,00
3	Харчові відходи	0,15	30,10	33,10	27,50
4	Деревина	0,43	7,50	1,70	2,50
5	Садово-пар-кові відходи	0,20	-	3,80	3,00
6	Засоби особистої гігієни	0,24	-	1,10	-
7	Шкіра, гума	0,39	1,40	1,70	1,90

Авторами [17-19] були проаналізовані модель IPCC, запропонована Міжурядовою групою експертів зі змін клімату, та модель LandGEM, розроблена Агенцією із захисту навколишнього середовища США. Також, рівняння з визначення емісії метану зі звалищ ТПВ, наведене у моделі LandGEM, було адаптоване до України. При цьому коефіцієнт генерації метану (k) було уточнено у залежності від кліматичних особливостей України. Територія України поділяється на 4 кліматичних регіони. Були розраховані середні значення параметра k для 4-х категорій відходів з урахуванням площ регіонів. Також було переглянуто параметр L_0 у залежності від категорії відходів на підставі польових досліджень морфологічного складу ТПВ для окремих міст України. При співставленні отриманих показників параметрів та параметрів за замовченням видно, що ТПВ, які утворюються в Україні характеризуються декілька меншим потенціалом утворення метану та більш високою швидкістю розкладення органічної складової.

Вміст метану у звалищному газі (коефіцієнт F) залежить від площі вигорання відходів на звалище, що призводить до зменшення емісії звалищного газу. З метою забезпечення консервативної оцінки біогазового потенціалу звалищ України пропонується значення F прийняти на рівні 0,8 замість 0,5 за замовчуванням.

Розроблена для моделі LandGEM автоматизована версія дозволяє здійснювати розрахунки не тільки емісії метану, а також діоксиду вуглецю, НЛОС. Величина емісії CO_2 та НЛОС залежить від результатів розрахунків емісії метану за рівнянням:

$$Q(t) = DDOC_m * F * 16/12, \quad (1.4)$$

де $DDOC_m$ – загальна маса біологічно розкладеного вуглецю.

На підставі комплексного аналізу трьох найбільш використовуваних моделей розрахунку емісії метану з місць захоронення ТПВ автори відмічають, що найбільш проробленою видається Національна модель газоутворення;

істотним недоліком в Національному Кадастрі є відсутність розрахунків емісії інших парникових газів, окрім метану; при проведенні розрахунків для конкретного звалища або полігону зручно використовувати LandGEMVersion 3.02.

Модель для оцінки викидів парникових газів при видаленні, біологічній обробці, інсинерації, відкритому спалювання відходів, очищенні та скиданні стічних вод запропонована Міжурядовою групою експертів зі змін клімату (МГЕЗК, IPCC) та представлена у Керівних принципах національних інвентаризацій парникових газів (МГЕЗК, 2006. Т. 5 Відходи) [20].

Модель враховує питомі величини утворення відходів на одного мешканця та дані щодо кількості населення. Також вона враховує кількість метану, який вже збирається, та окислення метану. Ця модель може бути адаптована для оцінки викидів метану на окремому полігоні ТПВ.

Модель IPCC має можливості для моделювання генерації метану в різних країнах, а саме:

- врахування даних щодо складу відходів з розділом на наступні категорії: харчові, садові, паперові, деревина, солома, текстиль, підгузки тощо. Якщо дані відсутні, то модель забезпечує регіональні значення. Модель визначає різні значення DOC для кожного виду відходів на основі кількості органічного вуглецю, який біорозкладається;

- визначення значень k для різних видів відходів, які згруповані у 4-ри категорії у залежності від швидкості розкладання: найвисокі значення мають харчові відходи (1 категорія), потім садові, підгузки (2 категорія), папір і текстиль (3 категорія), деревина, солома, які характеризуються найповільнішою швидкістю розкладання, віднесені до категорії 4;

- можливість застосування чотири варіанти кліматичних зон на основі середньорічної температури, кількості опадів, величини випарування (евапотранспірації, PET). Модель надає значення k для кожної категорії відходів на основі кліматичних умов і швидкості розкладання;

- застосування понижуючого фактору MCF, який враховує ступінь аеробного розкладання відходів (без утворення метану) на некерованих звалищах.

Глава 3 розділу присвячена видаленню відходів. У ній міститься інформація про методологію оцінки змін вуглецю, який знаходиться на звалищах твердих відходів [20].

Викиди метану зі звалищ твердих відходів є найбільшим джерелом викидів парникових газів у секторі «Відходи». Діоксид вуглецю, який утворюється на звалищах твердих відходів, має біологічне походження та не враховується у цьому розділі. Закись азоту (N_2O) утворюється в основному у результаті методів переробки, а не захоронення відходів. Викиди N_2O від звалищ ТПВ є невеликими, тому методологія по них не представлена у цьому розділі.

Леткі неметанові органічні сполуки (ЛНОС), оксиди азоту (NO_x), оксид вуглецю (CO) та аміак (NH_3) також можуть утворюватися в процесі обробки відходів. У цьому розділі методики їх визначення не приводяться. Вони викладені у Керівних принципах EMEP/CORINAIR Guidebook (EEA, 2005) та у Керівництві з оцінки викидів з неточкових джерел (U.S.EPA, 1995).

Що стосується оксидів азоту (NO_x), то вони утворюються при спалюванні відходів. Аміак (NH_3) – при компостуванні відходів.

Існують два методи оцінки викидів CH_4 зі звалищ ТПВ:

- метод компенсації мас (рівень 1);
- метод затухання першого порядку (ЗПП) (рівень 2).

Дані, отримані за методом компенсації мас, не можна порівняти з даними, отриманими за методом ЗПП. Метод ЗПП дає більш точну оцінку річних викидів метану.

Методологія МГЕЗК для оцінки викидів метану зі звалищ твердих відходів заснована на методі затухання першого порядку. Цей метод допускає, що здатні до розкладання органічні компоненти (здатний до біорозкладання органічний вуглець, DOC) у відходах повільно розкладаються протягом

декількох декад, коли формуються CH_4 та CO_2 . Якщо умови є постійними, то рівень утворення метану залежить від кількості вуглецю, який залишається у відходах. Тому викиди метану з відходів, захоронених на звалищах, перші декілька років після їх захоронення залишаються високими, а потім повільно зменшуються. Повний процес розкладення органічних компонентів, здатних до біорозкладення, може бути наближений до кінетики першого порядку. Період напіврозпаду для різних видів відходів може становити від декількох років до декількох декад або більш тривалого періоду.

Методологія МГЕЗК для оцінки викидів метану зі звалищ твердих відходів заснована на методі затухання першого порядку (ЗПП).

Для отримання більш точних результатів за методом ЗПП треба оцінити дані щодо захоронення відходів за період, який нараховує від 3 до 5 періодів напіврозпаду. Таким чином, необхідно використовувати дані щодо видалення відходів за період не менше 50 років.

Ключові параметри повинні містити наступні дані:

- період напіврозпаду;
- потенціал утворення метану (L_o);
- вміст органічного вуглецю у відходах (DOC);
- долю DOC , яка піддається розкладенню (DOC_F).

Частина утвореного метану окислюється у верхніх шарах звалища, або може бути рекуперована з метою отримання енергії або спалювання у факельній установці. Таким чином, кількість метану, який викидається в атмосферу, дорівнює кількості метану, що утворився.

Утворення метану в анаеробних умовах на звалищах ТПВ здійснюється за рахунок здатної до розкладання органічної речовини DOC_m , що міститься у відходах. Він визначається на основі інформації про категорії та види відходів, які видаляються на звалище (комунальні, промислові, інші), а також даних про морфологічний склад відходів (харчові, паперові, деревина, текстиль, тощо), або, у якості альтернативи, на підставі середньої кількості DOC у масі

захоронення відходів. Також, необхідно мати інформацію по типам звалищ ТПВ.

Визначення вуглецю, який здатен до біорозкладання, визначається за формулою:

$$DDOC_m = W * DOC * DOC_f * MCF, \quad (1.5)$$

де $DDOC_m$ – маса нестійкого DOC, який видалено на звалище, Гг;

W – маса захоронення відходів, Гг;

DOC – здатний до розкладання органічний вуглець, визначений у рік видалення на звалище, Гг С/Гг відходів;

DOC_f – доля DOC , здатного до розкладання (дріб);

MCF – корегуючий коефіцієнт CH_4 для анаеробного розкладення, визначений у рік видалення відходів на звалище;

Гігаграмм (Гг) – одиниця вимірювання маси, кратна одиниці системи СГС граму і одиниці системи СІ кілограму. $1 \text{ Гг} = 10^9 \text{ г} = 10^6 \text{ кг} = 10^3 \text{ т}$.

Потенціал утворення метану (L_o) визначається за формулою:

$$L_o = DDOC_m * F * 16/12, \quad (1.6)$$

де L_o – потенціал утворення CH_4 , Гг CH_4 ;

$DDOC_m$ – маса видаленого на звалище нестійкого DOC, Гг;

F – доля CH_4 в генерованому на звалищі газі (доля у об'ємі);

16/12 – співвідношення молекулярної ваги CH_4/C .

Вище наведене рівняння можливо застосовувати для розрахунку загального потенціалу утворення CH_4 у відходах, які залишаються на звалищі.

Реакції затухання першого порядку.

У реакціях першого порядку кількість продуктів завжди пропорціональна кількості реактивного матеріалу. Це означає, що рік, коли відходи були розміщені на звалищі, не відповідає кількості метану, що утворюється кожен рік. Тільки загальна маса матеріалу, який у теперішній період розкладається на

звалищі, є значимою. Якщо нам відомо кількість матеріалу, який розкладається на звалищі на початку року, то у методі оцінки викидів кожен рік може розглядатися як рік номер 1.

Реакції затухання першого порядку.

Розрахунок $DDOC_m$ - маси накопиченого на звалище нестійкого DOC на кінець року T :

$$DDOC_{ma_T} = DDOC_{md_T} + (DDOC_{ma_{T-1}} * e^{-k}). \quad (1.7)$$

Розрахунок $DDOC_m$, який розклався на кінець року T :

$$DDOC_{mdecomp_T} = DDOC_{ma_{T-1}} * (1 - e^{-k}), \quad (1.8)$$

де T – рік, за який проводяться розрахунки;

$DDOC_{ma_T} - DDOC_m$ накопичений на звалищі на кінець року T , Гг;

$DDOC_{ma_{T-1}} - DDOC_m$ накопичений на звалищі на кінець року $(T-1)$, Гг;

$DDOC_{md_T} - DDOC_m$ видалений на звалище у рік T , Гг;

$DDOC_{mdecomp_T} - DDOC_m$, які розклався у рік T , Гг;

k - константа реакції, $k = \ln(2)/t_{1/2}$ (рік⁻¹);

$t_{1/2}$ – час періоду напіврозпаду (рік).

CH_4 утворений з нестійкого $DDOC_m$.

Розрахунок кількості метану, який утворюється зі здатних до розкладання компонентів відходів, здійснюється шляхом перемноження доли CH_4 , який міститься у звалищному у газі, на коефіцієнт молекулярної маси CH_4/C . Кількість CH_4 , який утворився з $DDOC_m$, який розклався:

$$CH_{4утворений T} = DDOC_{mdecomp_T} * F * 16/12, \quad (1.9)$$

де $CH_{4утворений T}$ – кількість CH_4 , який утворився з нестійкого матеріалу, Гг;

$DDOC_{mdecomp_T} - DDOC_m$, які розклався на кінець року T , Гг;

F - доля CH_4 , за об'ємом, в звалищному газі (дріб);

16/12 – співвідношення молекулярної ваги CH_4/C .

Спрощена модель табличних розрахунків ЗПП враховує суму кількості нестійкого DOC на звалищах, враховуючи кількість відходів, які захороняються кожен рік, та кількість відходів, які накопичені у минулих роках. Ці дані використовуються при розрахунках кількості DOC, які розкладаються кожен рік на CH_4 та CO_2 .

Табличні розрахунки також дозволяють визначити часову затримку між захороненням відходів та початком утворення CH_4 . За замовчуванням термін часу затримки становить шість місяців. Модель дає змогу змінити час затримки за замовчуванням на інше значення. Ефективна практика полягає в виборі часу затримки в інтервалі від 0 до 6 місяців. Значення поза цього інтервалу повинні підтверджуватися доказами.

Модель розраховує кількість CH_4 , який утворений з $DDOC_m$. Для визначення кількості викинутого у атмосферу CH_4 віднімає рекуперований CH_4 та CH_4 , який окислений в матеріалі для укриття.

Модель представляє два варіанти розрахунку викидів:

перший – багатофазна модель, яка заснована на даних по утворенню категорій відходів (харчових, паперових, картонних, садово-паркових, деревини, текстильних тощо);

другий – однофазна модель, заснована на великогабаритних відходах. Ця модель також застосовується для розрахунку викидів від промислових відходів.

Поправочний коефіцієнт для метану MCF вводиться в якості середньої зваженої величини для всіх звалищ у країні.

Кількість CH_4 , яка утворюється від кожної категорії відходів та виду відходів/матеріалів, підсумовується.

При оцінці обсягів утворення метану проводиться з урахуванням географічних та кліматичних умов території, де розміщується звалище ТПВ.

При застосуванні багатофазної моделі оцінки обсягів утворення метану необхідно деталізувати комбіновані відходи, наприклад комунальні відходи

змішані (може включати 50 % неактивних матеріалів, 10 % харчових відходів, 30 % паперових та картонних відходів та 10 % садово-паркових відходів). Види відходів, східних за хімічним складом, необхідно інтегрувати: штори, одяг, килими можуть бути включені у текстильні відходи; кухонні - у харчові відходи; солома, дерев'яні меблі – у відходи деревини.

При застосуванні табличних розрахунків оцінки викидів метану необхідно привести представлені дані у відповідність з даними, які конкретизують морфологічний склад відходів, що видаляються на конкретне звалище. Найкращим є варіант створення окремих табличних розрахунків з метою визначення кількості кожного виду відходу за матеріалом, які захороняються на звалищі.

При відкритому спалюванні відходів на звалищі кількість відходів, які доступні до розкладання, а також $DDOC_m$, необхідно привести у відповідність до кількості спалених відходів.

Вибір коефіцієнтів викидів та параметрів.

Органічний вуглець, здатний до розкладання (DOC)

DOC – це органічний вуглець, який знаходиться у відходах і здатний до розкладання. Його виражають у вигляді Гг С на Гг відходів.

Оцінка DOC здійснюється за формулою:

$$DOC = \sum_i (DOC_i * W_i) \quad (1.10)$$

де DOC - доля здатного для розкладання органічного вуглецю у великогабаритних відходах, Гг С/Гг відходів;

DOC_i - доля здатного до розкладання органічного вуглецю у i -му виді відходів (використовується за замовченням);

W_i - доля i -го виду відходів за категоріями.

В моделі табличного розрахунку застосовується тільки для опції великогабаритних відходів i є осередненим показником DOC для

великогабаритних відходів (ВГВ), видалених на звалище, включаючи неактивні матеріали (скло, пластик, метал інші відходи, що не розкладаються).

Доля фактично розкладеного здатного до розкладання органічного вуглецю (DOC_F)

DOC_F це оціночне значення тієї доли органічного вуглецю, яка практично розклалася та виділилася зі звалища. При цьому, у відходах на звалищі залишається органічний вуглець, який не розкладається під дією анаеробних процесів, або розкладається дуже повільно.

Рекомендоване значення за замовченням DOC_F відповідає 0,5. Значення цього показника залежить від багатьох факторів, у тому числі температури, вологості, рН, складу відходів тощо. Національні значення DOC_F або значення зі схожих країн можуть бути використані для цього параметру. Однак, вони повинні бути визначені на добре задокументованому дослідженні.

Кількість DOC , який вилучено із звалища, не перевищує 1%, тому не враховується при оцінці DOC_F .

Корегуючий коефіцієнт для метану MCF

Корегуючий коефіцієнт для метану MCF застосовується у зв'язку з тим, що неконтрольовані звалища викидають у атмосферу менше метану ніж контрольовані анаеробні полігони ТПВ. Це пов'язано з тим, що на неконтрольованих звалищах більша кількість відходів розкладається аеробним засобом у верхніх шарах. MCF – це поправочний коефіцієнт практики управління відходами, який застосовується для певної області управління відходами. У таблиці 1.6 наведені значення MCF для кожної з чотирьох категорій звалищ.

Таблиця 1.6 – Класифікація звалищ ТПВ і поправочні коефіцієнти для метану (MCF)

Тип звалища ТПВ	Поправочний коефіцієнт для метану (MCF), значення за замовчуванням
1	2
Контрольовані анаеробні**	1,0
Напіванаеробні контрольовані ***	0,5

Продовження таблиці 1.6

1	2
Неконтрольовані глибокі (> 5 м відходів та/або з високим рівнем ґрунтових вод)****	0,8
Неконтрольовані неглибокі (< 5 м відходів)*****	0,4
Звалище поза категорією*****	0,6

* Керівні принципи національних інвентаризацій парникових газів МГ ЕК, т.5 Відходи.

**Анаеробні контрольовані звалища твердих відходів: на даному виді звалищ повинні знаходитися під контролем місця для видалення відходів (тобто, відходи відправляються на спеціально підготовлені майданчики, на яких в тій чи іншій мірі здійснюється продувка відходів і контролюється захист від загоряння) і при цьому виконується хоча б одна з перерахованих умов: (і) відходи чим-небудь укриваються, (іі) здійснюється їх механічна пресування, або (ііі) або відходи укриваються пошарово.

***Напіванаеробні контрольовані звалища твердих відходів: на даному виді звалищ необхідна наявність місць для видалення відходів, які знаходяться під контролем, і при цьому має дотримуватися хоча б одна з перерахованих умов: (і) відходи укриваються негерметичним матеріалом, (іі) є стічні дренажні системи, і (ііі) вентиляційні системи.

****Неконтрольовані звалища твердих відходів - глибокі і / або з високим рівнем ґрунтових вод: звалища не відповідають критеріям контрольованих звалищ, і на них глибина відходів перевищує або дорівнює 5 метрам і / або є високий рівень ґрунтових вод в верхньому рівні землі. Надалі ситуація може привести до заповнення відходами внутрішніх вод, таких як ставки, річки або заболочені території.

*****Неконтрольовані неглибокі звалища твердих відходів: звалища, які не відповідають критеріям контрольованих звалищ та глибина яких не перевищує 5 метрів.

*****Звалища твердих відходів поза категорії: тільки в тому випадку, коли країни не можуть класифікувати свої звалища на чотири категорії контрольованих і неконтрольованих, можна використовувати *МСF* для «поза категорії».

Значення за замовчуванням приводиться для країн, у яких кількість видалених на кожне звалище відходів не відома. Тільки тоді, коли держави не можуть класифікувати свої звалища, застосовується коефіцієнт для звалища поза категорією.

Частка метану в газі з об'єкту поводження з ТПВ (F).

Коефіцієнт F – доля метану у звалищному газі. Більшість відходів на звалищах утворюють звалищний газ, у якому вміст метану становить приблизно 50 %. Тільки відходи, до складу яких входить значна кількість жиру і масла, можуть генерувати звалищний газ з вмістом метану більше 50 %. Тому за замовченням коефіцієнт F становить 0,5.

Коефіцієнт окислення (ОХ).

Коефіцієнт окислення (ОХ) відображає кількість метану у звалищному газі, яка окислюється в ґрунті або у іншому матеріалі, який покриває відходи. Окислення метану здійснюється метанотрофними мікроорганізмами у поверхневих шарах и може коливатися від малого відсотка до 100% утвореного метану. На організованих, добре керованих звалищах, рівень окислення вище, ніж на некерованих. Результати польових та лабораторних вимірювань концентрацій і потоків викидів CH_4 та CO_2 для визначення коефіцієнта ОХ не рекомендується використовувати напряму. Значення за замовчуванням коефіцієнта окислення CH_4 відповідає 0. Застосування коефіцієнта окислення 0,1 здійснюється для покритих, добре контрольованих звалищ. Застосування ОХ більше 0,1 повинно бути обґрунтоване довідниковими даними, а також подібними національними умовами. При застосуванням ОХ із загальної кількості утвореного метану треба вираховувати його кількість, яка була рекуперирована. Коефіцієнт ОХ наведено у таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Коефіцієнт окислення (ОХ) для звалищ

Тип звалища	Коефіцієнт окислення (ОХ), значення за замовченням
Контрольована*, неконтрольована та звалище поза категорією	0
Контрольована, укрита матеріалом**, що окислює CH_4	0,1

* контрольовані, але не укриті повітряпроникним матеріалом

** приклади: ґрунт, компост

Швидкість розкладання відходів типу j .

Період напіврозпаду ($t_{1/2}$) – це період розкладу DOC_m у відходах до половини його первинної маси. У моделі ЗПП використовується постійна реакції k :

$$k = \ln(2) / t_{1/2} \quad (1.11)$$

Найбільш повільний показник $k = 0,02$ (період піврозпаду становить 35 років) притаманний звалищам, розташованим у сухій кліматичній зоні з повільним розкладанням таких відходів, як деревина та папір. Самий довгий напіврозпад протягом 70 років або довше може бути оцінений для неглибоких сухих звалищ, які розташовані в помірній кліматичній зоні або для відходів деревини в сухій кліматичній зоні.

Напіврозпад тривалістю 3 роки може відповідати контрольованим звалищам, розташованим у вологому помірному кліматі, або швидкою здатністю до розпаду відходів у вологому тропічному кліматі. Методологія за замовченням щодо визначення цього показника за польовими дослідженнями не розвинута.

Існує 2 альтернативних варіанти для вибору періоду напіврозкладання (k):

а) розраховується середня зважена для $t_{1/2}$ для змішаних великогабаритних відходів (розкладання різних типів відходів повністю залежить друг від друга. Через це розклад деревинних відходів збільшено у зв'язку з наявністю харчових відходів, а розклад харчових відходів занижено через деревинні);

в) розподіл потоку відходів на категорії відходів у відповідності з швидкістю їх розкладання (розкладання різних видів відходів не залежить одне від одного).

Основні припущення та розрахунки, які були прийняті:

- склад відходів, особливо органічний компонент, є одним з найбільш важливих факторів, які впливають як на кількість, так і на строки утворення метану;

- вміст вологи на звалищі є суттєвим елементом анаеробного розкладання та утворення метану; спрощений метод припускає, що вміст вологі на звалищі пропорційно середньорічній нормі осадів (МАР) в місці розташування звалища або співвідношенню МАР та потенціальній евапотранспирації (РЕТ);

- границя, по якій температура атмосферного повітря впливає на температуру звалища, а рівень утворення звалищного газу в багатьох залежить від рівня практики поводження з відходами і глибини звалища;

- відходи на неглибоких відкритих звалищах в основному розкладаються аеробним засобом та генерують невелику кількість метану, а викиди зменшуються за більш короткий період часу, ніж в анаеробних умовах; на контрольованих, а також неглибоких неконтрольованих звалищах складаються анаеробні умови.

Держава може встановлювати спеціальні значення напіврозпаду відходів або коефіцієнту k за умов фіксації порядку проведення польових випробувань.

У таблиці 1.8 наведено рекомендований рівень значень утворення метану за замовченням в рамках рівня 1.

Таблиця 1.8 – Рекомендований рівень значень утворення метану за замовчуванням (k) в рамках рівня 1

Тип відходів		Кліматична зона							
		Арктична та помірною (МАТ $\leq 20^{\circ}\text{C}$)				Тропічна (МАТ $> 20^{\circ}\text{C}$)			
		Суша (МАР/РЕТ < 1)		Волога (МАР/РЕТ > 1)		Суша (МАР < 1000 мм)		Суша та волога (МАР ≥ 1000 мм)	
		За замовчуванням	Діапазон	За замовчуванням	Діапазон	За замовчуванням	Діапазон	За замовчуванням	Діапазон
1		2	3	4	5	6	7	8	9
Повільно розкладаються	Паперові/ текстильні відходи	0,04	0,03-0,05	0,06	0,05-0,07	0,045	0,04-0,06	0,07	0,06-0,085
	Деревинні відходи/ солома	0,02	0,01-0,03	0,03	0,02-0,04	0,025	0,02-0,04	0,035	0,03-0,05

Продовження таблиці 1.8

1		2	3	4	5	6	7	8	9
Помірно розкладаються	Інші (нехарчові) органічні, які піддаються гниттю/садово-паркові відходи	0,05	0,04-0,06	0,1	0,06-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15-0,2
Швидко розкладаються	Харчові відходи/відстій стічних вод	0,06	0,05-0,08	0,185	0,1-0,2	0,085	0,07-0,1	0,4	0,17-0,7
Великогабаритні відходи		0,05	0,04-0,06	0,09	0,08-0,1	0,065	0,05-0,08	0,17	0,15*-0,2

* Приймаючи $t_{1/2} = 4 - 7$ років за характерне значення для більшості країн, що розвиваються, з тропічним кліматом. Умови з високою вологістю та швидкого розпаду відходів.

У таблиці 1.9 наведені значення періоду напіврозпаду ($t_{1/2}$) у рамках рівня 1.

Таблиця 1.9 – Значення періоду напіврозпаду ($t_{1/2}$) у рамках рівня 1

Тип відходів		Кліматична зона							
		Арктична та помірна (MAT $\leq 20^{\circ}\text{C}$)				Тропічна (MAT $> 20^{\circ}\text{C}$)			
		Суха (MAP/PET < 1)		Волога (MAP/PET > 1)		Суха ((MAP < 1000 мм)		Суша та волога (MAP ≥ 1000 мм)	
		За замовчуванням	Діапазон	За замовчуванням	Діапазон	За замовчуванням	Діапазон	За замовчуванням	Діапазон
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Повільно розкладаються	Паперові/текстильні відходи	17	14-23	12	10-14	15	12-17	10	8-10
	Деревинні відходи/солота	35	23-69	23	17-35	28	17-35	20	14-23
Помірно розкладаються	Інші (нехарчові) органічні, які піддаються гниттю/садово-паркові відходи	14	12-17	7	6-9	11	9-14	4	3-5

Продовження таблиці 1.9

1		2	3	4	5	6	7	8	9
Швидко розкладаються	Харчові відходи/відстій стічних вод	12	9-14	4	3-6	8	6-10	2	1-4
Великогабаритні відходи		14	12-17	7	6-9	11	9-14	4	3*-5

* Приймаючи $t_{1/2} = 4 - 7$ років за характерне значення для більшості країн, що розвиваються, з тропічним кліматом. Умови з високою вологістю та швидкого розкладу відходів.

В таблицях 1.8 та 1.9 використана наступна аббревіатура:

МАТ – середньорічна температура.

МАР – середньорічна норма осадів.

РЕТ – потенціальна евапотранспірація.

МАТ, МАР та РЕТ беруться за даними найближчої метеорологічної станції.

Рекуперація метану (R).

Рекуперація метану (R) передбачає, що метан, який утворюється на звалищах, може бути спалений у факелах або для отримання енергії. Значення за замовчуванням $R = 0$. У разі наявності рекуперації метану необхідно задокументувати кількість рекуперованого метану, контролювати кількість отриманої з газу електрики. При оцінці рекуперації метану треба враховувати такі параметри, як: тип покриття звалища, наявність прокладки, відкритий або закритий тип звалища тощо. Консервативна оцінка кількості рекуперованого метану може опиратися на інвентаризації мінімальної пропускної здатності діючого обладнання і факелів. Інший консервативний підхід служить для визначення загальної рекуперації у якості 35 % встановленої пропускної потужності.

У всіх випадках, кількість рекуперованого метану не повинна враховуватися як звалищний газ, тому що звалищний газ містить тільки частину метану.

Час затримки.

Час затримки. На більшості звалищ ТПВ відходи захороняються безперервно протягом всього року, кожного дня. Але генерація метану починається не одразу після захоронення.

Спочатку розкладення є аеробним. Триває до того моменту, коли увесь легкодоступний кисень буде витрачено. Ця стадія продовжується декілька тижнів. Далі - стадія окислення з генерацією водню (декілька місяців). Після цього настає перехідний період з кислотного середовища у нейтральну. Це початок генерації метану. Полягають, що цей момент настає через рік після захоронення відходів, коли середній час зберігання відходів на звалищі ставить шість місяців (невизначеність 2 місяці). Інший період затримки повинен супроводжуватися дослідями.

Застосування вимірювань при визначенні викидів метану зі звалища.

Модель ЗПП та інші методи визначення утворення метану на звалищах базуються на використанні наукових знань, а також припущені о мікробіальному метаболізмі під впливом анаеробних умов на звалищах. З метою перевірки моделі шляхом порівняння прогнозованих розрахунків з рівнем утворення метану, отриманого на основі вимірювань, для документування вибору к конкретним звалищам значень параметрів, що застосовуються у моделі, доцільно проводити натурні дослідження та застосовувати результати вимірювань.

Вуглець, який зберігається на звалищах.

Деяка частка вуглецю буде зберігатися на звалищах протягом тривалого часу. Розклад деревинних та паперових відходів проходить дуже повільно, тому вуглець, який міститься у цих видах відходів, накопичується на звалищах. Кількість вуглецю, який зберігається на звалищах можна оцінити за допомогою моделі ЗПП.

При використанні варіанта великогабаритних відходів перед визначенням кількості вуглецю, який тривалий час зберігається на звалищах, необхідно визначити відповідну долю *DOC*, який утворюється у заготовлених

лісоматеріалах з загальної долі *DOC* у відходах. Можна використовувати долі, наведені МГЕЗК за замовчуванням для паперових, картонних, деревинних, а також садово-паркових відходів.

