

ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ З МІСЦЬ ВИДАЛЕННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА ЗАХОДИ ЩОДО ЇХ СКОРОЧЕННЯ

І. В. САТІН, кандидат технічних наук, доцент,

<https://orcid.org/0000-0002-2028-9791>

Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», Київський національний університет будівництва і архітектури

E-mail: satin@nikti.org.ua

Д. В. КУЦИЙ, кандидат технічних наук, <https://orcid.org/0000-0002-0791-7298>

Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

E-mail: dkutsyi@gmail.com

[https://doi.org/10.31548/dopovid.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovid.3(109).2024.003)

Анотація. *Захоронення побутових відходів на полігонах та звалищах призводить до емісій парникових газів. Зазвичай вони розраховується на основі методики МГЕЗК, що враховує кількість та хімічний склад побутових відходів, а також кліматичні особливості регіону. Однак, на емісії парникових газів значно впливають технічні і експлуатаційні характеристики полігонів та звалищ. Їх дозволяє враховувати Українська модель газоутворення, яка адаптована до локальних умов.*

Метою даної роботи був розрахунок емісій парникових газів від визначених класів полігонів та звалищ з урахуванням їх специфічних характеристик на основі Української моделі газоутворення, а також розробка заходів щодо їх скорочення. Для цього виконана класифікація полігонів та звалищ за площею, що опосередковано характеризує їх місткість та місце розміщення. За результатами класифікації визначено, що з понад 7 тис. полігонів та звалищ України біля 320 класифіковані як великі. Вони займають понад третину від загальної площі полігонів та звалищ України та вміщують до 84% захоронених побутових відходів. Великі полігони та звалища є пріоритетними для досліджень емісій парникових газів.

За результатами розрахунку емісії парникових газів встановлено, що їх загальний обсяг становить 5 833,5 тис. тСО₂. Він на 32,9% менше за аналогічні оцінки згідно з методикою МГЕЗК, що пояснюється вищою точністю Української моделі газоутворення та її параметрів. Із загального обсягу емісій парникових до 40% потенційно може бути скорочено за рахунок продовження розвитку систем збирання біогазу, якими фактично було скорочено біля 10% в 2021 році. Даний потенціал може бути збільшений в половину і скорочення емісій парникових газів потенційно може досягати до 60% від їх загальних емісій з полігонів та звалищ. Для цього, наряду з системами збирання біогазу, доцільно здійснювати рекультивацию полігонів та звалищ. Але рекультивация є технічно

Сатін І. В., Куций Д. В.

складним і вартісним заходом, а обґрунтування її застосування може бути предметом подальших досліджень.

Ключові слова: біогаз; звалище; метан, полігон

Актуальність. Захоронення побутових відходів на полігонах та звалищах призводить до емісій парникових газів. Зазвичай вони розраховується на основі методики МГЕЗК, що враховує кількість та хімічний склад побутових відходів, а також кліматичні особливості регіону. Однак, на емісії парникових газів значно впливають технічні і експлуатаційні характеристики полігонів та звалищ. Їх дозволяє враховувати Українська модель газоутворення, яка адаптована до локальних умов.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В Україні за 2021 р. було зібрано 10 466,3 тис. т побутових відходів (ПВ), з яких 9 434,9 тис. т (90,1 %) потрапили на полігони та звалища, 776,1 тис. т (7,4 %) – на сміттєпереробні підприємства, 135,6 тис. т (1,3 %) – на заготівельні пункти вторинної сировини, 110,9 тис. т (1,1 %) – на сміттєспалювальні заводи (м. Київ) та 8,8 тис. т (0,1 %) – на ділянки компостування. Неперероблюваний залишок після оброблення ПВ та інші відходи (ПВ від ліквідації несанкціонованих звалищ тощо) у кількості приблизно 982,7 тис. т також додатково були захоронені на полігонах та звалищах. Таким чином, загальна кількість ПВ, що були захоронені на полігонах та звалищах у 2021 р. становила 10 417,6

тис. т (Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2021 рік, 2022).