Вуглець, який тривалий час зберігається на звалищах, зафіксований у якості 1. Значення для відходів, які утворенні із заготовлених лісоматеріалів (папір, картон, деревина, садово-паркові) може бути визначений за допомогою моделі ЗПП.

Забезпечення якості, контроль якості (ОЯ/КЯ) та документація.

Ефективна практика полягає у документуванні та архівуванні усіх відомостей, які необхідні для отримання оцінок викидів (глава 6 «Забезпечення якості, контроль якості та перевірка вірогідності», том1 «Загальні керівні вказівки та звітність»).

До звіту включаються опис моделі, за якою визначаються викиди парникових газів та забруднюючих речовин, ключові допущення та параметри.

Розподіл відходів між контрольованим та неконтрольованим звалищами з метою встановлення *MSF* також слід документувати разом з допоміжною інформацією.

Якщо на звалищі здійснюється рекуперація метану, то додається інформація про засоби для його рекуперації. Відомості щодо спалювання метану у факельних установках і спалювання метану у установках для отримання енергії необхідно документувати відокремлено.

Зміни у параметрах по роках повинні бути чітко роз'яснені з посиланням на довідкову інформацію.

У звітах повинні наводитися короткий опис використаних методів та посилання джерела даних.

У разі використання для визначення національних значень даних щодо діяльності у сфері твердих відходів даних досліджень та відбору проби процедури оцінки якості повинні включати:

- розгляд методу збирання даних досліджень та перевірку даних з метою оцінки правильності їх збирання та узагальнення. Здійснювати кореляцію даних з попередніми роками;

- оцінку джерел вторинних даних та забезпечення довідниковими посиланнями діяльності *ОЯ/КЯ*, пов'язаної з підготовленням вторинних даних.

Необхідно співставляти показники національних викидів з показниками із подібних до них країн, які мають подібні демографічні та економічні характеристики.

У матеріалах *InternationalBestPracticesGuidefor LFGE Projects* (Найкращі методи реалізації біогазові енергетичних проектів на полігонах ТПВ), розроблених Агенцією захисту навколишнього середовища США, 2012 р., містить великий огляд прикладів розробки міжнародних проектів, надає технологічні, економічні та політичні викладки, які направлені на досягнення успіху у реалізації проектів LFGE (Проекти з використання енергії біогазу) [18].

Модель Агенції захисту навколишнього середовища США *LandfillGasEmissionsModel* (LandGEM) була розроблена як інструмент для оцінки викидів різних компонентів біогазу на полігонах США. Використання моделей, розроблених для полігонів США, не дає адекватних результатів для звалищ в інших країнах через абсолютно різні характеристики відходів та умови їх захоронення на звалищах.

Повний облік обсягу звалищного газу (ЗГ) визначається урахуванням всіх складників нижче поданого рівняння:

$$\begin{aligned} \text{Генерація ЗГ} = & \text{зібраний газ} + \text{незібраний газ, який проникає через} \\ & \text{покриття} + \text{окислення метану у покривних шарах} + \\ & \text{міграцій у ґрунті} + \\ & \text{змінення об'ємного накопичення} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Точно замірити можливо лише зібраний ЗГ.

Для полігонів, які не мають установленної системи збору звалищного газу, встановлюється ефективність збору за замовченням. Для полігонів США, які планують сучасну систему, вона встановлюється на рівні 75 %. Однак, ефективність збору важко оцінити на відкритих звалищах або погано керованих полігонах, на яких мають значні варіації склад відходів, клімат, умови захоронення відходів.

Фактори, які впливають на утворення звалищного газу (ЗГ):

- вологість: генерація звалищного газу зростає разом зі зростанням вологості, яка сприяє зростанню швидкості розкладу відходів. Вологість оцінюється на підставі середньорічної кількості опадів у місці розташування звалища;
- температура: при підвищенні температури до 57⁰С зростає генерація звалищного газу. При більш високих температурах утворення ЗГ уповільнюється, що може бути пов'язано з протіканням аеробних процесів;
- кисень: повітря може проникати у масу відходів та інгібувати утворення ЗГ анаеробними мікроорганізмами;
- здатність відходів до біорозкладання: органічні матеріали, які здатні до швидкого розкладання, наприклад харчові відходи, швидко генерують ЗГ, але їх запаси швидко закінчуються. Такі матеріали, як папір, деревина здатні до мінімальній деградації, виробляють мінімальну кількість ЗГ. Неорганічні матеріали зовсім не виробляють ЗГ.

Швидкість розкладання відходів максимальна після розміщення відходів на полігоні. Органічні відходи починають розкладатися з затримкою від 3 до 6 місяців після захоронення. Протягом десятиліть швидкість падає через зростання кількості відходів, що вже піддалися біорозпаду.

Модель LandGEM застосовує рівняння розкладання першого порядку для розрахунку швидкості утворення метану в одиницях газового потоку (м³/рік) або маси (мегаграм на рік (Мг/рік)):

$$Q = \sum_{t=i}^n \sum_{j=0.1}^i kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}), \quad (1.13)$$

де Q – максимальний очікуваний потік метану, що утворюється, м³/рік;

i – часовий шаг, який дорівнює 1 року;

n – розрахунковий рік (рік початку захоронення відходів);

j – часовий шаг, який дорівнює 0,1 року;

k – швидкість утворення метану, 1/рік;

L_0 – потенціал утворення метану, м³/Мг;

M_i – маса відходів, яка захоронена у i -тому році, Мг;

t_{ij} – вік j -тої частини відходів маси M_i , яка захоронена в i -том році (десяти долі року).

Рівняння дає оцінку утворення метану на підставі кількості відходів, накопичених к цьому року. Загальна кількість звалищного газу, який генерується, дорівнює потенціалу утворення метану, який поділено на долю метану, що містить у ЗГ. Наприклад, кількість ЗГ у 2 рази більше кількості метану при умові, якщо ЗГ містить 50 % метану ($Q_{LFG} = Q/0.5 = 2Q$).

Швидкість утворення метану (k) пов'язана з на півперіодом P життя відходів співвідношенням:

$$P = \ln(2)/k. \quad (1.14)$$

У випадках малих значень k генерація метану обмежена. При великих значеннях k більша частина відходів розкладається за той же період. За замовченням значення k для не біореакторних полігонів (сухі та нормальні умови) обмежений величиною 0,02 (для полігонів, на яких випадає менше 635 мм атмосферних опадів на рік), 0,04 або 0,05 для полігонів з більшою кількістю опадів.

Потенціал утворення метану (L_0) описує загальну кількість метану, яка може бути отримана з тонни відходів в результаті їх максимально можливого розкладання. Цей показник залежить тільки від складу відходів.

Перемінний склад відходів, змінення кількості окремих їх компонентів призводить до зміни швидкості утворення метану k . Ці зміни неможна врахувати в моделі LandGEM, яка пропонує єдине значення k для усіх видів відходів. Це не може бути застосовано для інших країн, особливо у разі великої кількості харчових відходів.

Щорічна кількість ТПВ, які завозяться на звалище, є критично важливим вхідним параметром моделі. Фактичні дані о кількості відходів можливо отримати на підставі:

- оцінки кількості відходів на підставі записів про кількість та об'єми сміттєвозів. Необхідно фіксувати: вид відходів, їх щільність, об'єми сміттєвозів;

- рік відкриття звалища та швидкість зростання щорічної кількості відходів. Темпи зростання кількості відходів пов'язані з ростом населення. Вони можуть бути оцінені через дані про населення;

- розрахункова кількість накопичених відходів. Можна оцінити по схемі полігону, яка має масштаб, а також середній глибині відходів. Отриманий розрахунковий об'єм накопичених відходів необхідно перерахувати у масу відходів через реальну їх щільність. Треба враховувати, що щільність накопичених на звалищі відходів може змінюватися у широких границях в залежності від умов експлуатації полігону та складу відходів, а також від об'єм ґрунтів, які використовують для пересипки. Звичайна щільність відходів на звалищах коливається від 0,6 до 0,8 т/куб.м.

Фактор корекції метану (MCF) приймається:

- 0,8 (зниження на 20 %) для неконтрольованих звалищ глибиною 5 метрів;

- 0,4 (зниження на 60 %) для неконтрольованих звалищ глибиною менше 5 метрів.

Модель для оцінки генерації метану в Україні застосовує поправочний коефіцієнт, який враховує витрати органічного матеріалу при пожежах на звалищах. Застосування цього коефіцієнту вимагає отримання інформації щодо об'єму або площі поверхні полігону, які постраждали від пожежі, ступеню цього впливу, який оцінюється трьома ступенями: низькою, середньою та високою.

При наявності системи збирання та утилізації звалищного газу на звалищах необхідно оцінити ефективність його збирання. Для цього необхідно мати інформацію щодо умов на звалищі та практиці його експлуатації:

- метод експлуатації звалища. Наявність ґрунтового покриття, ущільнення та планування відходів, контроль за їх розміщенням, контроль сполохів, наявність системи дренажу фільтрату;
- глибина відходів. Моделі застосовують поправки до ефективності збирання у тому разі, коли глибина захоронених відходів становить менше 10 метрів;
- тип та проникнення покриття. Ефективність збирання ЗГ буде самою високою в місцях з низьким проникненням верхнього ґрунтового шару;
- нижній ізолюючий екран. Полігони з глиняним або синтетичним нижнім екраном будуть мати більш низькі показники міграції біогазу у навколишні ґрунти та більш високу ефективність збору ЗГ;
- ущільнення відходів. Не ущільнені відходи будуть мати більш високу інфільтрацію повітря, зменшення якості газу та більш низьку ефективність збирання;
- розмір активної площадки для захоронення відходів. Неконтрольовані звалища з великою площею захоронення відходів мають тенденцію к зниженню ефективності збирання ЗГ;
- управління фільтратом. Високий рівень фільтрату може різко знизити ефективність збору ЗГ, особливо на звалищах з більшою кількістю атмосферних опадів, поганим дренажем та обмеженим ґрунтовим покриттям.

Свідоцтвом високого рівня фільтрату є просочування фільтрату на схилах, наявність на поверхні луж та стоків.

Ступінь покриття полігону системою збирання ЗГ.

Максимальні значення ефективності, які не слід перевищувати при оцінці збору ЗГ:

- на відкритих звалищах та полігонах: 50 % в умовах вологого клімату;
- на відкритих звалищах та полігонах: 60 % в умовах сухого клімату;
- на закритих звалищах та полігонах: 70 %;
- на діючих інженерних полігонах: 75 % в умовах вологого клімату;
- на діючих інженерних полігонах: 80 % в умовах сухого клімату;
- на закритих інженерних полігонах: 85 %.

Національний звіт про інвентаризацію [19] містить баланс викидів забруднюючих речовин та викидів парникових газів за період з 1990 по 2015 рік із детальним описом застосованих методів та висновків наукових досліджень щодо національних умов. Національний звіт про інвентаризацію був підготовлений в рамках національної системи інвентаризації, яка включає комплекс усіх організаційних, правових та процедурних механізмів, прийнятих Україною для оцінки антропогенних викидів та викидів парникових газів.

Інвентаризація охоплює викиди семи парникових газів (ПГ):

- діоксид вуглецю (CO₂);
- метан (CH₄);
- оксид азоту (I) (N₂O);
- фторвуглеводи (ГФУ);
- перфторуглерод (ПФУ);
- гексафторид сірки (SF₆);
- трифторид азоту (NF₃).

Як і наступні газу попередників:

- окис вуглецю (CO);
- оксиди азоту (NO_x);
- неметанові леткі органічні сполуки (НМЛОС);

- діоксид сірки (SO₂).

Сектор 5 «Відходи» Національного звіту про інвентаризацію присвячено викидам ПГ при поводженні з відходами та при очищенні і скиданні стічних вод.

Сектор поділено на наступні категорії:

- 5.А Утилізація твердих відходів;
- 5.Б Біологічна обробка твердих відходів;
- 5.С спалювання та відкрите спалювання відходів;
- 5.Д Очищення та скидання стічних вод.

Викиди метану відбуваються в результаті розкладання органічної речовини в твердому тілі полігону комунальних і промислових відходів, від очищення промислової та побутової води, від біологічної обробки та компостування відходів. Викиди оксиду азоту мають місце при очищенні промислових стічних вод, спалюванні та компостуванні відходів. Вуглекислий газ виділяється при спалювання відходів.

Інвентаризація викидів ПГ зі звалищ твердих побутових відходів в Україні включає викиди метану з полігону ТПВ, а також промислові органічні відходи на звалищах та полігонах ТПВ країни, які можна розділити на три групи: некеровані неглибокі, некеровані глибокі, та керовані (контрольовані), відповідно до класифікації Керівних принципів МГЕЗК 2006 року.

Категорія 5.А є ключовою і оцінюється відповідно до рівня 3, використовуючи національні коефіцієнти викидів та фактори за замовчуванням.

Оцінка викидів CH₄ з полігонів ТПВ проводилася відповідно до Національної багатокomпонентної моделі, розробленої в 2012 році і описаної в науково-дослідній роботі «Дослідження газифікації на найбільших місцях депонування ТПВ та перехід на трикомпонентну національну модель для оцінки викидів ПГ від звалищ ТПВ в Україні» [20].

У роботі [21] модель була вдосконалена шляхом більш детальної оцінки складу ТПВ та виділення двох додаткових компонентів (шкіри та гуми, а також засобів особистої гігієни).

Національна модель газифікації базується на методі розпаду першого порядку третього рівня деталізації, що ґрунтується на визначених для України факторах кожної з семи органічних фракцій твердих побутових відходів.

Модель пропонує індивідуальні розрахунки для кожної категорії органічних відходів ($DOC_{j,kj}$), які групуються відповідно до швидкості розкладання та вмісту органічного вуглецю. Національна Модель не враховує вплив діяльності на вилучення вторинного матеріалу і енергії ресурсів з «тіла» звалищ ТПВ.

Частка відходів, що прямували безпосередньо до звалищ ТПВ, у період 1900-2004 рр. становила 85-90 %. Оцінка маси відходів, що відвозять на смітники, також включає незаконне вивезення ТПВ. Її частка складає 10-15 % від зібраних ТПВ. За даними наукових досліджень загальна кількість ТПВ, що вивозилися на звалища України в 2015 році, склала 9,67 млн. тонн.

Поправочний коефіцієнт метану (MCF).

Обґрунтування вибору коефіцієнту MCF базується на наступних даних: значна частина полігонів ТПВ в Україні є смітники, сформовані спонтанно в 60-70-х роках на місці глинистих або піщаних кар'єрів, в ярах або на плоских ділянках поверхні в безпосередній близькості від меж міста. У результаті звалища, які розташовуються поблизу міст з населенням від 50 тис. осіб і більше, є ділянками з глибиною 5-10 м захоронених відходів і класифікуються як некеровані глибокі звалища (MCF = 0,8). Навколо населених пунктів з населенням менше 50 тис. осіб утворилися звалища, які не досягають глибини 5 метрів, а за класифікацією їх можна віднести до некерованих дрібних полігонів (MCF = 0,4). Крім того, в Україні є звалища, які можуть претендувати на статус керованих (MCF = 1,0). Це інженерні споруди, реконструкція яких почалася в кінці 80-х років (після прийняття більш жорстких норм експлуатації полігонів) і була завершена в 1990 році в містах: Київ, Харків, Дніпропетровськ, Луганськ, Черкаси, Чернівці, Івано-Франківськ, Луцьк, Ялта.

Склад ТПВ, вміст біорозкладаємого вуглецю (DOC_j), і константа швидкості виробництва метану k_j .

Склад ТПВ в Україні в цілому розраховувався на основі припущень, узгоджених з експертами в сфері управління ТПВ:

- несортовані органічні компоненти містять до 15 % рослинних і до 25 % харчових відходів;
- компонент «кістка, шкіра і гума» на 1/3 складається з кісток (за відсутності прямих даних досліджень);
- частка засобів особистої гігієни визначається як сума імпорту та виробництва експорту цієї товарної групи у звітному році;
- склад ТПВ в регіонах визначається як середнє арифметичне даних у розташованих містах в цьому регіоні;
- в регіонах, де не проводилися дослідження, дані про морфологічний склад визначаються як середні дані в сусідніх регіонах.

Модель використовує значення DOC за замовчуванням для всіх компонентів до Керівництва МГЕЗК 2006.

Константа швидкості виробництва метану k_j прийнята за замовчуванням для зони помірного клімату відповідно.

Частка фактично розкладеного органічного вуглецю (DOC_F). Значення DOC_F є типовим і дорівнює 0,5.

Вміст метану в звалищному газі (F). Значення F є типовим і дорівнює 0,5.

Час затримки (t_0). Значення t_0 становить 6 місяців.

Коефіцієнт окислення метану (OX). В Україні немає доказів, що підтверджують ступінь окислення метану на звалищах, тому було використано значення за замовчуванням 0.

Таблиця 1.10 показує дані k_j та DOC_j для компонентів ТПВ, що використовуються для інвентаризації викидів метану зі звалищ і полігонів ТПВ.

Таблиця 1.10 – Значення *DOC* і *k* для компонентів ТПВ, які біологічно розкладаються

№ п/п	Компоненти	Постійна швидкості утворення метану (k_j), рік ⁻¹	Біорозпаду вуглець (DOC_j)
1	Папір та картон	0,048	0,40
2	Текстиль	0,048	0,24
3	Харчові відходи	0,110	0,15
4	Пиломатеріали	0,024	0,43
5	Садові і паркові відходи	0,070	0,20
6	Засоби особистої гігієни	0,048	0,24
7	Гума та шкіра	0,048	0,39

У таблиці 1.11 наведені усереднені показники по Україні за період 2010-2015 роки щодо категорій біорозпаду компонентів твердих побутових відходів, параметрів *DOC* і *MCF*, а також викидів метану.

Одним з важливіших факторів, які впливають на утворення парникових газів у складі звалищного газу, є кліматичні умови у місці розташування об'єктів захоронення відходів. В Україні було проведено дослідження, направлене на оцінку викидів ПГ з урахуванням нових кількісних даних щодо кліматичних факторів для різних кліматичних зон країни. Результати досліджень викладені у статті «Вплив кліматичних факторів на оцінку викидів парникових газів з місць захоронення твердих побутових відходів», Шмарін С.Л. зі співавторами [22].

За даними Міністерства регіонального розвитку та житлово-комунального господарства України в 2011 році в нашій країні було захоронено майже 14,4 млн.тонн ТПВ на 6 тис. звалищ та полігонах, які займають площу близько 9 тис.га. В результаті анаеробного розкладання ТПВ в атмосферу щорічно викидається більше ніж 300 тис. тонн метану, що становить біля 11,5 % від національних антропогенних викидів метану.

Низка областей України мають значні відмінності. Можна виділити чотири агрокліматичні зони, які поступово переходять одна в іншу. В [23] запропоновано алгоритм, який дозволяє врахувати особливості клімату окремих регіонів України при оцінці викидів ПГ. При цьому застосовується коефіцієнт за замовченням.

Таблиця 1.11 - Вміст біорозкладаємих компонентів, параметри *DOC* і *MCF*, викиди метану для полігонів ТПВ у період 2010-2015 рр.

Рік	Папір та картон	Текстиль	Харчові відходи	Деревні відходи	Садові та паркові відходи	Відходи особистої гігієни	Гума та шкіра	Біонерозкладаючі компоненти	<i>DOC</i> %	<i>MCF</i>	Загальне скорочення викидів метану від спалювання біогазу та полігони	Всього	Неконтрольовані неглибокі полігони	Неконтрольовані глибокі полігони	Контрольовані полігони
												ВикидиметанувідзахороненняMSW, кт CO ₂ -екв.			
Морфологічна структура MSW, %									кт CO ₂ -екв.						
2010	13,3	3,8	33,3	1,9	3,9	1,3	1,8	40,6	13,87	0,699	57,85	8035,20	1808,77	4743,13	1483,30
2011	13,7	3,9	31,8	1,8	3,6	1,3	1,9	42,0	13,72	0,699	114,16	8060,61	1819,95	4719,73	1520,93
2012	13,7	3,9	31,8	1,8	3,6	1,4	1,9	41,9	13,73	0,698	250,85	8003,23	1831,93	4697,13	1474,17
2013	13,7	3,9	31,8	1,8	3,6	1,4	1,9	41,9	13,73	0,697	264,37	8082,15	1848,32	4681,17	1552,66
2014	13,7	3,9	31,8	1,8	3,6	1,4	1,9	41,9	13,73	0,697	334,14	8094,76	1864,11	4661,16	1569,49
2015	13,7	3,9	31,8	1,8	3,6	1,4	1,9	41,9	13,73	0,699	293,10	8141,32	1862,85	4612,29	1666,17

Авторами запропоновано механізм вдосконалення національної методики з обліку викидів парникових газів з полігонів ТПВ в Україні шляхом впровадження національних значень темпів утворення метану для чотирьох кліматичних зон країни.

Виділяють чотири кліматичних регіони, для кожного з яких встановлені значення постійних темпів утворення метану фракцій ТПВ, які наведені у таблиці 1.12.

Таблиця 1.12 – Значення постійної темпів утворення метану k в залежності від компоненту ТПВ та кліматичного регіону*

Компонент	$k, \text{рік}$			
	Регіон 1	Регіон 2	Регіон 3	Регіон 4
1	2	3	4	5
Харчові відходи, засоби особистої гігієни	0,110	0,120	0,140	0,150
Садово-паркові відходи	0,055	0,060	0,070	0,075
Папір та картон, текстиль	0,022	0,024	0,028	0,030
Деревина, гума та шкіра	0,011	0,012	0,014	0,015

Регіон 1 – Херсонська і Луганська області.

Регіон 2 – АР Крим (включно м. Севастополь), Кіровоградська, Миколаївська, Одеська, Запорізька області.

Регіон 3 – Черкаська, Чернігівська, Дніпропетровська, Донецька, Харківська, Київська, Рівненська, Сумська, Вінницька, Волинська області.

Регіон 4 – Чернівецька, Івано-Франківська, Хмельницька, Львівська, Полтавська, Тернопільська, Закарпатська та Житомирська області.

Розрахунок викидів метану на рівні адміністративних областей показав, що валові викиди на одиницю захоронених відходів, значно відрізняються в залежності від кліматичних особливостей області. Для Запорізької області мінімальне значення – 0,23 т CH_4 в CO_2 -екв./т ТПВ, у той час як у сусідній Донецькій області цей показник склав 1,04 т CH_4 в CO_2 -екв./т ТПВ.

Процес утворення звалищного газу на полігонах ТПВ, його склад, фактори, які впливають на газоутворення, методика розрахунку емісії звалищного газу та вибір системи дегазації полігону викладені у

«Рекомендаціях з розрахунку утворення біогазу і вибору систем дегазації на полігонах захоронення твердих побутових відходів», які розроблені Державним комітетом Російської Федерації з будівництва та житлово-комунального комплексу ФГУП, Федеральним центром благоустрою та поводження з відходами у 2003 році [14].

Прямі польові вимірювання утворення звалищного газу та їх висока вартість є причиною того, що такі дослідження малочислені. Різноманітність місцевих кліматичних та географічних умов, різнорідність об'єктів досліджень ускладнюють отримання достовірних результатів та вимагає проведення багаторічних вимірювань. Тому, при визначенні емісії звалищного газу використовуються математичний апарат та математичне моделювання як основні інструменти досліджень. При розробці математичних моделей необхідно враховувати наступні чинники:

- відсутність обліку тривалості впливу захоронених відходів на довкілля;
- відсутність попередньої підготовки відходів перед захороненням;
- відсутність системи дегазації;
- застосування земляної засипки у якості захисного покриття;
- відсутність ізолюючої пересипки шарів відходів;
- горіння відходів на звалищах, що приводить до вигорання частини відходів, так як слідство, органічного вуглецю, що зменшує кількість утворення звалищного газу.

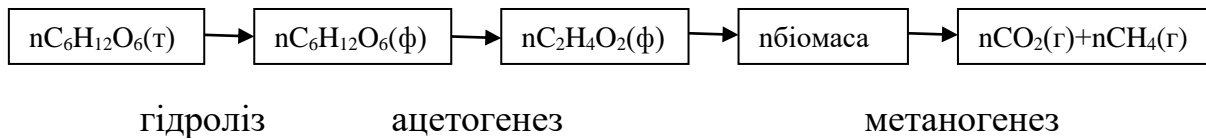
У основу розрахунку утворення звалищного газу покладено моделі процесу анаеробної деструкції целюлозовміщуючих відходів, який описується кінетичним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dC}{dt} = k * C, \quad (1.15)$$

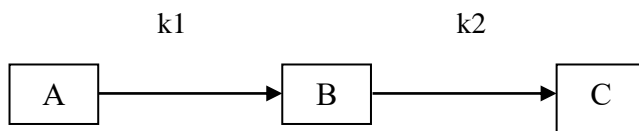
де C – концентрація реактивної матерії;

k – коефіцієнт пропорційності.

Процес утворення звалищного газу можна описати наступним чином:



Утворення звалищного газу здійснюється у процесі протікання двох послідовних реакцій, схематично представлених на нижче поданій схемі:



Швидкість утворення звалищного газу у цих послідовних реакціях визначається на основі кінетичного рівняння першого порядку:

$$\frac{dB}{dt} = k_1 * A; \quad \frac{dC}{dt} = k_2 * B, \quad (1.16)$$

де k_1 – константа швидкості реакції у фазі ацетогенезу;

k_2 - константа швидкості реакції у фазі метаногенезу.

Для полігонів на стадії рекультивації величиною k_1 можна знехтувати.

Для полігонів на стадії експлуатації враховуються дві константи.

При розрахунках вводяться наступні припущення:

1. Загальний час розкладання відходів визначається часом розпаду середньо та повільно біодеградуємих фракцій;

2. Температура та рН всередині тіла полігону розглядаються у діапазоні значень, які оптимальні для метаногенеза;

3. Вміст метану у звалищному газі становить 50%;

4. Активна фаза метаногенеза настає через 2 роки після формування анаеробних вимог;

5. При деградації відходів 1% від загального вмісту біорозкладаемого вуглецю переходить у фільтрат.

Розрахунок емісії звалищного газу ведеться за нижче поданим порядком.

1. Вихідними даними для розрахунку є:

- морфологічний склад біорозкладаємої частини ТПВ;
- зольність відходів;
- початкова вологість ТПВ.

Метановий потенціал розраховується за формулою:

$$L_{oi} = 11088 * \frac{n_c}{\mu_i} * (1 - A) * B_f, \quad (1.17)$$

де L_{oi} - метановий потенціал, $\text{нм}^3/\text{т}$ сухих відходів;

n_c - число кіломолей вуглецю, яке міститься у 1 тонні фракції;

μ_i - молярная маса фракції, $\text{кг}/\text{кмоль}$;

A – зольність фракції,;

B_f - коефіцієнт біорозкладання.

Морфологічний склад відходів, формули складових компонентів відходів, значення n_c , молярна маса μ_i наведені у таблиці 1.13.

Таблиця 1.13 - Морфологічний та хімічний склад біорозкладаємих ТПВ

Фракція відходів	Хімічна формула та значення n_c	Молярна маса, μ_i
1	2	3
Харчові відходи	$\text{C}_{320,0}\text{H}_{507,9}\text{O}_{188,4}\text{N}_{14,9}\text{S}$	7606,5
Папір	$\text{C}_{580,6}\text{H}_{952,3}\text{O}_{440,8}\text{N}_{3,49}\text{S}$	15051,9
Садово-паркові відходи	$\text{C}_{424,8}\text{H}_{635,9}\text{O}_{253,8}\text{N}_{6,41}\text{S}$	9916,04
Деревина	$\text{C}_{1321}\text{H}_{1904}\text{O}_{855,6}\text{N}_{6,41}\text{S}$	31542
Тканина, текстиль	$\text{C}_{978,8}\text{H}_{1396}\text{O}_{416,8}\text{N}_{70,2}\text{S}$	20825,2
Шкіра	$\text{C}_{404,4}\text{H}_{634,9}\text{O}_{58,1}\text{N}_{57,2}\text{S}$	7202,1
Гума	$\text{C}_{454,9}\text{H}_{69,4}\text{NS}$	5574
Пластик	$\text{C}_{3506}\text{H}_{5,003}\text{O}_1\text{NS}$	63,75

Коефіцієнт біорозкладання (B_f) визначається за таблицею 1.14.

Таблиця 1.14 – Значення констант розкладання k_1 та k_2

Тип відходів	Константа розкладання k_1 за умов			Константа розкладання k_2 за умов		
	вологі	середні	сухі	вологі	середні	сухі
Швидко розкладаємі	0,4	0,25	0,05	-	-	-
Середньо розкладаємі	0,1	0,05	-	0,098	0,046	0,0276
Повільно розкладаємі	-	-	-	0,046	0,0276	0,0138

Повний потенціал генерації метану L_0 враховує тільки органічно розкладаємі фракції. Він розраховується за формулою:

$$L_0 = \sum (L_{oi} * X_i), \quad (1.18)$$

де L_0 – повний потенціал генерації метану, $\text{нм}^3/\text{т}$ сухих відходів;

L_{oi} – потенціал генерації метану біорозкладаємою фракцією, $\text{нм}^3/\text{т}$;

X_i – доля біорозкладаємої фракції у ТПВ.

Для полігонів на стадії рекультивації та пост рекультивації загальна кількість метану визначається за формулою:

$$Q = (1 - w)L_0 * M_{d\tau} (1 - e^{-k_2\tau}), \text{нм}^3, \quad (1.19)$$

Швидкість генерації метану за рік:

$$V_{\text{CH}_4} = (1 - w)L_0 * M_{d\tau} * k_2 * -k_2\tau, \frac{\text{нм}^3}{\text{рік}}, \quad (1.20)$$

де τ – час розкладання ТПВ;

w – вологість відходів, які надходять на полігон, долі од.;

M_{dt} – маса відходів, що захороненні на полігоні, тонн;

k_2 – константа розкладання відходів.

Для діючого полігону швидкість утворення метану визначається за формулою:

$$V = (1 - w)L_0 * M * \frac{k_1 * k_2 * \tau}{k_2 - k_1} * (e^{-k_1 * \tau} - e^{-k_2 * \tau}) \quad , \quad (1.21)$$

Об'єм генерації метану:

$$Q = (1 - w)L_0 * M * \left(1 + \frac{k_1}{k_2 - k_1} * e^{-k_2 * \tau} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} * e^{-k_1 * \tau} \right) \quad , \quad (1.22)$$

де τ – час розкладання ТПІ;

w – вологість відходів, що надходять на полігон, долі одиниці;

M – маса відходів, що захороненні на поточний рік експлуатації (приймається з урахуванням маси відходів, які згоріли у результаті пожеж при експлуатації полігону);

k_1 – константа швидкості реакції у фазі ацетогенезу;

k_2 – константа швидкості реакції у фазі метаногенезу.

Кількісний та якісний склад звалищного газу визначається за Методикою розрахунку кількісних характеристик викидів забруднюючих речовин у атмосферу від полігонів твердих побутових та промислових відходів, яка у 2004 році була розроблена сумісно: НВП «ЕКОПРОМ» (Академія комунального господарства ім. К.Д. Памфілова), НДІ Екології людини та гігієни навколишнього середовища ім. А.М. Сисіна, НДІ охорони атмосферного повітря, ЗАТ «НВП «ЛОГУС» [24].

За цією Методикою визначаються основні види газоподібних забруднюючих речовин, які утворюються в результаті біотермічного анаеробного процесу розпаду органічних складових ТПВ та промислових

відходів (ПО) та виділяються з поверхні полігонів відходів у атмосферу. Основними за об'ємною масою складовими звалищного газу є метан та діоксид вуглецю. Крім того, звалищний газ містить пари води, оксид вуглецю, оксиди азоту, аміак, вуглеводневі, сірководень, фенол та інші екологічно небезпечні речовини у дуже незначній кількості.

Обстеження полігону ТПВ рекомендується проводити не раніше двох років з початку його експлуатації.

Надходження звалищного газу з поверхні полігону у атмосферне повітря йде рівномірно, без помітних коливань його кількісних та якісних характеристик.

Відходи мають наступні фізичні характеристики, які впливають на якісний та кількісний склад звалищного газу:

- щільність (насіпна маса) становить 0,2-0,3 тонн/куб.м;
- вологість коливається від 40 % до 55 %;
- вміст органічної речовини може сягати 70 % (у перерахунку на суху масу).

Ці дані підлягають уточненню для кожного конкретного полігона ТПВ.

В Методиці наведені формули для розрахунку питомого показника генерації звалищного газу, його густини, концентрації компонентів забруднюючих речовин у складі звалищного газу.

Питомий показник утворення звалищного газу в період його стабільної генерації при метановому бродінні розраховується за формулою:

$$Q_w = 10^{-4}(0,92Ж + 0,62У + 0,34Б), \quad (1.23)$$

де Q – питомий показник утворення звалищного газу, кг/кг відходів;

R- вміст органічної складової у відходах, %;

Ж – вміст жироподібних речовин в органічній складовій відходів, %;

У – вміст вуглеводородоподібних речовин в органічній складовій відходів, %;

Б - вміст білкових речовин в органічній складовій відходів, %.

R, Ж, У, Б визначаються аналізами у відібраних пробах відходів з перерахуванням на суху речовину відходів.

Відходи, поховані на полігонах ТПВ містять певну кількість вологи, яка не генерує звалищний газ. Тому, питомий показник утворення звалищного газу розрахований на одиницю вологих відходів, буде менший від сухих відходів в $10^{-2}(100 - W)$ разів (W – фактична вологість відходів в %, визначена аналізами проб).

Питомий показник утворення звалищного газу відходів з урахуванням їх вологості визначається за формулою:

$$Q_w = 10^{-6}R(100-W)(0,92Ж + 0,62У + 0,34Б) \quad (1.24)$$

Кількість звалищного газу, що утворюється протягом року, розраховується за формулою:

$$P_{num} = (Q_w/t_{збір}) * 10^3 \text{ кг/т відходів в рік}, \quad (1.25)$$

де P_{num} – кількість звалищного газу, що виділяється протягом року, віднесена до одиниці тонн відходів, кг/тонн відходів;

$t_{збір}$ - період повного зброджування органічної складової відходів, рік.

Період повного зброджування органічної складової відходів розраховується за формулою:

$$t_{збір} = 10248 / (T_{тепл.} * (t_{ср.тепл.})^{0,31966}), \quad (1.26)$$

де $t_{ср.тепл.}$ – середня з середньомісячних температур повітря у районі полігону ТПВ за теплий період року ($t_{ср.міс} > 0$), $^{\circ}\text{C}$;

$T_{тепл.}$ – тривалість теплового періоду року у районі полігона ТПВ, дні;

10248 та 0,301966 – питомі коефіцієнти, які враховують біотермічне розкладення органіки.

Густина звалищного газу визначається як сумарна величина добутку об'ємних концентрацій його компонентів на їх густину:

$$\rho_{з.г.} = \left(\sum C_{об.і} * \rho_i \right) * 10^{-2}, \text{ кг/куб.м} \quad (1.27)$$

де $\rho_{з.г.}$ – густина звалищного газу, кг/куб.м;

$C_{об.і}$ – вміст і-го компоненту у звалищному газі, об'ємні %;

$\rho_{з.г.і}$ – густина і-го компоненту звалищного газу, кг/куб.м;

n- кількість компонентів у звалищному газі.

Середня густина звалищного газу складає 0,95 – 0,98 від густини повітря. Якщо густина повітря становить 1, 2928 кг/куб.м, то середня густина звалищного газу буде:

$$1,2928 \cdot 0,965 = 1,24755 \text{ кг/куб. м}$$

Об'ємний вміст і-го компоненту у звалищному газі визначається за формулою:

$$C_{об.і} = 10^{-4} (C_i / \rho_i), \% \quad (1.28)$$

де C_i – концентрація і-го компоненту у звалищному газі, мг/куб.м

Густина звалищного газу визначається за формулою:

$$\rho_{з.г.} = 10^{-6} \sum C_i, \text{ кг/куб.м} \quad (1.29)$$

Розрахункові дані щодо густини компонентів звалищного газу наведені у таблиці 1.15.

Таблиця 1.15 – Показники густини компонентів звалищного газу

№ з/п	Найменуванні речовини	Густина, кг/куб.м
1	2	3
1	Метан	0,717
2	Вуглецю діоксид	1,977
3	Толуол	0,867
4	Аміак	0,771
5	Ксилол	0,869
6	Вуглецю окис	1,250
7	Азоту діоксид	1,490
8	Формальдегід	0,815
9	Ангідрид сірчаний	2,930
10	Етилбензол	0,867
11	Бензол	0,869
12	Сірководень	1,540
13	Фенол	1,071

Склад звалищного газу та концентрації компонентів у ньому визначаються через два роки після початку експлуатації полігону ТПВ шляхом відбору та аналізу проб звалищного газу у ряді точок по площі полігону на глибині 1,0 – 1,5 метра. Кількість та розміщення точок відбору залежить від активної площі полігону та числа різнорідних ділянок. Відбір проб здійснюється шляхом підсосу звалищного газу та подальших його хімічних аналізів.

Ваговий відсотковий вміст кожного компоненту звалищного газу розраховується на підставі проведених аналізів, у яких визначені їх концентрації, а також на підставі розрахованої щільності звалищного газу за формулою:

$$C_{ваг.i} = 10^{-4} (C_i / \rho_{з.г}), \%, \quad (1.30)$$

де $C_{ваг.i}$ – ваговий відсотковий вміст і-го компоненту звалищного газу, %;

C_i – концентрація і-го компоненту у звалищному газі, мг/куб.м;

$\rho_{з.г.}$ – густина звалищного газу, кг/куб.м.

Розрахунок питомої маси компонентів у звалищному газі, які викидаються за рік, ведеться за формулою:

$$P_{num.i} = (C_{ваг.i} * P_{num.i}) * 10^{-2}, \text{ кг/т відходів на рік}, \quad (1.31)$$

де $P_{num.i}$ = питома маса і-го компоненту у звалищному газі, кг/тонн відходів на рік.

Середньостатистичний склад звалищного газу, який рекомендовано приймати при проектуванні полігону ТПВ, наведено у таблиці 1.16.

Таблиця 1.16 – Компоненти звалищного газу та їх ваговий відсотковий вміст

Найменування компоненту	Ваговий відсотковий вміст компоненту, $C_{ваг.i}$, %
1	2
Метан	52,915
Толуол	0,723
Аміак	0,533
Ксилол	0,443
Вуглецю оксид	0,252
Азоту діоксид	0,111
Формальдегід	0,096
Етилбензол	0,095
Ангідрид сірчаний	0,070
Сірководень	0,026

Для розрахунку кількості викидів підраховується кількість активних відходів, які стабільно генерують звалищний газ. Фаза стабілізованого активного виходу звалищного газу у середньому становить 20 років та настає у середньому через 2 роки після захоронення відходів. Тобто, відходи, завезені на полігон протягом останніх 2 років, не враховуються.

Максимально разові викиди і-го компоненту біогазу з полігону визначаються за формулою:

$$M_i = 0,01 * C_{ваг.i} * M_{сум}, \text{ г/сек}, \quad (1.32)$$

де $C_{ваг.i}$ – ваговий відсотковий вміст і-го компоненту звалищного газу, який визначається за формулою 1.30, або за показниками таблиці 1.16, %.

Сумарний максимально разовий викид звалищного газу з полігону ТПВ становить:

$$M_{\text{сум.}} = ((P_{\text{нит.}} \cdot \Sigma D) / (T_{\text{тепл.}} * 24 * 3600)) * 10^3 = (P_{\text{нит.}} \cdot \Sigma D) / 86.4 T_{\text{тепл.}} \text{ г/сек}, \quad (1.33)$$

де ΣD – кількість активних стабільно генеруючих звалищний газ відходів, тонн;

$T_{\text{тепл.}}$ – тривалість теплового періоду року в районі полігону ТПВ, дні;

$P_{\text{нит.}}$ – питомий показник утворення звалищного газу за рік, віднесений до однієї тонни відходів, кг/тонну відходів за рік.

При розрахунках треба враховувати, що на обсяг викиду звалищного газу впливає температура навколишнього середовища. При низьких температурах процес мезофільного зброджування органічної частини ТПВ зупиняється до настання теплового періоду року ($t_{\text{ср.міс.}} > 0^{\circ}\text{C}$).

Обстеження полігону та відбір проб звалищного газу необхідно проводити в теплий період року при $t_{\text{ср.міс.}} > 8^{\circ}\text{C}$.

Тому, при розрахунках викидів звалищного газу у холодний період року застосовують підвищуючий коефіцієнт нерівномірності утворення звалищного газу, який приймається на рівні 1,3.

Валові викиди i -го компоненту звалищного газу розраховуються наступним чином:

$$G_i = 0,01 * C_{\text{ваг.}i} * G_{\text{сум.}}, \quad \text{г/сек}, \quad (1.34)$$

де $G_{\text{сум.}}$ – валовий викид звалищного газу, тонн/рік, який розраховується за формулою:

$$G_{\text{сум.}} = M_{\text{сум.}} \left(\frac{a * 365 * 24 * 3600}{12} + \frac{b * 365 * 24 * 3600}{12 * 1,3} \right) * 10^{-6} \text{ т/рік} \quad (1.35)$$

$$0,01 * C_{\text{ваг.}i} * M_{\text{сум.}}, \quad \text{г/сек}, \quad (1.36)$$

де a – період теплої пори року, коли $t_{\text{ср.міс.}} > 8^{\circ}\text{C}$;

b – період холодної пори року, коли $0^{\circ}\text{C} < t_{\text{ср.міс.}} \leq 8^{\circ}\text{C}$.

В Україні при проектуванні полігонів твердих побутових відходів розрахунок очікуваної кількості біогазу, що виділяється при анаеробному розкладанні 1 тонни ТПВ здійснюється згідно ДБН В.2.4-2.2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основи проектування» [25] за формулою:

$$V_{\text{р.б}} = P_{\text{ТПВ}} \cdot K_{\text{л.о}} \cdot (1-Z) \cdot K_{\text{р}}, \quad (1.37)$$

де $V_{\text{р.б}}$ - розрахункова кількість біогазу, м^3 ;

$P_{\text{ТПВ}}$ - загальна маса ТПВ, які складуються на полігоні, кг;

$K_{\text{л.о}}$ - вміст органіки, що легко розкладається, в 1 т відходів ($K_{\text{л.о}} - 0,5 \dots 0,7$);

Z - зольність органічної речовини ($Z = 0,2 \dots 0,3$);

$K_{\text{р}}$ - максимально можливий ступінь анаеробного розкладання органічної речовини за розрахунковий період ($K_{\text{р}} = 0,4 \dots 0,5$).

Під час розрахунків слід приймати такі величини:

- вагова кількість звалищного газу, одержуваного при анаеробному розкладанні, становить 1 г звалищного газу з 1 г розкладеної беззольної речовини ТПВ;

- об'ємна маса біогазу - $1 \text{ кг}/\text{м}^3$;

- теплотворна здатність біогазу - $5\,000 \text{ ккал}/\text{м}^3$ ($\sim 21 \text{ МДж}/\text{м}^3$).

В ДБН наводиться також приблизний склад звалищного газу та його фізичні характеристики:

- вміст метану – 40-60 %;

- вміст діоксиду вуглецю – 30-45 %;

- вміст азоту, сірководню, кисню, водню та інших газів - 5-10 %;

- теплотворна здатність звалищного газу – $18-25 \text{ МДж}/\text{куб.м}$;

- межі вибухонебезпечності у суміші звалищного газу з повітрям – 5-15 %.

Керівництво ЕМЕП/ЕАОС з інвентаризації викидів забруднюючих речовин 2016 [26].

Керівництво ЕМЕП/ЕАОС з інвентаризації викидів забруднюючих речовин (надалі – Керівництво) застосовує коефіцієнти, які якісно визначають викиди або показники ефективності їх видалення на одиницю діяльності (ОД), що здійснюється (коефіцієнти викидів або КВ). Виходячи з цього, рівняння для визначення викидів має наступний вигляд:

$$\text{Викиди} = \text{ОД} \times \text{КВ} \quad (1.38)$$

У Керівництві застосовується багаторівнева методологія для оцінки викидів. Прості (Рівень 1) методи наводяться для всіх джерел та речовин, у відношенні яких країни, що ратифікували протоколи Конвенції, зобов'язані надавати звітність.

По відношенню до ключових категорій джерел наводяться більш складні методи (Рівень 2). Найбільш складні підходи (Рівень 3) застосовуються для ключових категорій при наявності відповідних методів.

Методи Рівня 1 засновуються на простому лінійного взаємозв'язку між даними з ОД і КВ. Джерелом даних є доступна статистична інформація. Стандартні коефіцієнти Рівня 1 вибираються таким чином, щоб вони були репрезентативні з точки зору усереднених умов виробничих процесів та не залежали від будь-якої технології.

Методи Рівня 2 засновуються на тих же самих або подібних даних ОД, що і методи Рівня 1, але при цьому враховують коефіцієнти для викидів конкретних країн. Такі коефіцієнти розраховуються на підставі інформації конкретної країни щодо умов ведення виробничих процесів, технологіях боротьби з забрудненням тощо. Рівень 2 застосовується при більш високому рівні деталізації, якщо статистичні дані по ОД підрозділяються на підгрупи з більш або менш однорідними характеристиками виробничих процесів.

Методи Рівня 3 мають ще більш комплексний характер. Вони можуть включати дані на рівні об'єкта та/або ускладнені моделі.

Біологічна обробка відходів – скиди твердих відходів на ґрунт згідно Керівництва відносяться до категорії 5.А. Основними забруднюючими речовинами є парникові гази: CH_4 , CO_2 та N_2O . Викидається невелика кількість неметанових летких органічних сполук (НМЛОС), NO_x , NH_3 та CO . Але не має точної оцінки щодо коефіцієнту викиду для цих забруднюючих речовин. Також здійснюються викиди твердих частинок при обробці відходів, для яких доступні коефіцієнти викидів Рівня 1, а коефіцієнти викидів Рівня 3 можуть бути розраховані за допомогою US EPA (2006).

В Керівництві наводиться алгоритм вибору метода розрахунків.

На рис. 1.2 наведено алгоритм прийняття рішень для вибору рівня проведення оцінки викидів від захоронення твердих побутових відходів. При прийнятті рішень необхідно проаналізувати всю наявну інформацію, а саме:

- чи всі категорії відходів охоплені обліком;
- чи має місце розподіл ведення діяльності за різними технологіям;
- чи є об'єкт основним джерелом викидів.

Після проведення аналізу необхідно вибрати рівень та відповідні коефіцієнти для оцінки викидів забруднюючих речовин.

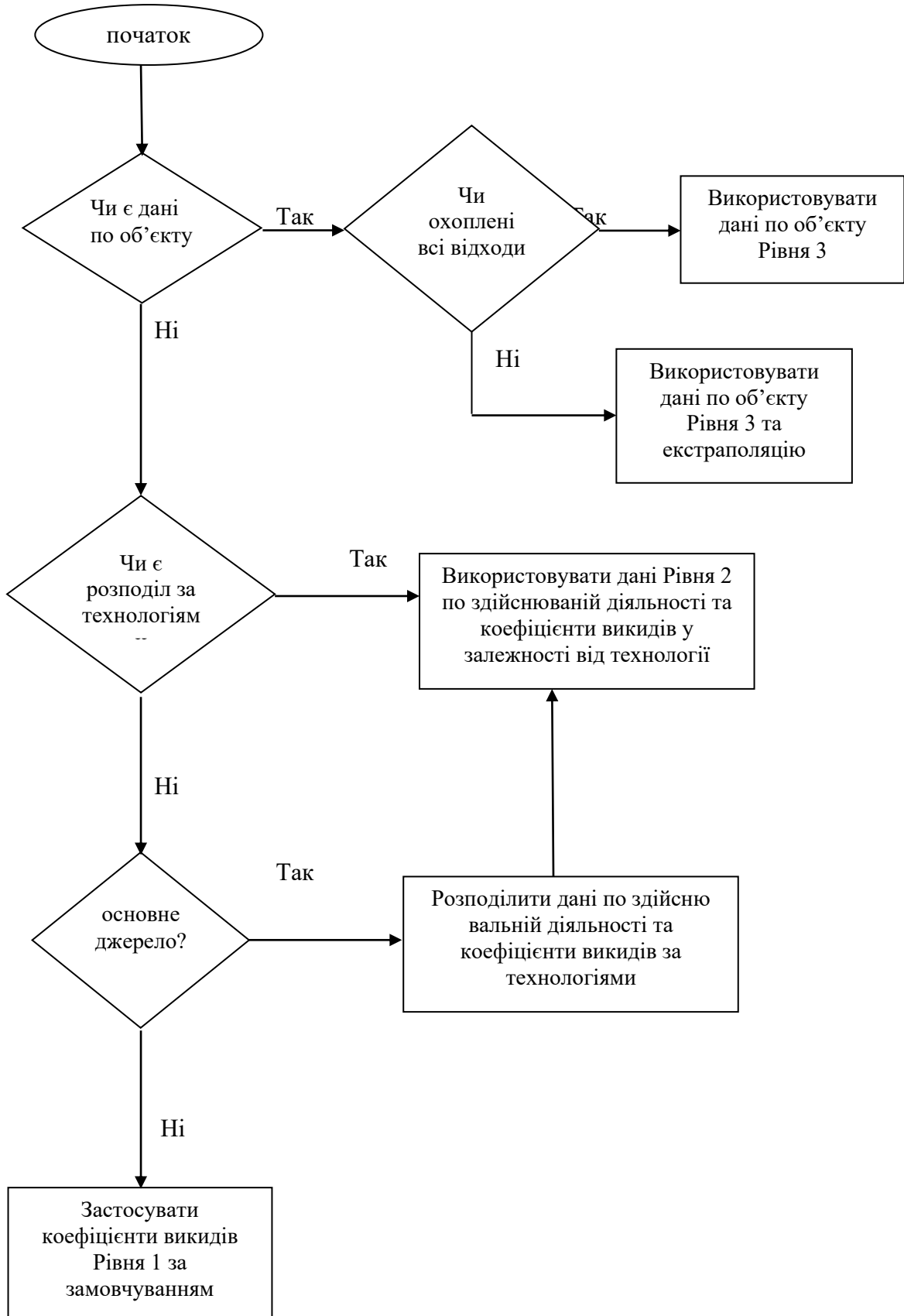


Рисунок 1.2 – Алгоритм прийняття рішень для застосування коефіцієнтів викидів для джерела скиду твердих відходів на ґрунт

Для Рівня 1 розрахунку викидів при захороненні відходів застосовується наступне рівняння:

$$E_{\text{забруднювач}} = AR_{\text{виробництво}} \times EF_{\text{забруднювач}} \quad (1.39)$$

Ця формула використовується на національному рівні.

Коефіцієнти викидів Рівня 1 припускають усереднену або стандартну технологію та об'єднують усі допоміжні процеси для цієї категорії джерела.

Коефіцієнти викидів за замовченням Рівня 1 надані у таблиці 1.17.

Таблиця 1.17 – Коефіцієнти викидів Рівня 1 за замовченням для звалищ ТПВ

Коефіцієнти викидів за замовченням Рівня 1					
	Код	Найменування			
Категорія джерела НО	5.A	Скид твердих відходів на ґрунт			
Паливо	Немає даних				
Не застосовується	NO _x , SO ₂ , Pb, Cd, As, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, ПХБ, ПХДД/Ф, Бензо(а)пирен, Бензо(б)флуорантен, Бензо(к)флуорантен, Індено(1,2,3-сд)пирен, ГХБ, ЧУ, ГХЦГ				
Не оцінено	NH ₃ , Hg, CO				
Забруднювач	Значення	Одиниці	95% довірчий інтервал		Посилання
			нижній	верхній	
НМЛОС	1,56	Кг/Мг	0,5	3,0	UK Inventory (2004)*
ЗКЗР (загальна концентрація завислих речовин)	0,463	г/Мг	0,006	2,21	US EPA (2006)
ТЧ ₁₀ (тверді частинки, розміри яких не перевищують 10 мікрон)	0,219	г/Мг	0,003	1,05	US EPA (2006)
ТЧ _{2,5} (тверді частинки, розміри яких не перевищують 2,5 мікрон)	0,033	г/Мг	0,0004	0,16	US EPA (2006)

* Кадастр Великобританії (2004) наводить цифру 5,65 г НМЛОС на 1 куб.м звалищного газу. У відповідності до АОНС США (2006), глава 2.4.4.1 потенціал утворення CH₄ може відрізнятися в границях відб до 270 куб.м на Мг відходів. Стандартизований коефіцієнт викидів був розрахований за допомогою потенціалу утворення CH₄ за замовченням – 138 куб.м на Мг відходів та вмісту метану – 50% (МГЕЗК, 2006, том 5, гл. 3.2.3).

Для НМЛОС Агенцією з охорони навколишнього середовища США (US EPA) було оцінено, що 98 % газів, які утворюються при розкладанні відходів, це метан, а 1,3 % - це НМЛОС, у т.ч. перхлоретилен, пентан, бутан та інші (US EPA, 1990).

Оцінки похибки для твердих частинок розраховані:

- нижній – як для мокрої леткої золи (27% вологовмісту при швидкості вітру 0,6 м/с);

- верхній – як для сухого шлаку (3,6 % вологовмісту при швидкості вітру 6,7 м/с).

Підхід Рівня 2, який базується на технологіях.

Немає даних для цієї категорії джерела.

Моделювання викидів Рівня 3 та використання об'єктивних даних.

Викиди твердих частинок від обробки відходів на муніципальних площадках захоронення твердих відходів розраховуються за допомогою рівняння:

$$E = k * 0,0016 * (U/22)^{1,2} / (M/2)^{1,4}, \quad (1.40)$$

де E – коефіцієнт викидів, кг/Мг;

k – показник розміру частинки ($k(\text{ТЧ}_{\text{ЗКЗР}})=0,74$, $k(\text{ТЧ}_{10})=0,35$, $k(\text{ТЧ}_{2,5})=0,053$);

U – середня швидкість вітру, м/с;

M – вологість матеріалу, %.

Якщо доступні конкретні параметри, то їх використовують для Рівня 3.

Якщо не має конкретної інформації для U та/або M , то застосовують коефіцієнти викидів Рівня 1.

У відповідності з US EPA (2006) швидкість вітру коливається від 0,6 до 6,7 м/с, середнє значення швидкості вітру за замовченням береться як:

$$U = 6,7 \text{ м/с.}$$

У відповідності з US EPA (2006), таблиця 13.2.4.-1 вологовміст для муніципальних площадок захоронення твердих відходів може коливатися від 2,3 % (нижня границя для шлаку) до 29 % (верхня границя для леткої золи). Середній вологовміст для різних насипних матеріалів береться як:

$$M = 11 \%$$

У аналітичному огляді Матвеева Ю.Б. (НТЦ «Биомасса») «Опыт и реализации проектов по сбору биогаза на полигонах ТБО Украины в рамках реализации программы «Метан на рынок» [27] наведені фактори, які впливають на процес газоутворення на полігонах ТПВ, а саме:

- кількість, тип та вік відходів;
- вміст вологи;
- температура;
- рН (кислотність);
- умови на полігоні (стан поверхні, крутизна схилів, наявність проміжних шарів).

Кількість звалищного газу, що утворюється на полігонах ТПВ, описується наступною формулою:

$$Q_{з.г.} = \sum_{i=1}^n 2 k L_0 M e^{-kt_i}, \quad (1.41)$$

де k – константа швидкості розкладання відходів, 1/рік;

L_0 – потенціал утворення метану, куб.м/тонн;

M – маса відходів, які вивезені на полігон в рік i , тонн;

t_i – вік відходів, рік i .

Потенціал утворення метану визначає кількість метану, який утворюється з однієї тонни відходів. Цей показник залежить від складу відходів, а саме вмісту органічних фракцій, які здатні розкладатися. Цей показник знаходиться у межах значень 0 – 312 м³ СН₄/тонну відходів. U.S.EPA за замовченням використовує значення 100 м³ СН₄/тонну для американських звалищ.

Для України цей показник має значення $85,0 \text{ м}^3 \text{ СН}_4/\text{тонну}$ відходів.

Константа швидкості розкладання відходів встановлює швидкість розкладання відходів та утворення звалищного газу. Залежить від морфологічного складу та вологості відходів, кількості опадів. Границі значень: від $0,01/\text{рік}$ (звалища у пустелі) до $0,4/\text{рік}$ (біореактори).

У огляді також наведені параметри ефективності збирання звалищного газу. Ефективність збирання звалищного газу – це відношення кількості зібраного звалищного газу до кількості утвореного звалищного газу.

Вона залежить від:

- типу об'єкту (полігон чи звалище);
- типу/конструкції системи збирання;
- ступеня охоплення полігону системою збирання;
- характеристики відходів;
- експлуатації системи збирання.

Ефективність збирання для спроектованих та санітарних полігонів становить 60-90%, а для відкритих та контрольованих звалищ – 30-60%.

2 ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МОРФОЛОГІЧНОГО СКЛАДУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У РІЗНИХ РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

За даними Міністерства розвитку громад та територій України за 2018 рік загальна кількість твердих побутових відходів, які були зібрані та перевезені, становить 9,077 млн.тонн. В основному, ці відходи були захороненні на звалищах і полігонах. Загальна кількість полігонів і звалищ ТПВ в Україні становить 6107 одиниць, у тому числі кількість перевантажених сміттєзвалищ становить 256 од. (4,2 %), а 984 од. (16 %) не відповідають нормам екологічної безпеки.

У статті «Вміст біорозкладаючих компонентів у складі твердих побутових відходів в Україні» [21] авторами викладені результати досліджень вмісту біорозкладаючих компонентів у складі ТПВ, а також проаналізовані зміни в морфологічному складі ТПВ на викиди метану, який утворюється у місцях їх захоронення.

За даними Державної агенції екологічних інвестицій України, в результаті анаеробного розкладання органічних компонентів ТПВ у "тілі" полігону в навколишнє природне середовище щорічно викидається більше 300 тис. тонн парникового газу метану, який складає 11,5 % від маси антропогенних викидів цього газу в країні.