Продовження практики захоронення ПВ на полігонах та звалищах призводить до зростаючого навантаження на довкілля за рахунок утворення емісій метану, які спричиняють зміну клімату. Емісії метану від захоронення ПВ оцінювались в різні періоди з використанням як спрощених, так й більш складних методик. Зокрема, за спрощеною оцінкою (Юрченко та ін., 2019) загальні емісії метану від захоронення ПВ в перерахунку з біогазу (при густині метану 0,7168 кг/Нм³ та вмісті 50%) можуть становити 405,0 тис. т, що еквівалентно (при потенціалі потепління 25 тСО₂/тСН₄) 10 124,8 тис. тСО₂. Згідно з оцінкою енергетичного потенціалу біогазу із полігонів ПВ (Гелетука, 2023), виконаною на основі спрощеної методики Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК), теоретичні емісії метану від захоронення ПВ можуть складати 452,0 тис. т, що еквівалентно 11 299,7 тис. тСО₂. Авторами (Шмарін та ін., 2014) на основі методики МГЕЗК з уточненими коефіцієнтами розраховано, що емісії метану від захоронення ПВ можуть становити

Сатін І. В., Куций Д. В.

272,8 тис. т, що еквівалентно 6 820,0 тис. тCO₂.

У свою чергу, результати офіційної інвентаризації парникових газів (ПГ) в Україні (Ukraine's greenhouse gas inventory 1990-2021. annual national inventory report for submission under the united nations framework convention on climate change and the kyoto protocol, 2023), які виконані за методикою МГЕЗК, показують, що емісії метану від захоронення ПВ за останні три десятиліття мають тенденцію до зростання в середньому на 0,9 % за рік. У 2021 р. вони могли становити загалом 346,7 тис. т, що еквівалентно біля 8 688,2 тис. тCO₂. Однак, починаючи з 2009 р. в Україні розвиваються системи збирання та утилізації біогазу (Юрченко та ін., 2019; Степаненко & Проскурня, 2009; Жук та ін., 2012; Мазур & Гонтарук, 2022; Тітова, 2023). Наразі вони введені в експлуатацію на 27 (НКРЕКП, 2022) та будуються на 2 полігонах та звалищах. З урахуванням частки метану, утилізованого за рахунок діючих систем збирання та утилізації біогазу, його фактичні емісії в Україні за 2021 р. становили 307,9 тис. т (88,8 % від загальних емісій метану), що еквівалентно 7 669,7 тис. тCO₂ (Ukraine's greenhouse gas inventory 1990-2021. Annual national inventory report for submission under the united nations framework convention on climate change and the Kyoto protocol, 2023).

Варто зазначити, що вищенаведені методики дозволяють оцінити або розрахувати емісії метану від захоронення ПВ переважно на основі кількості та хімічного складу ПВ, а також кліматичних особливостей регіону. При цьому, вони недостатньо враховують вік відходів та технічні і експлуатаційні характеристики полігонів та звалищ, які можуть значно впливати на утворення метану. Крім того, в місцевій практиці часто застосовується уточнена методика оцінки утворення біогазу – Українська модель газоутворення (Ukraine landfill gas model - users manual | global methane initiative, б. д.), параметри якої адаптовані до умов України і дозволяють прогнозувати емісії метану від полігонів та звалищ з вищою на біля 30 % точністю, що підтверджено дослідженнями (Резакова та ін., 2011).

Метадослідження. Метою даної роботи був розрахунок емісій метану та ПГ від захоронення ПВ на визначених класах полігонів та звалищ з урахуванням їх специфічних характеристик на основі Української моделі газоутворення, а також розробка заходів щодо скорочення таких емісій. Для цього застосовувались статистичні обсяги захоронення відходів (Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2021 рік, 2022), які також використані для інвентаризації ПГ (Ukraine's greenhouse gas inventory

Сатін І. В., Куций Д. В.