На об'єми утворення метану у процесі розкладання ТПВ в "тілі" полігону найбільше впливають наступні фактори:

- умови захоронення ТПВ (параметри експлуатації полігону: майданчик для складування відходів, продувка та захист від загоряння, покриття, пресування, пошарове розміщення відходів; наявність стічних, дренажних та вентиляційних систем, а також глибина полігона);
- маса захоронених ТПВ;
- кліматичні особливості місцевості (середня річна температура і співвідношення між кількістю опадів та випаровуванням води з поверхні ґрунту);

- вміст біорозкладаючих компонентів у складі ТПВ.

Морфологічний склад ТПВ щорічно змінюється і, крім того, має яскраво виражені сезонні коливання. Виходячи з цього, для визначення морфологічного складу ТПВ в Україні у 2013 році були використані дані досліджень, які були проведені у 22 містах країни (загальна кількість їх жителів складає 16 % населення України) у 2008-2013 рр.

Отримані дані систематизовані авторами за трьома рівнями – містам, областям і в цілому по Україні. Аналіз проводився за 8-ми компонентами: папір та картон, текстиль, харчові відходи, деревина, садово-паркові відходи, засоби особистої гігієни, гума та шкіра, небіорозкладаючі компоненти.

Вихідні дані, яких не вистачало, були розраховані на основі наступних припущень:

- невідсортовані компоненти, які містять органіку, включають до 15 % садово-паркових відходів та до 25 % харчових відходів;
- компонент "кістки, шкіра та гума" на 1/3 складається з кісток;
- вміст засобів особистої гігієни визначається як сума їх імпорту та виробництва за відрахуванням експорту даної групи товарів за період дослідження;
- склад ТПВ в областях визначається як середнє арифметичне показників по міським населеним пунктам;
- у тих областях, де дослідження не проводились, дані про морфологічний склад визначаються як середнє арифметичне даних суміжних областей.

Отримані дані щодо вмісту біорозкладаючих компонентів ТПВ було зведено у таблицю 2.1 та приведено на рисунку 2.1.

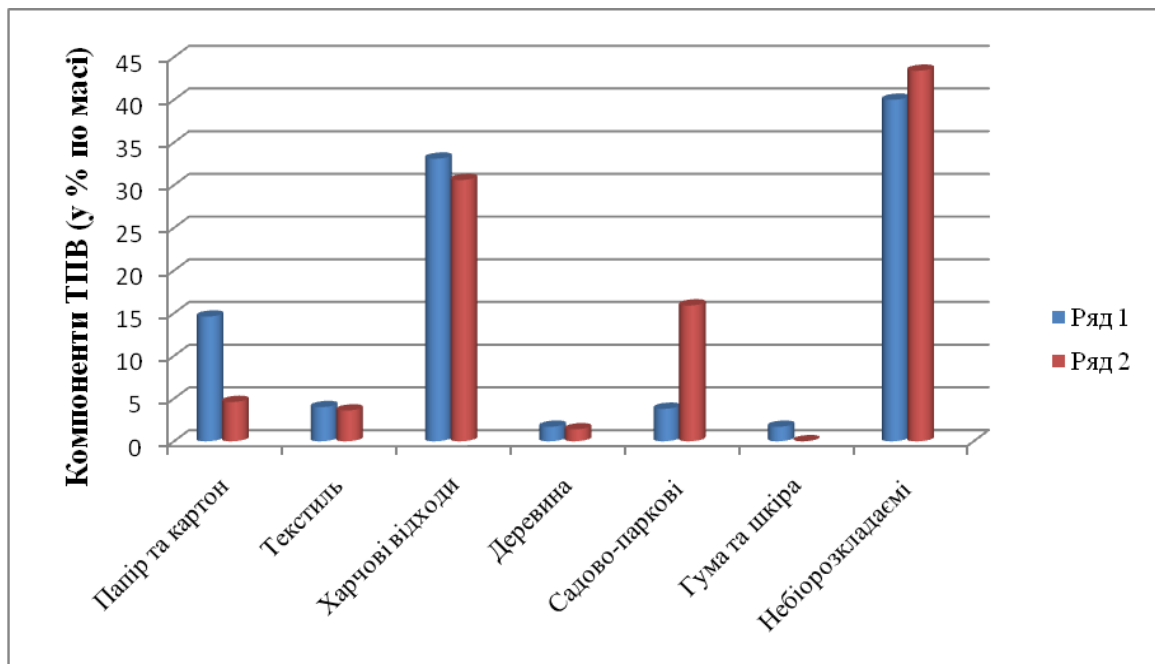
Таблиця 2.1 – Вміст біорозкладаємих компонентів ТПВ в Україні за даними на 2013 р.

№	Регіон, область	Міста, в яких проводились дослідження складу ТПВ	Компоненти ТПВ (у % по масі)							
			Папір та картон	Текстиль	Харчові відходи	Деревина	Садово-паркові	Засоби особистої гігієни	Гума та шкіра	Небіорозкладаємі
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Вінницька	Вінниця (2011)	6,3	0,9	42,4	0,5	6,6	-	0,6	41,6
2	Волинська	Луцьк (2013)	20,0	4,0	25,0	4,0	0,8	-	3,0	42,1
3	Дніпропетровська	Дніпро (2011)	9,6	2,2	29,5	0,7	4,3	-	1,4	51,1
4	Донецька	розрахункові дані	15,1	4,6	31,4	1,2	3,9	-	1,6	41,1
5	Житомирська	-//-	10,1	3,1	35,3	2,9	4,7	-	2,0	40,9
6	Закарпатська	-//-	10,5	5,3	28,8	2,9	2,8	-	3,1	45,6
7	Запорізька	Енергодар (2008)	22,0	5,5	37,6	1,5	4,1	-	1,5	26,7
8	Івано-Франківська	Івано-Франківськ (2009)	7,9	6,9	26,4	2,0	2,3	-	3,5	49,9
9	Київська	Бориспіль (2011)	8,9	7,7	28,4	1,5	3,1	-	3,5	45,7
10	Кіровоградська	Кіровоград (2011)	9,3	2,5	28,7	1,1	4,2	-	1,5	51,6
11	Луганська	розрахункові дані	14,5	5,3	29,3	1,2	3,5	-	1,8	43,3
12	Львівська	-//-	13,1	3,7	31,2	3,9	3,2	-	2,6	41,2
13	Миколаївська	-//-	15,6	2,6	29,0	2,3	3,9	-	1,3	44,2
14	Одеська	-//-	15,0	3,0	27,5	2,5	3,0	-	1,9	46,0
15	Полтавська	Полтава (2011)	7,2	1,9	43,0	0,5	5,2	-	2,0	39,1
16	Рівненська	Корець (2009), Острог (2008), Радівілов (2012)	19,0	1,8	29,4	9,0	3,2	-	3,3	33,1
17	Сумська	Суми (2011)	4,3	3,5	38,7	1,2	3,0	-	1,8	46,3
18	Тернопільська	Тернопіль (2011)	5,5	2,1	44,2	,05	6,4	-	0,6	39,6
19	Харківська	Харків (2011)	13,8	6,0	27,1	1,3	3,2	-	2,0	45,5
20	Херсонська	Херсон (2009)	28,0	3,0	28,8	5,0	3,2	-	1,0	31,0
21	Хмельницька	Хмельницький (2011)	6,1	2,2	40,9	0,4	5,9	-	0,5	43,0
22	Черкаська	розрахункові дані	7,9	3,2	35,6	0,9	4,8	-	1,9	44,5
23	Чернівецька	Чернівці (2011)	10,6	2,7	31,5	1,1	5,3	-	1,8	45,9
24	Чернігівська	розрахункові дані	6,8	4,4	36,7	1,1	3,8	-	2,4	43,7
25	м. Київ	Київ (2011)	16,7	1,9	38,7	1,5	1,5	-	0,4	38,1
	Україна	дані авторів	14,6	4,0	33,1	1,7	3,8	1,1	1,7	40,0
	Україна *		4,6	3,6	30,6	1,4	15,9	-	-	43,4

*Згідно «Досліджень газоутворення на найбільш крупних полігонах ТПВ та перехід на трьохкомпонентну національну модель розрахунків викидів ПГ від звалищ ТПВ в Україні. Звіт про НДР/Інститут технічної теплофізики НАН України, кер. Матвеев Ю.Б., викон. Кліменко В.М. [та інші]. – К., 2012. – 82 с. - № ДР 0112U001577.

Найбільша кількість паперових та картонних відходів утворюється у Волинській (20 %), Запорізькій (22 %), Херсонській (28 %) областях. Найменша – у Сумській області (4,3 %).

Утворення найбільшої кількості харчових відходів спостерігається у Вінницькій (42,4 %), Полтавській (43 %), Тернопільській (44,2 %) та Хмельницькій (40,9 %) областях. Найменший цей показник у Волинській області (25 %).



ряд 1 – дані авторів, ряд 2- дані Інституту технічної теплофізики НАН України

Рисунок 2.1– Вміст біорозкладаємих компонентів ТПВ в Україні:

Як видно із діаграми, за даними різних досліджень кількість біорозкладаючих компонентів ТПВ майже співпадає у категорії харчові відходи (30-33 %), текстиль (3,6-4 %), деревина (1,4-1,7 %). Кількість небіорозкладаючих компонентів у складі ТПВ також приблизно однакова (40-43,4 %). Таким чином, загальна кількість біорозкладаючих компонентів у складі ТПВ досягає майже 60 %.

Для підтримки належного рівня достовірності національної інвентаризації викидів парникових газів та забруднюючих речовин від звалищ і полігонів ТПВ країни дані морфологічного складу повинні періодично оновлюватися і уточнюватися.

Обробка вихідних даних та облік викидів парникових газів проводились в цьому дослідженні у відповідності з міжнародною практикою інвентаризації парникових газів, тому їх результати можуть бути використані у щорічних Кадастрах України по обліку викидів парникових газів.

У аналітичному огляді Матвеева Ю.Б. (НТЦ «Биомасса») «Опытреализациипроектов по сборубиогаза на полигонах ТБО Украины в рамках реализациипрограммы «Метан на рынок» [27] наведена характеристика полігонів ТПВ, які обслуговують м. Чернівці, м. Маріуполь, м. Рівне та на яких були проведені дослідження утворення та збирання звалищного газу.

За даними автора в Україні кількість міст з населенням більше 100 тис. становить 50. В них щорічно утворюється 40 млн. куб.м ТПВ (10 млн. тонн). Загальна кількість санкціонованих полігонів та звалищ налічує 700. На них вивозяться 90 % всіх ТПВ, що утворюються в країні.

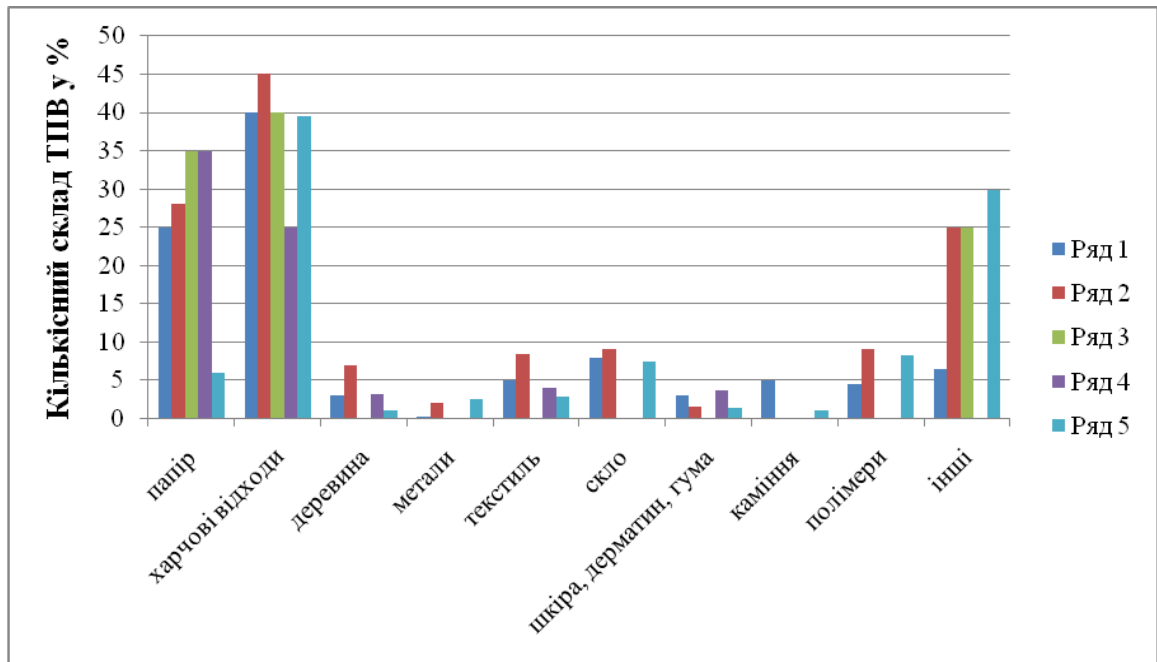
Характеристика звалищного газу, який утворюється на полігонах ТПВ в Україні, наведена у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Усереднений кількісний склад звалищного газу, що утворюється на українських полігонах ТПВ

Метан (CH ₄), % об'ємні	Діоксид вуглецю (CO ₂), % об'ємні	Кисень (O ₂), % об'ємні	Сірководень (H ₂ S), ppmv
37-60	25-50	0,5-3,5	0-15

За даними І.Я. Погрібного, які наведені у статті «Проблеми визначення морфологічного складу твердих побутових відходів з урахуванням сучасних умов переробки» [28] , в різних регіонах України морфологічний склад ТПВ може різнитися. Найбільший відсоток становлять харчові відходи (до 40 %), а

також папір (до 35 %). На діаграмі 2.2 наведені усереднені дані з морфологічного складу ТПВ по деяким регіонам України.



1 – Львівський, 2 - Черкаський, 3 – Кіровоградський, 4 – Одеський, 5 – Донецький

Рисунок 2.2 – Морфологічний склад ТПВ по регіонах України

На діаграмі 2.3 наведено орієнтовний морфологічний склад ТПВ міст України з населення більше 900 тис. мешканців.

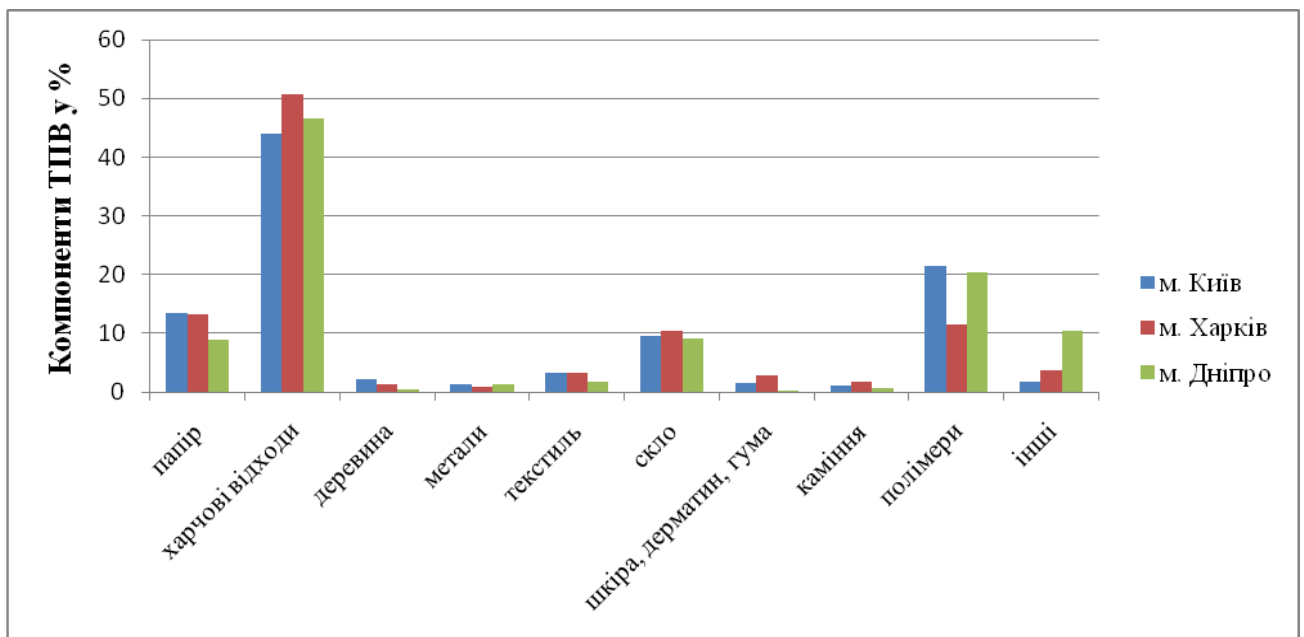


Рисунок 2.3 – Морфологічний склад ТПВ міст України

Таблиця 2.3 – Орієнтовний морфологічний склад ТПВ по регіонах України

Найменування адміністративно-територіальної одиниці	Вміст компонентів відходів, %									
	папір	харчові відходи	деревина	метали	текстиль	скло	шкіра, дерматин, гума	каміння	полімери	інші
Львівський	25,0	40,0	3,0	0,05	5,0	8,0	3,0	5,0	4,5	6,45
Черкаський	28,0	45,0	7,0	2,0	8,5	9,0	1,5	0	9,0	25,0
Кіровоградський	35,0	40,0	0	0	0	0	0	0	0	25,0
Одеський	35,0	25,0	3,25	0	4,0	0	3,75	0	0	0
Донецький	5,9	39,5	1,1	2,5	2,9	7,4	1,4	1,1	8,3	29,8
	Міста України з населенням більше 900тис. мешканців									
м. Київ	13,5	44,0	2,3	1,4	3,3	9,5	1,5	1,2	21,5	1,8
м. Харків	13,3	50,8	1,3	0,9	3,3	10,5	2,8	1,7	11,6	3,8
м. Дніпро	9,0	46,5	0,4	1,3	1,8	9,2	0,3	0,7	20,4	10,4

При відсутності даних у графі стоїть «0».

Дані щодо морфологічного складу ТПВ у містах України з населенням більше 900 тис. наведені згідно Фінального звіту «Збір та перевірка інформації стосовно поводження з твердими побутовими відходами в Україні» Японського агентства міжнародного співробітництва (ЛСА) [29], на діаграмі (рис.2.3) та в таблиці 2.3.

Як видно з діаграми, у великих містах у морфологічному складі ТПВ найбільша частка припадає на харчові відходи (40-51 %), паперові відходи (13-14 %) та відходи пластмас (11-22 %). Харчові відходи піддаються найбільш швидкої біодеградації. Тобто, вони є основним джерелом утворення звалищного газу.

Японським агентством міжнародного співробітництва у 2018 році були проведені дослідження хімічного складу ТПВ та технічних параметрів у м. Києві, м. Харкові та м. Дніпро. Результати досліджень зведені у таблицю 2.4.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад та параметри ТПВ у містах України з населенням більше 900 тис. мешканців

Місто	Хімічний склад та параметри ТПВ								
	Загальна тепло-творна здатність, ккал/кг	Вологість, %	Зольність, %	Вуглець, %	Водень, %	Кисень, %	Азот, %	Хлор, %	Сірка, %
м. Київ	2844	43,9	7,8	27	3,8	17	0,37	0,374	0,12
м. Харків	3872	27,8	6,8	37	4,6	22	0,69	0,507	0,17
м. Дніпро	2486	45,2	8,6	27	3,7	15	0,44	0,234	0,13

Морфологічний склад побутових відходів може дуже різнитися для різних регіонів та населених пунктів [30]. Вплив на відсотковий вміст компонентів ТПВ мають: благоустрій житлового фонду, пори року, кліматичні та інші умови. В складі ТПВ постійно збільшується кількість паперу, пластмас, фольги, поліетиленових плівок, інших видів пакування. Особливо великі сезонні зміни харчових відходів: з 28 % навесні до 40 % влітку та восени.

Вологість харчових відходів коливається від 60-70 % навесні до 80-85 % влітку та восени.

На хімічний склад ТПВ впливають кліматичні зони. Україна відноситься до середньої кліматичної зони. В таблиці 2.5 наведено хімічний склад ТПВ у залежності від кліматичної зони, де вони утворилися.

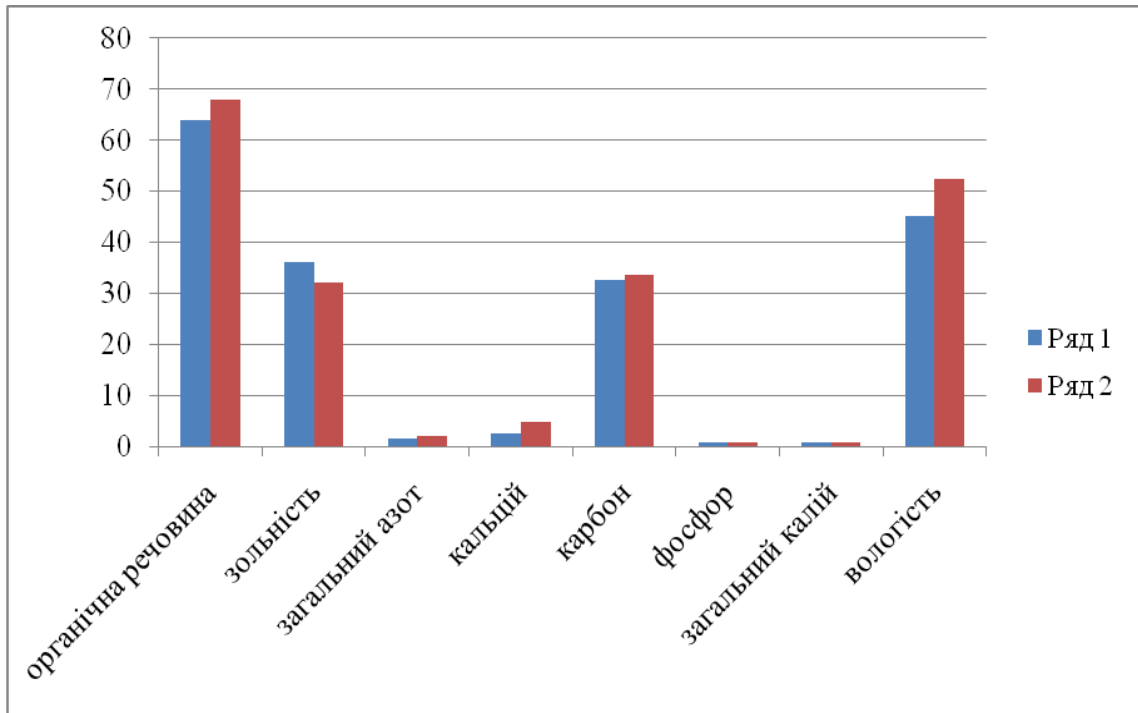
Таблиця 2.5 – Хімічний склад ТПВ у різних кліматичних зонах (% від сухої маси)

Показники	Кліматичні зони	
	середня	південна
1	2	3
Органічна речовина	56 - 72	56 - 80
Зольність	28 – 44	20 – 44
Загальний азот	0,9 – 1,9	1,2 – 2,7
Кальцій	2 – 3	4 – 5,7
Карбон	30 – 35	28 – 39
Фосфор	0,5 - 0,8	0,5 - 0,8
Загальний калій	0,5 - 1	0,5 – 1,1
Вологість (% від загальної маси)	40 – 50	35 - 70

Порівняння усередненого хімічного складу ТПВ для середньої та південної кліматичних зон наведено на діаграмі 2.4.

Як видно з діаграми, найбільший вплив кліматичних зон позначається на вмісті органічних речовин, зольності та вологості.

Фахівцями Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сикорського» (НТУУ «КПІ») були проведені експериментальні дослідження динаміки зміни таких параметрів ТПВ, як морфологічний склад, калорійність, вологість та зольність, у місті Бориспіль Київської області [31]. Аналіз морфологічного складу ТПВ проводився за методикою Каунаського технологічного університету. Дослідження проводилися з періодичністю 1 раз на місяць за період червень 2010 року – травень 2011 року.



рядок 1 – середня кліматична зона; рядок 2 – південна кліматична зона

Рисунок 2.4 – Усереднений хімічний склад ТПВ для середньої та південної кліматичних зон

Дослідженнями виявлені значні коливання відсоткового вмісту фракцій ТПВ:

- папір – від 4,95 % до 8,085 %;
- пластмаса - від 8,67 % до 12,18 %;
- скло – від 16 % до 20,76 %;
- харчові відходи – від 14 % до 34,58 %;
- садові відходи – від 9,74 % до 30,9 %;
- інші неорганічні відходи – від 5,72 до 22,01 %;
- інші органічні відходи – від 3 % до 10,38 %.

Коливання показників інших компонентів виявилися незначними.

Усереднені за отриманими результатами досліджень характеристики хімічних показників окремих фракцій ТПВ наведені у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Хімічні характеристики окремих фракцій ТПВ

Фракція	DM,%	ODM,%	C,%	bioC,%	H,%	O,%	N,%	Cl,%	S,%
Папір	78,6	87,0	48,6	99,0	6,4	44,3	0,2	0,3	0,2
Пластик	93,3	91,8	77,7	5,0	12,0	11,0	0,6	0,2	0,1
Залізо	100,0	0,0	0,0	98,0	6,3	44,2	0,5	0,7	0,1
Скло	100,0	0,0	0,0	98,0	10,0	40,0	3,0	0,0	0,0
Харчові відходи	33,8	87,0	50,7	100,0	6,2	43,7	0,5	0,1	0,1
Інші органічні речовини	91,3	81,5	50,5	90,0	7,5	33,3	1,5	1,2	0,2
Інші неорганічні речовини	100,0	0,0	48,2	98,0	6,3	44,2	0,5	0,7	0,1

Примітка. DM – вміст сухої частки; ODM – вміст органічної складової у сухій частині; C, H, O, N, Cl, S – вміст відповідно вуглецю, водню, кисню, азоту, хлору, сірки у сухій частині; bioC – вміст вуглецю органічного походження у складі вуглецю органічної сухої частини.

На підставі проведених авторами досліджень були здійснені розрахунки, які показали, що вміст вуглецю органічного походження у складі вуглецю органічної сухої частини (bioC) становить 12,68 %. Цей показник застосовується при обчисленні виділення парникових газів, у т.ч. метану, зі звалищ та полігонів.

3 ЕВОЛЮЦІЯ БІОГАЗУ НАД ПОЛІГОНОМ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Дослідження забруднення атмосферного повітря в зоні впливу полігонів ТПВ включає в себе чисельні розрахунки емісії біогазу (метану), оцінку міграції екологічно небезпечних речовин [32].

Моделі розрахунку емісії біогазу переважно базуються на вирішенні рівняння Моно, розпаду першого порядку, такого як TNO, LandGEM, Gassim, Afvalzorg, EPER, IPCC, LFGREEN. Ці моделі враховують вміст вуглецю, вологи, вік відходів, їх здатність розкладатися, метеорологічні умови [33]. Метеорологічні умови суттєво впливають на склад і потік регенерації звалищного газу [34]. Залежно від вихідних даних, практичний інтерес представляють методики Табасарани-Реттенбергера [35], Вебера Б. [36], LandGEM [37], АКХ ім. К. Д. Памфілова [38], А. М. Шаїмової [39]. Оптимальним підходом для оцінки потенціалу газоутворення є поєднання експериментальних методів з використанням лабораторних вимірювань характеристик зразків звалищного тіла для отримання результатів, що взаємно підтверджують один одного [40].

Для дослідження еволюції нагрітого газоутворення (біогазу) при конвективному підйомі в атмосферному повітрі над полігоном ТПВ вирішувалися наступні завдання:

- описати основні параметри біогазу, а саме: висотну і часову залежності швидкості руху центру, характерного розміру (радіуса), надлишкової відносної температури, плавучості біогазу;

- оцінити зміни основних параметрів нагрітих газоутворень (біогазу) над полігоном ТПВ для характерних ситуацій.

Будемо вважати, що спливаюче нагріте газоутворення має форму сфери з радіусом, який поступово збільшується. При цьому швидкість залучення холодного повітря пропорційна як площі спливаючого утворення, так і швидкості підйому його центру мас. Коефіцієнт пропорційності вважається

постійним. Так як радіус утворення набагато менше висоти однорідної атмосфери і товщини тропосфери, то стратифікацією атмосфери можна знехтувати.

В якості вихідних даних виберемо рівняння для швидкості руху центру нагрітого об'єму V повітря масою m , радіусом R , щільністю ρ і абсолютною температурою T , швидкості збільшення маси залученого холодного повітря з щільністю ρ_0 , температурою T_0 і повного інтеграла плавучості.

$$\frac{4\pi}{3} F = \frac{4\pi}{3} g \mathcal{G} R^3, \quad (3.1)$$

де g – прискорення вільного падіння;

$\mathcal{G} = (\rho_0 - \rho) / \rho_0$ – плавучість.

Плавучість біогазу обумовлена тим, що його щільність менше, ніж повітря $\rho < \rho_0$, тобто цей газ є більш легким. Модель, що використовувалась далі, придатна в разі, якщо піднімаються обсяги нагрітого утворення. В результаті біохімічних процесів розкладання відходів виділяється з продуктами розкладання тепло, яке обумовлює різницю температур. При цьому плавучість викликана $T > T_0$, в цьому випадку $\mathcal{G} = (T_0 - T) / T_0$. В умовах полігону ТПВ одночасно мають місце обидва випадки.

Вихідні рівняння з урахуванням опору повітря включають в себе співвідношення для швидкості підйому, маси залученого холодного повітря і повного інтегралу плавучості нагрітого утворення:

$$m \frac{dv}{dt} = F_A - mg - C\rho_0 v^2 S / 2, \quad (3.2)$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha S_1 v \rho_0, \quad (3.3)$$

$$\frac{dF}{dt} = -N^2 v R^3, \quad (3.4)$$

де t - час;

$F_A = \rho_0 V g$ – сила Архімеда;

mg – сила тяжіння;

$C \rho_0 v^2 S/2$ – сила опору повітря.

Для сферичного газоутворення $S = \pi R^2$ – площа поперечного перерізу, $S_1 = 4\pi R^2$ – площа поверхні сфери, α – коефіцієнт захоплення холодного повітря, $N \approx 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ – коефіцієнт Брента-Вяйсяля, $C = C_D + 8\alpha$ – ефективний коефіцієнт опору, C_D – коефіцієнт опору (для сфери при помірних швидкостях $C_D \approx 0,5$, а $\alpha \approx 0,1$, і $C \approx 1,3$ [41]). Оскільки $m = \rho V = 4\pi R^3 \rho / 3$, $\rho = \rho_0 T_0 / T$, рівняння (3.2)- (3.4) з урахуванням (3.1) приймуть вигляд:

$$\frac{dv}{dt} = g - \beta(1 + \vartheta) \frac{v^2}{R}, \quad \beta = 3C/8 \approx 0,5,$$

$$\frac{dR}{dt} - \frac{R}{3(1 + \vartheta)} \frac{d\vartheta}{dt} = \alpha v(1 + \vartheta), \quad (3.5)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} + 3\vartheta \left(\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} \right) = - \frac{N^2 v}{g}. \quad (3.6)$$

Вирішуючи щодо похідних в рівняннях (3.5) і (3.6), отримаємо систему:

$$\frac{dv}{dt} = g - \beta(1 + \vartheta) \frac{v^2}{R}, \quad v(0) = 0, \quad (3.7)$$

$$\frac{dR}{dt} = \frac{v}{1 + 2\vartheta} \left[\alpha(1 + \vartheta)^2 - \frac{N^2 R}{3g} \right], \quad R(0) = R_0, \quad (3.8)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -3\alpha \frac{\vartheta(1 + \vartheta)^2}{1 + 2\vartheta} \frac{v}{R} - \frac{N^2}{g} \frac{1 + \vartheta}{1 + 2\vartheta} v, \quad \vartheta(0) = \vartheta_0. \quad (3.9)$$

Рівняння (3.8) можна спростити, якщо врахувати, що $N^2 R / g \ll 0,1 - 10$. Ця нерівність справедлива при $R \leq 1 - 10$ км при $\vartheta \approx 0,1 - 10$. Якщо до того ж

$R \ll 3\alpha\vartheta(\vartheta+1)g/N^2$, то в (3.9) можна знехтувати членом N^2 . При цьому R заздалегідь набагато менше висоти однорідної атмосфери. Тим самим виключаються з розгляду коливальні рішення. Тоді замість (3.8) і (3.9) маємо:

$$\frac{dR}{dt} \approx \alpha \frac{(1+\vartheta)^2}{1+2\vartheta} \nu, \quad (3.10)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} \approx -3\alpha \frac{\vartheta(1+\vartheta)^2}{1+2\vartheta} \frac{\nu}{R}. \quad (3.11)$$

Розділивши (3.11) на (3.10), отримаємо:

$$\frac{d\vartheta}{dR} = -3 \frac{\vartheta}{R}. \quad (3.12)$$

Тоді рішення (3.12) має вигляд:

$$\vartheta(R) = \vartheta_0 (R_0/R)^3 \text{ або } \vartheta R^3 = \vartheta_0 R_0^3. \quad (3.13)$$

Співвідношення (3.13) відображає факт збереження повного інтегралу плавучості, тобто $dF/dt = 0$, а $F = F_0$.

Результати та обговорення рішення системи диференціальних рівнянь для висотної і часової залежності швидкості підйому, маси втягнутого холодного повітря, повного інтеграла плавучості нагрітого газоутворення (біогазу).

Припустимо $\vartheta \ll 1$, тобто різниця температур самого газоутворення і атмосферного повітря $\Delta T \approx T - T_0 \leq 30$ К, що описує характерні ситуації на полігоні ТПВ. Температура (щільність) біогазу незначно відрізняється від значень атмосферного повітря (до 10 %). Тоді з (3.7), (3.10) і (3.11) отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\frac{dv}{dt} \approx g - \beta \frac{v^2}{R}, \quad v(0) = 0, \quad (3.14)$$

$$\frac{dR}{dt} \approx \alpha v, \quad v(0) = 0, \quad (3.15)$$

$$\frac{d\mathcal{G}}{dt} \approx -3\alpha \frac{\mathcal{G}}{R}, \quad \mathcal{G}(0) = \mathcal{G}_0. \quad (3.16)$$

Опис висотної залежності основних параметрів нагрітих газотворення (біогазу)

Спочатку отримаємо вираз для $v(z)$, $R(z)$ и $\mathcal{G}(z)$. Врахуємо, що:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dz} \frac{dz}{dt} = v \frac{dv}{dz}, \quad \frac{dR}{dt} = \frac{dR}{dz} \frac{dz}{dt} = v \frac{dR}{dz}, \quad \frac{d\mathcal{G}}{dt} = \frac{d\mathcal{G}}{dz} \frac{dz}{dt} = v \frac{d\mathcal{G}}{dz}.$$

Тоді замість (3.14) – (3.16) маємо систему:

$$v \frac{dv}{dz} = g - \beta \frac{v^2}{R}, \quad v(z=0) = 0, \quad (3.17)$$

$$\frac{dR}{dz} = \alpha, \quad R(z=0) = R_0, \quad (3.18)$$

$$\frac{d\mathcal{G}}{dz} = -3\alpha \frac{\mathcal{G}}{R}, \quad \mathcal{G}(z=0) = \mathcal{G}_0. \quad (3.19)$$

Із (3.18) і (3.13) слідує:

$$R(z) = R_0 \left(1 + \frac{\alpha}{R_0} z \right) = R_0 x, \quad (3.20)$$

$$\mathcal{G}(z) = \frac{\mathcal{G}_0}{(1 + \alpha z / R_0)^3} = \frac{\mathcal{G}_0}{x^3}, \quad (3.21)$$

де $x = 1 + \alpha z / R_0$. Підставляючи (3.20) і (3.21) в рівняння (3.17) та інтегруючи за умови, що при $z = 0$ $x = 1$, отримаємо рішення (3.17) у вигляді:

$$\nu(x) = \nu_{ch} \left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{x^a} \right)^{1/2}, \quad \nu_{ch} = \left(\frac{\mathcal{G}_0 g R_0}{\beta - \alpha} \right)^{1/2}, \quad a = 2 \frac{\beta}{\alpha} \approx 10, \quad (3.22)$$

де ν_{ch} – характерна швидкість підйому біогазу.

Значення $\nu(x)$, яке дає співвідношення (3.22), змінюється немонотонно.

При $\alpha z / R_0 \ll 1$:

$$\nu = \nu_{ch} \sqrt{2(\beta - \alpha)z / R_0} = \sqrt{2\mathcal{G}_0 g z},$$

тобто ν підвищується з ростом висоти z по закону $\nu \sim z^{1/2}$. При

$x_0 = \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{\frac{1}{a-2}} \approx 1,22$ швидкість досягає максимального значення:

$$\nu_{\max} = \nu(x_0) = \nu_{ch} \left[\left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{-2/(a-2)} - \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^{-a/(a-2)} \right]^{1/2} \approx 0,73 \nu_{ch}. \quad (3.23)$$

При $x > 1,33$ маємо $x^{-2} \gg x^{-a}$ та із (3.22) отримаємо:

$$\nu \approx \frac{\nu_{ch}}{x} = \frac{\nu_{ch}}{1 + \alpha z / R_0} = \frac{\nu_{ch} R_0}{R}, \quad (3.24)$$

тобто $\nu(z)$ при збільшенні висоти поступово зменшується від ν_{\max} до нуля.

Швидкість ν зменшується на порядок на висоті $z_1 \approx 9R_0 / \alpha \approx 90R_0$. При цьому $R(z_1) \approx 10R_0$, а $\mathcal{G}(z_1) \approx 10^{-3} \mathcal{G}_0$. Характерний час підйому $t_1 \approx z_1 / \bar{\nu}$, де $\bar{\nu} \approx \nu_{\max} / 2 \approx 0,36 \nu_{ch}$ – середня по висоті швидкість підйому.

Із рівнянь (3.14) – (3.16) слідує такі характерні часи змін ν , R и \mathcal{G} :

$$t_\nu \approx \frac{R_0}{\beta \nu_{\max}}, \quad t_R \approx \frac{R_0}{\alpha \nu_{\max}}, \quad t_g \approx \frac{R_0}{3\alpha \nu_{\max}},$$

де $\nu_{\max} = \nu(t_{\max})$;

$t_{\max} \approx t_v$ – час досягнення максимального значення v .

Важливо, що $t_v \ll t_g < t_R$. Тому при $t < t_v$ можна вважати $R(t) \approx R_0$, $\mathcal{G}(t) \approx \mathcal{G}_0$.

Тоді із (3.14) слідує, що при $t < t_v$ швидкість при збільшенні часу підвищується по лінійному закону:

$$v(t) \approx \mathcal{G}_0 g t \approx v_{\max} \frac{t}{t_v}. \quad (3.25)$$

Із співвідношень (3.14) і (3.15) маємо:

$$\frac{dv}{dR} = \frac{\mathcal{G}g}{\alpha v}.$$

З урахуванням (3.13) отримаємо:

$$\frac{dv}{dR} = \frac{\mathcal{G}_0 g R_0^3}{\alpha v R^3}. \quad (3.26)$$

Рішення (3.26) з урахуванням початкових умов має вигляд:

$$v = \sqrt{\frac{\mathcal{G}_0 g R_0}{\alpha}} \sqrt{1 - \left(\frac{R_0}{R}\right)^2} = v_{ch} b \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R^2}}, \quad b = \left(\frac{\beta}{\alpha} - 1\right)^{1/2} \approx 2. \quad (3.27)$$

Підставляючи (3.27) в (3.15), приходимо до наступного рівняння для R :

$$\frac{dR}{dt} \approx \alpha b v_{ch} \sqrt{1 - \frac{R_0^2}{R^2}}, \quad R(0) = R_0.$$

Його рішення можна представити у вигляді:

$$R(t) = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{b v_{ch} t}{R_0}\right)^2} = R_0 \sqrt{1 + \frac{\alpha \mathcal{G}_0 g t^2}{R_0}}. \quad (3.28)$$

Із (3.12) і (3.28) отримуємо:

$$\mathcal{G}(t) = \frac{\mathcal{G}_0}{\left[1 + \left(\frac{ab v_{ch} t}{R_0}\right)^2\right]^{3/2}} = \frac{\mathcal{G}_0}{\left(1 + \frac{\alpha \mathcal{G}_0 g t^2}{R_0}\right)^{3/2}}. \quad (3.29)$$

Із (3.28) видно, що розмір $R(t)$ збільшується при збільшенні t , а плавучість $\mathcal{G}(t)$ при цьому зменшується.

Для $t \approx t_v = R_0 / \beta v_{\max}$ із (3.28) и (3.29) отримуємо: $R(t_v) \approx 1,14R_0$, $\mathcal{G}(t_v) \approx 0,68\mathcal{G}_0$, тоді:

$$v(t_v) \approx \sqrt{\frac{\mathcal{G}(t_v)gR(t_v)}{\beta}} \approx 0,88 \sqrt{\frac{\mathcal{G}_0gR_0}{\beta}} = 0,80v_{ch}.$$

Значення $v(t_v)$ незначно (на 9%) відрізняється від v_{\max} .

Розглянемо поведінку $v(t)$, $R(t)$ і $\mathcal{G}(t)$ при $t > t_v$. Із (3.14) при $dv/dt \approx 0$ з урахуванням (3.13) слідує:

$$v \approx \sqrt{\frac{gR}{\beta}} \approx \sqrt{\frac{\mathcal{G}_0gR_0^3}{\beta R^2}} = \sqrt{\frac{\mathcal{G}_0gR_0}{\beta}} \frac{R_0}{R}. \quad (3.30)$$

Підставляючи (3.30) в (3.15), виходить:

$$\frac{dR}{dt} \approx \alpha \sqrt{\frac{\mathcal{G}_0gR_0}{\beta}} \frac{R_0}{R} = \alpha c v_{ch} \frac{R_0}{R}, \quad R(0) = R_0, \quad (3.31)$$

де $c = (1 - \alpha/\beta)^{1/2} = 0,9$. Рішення (3.31) має вигляд:

$$R(t) = R_0(1 + \tau)^{1/2}, \quad \tau = \frac{t}{t_0}, \quad t_0 = \frac{R_0}{2\alpha c v_{ch}}, \quad (3.32)$$

де τ – безрозмірна величина.

Із (3.12) і (3.32) слідує:

$$\mathcal{G}(t) = \frac{\mathcal{G}_0}{(1 + \tau)^{3/2}}. \quad (3.33)$$

Підставляючи (3.32) в (3.30), отримаємо:

$$v(t) = \frac{c v_{ch}}{(1 + \tau)^{1/2}}. \quad (3.34)$$

При $t/t_0 \gg 1$ співвідношення (3.32) – (3.34) спрощуються:

$$R(t) \approx R_0 \tau^{1/2}, \quad (3.35)$$

$$\mathcal{G}(t) \approx \mathcal{G}_0 \tau^{-3/2}, \quad (3.36)$$

$$\nu(t) \approx c \nu_{ch} \tau^{-1/2}. \quad (3.37)$$

Швидкість зменшується на порядок за час $t_1 \approx 100t_0$, при цьому R збільшується на порядок, а \mathcal{G} – зменшується на три порядки.

Далі оцінимо максимальну висоту підйому нагрітого утворення:

$$\begin{aligned} z_{\max} &= \int_0^{t_{\max}} \nu(t) dt \approx \int_0^{t_v} \nu(t) dt + \int_{t_v}^{t_{\max}} \nu(t) dt = \int_0^{t_v} \frac{\nu_{\max}}{t_v} t dt + \int_{t_v}^{t_{\max}} \frac{c \nu_{ch}}{(1+t/t_0)^{1/2}} dt = \\ &= \frac{\nu_{\max} t_v}{2} + 2c \nu_{ch} t_0 \left(\sqrt{1+t_{\max}/t_0} - \sqrt{1+t_v/t_0} \right) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Оскільки $t_0 \gg t_v$ та $t_{\max} \gg t_0$,

$$z_{\max} \approx 2c \nu_{ch} t_0 \left(\frac{t_{\max}}{t_0} \right)^{1/2} = \frac{R_0}{\alpha} \left(\frac{t_{\max}}{t_0} \right)^{1/2}. \quad (3.39)$$

При $t_{\max}/t_0 \approx 100$, коли ν зменшується на порядок, маємо $z_{\max} \approx 10R_0/\alpha \approx 100R_0$. При цьому z_{\max} практично не відрізняється від $z_1 \approx 90R_0$.

Наведемо результати розрахунків основних параметрів, що описують конвективний підйом нагрітих утворень в атмосфері (біогазів), для значень \mathcal{G}_0 , рівних 10^{-3} , $3 \cdot 10^{-3}$, 10^{-2} , $3 \cdot 10^{-2}$, 10^{-1} , а також для R_0 , рівних 10, 100 і 1000 м (табл. 3.1, 3.2 і 3.3). Максимальне значення R_0 визначається не розміром джерела надзвичайної ситуації, який може становити $\approx 1-10$ км, а значенням зовнішнього масштабу турбулентності L_t в атмосфері.

Таблиця 3.1 – Залежність основних параметрів нагрітого газотворення($R_0 = 10$ м)

Параметр	ϑ_0				
	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
z_1 , м	900	900	900	900	900
z_{\max} , м	1000	1000	1000	1000	1000
v_{ch} , м/с	0,50	0,86	1,57	2,71	5,00
v_{\max} , м/с	0,36	0,63	1,14	1,98	3,61
t_0 , с	111	64,6	35,4	20,5	11,1
t_v , с	55,6	31,75	17,54	10,10	5,54
t_g , с	94,3	52,9	29,2	16,8	9,2
t_R , с	383	158,75	87,7	50,50	27,7
t_{\max} , с	$1,1 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$

Таблиця 3.2 – Залежність основних параметрів нагрітого газотворення($R_0 = 100$ м)

Параметр	ϑ_0				
	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
z_1 , км	9	9	9	9	9
z_{\max} , км	10	10	10	10	10
v_{ch} , м/с	1,50	2,71	5,00	8,57	15,00
v_{\max} , м/с	1,10	1,98	3,61	6,26	11,00
t_0 , с	370,3	205	111,1	64,8	37,0
t_v , с	181,8	101,0	55,4	31,9	18,2
t_g , с	302,2	168,3	92	53,2	30,2
t_R , с	906,5	505	277	159,5	90,7
t_{\max} , с	$3,7 \cdot 10^4$	$2,05 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	$6,5 \cdot 10^3$	$3,7 \cdot 10^3$

Таблиця 3.3 – Залежність основних параметрів нагрітого газотворення($R_0 = 1000$ м)

Параметр	ϑ_0				
	10^{-3}	$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$3 \cdot 10^{-2}$	10^{-1}
z_1 , км	90	90	90	90	90
z_{\max} , км	100	100	100	100	100
v_{ch} , м/с	5,00	8,57	15,00	27,11	50,00
v_{\max} , м/с	3,61	6,26	11,00	19,80	36,1
t_0 , с	1111	648,2	370,3	204,9	111,1
t_v , с	554	319,5	181,8	101	55,4
t_g , с	923	532,5	303	168,3	92,3
t_R , с	2770	1597,5	909	505	277
t_{\max} , с	$1,1 \cdot 10^5$	$6,5 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$

З таблиць 3.1, 3.2 і 3.3 видно, що при збільшенні ϑ_0 просторові і тимчасові масштаби зміни швидкості, радіуса та відносного нагріву утворення (плавучість) зменшуються. Значення швидкостей v_{\max} і $\nu(L_0)$, а також висоти і часу підйому нагрітих утворень, навпаки, збільшуються при збільшенні ϑ_0 .

Значення всіх перерахованих вище параметрів зростають при збільшенні радіуса R_0 .

4 РЕЗУЛЬТАТИ НАТУРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЕНЕРАЦІЇ ЗВАЛИЩНОГО ГАЗУ НА РОГАНСЬКОМУ ПОЛІГОНІ ТПВ (М. ХАРКІВ)

Для обліку та розрахунку обсягів викидів парникових газів та забруднюючих речовин в атмосферне повітря підвищується необхідність здійснення натурних досліджень (вимірів) емісії та складу звалищного газу на полігонах ТПВ. Ці дослідження проводяться з метою уточнення результатів теоретичних досліджень (математичного моделювання).

Закордонні математичні розрахунки не враховують реальний стан захоронення ТПВ на полігонах України. Тому їх практичне застосування викликає великі труднощі та потребує уточнення з урахуванням конкретних умов та результатів досліджень емісії парникового газу на полігонах.

Для оцінки обсягів викидів звалищного газу співробітники УКРНДІЕП провели натурні (польові) дослідження для отримання практичних даних про просторове розподілення звалищного газу на різних ділянках захоронення відходів для районування території полігону по насиченості його звалищним газом на Роганському полігоні ТПВ (м.Харків).

4.1 Апаратура та обладнання для відбору та аналізу проб біогазу на полігоні ТПВ

У тілі полігону і в його поверхневому шарі склад газу може істотно відрізнитися залежно від строків захоронення відходів та глибини їхнього залягання. На концентрацію компонентів звалищного газу також впливає ряд інших факторів (вологість, кліматичні умови, наявність органічної фази та ін.). Як показали результати досліджень, у верхньому шарі відходів концентрація метану підвищується та досягає 40-60 %, що представляє практичний інтерес для його збору, спалювання та вироблення електроенергії.

При визначенні фізичних параметрів відходів у тілі полігону та якісного і кількісного складу звалищного газу використовували наступні вимірювальні

прилади:

- газоаналізатор «КОЛИОН-1В-03» (параметри вимірів сірководню 1,0-30,0 мг/м³);
- інтерферометр шахтний ШИ-12 (параметри вимірів від 1,0 до 100,0 %);
- газоаналізатор «TESTO-350». Прилад дозволяє проводити виміри у великих діапазонах значень концентрацій димових газів для контролю промислових процесів, а також забезпечує високу точність вимірів граничних значень газових викидів;
- рН-метр;
- термометри ТЛ-3, ГОСТ 915-73 (діапазон вимірювання 0-350 °С, похибка ±1%);
- секундомір (діапазон вимірювання 0-60 хв, похибка ±1%).

Діапазон і похибка вимірів основних характеристик газових викидів газоаналізатором «TESTO-350», інтерферометром шахтним ШИ-12, а також газоаналізатором «КОЛИОН 1В-03» приведені в таблицях 4.1, 4.2 та 4.3.

Таблиця 4.1 – Похибка та діапазон вимірів газоаналізатора «TESTO-350»

№	Показник	Діапазон вимірів	Границі допустимої похибки вимірювань
1	Температура	-40...+1000 °С (до +1200 °С)	±0,5 °С (0...+100 °С) ±0,5 % (більше +100 °С)
2	O ₂	0...21 %	±0,2 %
3	CO	0...10000 млн ⁻¹	±20 ppm (до 400 млн ⁻¹) ±5% (до 2000 млн ⁻¹) ±10% (до 10000 млн ⁻¹)
4	NO	0...30000 ppm	±5 ppm (до 100 ppm) ±5% (до 2000 ppm) ±10% (до 30000 ppm)
5	NO ₂	0...500 млн ⁻¹	±10 ppm (до 100 млн ⁻¹) ±5% (більше 100 млн ⁻¹)

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4
6	SO ₂	0...5000 млн ⁻¹	±20 ppm (до 400 млн ⁻¹) ±5% (до 3000 млн ⁻¹) ±10% (до 30000 млн ⁻¹)
7	Різниця тиску	0...100 гПа	±0,1 гПа (0...20 гПа) ±0,5% (20...100 гПа)

Таблиця 4.2 – Похибка та діапазон вимірів інтерферометра шахтного ШИ-12

№	Показник	Діапазон вимірів	Границі допустимої похибки вимірювань
1	2	3	4
1	Вимірювання об'ємної долі метану	Від 0 до 100%	±4% при t – (20±5) ⁰ С; атмосферному тиску (101,3±1,07) кПа
2	Вимірювання об'ємної долі CO ₂	Від 0 до 100%	±4% при t – (20±5) ⁰ С; атмосферному тиску (101,3±1,07) кПа

Таблиця 4.3 – Похибка та діапазон вимірів газоаналізатору «КОЛІОН 1В-03»

№	Показник	Діапазон вимірів	Границі допустимої похибки вимірювань
1	2	3	4
1	Сірководень	0 - 30 мг/м ³	±15% при t від – 30 до + 45 ⁰ С; атмосферному тиску (84 - 106,7) кПа
2	Відносна вологість	30 – 95 %	на кожні 10% ±0,2 долі основної похибки

Основне обладнання, що використовувалося для відбору проб відходів, приведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Обладнання для відбору проб відходів

Обладнання/ матеріал	Місце знаходження/ агрегатний стан відходів	Обмеження використання
Лопата/ нержавіюча сталь (далі - н/с)	Відстійники, звалища (полігони), контейнери / осади, тверді речовини	Вимоги техніки безпеки. Можуть виникнути труднощі через відсутність доступу к місцю (точці) відбору.
Бур / н/с	Відстійники, звалища (полігони), контейнери / тверді речовини, осади	Можуть виникнути труднощі при відборі в'язких твердих та затверділих відходів

Найбільш розповсюджені методи для оцінки кількості і швидкості утворення біогазу із твердих побутових відходів включають оцінку за допомогою математичного моделювання процесів у тілі полігона різного рівня складності; польові дослідження газоутворення на полігонах ТПВ та дослідження зразків ТПВ в лабораторних умовах [40].

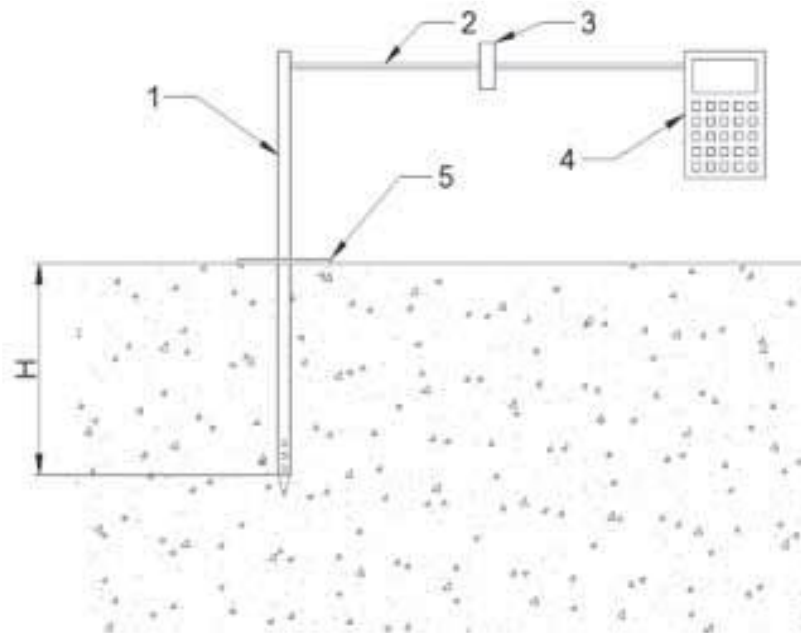
4.2 Результати польових досліджень газоутворення на Роганському полігоні ТПВ

Одним із способів оцінки потенціалу збору біогазу, калібровки моделей газоутворення для умов конкретного полігону і отримання додаткової інформації для проектування системи збору БГ є проведення польових досліджень на полігоні ТПВ.

Методи польових досліджень газоутворення поділяються на пасивні, коли вимірюється самовільний вихід БГ із тіла полігона, та активні, так звані насосні тести або пробні відкачування БГ за допомогою експериментальної системи відбору на декількох репрезентативних ділянках полігону.

У даній роботі використовували активний та пасивний методи відбору проб БГ.

Активний метод включає оцінку потоку БГ із колодязя або свердловини із одночасним аналізом складу БГ (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S , N_2). Для відбору проб звалищного газу за допомогою пробовідбірної трубки і газоаналізатора відбирали і аналізували склад звалищного газу (схема відбору проб біогазу приведена на рисунку 4.1).



1 - пробовідбірник (зонд); 2 - газова лінія; 3 - фільтри для захисту газоаналізатора від пилу і вологи; 4 - газоаналізатор з вбудованим збудником витрати; 5 - обмежувальне кільце;

Н - глибина відбору проби біогазу

Рисунок 4.1 – Схема відбору проб біогазу з колодязя або свердловини

Для оцінки концентрації БГ над поверхнею полігона при його самовільному виході із тіла полігону над його поверхнею застосовували пасивний метод відбору БГ. Ділянку полігону ТПВ розміром 1,5*2,0 м накривали поліетиленовою плівкою (рис.4.2). За визначений проміжок часу (60 хв) простір під плівкою заповнювався звалищним газом, після чого проводили визначення концентрацій компонентів звалищного газу (CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S , N_2).



Рисунок 4.2 – Відбір проб біогазу з поверхні полігону ТПВ

Натурні (польові) дослідження емісії та складу звалищного газу були проведені на Роганському полігоні ТПВ (м. Харків). Основні характеристики полігону представлені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Характеристика дослідженого полігону ТПВ

Полігон	Площа, га	Глибина, м	Наповнення ТПВ, млн.т	Рік відкриття/закриття	Кількість секцій, шт
Роганський полігон ТПВ	21,0	I секція – 27-30; II секція – 5-7; III секція – 15-17	3,0-3,5	1975	3

Полігон складається із трьох секцій: I секція – глибина 27-30 м (закрита для захоронення ТПВ); II секція – глибина 5-7 м – знову відкрита для складування ТПВ; III секція – глибина 15-17 м (практично закрита для складування ТПВ).

На Роганському полігоні ТПВ протягом 2019 року – навесні (квітень), влітку (липень-серпень) та восени (жовтень) – з метою оцінки газоутворення були проведені польові дослідження.

У квітні 2019 року проводилися вимірювання газоутворення на Роганському полігоні ТПВ (секція I) активним методом. Проби БГ відбирали із колодязя глибиною 6 м, діаметром 0,8 м за допомогою відкачування газу. Одночасно визначали вміст метану та CO_2 за допомогою газоаналізатора ШИ-12, вміст O_2 – газоаналізатором TESTO-350, вміст H_2S – газоаналізатором «КОЛИОН 1В-03».

Результати вимірювання складу звалищного газу: метан – 33,7-38,2 %, діоксид вуглецю – 18,2-19,3 %, азот – 0,0008 %, сірководень - 0,0024 %, кисень – 0,8-1,7 %.

Низький рівень метану (менше 39 %) у звалищному газі, можливо, свідчить про затухання процесу метаноутворення в товщі полігону, а підвищений рівень азоту і наявність кисню – про потрапляння повітря в тіло полігону при відборі проб.

У липні 2019 року на полігоні (секція II) проведені польові дослідження активним і пасивним методами. У процесі досліджень були відібрані відходи з тіла полігону і визначена їх вологість, яка склала 51-56 % (при температурі повітря 28-35 °C).