1990-2021. annual national inventory report for submission under the united nations framework convention on climate change and the kyoto protocol, 2023), та проводився детальний аналіз даних щодо полігонів та звалищ, їх класифікація і оцінка технічної оснащеності.

Матеріали і методи дослідження.

Об'єктами дослідження були полігони та звалища в розрізі областей України. Основні дані про них наведені в реєстрах місць видалення відходів (МВВ), які регулярно ведуться обласними органами виконавчої влади згідно з Постановою КМУ від 03.08.1998 р. №1216. Сукупний аналіз цих реєстрів показав, що вони містять інформацію про 5 072 полігони та звалища станом на 2021 р. В цей час, за даними Мінрегіону (Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2021 рік, 2022) в Україні нараховувалось 5 969 полігонів та звалищ у 2021 р. Така різниця пояснюється різними підходами щодо ведення реєстрів МВВ і збирання даних. В реєстрах здебільшого наведена інформація про полігони та звалища, які мають паспорт та/або відповідають вимогам державних будівельних норм (ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування», б. д.). Дані Мінрегіону містять інформацію як про паспортизовані, так і не паспортизовані полігони та звалища.

З огляду на це, дані про полігони та звалища з реєстрів МВВ були доповнені даними Мінрегіону та інформацією з Регіональних планів управління відходами, що розробляються обласними органами виконавчої влади згідно з Постановою КМУ від 30.06.2023 р. №667. Таким чином, була сформована бази даних для цієї роботи, яка включала інформацію про 7 119 полігонів та звалищ України. За площею, яка певною мірою характеризує місткість полігону та визначає його місце розміщення, вони були розділені на наступні класи:

- Малі полігони та звалища площею до 1 га, які характерні малим та середнім сільським населеним пунктам. Їм властива глибина до 5 м (зазвичай 2-3 м), а також відсутність пересипки та ущільнення відходів і будь-яких інженерних систем збирання фільтрату та біогазу;

- Середні полігони та звалища площею від 1 до 5 га включно, які характерні великим сільським населеним пунктам, малим та середнім селищам і малим містам. Їм властива відсутність пересипки та ущільнення відходів і будь-яких інженерних систем збирання фільтрату та біогазу. Однак їх глибина в більшості випадків може перевищувати 5 м;

- Великі полігони та звалища площею понад 5 га, які характерні великим селищам, середнім та великим містам. Їм властива глибина

Сатін І. В., Куций Д. В.

понад 5 м (зазвичай від 10 м) і, подекуди, наявність ущільнення відходів. Однак в переважній більшості випадків вони не мають регулярної пересипки відходів та/або інженерних систем збирання фільтрату та біогазу.

За результатами прийнятої класифікації, із усіх 7 119 полігонів та

звалищ України 4 854 од. (68,2 %) відносяться до малих, 1 945 од. (27,3 %) – до середніх і лише 320 од. (4,5 %) – до великих полігонів та звалищ (рис. 1). Для кожної області розподіл класів полігонів та звалищ має свою специфіку.