За допомогою портативного газоаналізатора ШИ-12 та TESTO-350 визначили склад БГ (CH_4 , CO_2 , O_2). Результати вимірювання складу звалищного газу: метан – 48,3 % -59,2 %; вуглекислий газ – 23,7- 30,7 %; сірководень - 0,0024 %; азот - 0,0008 %, кисень – 0,4-0,8 %.

Додатково на Роганському полігоні ТПВ (II секція) у серпні 2019 року були пробурені свердловини глибиною 1,4 м та 3 м. Було відібрано 5 проб зразків відходів та визначено їх вологість, % ППП, % золи. Результати дослідження фізичних параметрів твердих побутових відходів наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Результати дослідження фізичних параметрів (вологості, % ППП, % золи) твердих побутових відходів на Роганському полігоні ТПВ

Дата відбору проби	Свердловина № 1, глибина 1,4 м	Свердловина № 2, глибина 3,0 м	Температура газу, °С
1	2	3	4
Вологість твердих побутових відходів, % об.			
19.04. 2019 р.	48,1	20,3	19
30.05. 2019 р.	52,2	24,5	22
03.07. 2019 р.	57,4	35,2	27
26.09. 2019 р.	60,7	41,8	24
ППП (пил після прокалювання) твердих побутових відходів, %			
19.04. 2019 р.	8,33	4,38	-
30.05. 2019 р.	7,64	6,40	-
03.07. 2019 р.	7,62	5,32	-
26.09. 2019 р.	7,65	6,25	-
Зола, %			
19.04. 2019 р.	7,1	-	-
30.05. 2019 р.	8,3	-	-
03.07. 2019 р.	12,2	-	-
26.09. 2019 р.	15,6	-	-

Як видно із даних, наведених у таблиці 4.6, вологість твердих побутових відходів залежить від глибини захоронення відходів (на більшій глибині вологість є вищою).

У квітні-вересні 2019 року на 3 секції Роганського полігону ТПВ, де відбувається активна фаза (4 фаза) розщеплення органіки на окремі складові і

перетворення в метан, було відібрано приблизно 20 проб звалищного газу. Дослідження проводили аналогічно дослідженням в секції №1 полігона. Склад компонентів звалищного газу приведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Характеристика складу звалищного газу (секція №3)

Пора року відбору проб газу	Склад газу, % мас.				
	CH ₄	CO ₂	NO _x	O ₂	H ₂ S
Квітень 2019 р.	41,2	22,4	0,0007	1,4	0,0024
	42,8	23,6	0,0008	1,7	0,0025
	43,2	22,3	0,0009	1,6	0,0026
Липень 2019 р.	48,3	23,2	0,0008	0,8	0,0019
	53,4	24,1	0,0009	0,75	0,0020
	56,7	24,6	0,0007	0,9	0,0022
Жовтень 2019 р.	43,5	22,7	0,0009	1,25	0,002
	46,4	22,9	0,0006	1,2	0,0022
	48,3	23,2	0,0008	1,3	0,0021

Як видно із даних таблиці 4.7, концентрація метану досягає максимальних значень влітку (липень). Це обумовлено підвищеною температурою повітря 28-34 °С, яка створює оптимальні умови (вологість, рН, температура в тілі полігону) для утворення метану.

Концентрація метану залежно від пори року представлена на рисунку 4.3.

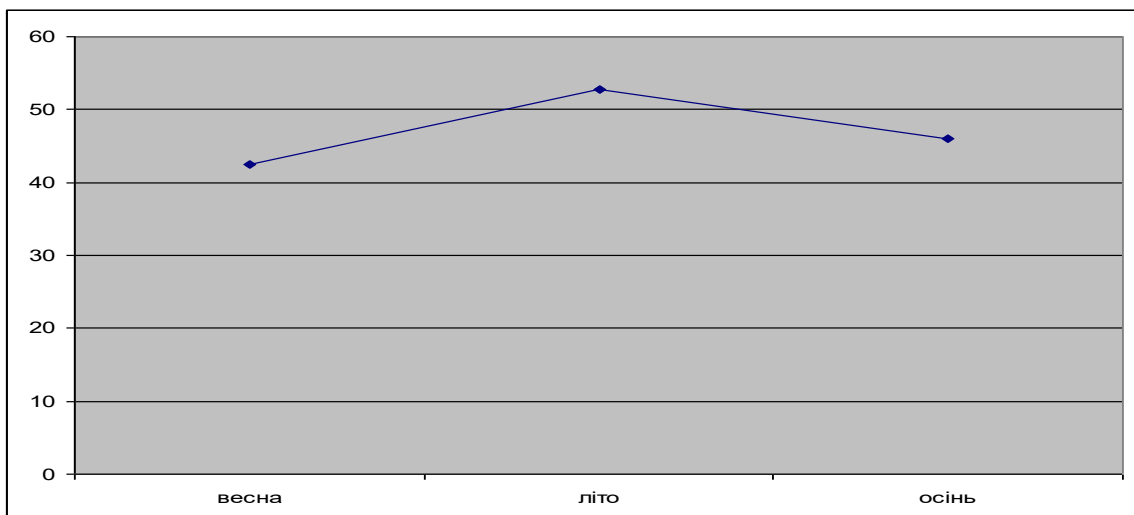


Рисунок 4.3 – Концентрація метану залежно від пори року

Як видно із графіку на рисунку 4.3, максимальна концентрація метану спостерігається влітку, коли температура повітря є найвищою, вологість відходів у тілі полігону – 55–59 %; рН – 6,8–7,8; температура в тілі полігону 55–60 °С. Таким чином було експериментально підтверджено залежність концентрації метану від температури в тілі полігона, рН, вологості та температури повітря (пори року).

Результати досліджень, проведені у квітні – вересні 2019 року на Роганському полігоні ТПВ, представлені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Результати дослідження по виділенню метану з поверхні Роганського полігону ТПВ пасивним методом

Дата відбору проби	Колодязь № 1, глибина 6,0 м	Колодязь № 2, глибина 2,0 м	Свердловина № 1, глибина 1,4 м	Свердловина № 2, глибина 3,0 м	Закритий простір під плівкою	Температура газу, °С
1	2	3	4	5	6	7
Сірководень, % об.						
19.04. 2019 р.	0,0011	-	0,0012	0,0016	0,0005	19
30.05. 2019 р.	-	0,0013	0,0014	0,0021	0,0008	22
03.07. 2019 р.	0,0014	-	0,0018	0,0020	0,0006	27
26.09. 2019 р.	0,0022	0,0015	0,0017	0,0021	0,0009	21
Метан, % об.						
19.04. 2019 р.	41,4	40,9	37,1	39,1	12,0	19
19.04. 2019 р.	33,7	34,1	38,5	40,3	13,1	19
19.04. 2019 р.	40,8	42,3	43,2	40,5	15,2	20
19.04. 2019 р.	40,3	41,2	42,5	42,6	11,0	20
19.04. 2019 р.	41,3	41,9	42,9	43,0	12,1	21
30.05. 2019 р.	41,5	40,6	38,0	39,4	11,4	24

Продовження таблиці 4.8

1	2	3	4	5	6	7
30.05. 2019 р	42,9	41,9	43,0	40,1	11,2	25
30.05. 2019 р	43,1	41,8	42,1	41,9	12,0	24
30.05. 2019 р	40,9	41,1	40,8	42,1	14,1	24
30.05. 2019 р	41,2	40,8	41,5	43,0	13,0	25
03.07. 2019 р.	48,3	-	38,2	40,0	15,1	27
03.07. 2019 р.	-	50,2	-	49,5	15,9	28
03.07. 2019 р.	48,8	49,8	56,7	55,4	15,5	27
03.07. 2019 р.	-	49,6	53,2	54,2	15,0	27,5
03.07. 2019 р.	51,3	52,6	55,3	50,6	14,5	27
26.09. 2019	43,5	46,2	44,5	44,8	12,0	22
26.09. 2019	43,9	44,4	44,1	43,7	13,1	23
26.09. 2019	45,6	47,4	48,3	44,9	11,1	22
26.09. 2019	45,2	47,1	46,2	45,0	12,0	22
26.09. 2019	44,0	43,8	47,9	48,2	11,2	23
Діоксид вуглецю, % об.						
19.04. 2019 р.	22,8	22,9	23,1	23,4	21,7	19
30.05. 2019 р	22,4	22,5	22,6	23,6	21,3	22
03.07. 2019 р.	23,6	23,2	24,6	24,3	22,5	27

Як видно із таблиці 4.8, у закритому просторі під плівкою концентрації метану у 2,5 – 3,5 раза менше, ніж концентрації метану в тілі полігону. Зниження концентрації метану над поверхнею полігону зумовлене можливим

розбавленням повітрям, що відбувається над тілом полігону при доступі кисню. Можливо це обумовлено іншими факторами, що мали місце на момент проведення досліджень.

За даними таблиці 4.8 було побудовано діаграму, на якій простежується залежність концентрації метану від глибини проведення досліджень (рис. 4.4).

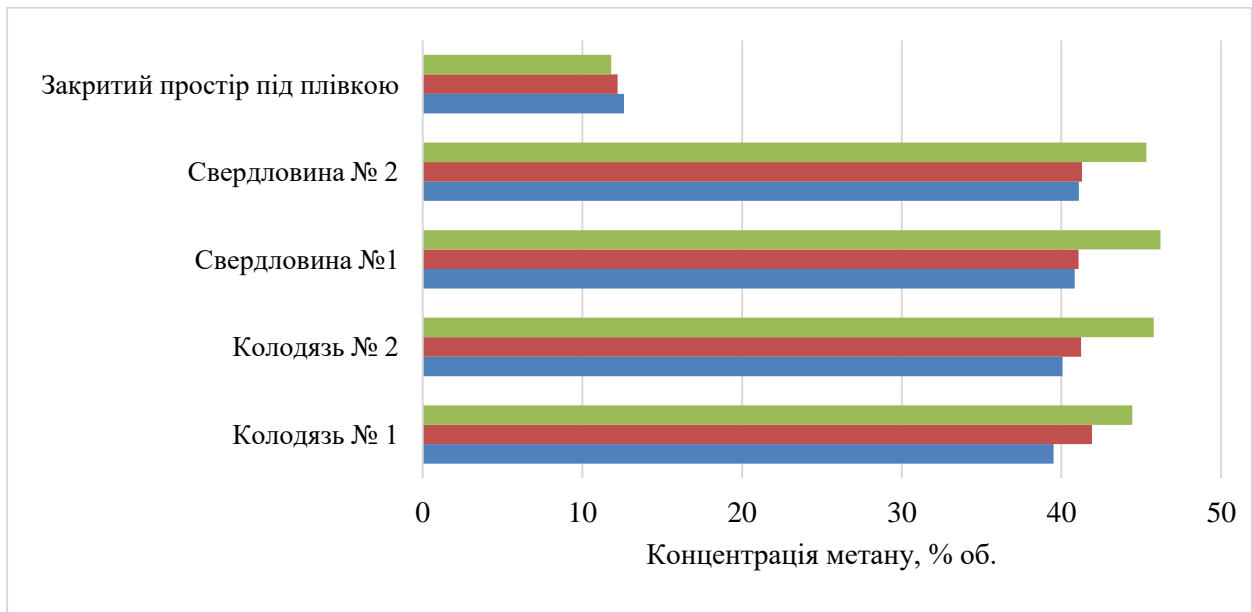


Рисунок 4.4 – Концентрація метану залежно від глибини проведення досліджень

Як видно із рисунку 4.4, концентрації метану, заміряні в тілі полігону (зі свердловин, а також колодязів), більше ніж у три рази перевищують концентрації метану, отримані над поверхнею полігону (закритий простір під плівкою). Концентрації метану, заміряні на глибині у тілі полігону, є високими (40 – 51 % об.) у зв'язку з тим, що анаеробні процеси метанового бродіння здійснюються без доступу кисню.

На основі проведених досліджень складено графік концентрації метану у ЗГ залежно від секції складування відходів (рис. 4.5).

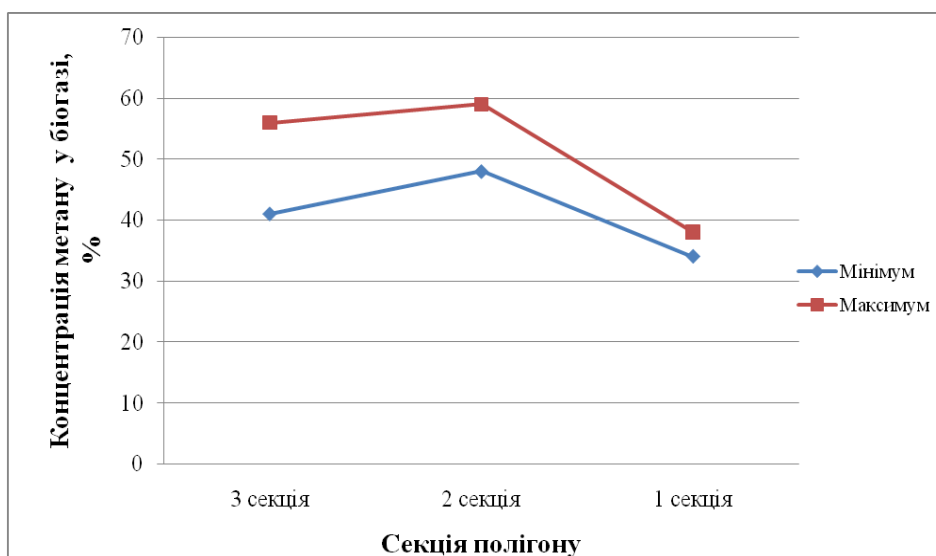


Рисунок 4.5 – Концентрація метану залежно від секції складування відходів

Як видно із рисунку 4.5, концентрація метану у біогазі залежить від секції, на якій проводився відбір проб. Ця залежність підтверджує дані про коливання концентрації метану залежно від часу складування.

Так, у 3 секції Роганського полігону ТПВ відбувається активна фаза розщеплення органіки на окремі складові і перетворення в метан, 2 секція характеризується бурхливим утворенням метану, у 1 секції концентрація метану суттєво знижується, що свідчить про затухання процесів розщеплення органіки.

5 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З РОЗРАХУНКУ ОБСЯГІВ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН У АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Враховуючи зобов'язання України (згідно вимог РКІК ООН) покращувати якість розрахунків шляхом удосконалення існуючих та розробленням національних методичних вказівок обліку викидів парникових газів із різних джерел було розроблено методичні вказівки з розрахунку обсягів викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря для полігонів твердих побутових відходів.

5.1 Терміни та визначення

Для цілей цих методичних вказівок нижче наведені основні терміни, які вживаються в такому значенні:

- анаеробне розкладання або анаеробне зброджування органічних речовин побутових відходів – це багатоступінчастий процес перетворення органічних сполук відходів в стабільний продукт, який здійснюється анаеробними мікроорганізмами за умов відсутності доступу кисню;

- атмосферне повітря - життєво важливий компонент навколишнього природного середовища, який являє собою природну суміш газів, що знаходиться за межами жилих, виробничих та інших приміщень;

- біодоступний вуглець у складі побутових відходів – джерело вуглецю для утворення метану на звалищах і полігонах, який міститься у компонентах ТПВ, а саме: папір, картон, харчові відходи, деревина, садово-паркові відходи, текстиль, шкіра, гума, а також засоби особистої гігієни;

- джерело викиду - об'єкт (полігон ТПВ, звалище ТПВ), з якого надходить в атмосферне повітря забруднююча речовина;

- емісія (викид) – надходження в атмосферне повітря парникових газів та забруднюючих речовин або їх суміші;

- забруднююча речовина - речовина хімічного або біологічного походження, що присутня або надходить в атмосферне повітря і може прямо або опосередковано справляти негативний вплив на здоров'я людини та стан навколишнього природного середовища;

- захоронення відходів - остаточне розміщення відходів при їх видаленні у спеціально відведених місцях чи на об'єктах таким чином, щоб довгостроковий шкідливий вплив відходів на навколишнє природне середовище та здоров'я людини не перевищував установлених нормативів;

- звалище побутових відходів – спеціально відведене місце для захоронення побутових відходів. Звалища поділяються на неконтрольовані глибокі та неконтрольовані неглибокі. Неконтрольовані глибокі звалища - глибина відходів перевищує або дорівнює 5 метрам і / або є високий рівень ґрунтових вод в верхньому рівні землі. Неконтрольовані неглибокі звалища - глибина відходів не перевищує 5 метрів;

- звалищний газ (ЗГ) – суміш газів, що утворюється в процесі природного анаеробного розкладання органічної складової побутових відходів, які розміщуються на полігонах та звалищах. Основну об'ємну масу звалищного газу складають метан (40-70 %) і діоксид вуглецю (30-60 %), у якості супутніх компонентів присутні азот (N_2), кисень (O_2), водень (H_2), а також різні органічні сполуки (4,34 %);

- інвентаризація викидів - систематизація інформації про розміщення джерел забруднення атмосферного повітря на території, види і кількісний склад забруднювальних речовин, що викидаються в атмосферне повітря;

- парникові гази – гази в атмосфері планети, що здатні поглинати теплове випромінювання поверхні планети і хмар (інфрачервона радіація) і відбивати його назад додатково розігріваючи планетарну атмосферу. До основних парникових газів в атмосфері Землі відносяться пари води (H_2O), вуглекислий газ (CO_2), закис азоту (N_2O), метан (CH_4), озон (O_3), гексафторид сірки (SF_6), гідрофторвуглецеві сполуки (ГФВ) і перфторвуглецеві сполуки (ПФВ). Найбільший внесок у зміну клімату вносять вуглекислий газ та метан;

- питомі викиди забруднюючих речовин - середні показники викидів для окремих технологічних процесів у галузях промисловості і використовуються для визначення валових викидів забруднювальних речовин у атмосферне повітря. питомий викид /фактор емісії/ - величина, яка встановлює залежність між кількістю забруднювальної речовини (або їх суміші), що викидається в атмосферне повітря та діяльністю, пов'язаною з цим викидом;

- побутові відходи - відходи, що утворюються в процесі життя і діяльності людини в житлових та нежитлових будинках (тверді, великогабаритні, ремонтні, рідкі, крім відходів, пов'язаних з виробничою діяльністю підприємств) і не використовуються за місцем їх накопичення;

- полігон побутових відходів - інженерна спеціалізована споруда, яка призначена для захоронення побутових відходів і повинна запобігати негативному впливу на навколишнє природне середовище і відповідати санітарно-епідеміологічним і екологічним нормам;

- потужність викиду - кількість речовини (суміш речовин), що викидається в атмосферне повітря за одиницю часу;

- анаеробні контрольовані (керовані) звалища побутових відходів – це спеціально підготовлені майданчики, на яких здійснюється продувка відходів і контролюється можливість загоряння; а також виконується хоча б одна з наступних умов:

а) проводиться пошарове укриття заборонених відходів;

б) здійснюється їх механічне пресування;

в) відходи укриваються будь-яким матеріалом;

- напіванаеробні контрольовані (керовані) звалища твердих відходів - місця для видалення відходів, які знаходяться під контролем та на яких виконується хоча б одна з перерахованих умов:

а) відходи укриваються негерметичних матеріалом;

б) є стічні дренажні системи;

в) є вентиляційні системи;

- неконтрольовані (некеровані) звалища твердих відходів - глибокі і / або з високим рівнем ґрунтових вод: звалища не відповідають критеріям контрольованих звалищ, і на них глибина відходів перевищує або дорівнює 5 метрам і / або є високий рівень ґрунтових вод в верхньому рівні землі;

- неконтрольовані (некеровані) неглибокі звалища твердих відходів: звалища, які не відповідають критеріям контрольованих звалищ та глибина яких не перевищує 5 метрів;

- звалища твердих відходів поза категорії – у разі, коли це звалища не можуть бути класифіковані за вище наведеними категоріями контрольованих, вони набувають статусу «поза категорії».

5.2 Загальні положення

Відповідно до частини другої статті 16 Закону України «Про охорону атмосферного повітря» [42] підприємства, установи, організації та громадяни - суб'єкти підприємницької діяльності зобов'язані відповідно до міжнародних договорів, згода на обов'язковість яких надана Верховною Радою України, проводити роботу щодо зменшення викидів речовин, накопичення яких в атмосферному повітрі може призвести до негативних змін клімату.

У липні 2016 року Україна ратифікувала Паризьку угоду щодо боротьби з глобальним змінням клімату [43]. Ця угода посилює реалізацію відповідної Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй, прийняту у Нью-Йорку 9 травня 1992 року. Угода передбачає застосування механізму, який буде сприяти скороченню викидів парникових газів. Україна, як держава-учасниця Паризької угоди, взяла на себе зобов'язання вже у 2030 році не перевищувати 60 % викидів парникових газів від рівня таких викидів у 1990 році.

У цьому аспекті набуває актуальності питання регулювання викидів парникових газів від таких великих за площею об'єктів, як полігони та звалища твердих побутових відходів, територія яких в країні, за даними Міністерства розвитку громад та територій України, на теперішній час охоплює більш ніж 9 тис. га. В Україні нараховується більше 6 тис. легальних полігонів та звалищ.

Усі ці полігони та звалища ТПВ є джерелами емісії парникових газів таких, як метан та діоксид вуглецю.

Методичні вказівки з розрахунку обсягів викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря для полігонів твердих побутових відходів призначені для використання при проведенні інвентаризації викидів парникових газів та забруднюючих речовин, які генеруються полігонами та звалищами побутових відходів, при оцінці викидів від полігонів при розробці проектної документації на будівництво нових та розширення діючих об'єктів, при підготовці матеріалів для проходження процедури з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності, проведенні державного екологічного контролю полігонів ТПВ, організації природоохоронної діяльності суб'єктів господарювання, які є власниками полігонів ТПВ, при розрахунку екологічного податку за викиди у атмосферне повітря.

Ці методичні вказівки розповсюджуються на основні види парникових газів та забруднюючих речовин, які утворюються в результаті біотермічного анаеробного процесу розкладання органічних складових твердих побутових відходів на полігонах і звалищах України та надходять у атмосферне повітря.

До компонентів побутових відходів, що піддаються біологічній деградації, відносяться: папір, картон, харчові відходи, деревина, садово-паркові відходи, текстиль, шкіра, гума, а також засоби особистої гігієни. Згідно досліджень Інституту технічної теплофізики НАН України вміст біорозкладаючих компонентів побутових відходів в Україні становить:

папір та картон	-	4,6 % по масі;
текстиль	-	3,6 % по масі;
харчові відходи	-	30,6 % по масі;
деревина	-	1,4 % по масі;
садово-паркові відходи	-	15,9 % по масі.

Таким чином загальна кількість біорозкладаючих компонентів у складі ТПВ досягає 56,1% по масі.

У результаті складного біотермічного анаеробного процесу, який протікає у товщі відходів, захоронених на звалищах та полігонах, здійснюється перетворення органічних сполук з виділенням звалищного газу.

Процес анаеробного розкладу органічних речовин здійснюється трьома основними групами мікроорганізмів:

- на першому етапі анаеробного бродіння органічних речовин шляхом біохімічного розщеплення (гідролізу) спочатку відбувається розкладання високомолекулярних сполук (вуглеводів, жирів, білкових речовин) на низькомолекулярні органічні сполуки;

- на другому етапі кислото утворення (кислотогенез) за участю бактерій відбувається подальше розкладання з утворенням жирних кислот та їх солей, а також спиртів, CO_2 і H_2 , а потім H_2S і NH_3 ;

- на третьому етапі – стадії ацетогенезу – жирні кислоти перетворюються в оцтову кислоту, дисоціюють на аніони ацетату та катіони водню;

- остаточне бактеріальне перетворення органічних речовин у CO_2 і CH_4 здійснюється на четвертому етапі процесу (метанове бродіння або метаногенез), коли метан (CH_4) утворюється з оцтової кислоти та ацетату, а також при відновленні вуглекислого газу воднем.

Ці реакції протікають одночасно. Перший та другий етапи анаеробного перетворення органічної складової відходів тривають від 40 днів до шести місяців після їх захоронення. Тривалість третього етапу становить до 700 днів. Найбільша тривалість припадає на четвертий етап – від 10 до 30 або 40 років. На цьому етапі спостерігається максимальне виділення звалищного газу з постійною генерацією метану. Потім активність процесів поступово зменшується, тобто проходить затухання анаеробного бродіння, поступово зменшується утворення звалищного газу та метану.

До складу звалищного газу входять: метан (CH_4), діоксид вуглецю (CO_2), а також забруднюючі речовини у незначній кількості: водень (H_2) і сірководень (H_2S), азот, ароматичні вуглеводні, галогено-ароматичні вуглеводні.

Усереднений кількісний склад звалищного газу, що утворюється на українських полігонах ТПВ наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Усереднені показники вмісту газів у звалищному газі полігонів України

Метан (CH ₄), % об'ємні	Діоксид вуглецю (CO ₂), % об'ємні	Кисень (O ₂), % об'ємні	Азот, % об'ємні	Сірководень (H ₂ S),ppmv
37-60	25-50	0,5 – 3,5	1,6 - 6,2	0 - 15

Надходження звалищного газу з поверхні звалища або полігону у атмосферне повітря здійснюється рівномірно, без помітних коливань його кількісних та якісних характеристик.

Методичні вказівки містять варіанти визначення обсягів викидів парникових газів та забруднюючих речовин двома шляхами:

- при проведенні інструментальних вимірів метану та діоксиду вуглецю на полігонах і звалищах ТПВ;
- розрахунковим шляхом.

Ці методичні вказівки не включають визначення викидів забруднюючих речовин, які викидаються у атмосферне повітря при роботі автотранспортної та дорожньої техніки, при складуванні, пересуванні та інших операцій з відходами при їх захороненні. Обсяги викидів від цих процесів розраховуються за відповідними чинними методиками.

Ці методичні вказівки призначені для розрахунку викидів парникових газів і забруднюючих речовин, які здійснюються при нормальному режимі експлуатації звалищ та полігонів.

5.3 Програма обстеження полігонів

На кількісну характеристику викидів забруднюючих речовин та парникових газів, які виділяються з полігону захоронення відходів, впливає ціла низка факторів, серед яких можна виділити наступні:

- кліматичні характеристики;
- робоча площа полігону;
- строки експлуатації полігону;
- кількість захоронених відходів;
- потужність шару відходів;
- морфологічний склад відходів;
- вологість відходів;
- вміст органічної складової у відходах;
- технологія захоронення відходів.

Згідно Державних будівельних норм України ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів» при розрахунках кількості звалищного газу (біогазу), що буде виділятися при експлуатації полігону, необхідно враховувати:

- морфологічний та хімічний склад, у т.ч. вміст органічної складової відходів;
- властивості ТПВ, у т.ч. їх вологість, щільність;
- місткість і термін експлуатації полігона;
- схему і максимальну висоту (глибина захоронення) складування ТПВ;
- площу полігону;
- обсяги захоронених відходів;
- гідрогеологічні умови ділянки складування;
- рН водної витяжки з ТПВ.

На склад ТПВ впливають: кліматична зона, тип забудови селітебних територій, рівень доходів населення, національні традиції тощо. Морфологічний склад ТПВ для різних регіонів України приблизно однаковий і мало відрізняється. Але мають місце його сезонні коливання. Щільність (насипна маса) відходів становить 0,2-0,3 т/куб.м, вологість коливається від 40 % до 55 %, вміст органічної речовини (у відсотках на суху масу) може досягати 70%.

На утворення біогазу на полігоні також впливає доступ кисню і води до відходів, температури повітря та температура всередині тіла полігону.

5.3.1 Фактори, які впливають на генерацію звалищного газу

Кількісний та якісний склад звалищного газу і швидкість його генерації залежить від багатьох факторів, у тому числі, від вологості, температури, наявності кисню, рівня рН в тілі полігону, біорозкладання відходів, кліматичних та геологічних умов місця розташування полігону, їх морфологічного та хімічного складу, умов захоронення ТПВ (параметри експлуатації полігону: майданчик для складування відходів, продувка та захист від загоряння, покриття, пресування, пошарове розміщення відходів; наявність стічних, дренажних та вентиляційних систем), щільності відходів, умов складування (площа, об'єм, глибина захоронення), та підлягає уточненню у кожному конкретному випадку.