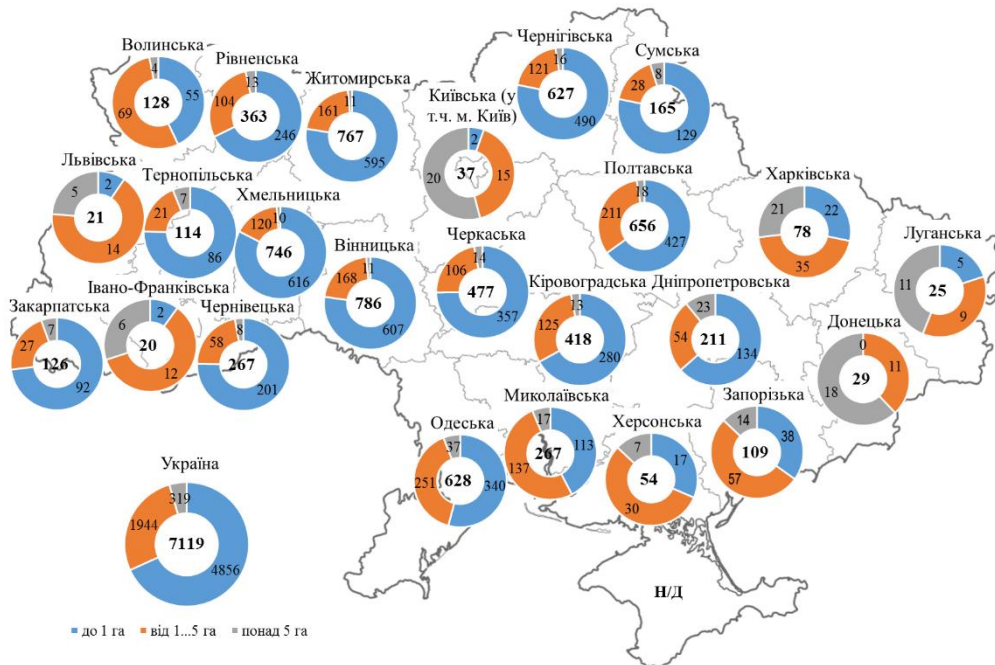


Рис. 1. Кількість полігонів та звалищ по областях України в 2021 р., од.

Найбільша кількість великих полігонів та звалищ розміщена в областях з густонаселеними міськими агломераціями (Донецька, Луганська, Львівська, Київська, Харківська). До них додається область, що охоплює гірський район України (Івано-Франківська), де, очевидно, є обмеження щодо територій проживання населення, які призводять до його скупчення, та/або територій, які доступні для розміщення полігонів та звалищ.

Переважаюча кількість середніх полігонів та звалищ розміщена в областях із довгою прибережною смугою (Запорізька, Миколаївська, Херсонська). Вздовж прибережної смуги цих областей, вірогідно, може проживати переважна частина населення, або його кількість може тимчасово збільшуватись в теплий період року через наплив туристів, що призводить до збільшення розмірів полігонів та звалищ. Виключенням з цієї категорії є Волинська область, де

Сатін І. В., Куций Д. В.

інформація про всі наявні полігони та звалища частково відсутня.

В решті областей переважаючою кількістю є малі полігони та звалища.

Загальна площа усіх полігонів та звалищ України оцінюється в 9 608 га, з яких 2 600 (27,1 %) припадає на малі, 3 868 га (40,2 %) – на середні та 3 140 га (32,7 %) – на великі полігони та звалища (рис. 2). Можна заключити, що найменша кількість

великих полігонів та звалищ (частка 4,5 %) сумарно займають понад третину (частка 32,7 %) від загальної площі полігонів та звалищ України. В цей же час, найбільша кількість малих полігонів та звалищ ПВ (частка 68,2 %) сумарно займає найменшу площу (частка 27,1 %) від загальної площі полігонів та звалищ України.