Вплив основних факторів можна описати наступним чином:

- вологість є одним із найбільш важливих факторів, які впливають на формування біогазу. Розщеплення органіки відходів на окремі складові і перетворення в метан може відбуватися лише у вологому середовищі, оскільки бактерії можуть переробляти лише речовини в розчиненому вигляді. Тому, високий вміст води у відходах сприяє збільшенню швидкості їх розпаду. Зі збільшенням вологості збільшується утворення метану. Однак, кількість води у відходах повинна бути оптимальною. Загальна кількість біогазу, яка утворюється протягом тривалого часу, не підвищується зі збільшенням кількості води вище максимального порогу, необхідного для підтримання життєдіяльності мікроорганізмів;

- температура, підвищуючись приблизно до 57 °С, викликає підвищення генерації біогазу. При більш високих температурах кількість біогазу зменшується. Більш високі температури вказують швидше на аеробні, ніж на анаеробні умови, які можуть призвести до виникнення підповерхневих пожеж. У той час, як низькі температури можуть розповсюджуватися через поверхню

відходів і зменшувати генерацію біогазу, зокрема, на невеликих звалищах, більша частина відходів на крупних об'єктах ізольована від зовнішнього середовища та нагрівається через мікробіологічну активність. Вплив температури на утворення біогазу є комплексним, температурні профілі в межах маси відходів досить різноманітні для використання в моделях, хоча деякі моделі використовують для розрахунків температуру зовнішнього повітря;

- кисень у повітрі може проникати в масу відходів та виступати інгібітором виробництва біогазу анаеробними мікроорганізмами. Значна частина відходів на неглибоких ділянках і ділянках без покриття (або з поганим покриттям) можуть бути порушені інфільтрацією повітря і зменшенням генерації біогазу. Системи збору біогазу також можуть сприяти підвищенню інфільтрації повітря, особливо якщо вони використовуються агресивно;

- рівень рН. В той час, як гідроізолюючі і кислотоутворюючі бактерії в кислому середовищі з рівнем рН 4,5-6,3 досягають оптимуму своєї активності, бактерії, які утворюють оцтову кислоту і метан, можуть жити лише при нейтральному або слабколужному рівні рН – 6,8-8,0;

- біорозкладання відходів має важливий вплив на кількість та швидкість генерації біогазу. Високо розкладаючі органічні матеріали, наприклад харчові відходи, будуть утворювати біогаз швидко, але споживати швидше, ніж менш розкладаючі матеріали, наприклад папір, який виробляє біогаз повільно, але протягом тривалого часу. Такі матеріали як дерево, демонструють мінімальну деградацію і утворюють мінімальну кількість біогазу. Неорганічні матеріали не утворюють біогаз;

- вплив кліматичних факторів на динаміку утворення парникових газів оцінювався у роботі А.Ю.Пухнюк, Ю.Б.Матвєєва [40]. Автори показали, що кількість опадів, випаровуваність та температурний режим полігонів є важливими факторами метаноутворення. В [44] проведені дослідження кліматичних особливостей території – температури і кількості атмосферних опадів у місцях розташування полігонів ТПВ. Ряд областей України має доволі

значні відмінності у вологості та температурному режимі, що дозволяє виділити чотири агрокліматичні зони, які поступово переходять одна в одну;

- час розкладання відходів. Генерація метану починається орієнтовно через два роки після захоронення відходів на полігоні і досягає максимального утворення через 17 років. Протягом наступних 25-30 років спостерігається стабілізація процесів, після чого процес метаногенезу затухає. Тому, важливо мати інформацію про рік початку експлуатації полігону та термін його закриття;

- морфологічний та хімічний склад відходів, особливо його органічний компонент, є одним з найважливіших факторів, який впливає як на кількість, так і на строки утворення метану;

- практика управління полігоном або звалищем ТПВ. Об'єкти захоронення відходів підрозділяються на:

- полігони побутових відходів;
- контрольовані (керовані) звалища;
- неконтрольовані (некеровані) звалища.

На полігонах, як правило, здійснюється перекриття шарів розміщених відходів, їх ущільнення, контроль за розміщенням, боротьба з пожежами, збір та очищення фільтрату. На полігонах створюються умови для більш ефективного збирання звалищного газу, ніж на звалищах.

Значний вплив на утворення метану має глибина захоронення відходів та ступінь їх ущільнення. На неглибоких полігонах і звалищах, а також там, де відходи не ущільнюються належним способом, спостерігається менш інтенсивна генерація метану через інфільтрацію повітря, що негативно впливає на процеси метаногенезу.

На ефективність генерації метану впливають тип та ступінь покриття шарів відходів. При застосуванні матеріалу з низькою здатністю до проникнення повітря спостерігається більш інтенсивна генерація звалищного газу.

5.3.2 Кліматичні та геологічні характеристики району розміщення полігону ТПВ

У даному розділі наводяться дані щодо кліматичних умов, метеорологічних характеристик та геологічні особливості району розміщення полігону. Вказуються дані щодо розміщення житлової забудови довкола полігону, зазначається відстань до найближчого населеного пункту.

Площа полігону складає ___ га, висота – ___ м.
Полігон введено в експлуатацію в _____ році.

Природно-кліматичні умови в районі розташування полігону

і характеризуються _____.

Найближча житлова забудова знаходиться у _____
напрямку на відстані _____ км.

Основні характеристики полігона заносяться до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Характеристика дослідженого полігону ТПВ

Полігон	Площа, га	Глибина, м	Наповнення ТПВ, млн.т	Рік відкриття/ закриття	Кількість секцій, шт
1	2	3	4	5	6

Визначаються середньостатистичні температури атмосферного повітря:

- найбільш спекотного місяця протягом року;
- найбільш холодного місяця протягом року.

Визначається кількість опадів - вказуються середньостатистичні дані щодо найбільшої кількості випадіння опадів.

Вказуються середньорічна роза вітрів у місці розміщення полігону, переважаючий напрямок вітру, середньорічна та максимальна швидкості вітру. Наводиться характеристика рельєфу місцевості.

Дані щодо характеристики кліматичних умов та рельєфу місцевості розташування полігону заносяться до таблиць 5.3 та 5.4.

Таблиця 5.3 – Характеристика кліматичних умов та рельєфу місцевості розташування полігону

Найменування полігону ТПВ	Місце розташування полігону	Температура найбільш спекотного місяця року, °С	Температура найбільш холодного місяця року, °С	Максимальна кількість опадів, мм	Середньорічна швидкість вітру, м/с	Максимальна швидкість вітру, м/с	Рельєф місцевості
1	2	3	4	5	6	7	8

Таблиця 5.4 – Метеорологічні характеристики полігону ТПВ

Найменування характеристик	Величина
Коефіцієнт рельєфу місцевості	
Середня максимальна температура зовнішнього повітря найбільш жаркого місяця року, $T_{л}$, °С	
Середня температура зовнішнього повітря найбільш холодного місяця, $T_{з}$, °С	
Середньорічна роза вітрів, % Пн ПнС С ПдС Пд ПдЗ З ПнЗ	
Швидкість вітру (за середніми багаторічними даними), повторення перевищення якої складає 5%, U^* , м/с	

Проводиться обстеження полігону захоронення відходів, встановлення його характеристик.

Для отримання інформації залучаються проектні матеріали, матеріали обстеження полігону, журнали обліку відходів, які надходили і надходять на полігон, товарно-транспортні накладні, акти виконаних робіт, книги бухгалтерського обліку тощо. Встановлюється наявність ділянок зі старими захороненнями відходів, експлуатація яких вже не здійснюється, а також терміни експлуатації ділянок, на яких проводяться складування відходів. Уточнюються строки їх експлуатації.

Отриманні дані зводяться у таблицю 5.5.

Таблиця 5.5 – Характеристики полігону захоронення ТПВ

Ділянки відходів за термінами експлуатації	Строки експлуатації		Площа ділянки, га	Глибина захоронення (висота складування), м
	Рік початку	Рік закінчення		
А	1	2	3	4
Виведені з експлуатації ділянки захоронення відходів				
Ділянки, що знаходяться в експлуатації				

Продовження таблиці 5.5

Схема захоронення відходів	Обсяги накопичення відходів, тис. тонн/рік	Ступінь ущільнення при захороненні ТПВ	Рівень ґрунтових вод	
			Низький рівень (глибина залягання більше 3 м)	Високий рівень (глибина залягання менше 3 м)
5	6	7	8	9

Складають карту-схему полігону. На карті-схемі визначають ділянки захоронення, які вже не експлуатуються. та діючі ділянки приймання відходів. Також на карту-схему наносять точки відбору проб.

5.3.3 Характеристика відходів, що захороняються на полігоні

Проводиться визначення морфологічного складу та властивостей відходів, які захороняються на полігоні. При проведенні досліджень використовують журнали обліку відходів, які приймаються на полігон, та Нормативного Документу «Охорона навколишнього природного середовища та раціональне використання природних ресурсів. Якість довкілля». Відбір проб ґрунтів та відходів при здійсненні хіміко-аналітичного контролю (загального і локального) забруднення об'єктів навколишнього природного середовища в районах впливу промислових, сільськогосподарських, господарсько-побутових і транспортних джерел забруднення. Щільність відходів, їх вологість та рН водної витяжки визначаються за відповідними методиками. Отриманні дані заносяться у таблиці 5.6 та 5.7.

Таблиця 5.6 – Морфологічний склад відходів, що захороняються на полігоні ТПВ (визначаються окремо для старих ділянок та ділянок, які знаходяться в експлуатації)

Компоненти ТПВ	Вміст компонента, %	Вміст органічної складової, %
1	2	3
Папір		
Харчові відходи		
Дерево		
Текстиль		
Шкіра, гума		
Пластмаса		
Кістки		
Суміш компонентів		

Таблиця 5.7 – Властивості відходів, що захороняються на полігоні ТПВ (визначаються окремо для старих ділянок та ділянок, які знаходяться в експлуатації)

Найменування відходу	Щільність, кг/куб.м	Вологість у тілі полігону,%	pH водної витяжки	Примітка
1	2	3	4	5

5.4 Проведення інвентаризації викидів на полігоні ТПВ

Проводяться лабораторно-аналітичні дослідження звалищного газу. Вони проводяться шляхом відбору проб зі свердловин, які пробурені у тілі полігону.

Відбір проб звалищного газу проводиться згідно КНД 211.2.3.063-98 «Охорона навколишнього природного середовища та раціональне використання природних ресурсів. Відбір проб промислових викидів. Інструкція».

При відборі проб визначають певні параметри біогазу. Отримані при проведенні досліджень дані щодо характеристики джерел виділення звалищного газу у атмосферне повітря, а також якісного та кількісного складу біогазу заносяться до відповідних таблиць 5.8, 5.9 та 5.10.

Таблиця 5.8 –Параметри, які визначаються при відборі проб звалищного газу

Назва параметра	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення параметра
1	2	3	4
Температура навколишнього повітря	Та.п.	°С	
Температура газу	T _p	°С	
Об'ємна витрата газу	V _p	м ³ /с	
Тривалість відбору проби	T	Хв	
Атмосферний тиск	P	кПа (мм РТ.ст.)	

Продовження таблиці 5.8

1	2	3	4
Швидкість газового потоку	V_f	м/с	
Діаметр свердловини	D	м	
Глибина відбору проби в тілі полігону або висота відбору проби над шаром полігону	H	м	

Таблиця 5.9 –Характеристика джерел надходження звалищного газу у атмосферне повітря

Дата та час відбору проб	Найменування свердловини /колодязя (точки відбору проб)	Глибина відбору проби в тілі полігону або висота відбору проби над шаром полігону, м	Номер проби	Тривалість відбору хв.	Об'єм аспірованого газу, $дм^3/хв$	Атмосферний тиск, (мм рт.ст.)
1	2	3	4	5	6	7

Таблиця 5.10 –Дані щодо кількісного та якісного складу звалищного газу, що надходить у атмосферне повітря

Найменування свердловини /колодязя (точки відбору проб)	Номер проби	Глибина відбору проб	Об'ємна витрата газу, $дм^3/хв$	Температура, $^{\circ}C$	
				газового потоку	навколишнього повітря
1	2	3	4	5	6

Продовження таблиці 5.10

Забруднююча речовина		Фактичний вміст речовини у біогазі, %	Методика визначення показників
Код	Найменування		
7	8	9	10

5.5 Визначення обсягів викидів парникових газів та забруднюючих речовин в атмосферне повітря для полігонів ТПВ

Джерелом утворення звалищного газу на полігонах ТПВ є лише органічні відходи, які можуть розкладатися біологічним шляхом. До таких відходів відносяться: папір, картон, харчові відходи, деревина, садово-паркові відходи, текстиль, шкіра, гума, а також засоби особистої гігієни.

Надходження звалищного газу в атмосферне повітря здійснюється рівномірно по всій поверхні полігону або звалища з поверхні звалища або полігону.

5.5.1 Визначення обсягів викидів парникових газів та забруднюючих речовин, які виділяються у атмосферу з полігону ТПВ, при проведенні інструментальних вимірів

Роботи з відбору звалищного газу та проведенню інструментально-лабораторних вимірювань з визначення обсягів генерації звалищного газу та емісії метану і діоксиду вуглецю повинні організовуватися та вестися у відповідності з вимогами діючих нормативних документів. При проведенні інструментально-аналітичних досліджень необхідно використовувати метрологічно атестовані методики виконання вимірювань і повірені засоби вимірювальної техніки. У відповідності абзацу 8 частини першої статті 10 Закону України «Про охорону атмосферного повітря» при наявності специфічних умов викиду забруднюючих речовин підприємства, установи, організації та громадяни - суб'єкти підприємницької діяльності зобов'язані забезпечити розроблення методик виконання вимірювань.

Обсяг генерації звалищного газу від звалищ та полігонів побутових відходів визначається шляхом проведення замірів вимірювальною технікою, яка пройшла повірку.

Враховуючи, що на генерацію звалищного газу впливають наступні фактори:

- кліматичні умови;

- робоча площа звалища або полігону;
- строки експлуатації звалища або полігону;
- кількість захоронених відходів;
- потужність шару складування відходів;
- морфологічний склад захоронених відходів;
- вологість відходів тощо.

Проводити вимірювання потрібно в декількох точках (не менше п'яти) на поверхні звалища або полігону, окремо для об'єктів, що вже не експлуатуються, та об'єктів, які знаходяться у активній фазі (здійснюється прийом та захоронення відходів), три рази за сезон року. Строк проведення досліджень – протягом року.

Визначений вимірами об'єм генерованого звалищного газу приводимо до нормальних фізичних умов. Нормальні фізичні умови: тиск 101 325 Па (760 мм рт. ст.), температура 273,16 К (0°C).

Приведення визначеного об'єму звалищного газу до нормальних умов проводимо за формулою:

$$V_{\text{н.зг}} = V_i * \frac{P}{760} * \frac{273.16}{T} = 0.359 * V_{\text{ср.зг}} * \frac{P}{T}, \quad (5.1)$$

де $V_{\text{н.зг}}$ – об'єм звалищного газу при 0 °С и 760 мм рт. ст., куб.м/год.;

V_i - об'єм звалищного газу, визначеного в і-той точці відбору проб, куб.м/год;

P – тиск газу у робочих умовах, мм рт. ст.;

T – температура газу у робочих умовах, °К.

Розраховуємо об'єм сухого звалищного газу за формулою:

$$V_{\text{сух.зг}} = V_{\text{н.зг}} * 10^{-2} * (100 - W), \quad (5.2)$$

де $V_{\text{сух.зг}}$ – об'єм сухого звалищного газу, куб.м/год.;

W – фактична вологість звалищного газу, %.

Дані заносимо у таблицю 5.11.

Таблиця 5.11 – Об'єм звалищного газу, генерованого з полігону або звалища відходів протягом року

Точки відбору проб	Об'єм звалищного газу, приведений до нормальних умов, куб.м/год.						
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень
1							
2							
3							
5							
Σ*							
V _{ср}							

Продовження таблиці 5.11

Точки відбору проб	Об'єм звалищного газу, приведений до нормальних умов, куб.м/год.					Усереднений обсяг звалищного газу, генерованого протягом року, куб.м/рік
	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	
1						X
2						X
3						X
4						X
5						X
Σ*						X
V _{ср.і}						

* сумарний об'єм звалищного газу, визначений у точках відбору.

Визначаємо середній об'єм звалищного газу за період проведення досліджень:

$$V_{ср.і} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{гв.і}}{n}, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (5.3)$$

де $V_{гв.і}$ = обсяг звалищного газу в і-тій точці відбору проб, приведений до нормальних умов, куб.м/год.;

n- кількість точок відбору проб.

При значній площі полігону або звалища кількість точок відбору проб може бути збільшена за потребою.

Розраховуємо кількість звалищного газу, який генерований звалищем або полігоном, протягом року, за формулою:

$$Q_{зг.j} = 10^{-3} * V_{ср.j} * 24 * 365 * \rho_{зг.} * \frac{S_3}{\sum_{i=1}^n S_i}, \text{ тонн/рік} \quad (5.4)$$

де $V_{ср.j}$ – усереднений обсяг звалищного газу, генерований протягом року, куб.м;

$\rho_{зг.}$ – густина звалищного газу, кг/куб.м. Середнє значення густини звалищного газу відповідає 1,25 кг/куб.м;

S_3 – загальна площа звалища або полігону, кв.м;

S_i – площа, на якій здійснювався відбір звалищного газу в i -той точці, кв.м.;

n – кількість точок відбору.

Одночасно з вимірюванням об'єму звалищного газу здійснюється відбір проб та визначення вагового відсоткового вмісту в ньому метану (CH_4) та двоокису вуглецю (CO_2). Дані заносяться у таблиці 5.12 та 5.13.

Таблиця 5.12 – Вміст метану у звалищному газі

Точки відбору проб	Ваговий відсотковий вміст метану у звалищному газі, %						
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень
1							
2							
3							
4							
5							
W_{CH4}*							

Продовження таблиці 5.12

Точки відбору проб	Ваговий відсотковий вміст метану у звалищному газі, %					Усереднений показник вагового відсоткового вмісту метану, %
	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	
1						X
2						X
3						X
4						X
5						X
W_{CH4}*						

* усереднений показник вагового відсоткового вмісту метану

Таблиця 5.13 – Вміст двоокису вуглецю у звалищному газі

Точки відбору проб	Ваговий відсотковий вміст двоокису вуглецю у звалищному газі, %						
	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Липень
1							
2							
3							
4							
5							
W_{CO2}*							

Продовження таблиці 5.13

Точки відбору проб	Ваговий відсотковий вміст двоокису вуглецю у звалищному газі, %					Усереднений показник вагового відсоткового вмісту двоокису вуглецю, %
	Серпень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень	
1						X
2						X
3						X
4						X
5						X
W_{CO2}*						

* усереднений показник вагового відсоткового вмісту двоокису вуглецю

Розрахунок кількості викидів метану та діоксиду вуглецю здійснюється за формулою:

$$Q_i = \frac{Q_{зг.j} * C_i}{100}, \text{ тонн/рік} \quad (5.5)$$

де Q_i – валовий викид i -тої речовини (метану або двоокису вуглецю) у складі звалищного газу, тонн/рік;

$Q_{зг.j}$ – валовий викид звалищного газу, тонн/рік;

C_i – усереднений показник вагового відсоткового вмісту i -тої речовини (метану або двоокису вуглецю) у складі звалищного газу, %.

Дані заносимо у таблицю 5.14.

Таблиця 5.14 – Емісія метану та двоокису вуглецю з полігонів та звалищ ТПВ

Емісія звалищного газу, тонн/рік	Викиди метану		Викиди двоокису вуглецю	
	усереднений показник вагового відсотковий вміст CH_4 у звалищному газі, %	Валовий викид метану (Q_{CH_4}), тонн/рік	усереднений показник вагового відсотковий вміст CO_2 у звалищному газі, %	Валовий викид діоксиду вуглецю (Q_{CO_2}), тонн/рік
1	2	3	4	5

У зв'язку з тим, що доля метану та діоксиду вуглецю у звалищному газі складає більше 95 %, доцільно визначати вміст інших компонентів звалищного газу розрахунковим методом.

При застосуванні розрахункового методу інвентаризації викидів звалищ та полігонів ТПВ враховують дані щодо середньостатистичного складу звалищного газу, наведені у таблиці 5.15.

Таблиця 5.15 – Середньостатистичний склад звалищного газу

Найменування компоненту	Ваговий відсотковий вміст компоненту, $C_{\text{ваг.}i}$, %	Співвідношення компонент/метан, k_i
1	2	3
Метан	52,915	1
Толуол	0,723	0,0137
Аміак	0,533	0,0101
Ксилол	0,443	0,0084
Вуглецю оксид	0,252	0,0048
Азоту діоксид	0,111	0,0021
Формальдегід	0,096	0,0018
Етилбензол	0,095	0,0018
Ангідрид сірчаный	0,07	0,0013
Сірководень	0,026	0,0005

Розрахунок валових викидів компонентів звалищного газу здійснюємо за формулою:

$$Q_i = Q_{CH_4} * k_i, \text{ тонн} \quad (5.6)$$

де Q_i – валовий викид i -того компонента звалищного газу, тонн/рік;

Q_{CH_4} – валовий викид метану, тонн/рік;

k_i – коефіцієнт співвідношення з таблиці 5.15.

Отримані дані щодо викидів парникових газів та забруднюючих речовин, які надходять у атмосферне повітря з полігону або звалища ТПВ у складі звалищного газу, заносимо у таблицю 5.16.

Таблиця 5.16 – Валові викиди парникових газів та забруднюючих речовин з полігону або звалища ТПВ

№ з/п	Найменування компонента звалищного газу	Емісія парникових газів та забруднюючих речовин у атмосферне повітря, тонн/рік	Примітка
1	Метан		
2	Діоксид вуглецю		
3	Толуол		
4	Аміак		
5	Ксилол		
6	Вуглецю оксид		
7	Азоту діоксид		
8	Формальдегід		
9	Етилбензол		
10	Ангідрид сірчаний		
11	Сірководень		

5.5.2 Визначення обсягів викидів парникових газів та забруднюючих речовин, які виділяються у атмосферу з полігону ТПВ, розрахунковим методом

Майже 95 % твердих побутових відходів, які утворюються в Україні, захороняються на полігонах та звалищах. На цих об'єктах видалення відходів складаються умови, які сприяють біологічному розкладанню органічної складової компонентів ТПВ. У результаті складних біотермічних анаеробних процесів біодеградації відходів утворюється звалищний газ, який виділяється у атмосферне повітря. До складу звалищного газу входять наступні парникові гази та забруднюючі речовини: метан (CH_4), діоксид вуглецю (CO_2), а також у незначній кількості: сірководень (H_2S), толуол, аміак, ксилол, вуглецю оксид, азоту діоксид, формальдегід, етилбензол, ангідрид сірчаний.

При зборі вихідних даних для проведення розрахунків утворення метану на полігонах та звалищах ТПВ встановлюємо загальну кількість твердих побутових відходів, які надходять на полігон або звалище протягом року для захоронення, а також відсотковий вміст по масі компонентів відходів, здатних до біорозкладання. При цьому необхідно деталізувати комбіновані відходи, наприклад комунальні відходи змішані (може включати 50 % неактивних матеріалів, 10 % харчових відходів, 30 % паперових та картонних відходів та 10 % садово-паркових відходів). Види відходів, схожих за хімічним складом, необхідно інтегрувати: штори, одяг, килими можуть бути включені у текстильні відходи; кухонні - у харчові відходи; солома, дерев'яні меблі – у відходи деревини.

Дані заносимо у таблицю 5.17.

Таблиця 5.17 – Дані щодо кількості ТПВ, які захороняються протягом року, вміст біорозкладаємих компонентів у складі ТПВ

Найменування показника	Кількість, тонн/рік	Вміст компонента у загальній кількості ТПВ, %	Примітка
1	2	3	4
Загальна кількість ТПВ, які захороняються		X	
Біорозкладаємі компоненти ТПВ			
Папір, картон			
Текстиль			
Харчові відходи			
Деревина			
Садово-паркові відходи			
Засоби особистої гігієни			
Шкіра, гума			

В Україні нормативним документом з оцінки емісії метану з місць видалення відходів є «Національний Кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2016 роки». Оцінка емісії метану з місць захоронення ТПВ здійснюється за Національною багатокомпонентною моделлю на основі метода затухання першого порядку третього рівня деталізації (далі – Національна модель).

В основу моделі покладено залежність утворення метану від характеристик відходів та умов їх захоронення, які визначають кількість органічного вуглецю, який має здатність біологічно розкладатися та переходити у метан.

Модель враховує утворення метану при розкладанні відходів, які захоронені на полігоні за поточний та попередні роки. Національна модель базується на методі розпаду першого порядку третього рівня деталізації, що

грунтується на визначених для України факторах кожної з семи органічних фракцій твердих побутових відходів. Кількість CH_4 , яка утворюється від кожної категорії відходів та виду відходів/матеріалів, підсумовується.

Утворення метану розраховується за формулою:

$$Q(t) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A * k_j * MWS_i * MWS_{i,j} * L_{0i,j} * e^{-k_j(t-x)} \quad , \quad (5.7)$$

де $Q(t)$ – кількість метану, який утворюється за час t , тонн;

A – нормалізуючий множник, який визначається за формулою:

$$A = (1 - e^{-k_j}) / k_j \quad , \quad (5.8)$$

де k_j – константа швидкості утворення метану для j -го компонента ТПВ, рік^{-1} ;

MWS_i – загальна маса ТПВ, які захороненні за рік i , тонн/рік;

$MWS_{i,j}$ – вміст j -го компонента у ТПВ в i -му році, %;

t – розрахунковий рік (якщо розрахунки виконуються за один рік, то $t=1$), рік;

x – період, за які вносяться дані, рік;

$L_{0i,j}$ – потенціал утворення метану за рік i , тонн CH_4 /тонн ТПВ.

Константа швидкості утворення метану для j -го компонента ТПВ (k_j) – це одна із констант моделі, яка визначає швидкість розкладання відходів і швидкість генерації звалищного газу. Вона визначається по кожному компоненту і залежить від вологості, рН відходів, вмісту біогенних елементів та температури, тобто від кліматичних умов території, де розташовано місце захоронення відходів. Визначається по таблиці 5.18.

Таблиця 5.18 – Константи швидкості утворення метану для різних компонентів ТПВ

№	Компонент	к _j , рік ⁻¹
		Національний рівень*
1	Папір, картон	0,024
2	Текстиль	0,024
3	Харчові відходи	0,12
4	Деревина	0,012
5	Садово-паркові відходи	0,06
6	Засоби особистої гігієни	0,12
7	Шкіра, гума	0,012

* Національний Кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2013 роки;

Константа швидкості утворення метану k_j прийнята за замовчуванням для зони помірного клімату.

Потенціал утворення метану (L_{0j}) описує загальну кількість метану, яка може бути отримана з тонни відходів у результаті їх максимально можливого розкладання. Він визначається за кожним компонентом та залежить від умов захоронення відходів (MCF_i) та вуглецю, здатного до біорозкладання (DOC_j).

Потенціал утворення метану за рік визначається за формулою:

$$L_{0j} = DOC_j * DOC_F * F * 16/12 * MCF_i, \quad (5.9)$$

де DOC_j – загальна кількість органічного вуглецю, здатного до біологічного розкладання у j -ій фракції, т С/т ТПВ;

DOC_F – частина вуглецю, яка бере участь у реакціях розпаду ($DOC_F = 0,5$);

F – вміст метану у звалищному газі ($F = 0,5$);

$16/12$ – коефіцієнт перерахунку вуглецю у метан;

MCF_i – фактор корегування утворення метану за рік i , який залежить від умов захоронення ТПВ.

Таблиця 5.19 – Значення показників DOC_F та F

Показник	Значення показника	Примітка
Частка фактично розкладеного органічного вуглецю (DOC_F)	0,5	Типове, приймається за замовчуванням
Вміст метану в звалищному газі (F)	0,5	Типове, приймається за замовчуванням
Час затримки (t_0)	Значення t_0 становить 6 місяців	Типове, приймається за замовчуванням

Маса вуглецю, який піддається біотрансформуванню в метан, залежить від компонентів ТПВ (DOC_j). Данні вмісту DOC_j наведені у таблиці 5.20.

Таблиця 5.20 – Вміст вуглецю, здатного до біорозкладання, у компонентах ТПВ

№	Компонент	Біорозкладаємий вуглець (DOC_j), тоннС/тонн ТПВ
1	Папір, картон	0,40
2	Текстиль	0,24
3	Харчові відходи	0,15
4	Деревина	0,43
5	Садово-паркові відходи	0,20
6	Засоби особистої гігієни	0,24
7	Шкіра, гума	0,39

Фактор корегування утворення метану, який залежить від умов захоронення ТПВ, наведено у таблиці 5.21.

Таблиця 5.21 – Значення показника MSF_i

Типи полігонів і звалищ ТПВ	MSF_i
Контрольовані анаеробні**	1,0
Напіванаеробні контрольовані***	0,5
Неконтрольовані глибокі (> 5 м відходів та/або з високим рівнем ґрунтових вод)****	0,8
Неконтрольовані неглибокі (< 5 м відходів)*****	0,4
Поза категорією*****	0,6

**Анаеробні контрольовані звалища твердих відходів: на даному виді звалищ повинні знаходитися під контролем місця для видалення відходів (тобто, відходи відправляються на спеціально підготовлені майданчики, на яких в тій чи іншій мірі здійснюється продувка відходів і контролюється захист від загоряння) і при цьому виконується хоча б одна з перерахованих умов: (i) відходи чим-небудь укриваються, (ii) здійснюється їх механічна пресування, або (iii) або відходи укриваються пошарово.

***Напіванаеробні контрольовані звалища твердих відходів: на даному виді звалищ необхідна наявність місць для видалення відходів, які знаходяться під контролем, і при цьому має дотримуватися хоча б одна з перерахованих умов: (i) відходи укриваються негерметичним матеріалом, (ii) є стічні дренажні системи, і (iii) вентиляційні системи.

****Неконтрольовані звалища твердих відходів - глибокі і / або з високим рівнем ґрунтових вод: звалища не відповідають критеріям контрольованих звалищ, і на них глибина відходів перевищує або дорівнює 5 метрам і / або є високий рівень ґрунтових вод в верхньому рівні землі. Надалі ситуація може привести до заповнення відходами внутрішніх вод, таких як ставки, річки або заболочені території.

*****Неконтрольовані неглибокі звалища твердих відходів: звалища, які не відповідають критеріям контрольованих звалищ та глибина яких не перевищує 5 метрів.

*****Звалища твердих відходів поза категорії: тільки в тому випадку, коли країни не можуть класифікувати свої звалища на чотири категорії контрольованих і неконтрольованих, можна використовувати *MCF* для «поза категорії».

Для області застосування цих Методичних вказівок визначення обсягів утворення метану здійснюється за рік за формулою:

$$Q(t) = \sum_{j=1}^m A * k_j * MWS_i * MWS_{i,j} * L_{oi,j} * e^{-k_j(t-x)}, \quad (5.10)$$

де компоненти відповідають визначенням у формулах 5.7, 5.8;

$t = 1$ рік;

$x = 0$;

m = кількість компонентів відходів, за якими проводяться розрахунки.

Емісія метану зі звалища або полігону визначається як сума обсягів метану, який генерується при розкладанні компонентів ТПВ, здатних до біодеградації.

Вміст інших забруднюючих речовин, які виділяються разом зі звалищним газом у атмосферне повітря, розраховуємо за середньостатистичним складом звалищного газу.

Дані щодо середньостатистичного складу звалищного газу, наведені у таблиці 5.22.

Таблиця 5.22 – Середньостатистичний склад звалищного газу

Найменування компонента	Ваговий відсотковий вміст компонента, $C_{ваг.i}, \%$	Співвідношення компонент/метан, k_i
1	2	3
Метан	52,915	1
Діоксид вуглецю	44,736	0,8454
Толуол	0,723	0,0137
Аміак	0,533	0,0101
Ксилол	0,443	0,0084
Вуглецю оксид	0,252	0,0048
Азоту діоксид	0,111	0,0021
Формальдегід	0,096	0,0018
Етилбензол	0,095	0,0018
Ангідрид сірчаний	0,07	0,0013
Сірководень	0,026	0,0005

Розрахунок валових викидів компонентів звалищного газу здійснюємо за формулою:

$$Q_i = Q_{CH_4} * k_i, \text{ тонн} \quad (5.11)$$

де Q_i – валовий викид і-того компонента звалищного газу, тонн/рік;

Q_{CH_4} – валовий викид метану, тонн/рік;

k_i – коефіцієнт співвідношення (визначався за таблицею 5.22).

Отримані дані щодо викидів парникових газів та забруднюючих речовин, які надходять у атмосферне повітря з полігону або звалища ТПВ у складі звалищного газу заносимо у таблицю 5.23.

Таблиця 5.23 – Валові викиди парникових газів та забруднюючих речовин з полігону або звалища ТПВ

№ з/п	Найменування компонента звалищного газу	Емісія парникових газів та забруднюючих речовин у атмосферне повітря, тонн/рік	Примітка
1	2	3	4
1	Метан		
2	Діоксид вуглецю		
3	Толуол		
4	Аміак		
5	Ксилол		
6	Вуглецю оксид		
7	Азоту діоксид		
8	Формальдегід		
9	Етилбензол		
10	Ангідрид сірчаний		
11	Сірководень		

Розрахунок обсягів викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря на прикладі Роганського полігону ТПВ наведено у Додатку А.

ВИСНОВКИ

У результаті проведення дослідження за темою «Розробка Методичних вказівок з розрахунку обсягів викидів забруднюючих речовин у атмосферне повітря для полігонів твердих побутових відходів» (заключний) згідно тематичного плану прикладних наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок за бюджетною програмою КПКВК 2401040 «Прикладні наукові та науково-технічні розробки, виконання робіт за державними цільовими програмами і державним замовленням у сфері природоохоронної діяльності, фінансова підтримка підготовки наукових кадрів» на 2019-2021 роки виконано:

- аналітичний огляд міжнародних методик та аналіз літературних джерел щодо моделювання генерації звалищного газу на полігонах твердих побутових відходів та визначення його компонентів;

- порівняльну характеристику складу твердих побутових відходів у різних регіонах України;

- дослідження еволюції біогазу над полігоном ТПВ;

- розроблено математичну модель, яка описує динаміку конвекційного підйому нагрітих газоутворень (біогазу) в атмосферне повітря. Встановлені висотні та часові залежності швидкості переміщення, характерного розміру, надлишкової відносної температури, плавучості цих газоутворень;

- аналітичні рішення системи диференціальних керувань швидкості підйому маси залученого холодного повітря і повного інтеграла плавучості нагрітого біогазу. При різних значеннях плавучості та початкового радіуса нагрітого газоутворення виконані численні оцінки, які показують висотні та часові масштаби зміни висоти, швидкості підйому, розміру (радіуса), плавучості джерела небезпеки над полігоном ТПВ;

- лабораторно-аналітичні дослідження викидів звалищного газу над шаром та з тіла Роганського полігону ТПВ (м. Харків); усереднені результати хімічного аналізу БГ свідчать про високий вміст метану – 40-60 % в біогазі,

вуглекислий газ становить 15-40 % об'єму, кисень – 0,5-1,7 %. Відібрано проби відходів та визначено їх фізичні параметри (вологість, морфологічний склад);

– розрахунки обсягів викидів метану та інших забруднюючих речовин в атмосферне повітря на Роганському полігоні ТПВ;

– запропоновано програму обстеження звалищ та полігонів ТПВ;

– розроблені методичні вказівки з розрахунку обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря для полігонів твердих побутових відходів. Для визначення обсягів викидів парникових газів та забруднюючих речовин розроблено 2 метода: на підставі проведених інструментальних вимірів та розрахунковим методом. Вибір методу здійснюється замовником залежно від умов, необхідних для проведення досліджень.

Результати роботи можуть бути впроваджені при проведенні інвентаризації викидів парникових газів та забруднюючих речовин, які генеруються полігонами та звалищами побутових відходів, при оцінці викидів від полігонів, при розробці проектної документації на будівництво нових та розширення діючих об'єктів, при підготовці матеріалів для проходження процедури з оцінки впливу на довкілля планованої діяльності, проведенні державного екологічного контролю полігонів ТПВ, організації природоохоронної діяльності суб'єктів господарювання, які є власниками полігонів ТПВ, а також при справлянні ними екологічного податку за викиди в атмосферне повітря парникових газів та забруднюючих речовин з полігонів ТПВ.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Alam, P. Impact of solid waste on health and the environment [Text] / P. Alam, K. Ahmade // Special Issue of International Journal of Sustainable Development and Green Economics (IJS DGE). – 2013. – Vol. 2. – P.165–168.
2. Дмитрук, О. О. Фізико-хімічна сутність процесу утворення звалищного газу з твердих побутових відходів [Текст] / О. О. Дмитрук, Е. А. Дмитрук // Збірник наукових праць НГУ. – 2017. – № 52. – С.335–341.
3. Соколов, В. Б. Твердые бытовые отходы – реальная опасность для окружающей среды и здоровья человека [Текст] / В. Б. Соколов, И. В. Попов // Вестник Костромского государственного технологического университета: рецензируемый периодический научный журнал. — Кострома: КГТУ, 2007. – № 15. – С. 126–128.
4. Архіпова, Г. І. Вплив звалищ побутових відходів на здоров'я людей [Текст] / Г. І. Архіпова, Ю. О. Галушка // Вісник НАУ. – 2009. – №3. – С. 217–219.
5. Korrespondent.net. Всі новини «свалка» на сайті Korrespondent.net [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://korrespondent.net/tag/3441/>. – Назва з екрану.
6. Aderemi, A. O. An Assessment of Landfill Fires and Their Potential Health Effects - a Case Study of a Municipal Solid Waste Landfill in Lagos, Nigeria [Text] / A. O. Aderemi, A. A. Otitoloju // International Journal of Environmental Protection. – 2012. – Vol. 2. – № 2. – P. 22–26.
7. Musilli, A. Landfill elevated internal temperature detection and Landfill Fire Index assessment for fire monitoring [Text] / Musilli, A. Rowan University. ProQuest Dissertations Publishing. – 2016. – 168 p.
8. Попович, В. В. Пожежна небезпека стихійних сміттєзвалищ та полігонів твердих побутових відходів [Текст] / В. В. Попович // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – 2012. – № 21. – С. 140–147.

9. Исследование атмосферного воздуха полигона по депонированию отходов с целью определения пожаро- и взрывоопасности [Текст] / В. Р. Миркасинова, Р. А. Молчанова И. Р. Байков, Р. М. Хатмуллина // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – №5. –С. 433–444.

10. Аналіз масиву карток обліку пожеж [Електронний ресурс] // Український науково-дослідний інститут цивільного захисту. – Режим доступу: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Analiz-masivu-kartok-obliku-pozhezh.html>. – Назва з екрану.

11. World Fire Statistics [Electronic resource] // International Association of Fire and Rescue Service. – Available: <http://www.ctif.org/ctif/world-fire-statistics>.

12. Дергачевский полигон: Рекультивация. Газета "Харьковские известия". 18 мая 2019 г.

13. Національний кадастр антропогенних викидів із джерел і абсорбції поглиначами парникових газів в Україні за 1990-2018 рр./Державне агенство екологічних ресурсів України. К. 2018. 577с.

14. «Рекомендації з розрахунку утворення біогазу і вибору систем дегазації на полігонах захоронення твердих побутових відходів», Державний комітет Російської Федерації з будівництва та житлово-комунального комплексу ФГУП, Федеральний центрм благоустрою та поведження з відходами. М. 2003. – 19 с.

15. Сафронов Т.А. Оценка эмиссии парниковых газов из мест захоронения ТБО: критический анализ методик и адаптация к условиям одесской области / Т.А. Сафронов, В.Ю. Приходько, Т.П. Шанина // Вісник Одеського державного екологічного університету. 2017. № 21. С. 5-14.

16. Национальный Кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990-2016 г. Киев, 2018. 519 с. - Режим доступу:<https://menr.gov.ua/news/32422.html>.

17. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006. Т. 5 Отходы. - Режим доступу: <https://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/russian/vol5.html>.

18. International Best Practices Guide for LFGE Projects (Найкращі методи реалізації біогазові енергетичних проєктів на полігонах ТПВ). Агенція захисту навколишнього середовища США, 2012 р. 139 с. Режим доступу: https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_IBPGcomplete.pdf.

19. Щорічний національний звіт про інвентаризацію для подання згідно з Рамкою ООН Конвенція про зміну клімату та Кіотський протокол UKRAINE'S GREENHOUSE GAS INVENTORY 1990-2015 (draft). The Ministry of Environment and Natural Resources of Ukraine. Kyiv – 2017 .

20. Исследование газообразования на наиболее крупных полигонах ТБО и переход на трехкомпонентную национальную модель расчетов выбросов ПГ от свалок ТБО в Украине [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / Институт технической теплофизики НАН Украины; рук. Матвеев Ю.Б.; исполн.: Клименко В.М. [и др.]: К., 2012 – 82 с. – Библиогр.: 72-76. - № ГР 0112U001577.

21. Шмарин С. Содержание биоразлагаемых компонентов в составе твердых бытовых отходов в Украине / Шмарин Сергей, Алексеев Иван, Филозоф Роман, Ремез Наталья, Денафас Гинтарас // Экология и промышленность. – 2014. – №1. – С. 73 – 77.

22. Шмарин С.Л. Вплив кліматичних факторів на оцінку викидів парникових газів з місць захоронення твердих побутових відходів в Україні/ Шмарин С.Л., Слівінська В.В., Філозоф Р.С., Нахшина А.Д., Михайленко В.П. // Фізична географія та геоморфологія. – 2014. – Вип.2 (74) – С. 133-139.

23. Ukraine Landfill Gas Model: User's Manual // [U.S. EPA]

24. «Методика розрахунку кількісних характеристик викидів забруднюючих речовин у атмосферу від полігонів твердих побутових та промислових відходів», НВП «ЕКОПРОМ» (Академія комунального господарства ім. К.Д. Памфілова), НДІ Екології людини та гігієни навколишнього середовища ім. А.М. Сисіна, НДІ охорони атмосферного повітря, ЗАТ «НВП «ЛОГУС». М. 2004. – 12 с.

25. ДБН В.2.4-2.2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основи проєктування». Державний комітет України з будівництва та архітектури,

Міністерство охорони навколишнього природного середовища України. Київ 2005. – 44 с.

26. Руководство ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ 2016. European Environment Agency, 2016. Режим доступа: <https://www.eea.europa.eu/ru/publications/rukovodstvo-emep-eaos-po-inventarizacii-vybrosov-2016>.

27. Матвеев Ю.Б. Опыт реализации проектов по сбору биогаза на полигонах ТБО Украины в рамках реализации программы «Метан на рынок», Агентство по возобновляемой энергетике/НТЦ Биомасса. М. 26 мая 2009. – 18с.

28. Погрібний І.Я. Проблеми визначення морфологічного складу твердих побутових відходів з урахуванням сучасних умов переробки // Електронне наукове фахове видання «Ефективна економіка». – 2012. - №11.

29. Збір та перевірка інформації стосовно поводження з твердими побутовими відходами в Україні. Фінальний звіт. Японське агентство міжнародного співробітництва (ЛСА). - 2018. – 384 с.

30. Стольберг Ф.В. «Экология города (урбоэкология)». Учебник. - К.: Либра, 2000. – 464 с.

31. Шмарин С.Л. Помесячное измерение морфологического состава, калорийности, влажности и зольности твердых бытовых отходов/ Шмарин С.Л., Лучко И.А. // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2011. – Вип. 21. – С. 136-143.

32. Igor Goncharenko, Liudmila Anishenko, Leonid Pisnya, Serhii Petrukhin, Elena Serikova MATHEMATICAL MODELING OF BIOGAS LIFTING FROM THE MUNICIPAL SOLID WASTE POLYGON // Scientific Journal «ScienceRise» № 9(50)2018.-p 39-42.

33. Kamalan, H. A Review on Available Landfill Gas Models [Text] / H. Kamalan, M. Sabour, N. Shariatmadari // Journal of Environmental Science and Technology. – 2011. – № 4. – P. 79–92. doi: 10.3923/jest.2011.79.92.

34. Aghdam, E. F. Impact of meteorological parameters on extracted landfill gas composition and flow [Text] / E. F. Aghdam, C. Scheutz, P. Kjeldsen // Waste Management. – 2018. – Available: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.045>.

35. Tabasaran, O. Grundlagen zur Planung von Entgasungsanlagen [Text] / O. Tabasaran, G. Rettenberger // Mtil- Handbuch, Loseblattsammlung, Lfg. ErichSchmidtVerlag, 1987.

36. Weber, B. Minimierung von Emissionen der Deponie[Text] / B.Weber // Heft 74.- Veröffentlichung des Institutes for Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, 1990. – 46 p.

37. Alexander, A. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM). Version 3.02 User's Guide [Text] / A. Alexander, C. Burklin, A. Singleton. – Washington: EPA, 2005. – 48 p.

38. Методически еуказания по расчету количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов: утв. АКХ им. Памфилова 01.01.1995. – М., 1995. – 9 с.

39. Разработка математической модели образования биогаза на полигонах твердых бытовых отходов[Текст] / А. М. Шаимова, Л. А. Насырова, Г. Г. Ягафарова, Е. Г. Ильина, Р. Р. Фасхутдинов // Нефтегазовое дело. – 2009. – Том 7. – № 1. – С. 137–140.

40. Пухнюк, А. Ю. Полевые исследования для оценки потенциала образования биогаза на полигонах твердых бытовых отходов Украины [Текст] / А. Ю. Пухнюк, Д. В. Куцый, Ю. Б. Матвеев // Науково-технічний збірник №105. – 2012. – С. 482–495.

41. Гостинцев, Ю. А. О механизме генерации длинноволновых акустических возмущений в атмосфере всплывающим облаком продуктов взрыва. [Текст] / Ю. А. Гостинцев, Ю. В. Шацких // Физика горения и взрыва. – 1987. – №2. – С. 91–97.

42. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16 жовтня 1992 року N 2707-XII .

43. Final draft of climate deal formally accepted in Paris. CNN. Cable News Network, Turner Broadcasting System, Inc. (December 12, 2015).

44. Шмарін С.Л. Слівінська В.В. Національний центр обліку викидів парникових газів.

ДОДАТОК А
ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ОБСЯГІВ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ
РЕЧОВИН У АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ
З РОГАНСЬКОГО ПОЛІГОНУ ТПВ

Роганський полігон по утилізації та переробці твердих відходів було відкрито 1975 року.

Полігон складається із трьох секцій: I секція – глибина 27-30 м (закрита для захоронення ТПВ); II секція – глибина 5-7 м – знову відкрита для складування ТПВ; III секція – глибина 15-17 м (практично закрыта для складування ТПВ).

Кліматичні та геологічні характеристики району розміщення полігону

Роганський полігон по утилізації та переробці твердих відходів розташований у балці Писаренків яр, колишнього глиняного кар'єру, що знаходиться на півночі сел. Рогань на землях колишнього навчального господарства «Комуніст» тепер с. Докучаєвське Харківського району Харківської області.

Таблиця А.1 – Характеристика дослідженого полігону ТПВ

Полігон	Площа, га	Глибина, м	Наповнення ТПВ, млн.т	Рік відкриття/закриття	Кількість секцій, шт
1	2	3	4	5	6
Роганський полігон ТПВ	21,0	I секція – 27-30; II секція – 5-7; III секція – 15-17	3,0-3,5	1975	3

Площа полігону складає 21,7 га, висота – 25-35 м. Полігон введено в експлуатацію в 1975 році.

Природно-кліматичні умови в районі розташування полігону є типовими для північно-східної частини України і характеризуються помірною континентальністю.

Найближча житлова забудова знаходиться у північному напрямку на відстані > 1,7 км (с. Хроли).

Таблиця А.2 – Характеристика кліматичних умов та рельєфу місцевості розташування полігону

Найменування полігону ТПВ	Місце розташування полігону	Температура найбільш спекотного місяця року, °С	Температура найбільш холодного місяця року, °С	Максимальна кількість опадів, мм	Середньорічна швидкість вітру, м/с	Максимальна швидкість вітру, м/с	Рельєф місцевості
1	2	3	4	5	6	7	8
Роганський	Харків	25,6	-9,8	517	6	9	1

Карта-схема полігону із зазначенням ділянок захоронення, які вже не експлуатуються, та діючих ділянок приймання відходів, а також із нанесеними точками відбору проб, представлена в Додатку Б.

Таблиця А.3 –Метеорологічні характеристики полігону ТПВ

Найменування характеристик	Величина
1	2
Коефіцієнт рельєфу місцевості	1
Середня максимальна температура зовнішнього повітря найбільш жаркого місяця року, Т _л , °С	25,6

Продовження таблиці А.3

1	2
Середня температура зовнішнього повітря найбільш холодного місяця, T_3 , °С	-9,8
Середньорічна роза вітрів, %	
Пн	10,0
ПнС	11,0
С	19,0
ПдС	14,0
Пд	9,0
ПдЗ	11,0
З	15,0
ПнЗ	11,0
Швидкість вітру (за середніми багаторічними даними), повторення перевищення якої складає 5%, U^* , м/с	8-9

Таблиця А.4 – Характеристики полігону захоронення ТПВ

Ділянки відходів за термінами експлуатації	Строки експлуатації		Площа ділянки, га	Глибина захоронення (висота складування), м
	Рік початку	Рік закінчення		
А	1	2	3	4
Виведені з експлуатації ділянки захоронення відходів	-	-	-	-
Ділянки, що знаходяться в експлуатації	1975	2019	21,0	25 ÷ 35

Продовження таблиці А.4

Схема захоронення відходів	Обсяги накопичення відходів, тис. тонн/рік	Ступінь ущільнення при захороненні ТПВ	Рівень ґрунтових вод	
			Низький рівень (глибина залягання більше 3 м)	Високий рівень (глибина залягання менше 3 м)
5	6	7	8	8
-	-	-	-	-
Відкритий, поверхневий	120			

На Роганському полігоні ТПВ проведено визначення складу та властивостей відходів, які захороняються на полігоні. Результати проведених досліджень наведено в таблицях А.5 та А.6.

Таблиця А.5 – Морфологічний склад відходів, що захороняються на полігоні ТПВ

Компоненти ТПВ	Вміст компонента, %	Вміст органічної складової, %
1	2	3
Папір	10,5	44,5
Харчові відходи	48,4	25,4
Дерево	1,3	4,5
Текстиль	4,4	5,5
Шкіра, гума	2,8	9,5
Пластмаса	10,2	7,2
Кістки	2,3	3,4
Суміш компонентів	20,1	-

Таблиця А.6 – Властивості відходів, що захороняються на полігоні ТПВ (визначаються окремо для старих ділянок та ділянок, які знаходяться в експлуатації)

Найменування відходу	Щільність, кг/куб.м	Вологість у тілі полігону, %	pH водної витяжки	Примітка
1	2	3	4	5
ТПВ	200	54	-	-

Проведено дослідження джерел виділення звалищного газу у атмосферне повітря, а також визначено якісний та кількісний склад біогазу. Отримані дані занесено до відповідних таблиць А.7, А.8 та А.9.

Таблиця А.7 – Параметри, які визначаються при відборі проб звалищного газу

Назва параметра	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення параметра
1	2	3	4
Температура навколишнього повітря	Та.п.	$^{\circ}\text{C}$	21
Температура газу	T_p	$^{\circ}\text{C}$	20
Об'ємна витрата газу	V_p	$\text{м}^3/\text{с}$	0,0002
Тривалість відбору проби	T	Хв	5
Атмосферний тиск	P	кПа (мм рт.ст.)	751
Швидкість газового потоку	V_r	м/с	0,07
Діаметр свердловини	D	м	0,06
Глибина відбору проби в тілі полігону	H	м	2,5

Таблиця А.8 – Характеристика джерел надходження звалищного газу у атмосферне повітря

Дата та час відбору проб	Найменування свердловини /колодязя (точки відбору проб)	Глибина відбору проби в тілі полігону, м	Номер проби	Тривалість відбору хв.	Об'єм аспірованого газу, $\text{дм}^3/\text{хв}$	Атмосферний тиск, (мм рт.ст.)
1	2	3	4	5	6	7
19.04.2019	№1	2,5	1	3	12	751
30.05.2019	№2	3	2	4	15	756
03.07.2019	№3	2	3	5	10	749
26.09.2019	№4	3	4	5	12	753

Таблиця А.9 – Дані щодо кількісного та якісного складу звалищного газу, що надходить у атмосферне повітря

Найменування свердловини /колодязя (точки відбору проб)	Номер проби	Глибина відбору проб	Об'ємна витрата газу, дм ³ /хв	Температура, °С	
				газового потоку	навколишнього повітря
1	2	3	4	5	6
Колодязь №1	1	6,0	0,0002	24	26
Колодязь №2	2	2,0	0,0003	25	27
Свердловина №1	3	1,4	0,0004	19	21
Свердловина №2	4	3,0	0,00025	17	18

Продовження таблиці А.9

Забруднююча речовина		Фактичний вміст речовини у біогазі, %	Методика визначення показників
Код	Найменування		
7	8	9	10
410	Метан	48,3	ШИ-12
410	Метан	52,6	ШИ-12
410	Метан	56,7	ШИ-12
410	Метан	55,4	ШИ-12

Визначення обсягів викидів метану, який виділяється у атмосферу з полігону ТПВ (на прикладі Роганського полігону ТПВ та ПВ)

Кількість метану, який утворюється з полігону ТПВ, тонн; розраховувався за формулою:

$$Q(t) = \sum_{j=1}^m A * k_j * MWS_i * MWS_{i,j} * L_{oi,j} * e^{-k_j(t-x)}, \quad (A.1)$$

де $Q(t)$ – кількість метану, який утворився за час t , тонн;

A – нормалізуючий множник, який визначався за формулою (A.2):

$$A = (1 - e^{-k_j}) / k_j, \quad (A.2)$$

де k_j – постійна темпів утворення метану для j -го компонента ТПВ, рік⁻¹;

MWS_i – загальна маса ТПВ, які захороненні за рік i , тонн/рік;

$MWS_{i,j}$ – вміст j -го компонента у ТПВ в i -му році, %;

t – розрахунковий рік ($t=1$), рік;

x – період, за які вносяться дані, ($x = 0$), рік;

$L_{0i,j}$ – потенціал утворення метану за рік i , тонн CH_4 /тонн ТПВ.

m – кількість компонентів відходів, за якими проводяться розрахунки.

Потенціал утворення метану за рік визначався за формулою А.3:

$$L_{0j} = DOC_j * DOC_F * F * 16/12 * MCF_i, \quad (A.3)$$

де DOC_j – загальна кількість органічного вуглецю, здатного до біологічного розкладання у j -ій фракції, т С/т ТПВ;

DOC_F – частина вуглецю, яка бере участь у реакціях розпаду ($DOC_F = 0,5$);

F – вміст метану у звалищному газі ($F = 0,5$);

$16/12$ – коефіцієнт перерахунку вуглецю у метан;

MCF_i – фактор корегування утворення метану, який залежить від умов захоронення ТПВ.

Показник $MWS_{i,j}$ визначався на основі даних про вміст біорозкладаємих компонентів у загальній масі ТПВ, отриманих на підставі проведених досліджень на полігоні. Дані занесено до табл. А.10.

Таблиця А.10 – Дані щодо кількості ТПВ, які захороняються протягом року, вміст біорозкладаємих компонентів у складі ТПВ

Найменування показника	Кількість, тонн/рік	$MWS_{i,j}$ вміст компонента у загальній кількості ТПВ, %	Примітка
1	2	3	4
Загальна кількість ТПВ, які захороняються	120000	X	

Продовження таблиці А.10

1	2	3	4
Біорозкладаємі компоненти ТПВ			
Папір, картон	12600	10,5	
Текстиль	5280	4,4	
Харчові відходи	58080	48,4	
Деревина	1560	1,3	
Садово-паркові відходи	1200	1	
Засоби особистої гігієни	0	-	
Шкіра, гума	3360	2,8	

Значення DOC_j та k_j для біорозкладаємих компонентів у загальній масі ТПВ визначалися за таблицями 5.18 та 5.20.

Таблиця А.11 – Значення DOC_j та k_j для біорозкладаємих компонентів у загальній масі ТПВ

№	Компонент	DOC_j , тоннС/тонн ТПВ	k_j , рік ⁻¹ **
1	Папір, картон	0,40	0,024
2	Текстиль	0,24	0,024
3	Харчові відходи	0,15	0,12
4	Деревина	0,43	0,012
5	Садово-паркові відходи	0,20	0,06
6	Шкіра, гума	0,39	0,012

Фактор корегування утворення метану, який залежить від умов захоронення ТПВ, визначався за таблицею 5.21. MSF_i для даного полігону становить 0,5 – (напіванаеробні контрольовані).

Нормалізуючий множник A визначався за формулою 5.7, дані розрахунків занесено в таблицю А.12.

Таблиця А.12 – Результати визначення нормалізуючого множника A

№	Компонент	A
1	Папір, картон	0,9887
2	Текстиль	0,9887
3	Харчові відходи	0,9429
4	Деревина	0,9946
5	Садово-паркові відходи	0,9712
6	Шкіра, гума	0,9946

Емісія метану зі звалища або полігону визначається як сума обсягів метану, який генерується при розкладанні компонентів ТПВ, здатних до біодеградації.

Результати розрахунків обсягів викидів метану та інших забруднюючих речовин, який виділяються у атмосферу з Роганського полігону ТПВ та ПВ, представлено в таблицях А.13 та А.14.

Таблиця А.13 – Визначення обсягів викидів метану, який виділяється у атмосферу з Роганського полігону ТПВ та ПВ

№	Компоненти в складі ТПВ	kj	A	DOC _j	DOC _F	F	16/12	MCF _i	L _{0j}	t	x	MWS _i	MWS _{i,j} %	e ^{-k*(t-x)}	Q(t), Т
1	Папір, картон	0,024	0,9887	0,4	0,5	0,5	1,33	0,5	0,067	1	0	120000	10,5	0,976	1941,08
2	Текстиль	0,024	0,9887	0,24	0,5	0,5	1,33	0,5	0,040	1	0	120000	4,4	0,976	488,04
3	Харчові відходи	0,12	0,9429	0,15	0,5	0,5	1,33	0,5	0,025	1	0	120000	48,4	0,887	14533,61
4	Деревина	0,012	0,9946	0,43	0,5	0,5	1,33	0,5	0,071	1	0	120000	1,3	0,988	131,52
5	Садово-паркові відходи	0,06	0,9712	0,2	0,5	0,5	1,33	0,5	0,033	1	0	120000	1	0,942	218,95
6	Шкіра, гума	0,012	0,9946	0,39	0,5	0,5	1,33	0,5	0,065	1	0	120000	2,8	0,988	256,92

Сума 17570,13т/рік

Таблиця А.14 – Визначення обсягів викидів інших забруднюючих речовин, які виділяються у атмосферу з полігону ТПВ

№ з/п	Найменування компонента звалищного газу	Співвідношення компонент/метан, k_i	Емісія парникових газів та забруднюючих речовин у атмосферне повітря, тонн/рік
1	Метан	1	17570,13
2	Діоксид вуглецю	0,8454	14853,79
3	Толуол	0,0137	240,71
4	Аміак	0,0101	177,46
5	Ксилол	0,0084	147,59
6	Вуглецю оксид	0,0048	84,34
7	Азоту діоксид	0,0021	36,90
8	Формальдегід	0,0018	31,63
9	Етилбензол	0,0018	31,63
10	Ангідрид сірчаний	0,0013	22,84
11	Сірководень	0,0005	8,79