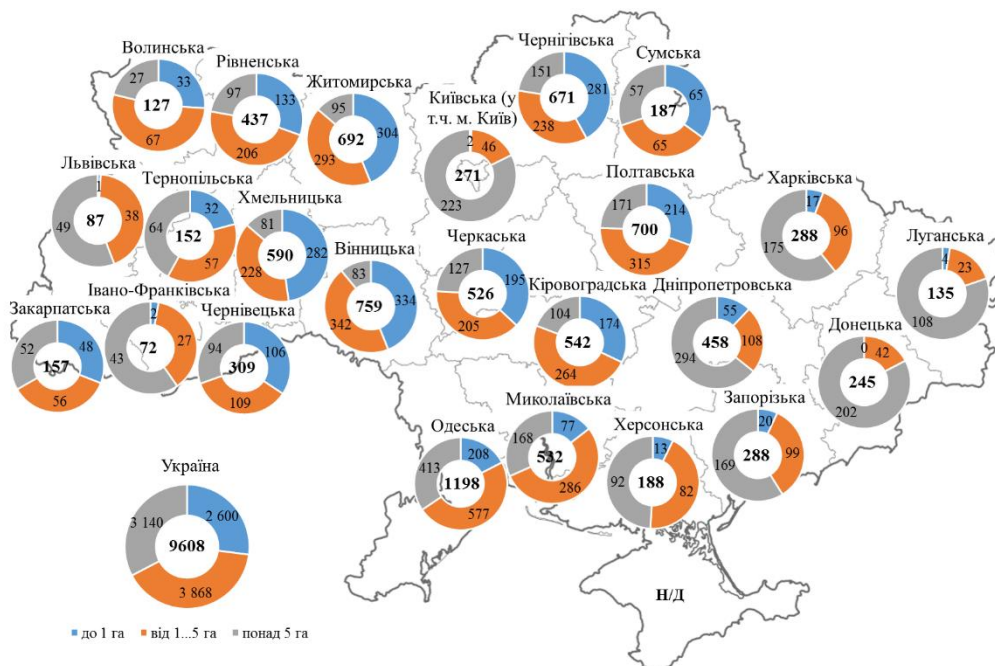


Рис. 2. Площа полігонів та звалищ по областях України в 2021 р., га

У регіональному розрізі, найбільша площа зайнята великими полігонами та звалищами в областях з найбільшими міськими агломераціями України (Донецька, Київська, Луганська). Дещо менша, але переважаюча площа зайнята великими полігонами та звалищами в областях, де є великі міські агломерації та/або значна кількість сільського населення і територіальні особливості (Дніпропетровська,

Запорізька, Івано-Франківська, Львівська, Харківська). В цих областях частка великих полігонів та звалищ ПВ балансується середніми і малими.

У решті областей України розподіл за площею полігонів та звалищ наближено відповідає загальнодержавним показникам. Такий розподіл може характеризуватися відносно рівномірним розподілом міського та

Сатін І. В., Куций Д. В.

сільського населення та розвитком мережі сільських населених пунктів.

Загальні обсяги накопичення ПВ на полігонах та звалищах України відображені в реєстрах МВВ. Щорічно, через надходження нових партій ПВ, ця інформація має оновлюватись за результатами спостережень та контрольних замірів, що виконуються обласними органами виконавчої влади. Але, фактично більшість обласних органів виконавчої влади здійснюють не регулярні оновлення інформації і пояснюють це браком технічних можливостей.

Для визначення об'єктивних загальних обсягів накопичення та річних обсягів захоронення ПВ було зроблене припущення про те, що частки від загального обсягу накопичення ПВ на різних класах полігонів за даними реєстрів МВВ характеризують довготривалу

динаміку розподілу надходження ПВ на полігони та звалища України. Тому, шляхом множення цих часток на дані Мінрегіону (Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2021 рік, 2022) була виконана оцінка і перерозподіл між різними класами полігонів та звалищ загальних обсягів накопичення та річних обсягів захоронення ПВ.

Як зазначалось вище, на полігонах та звалищах України було захоронено 10 417,6 тис. т ПВ в 2021 р. З них, за перерозподілом, 253,1 тис. т (2,5 %) могло бути захоронено на малих, 1 661,1 тис. т (15,9 %) – на середніх та 8 503,4 тис. т (81,6 %) – на великих полігонах та звалищах (рис. 3). Тобто, лівова частка ПВ в Україні захоронюється на малій кількості великих полігонів та звалищ, які сумарно займають понад третину від загальної площі полігонів та звалищ України.

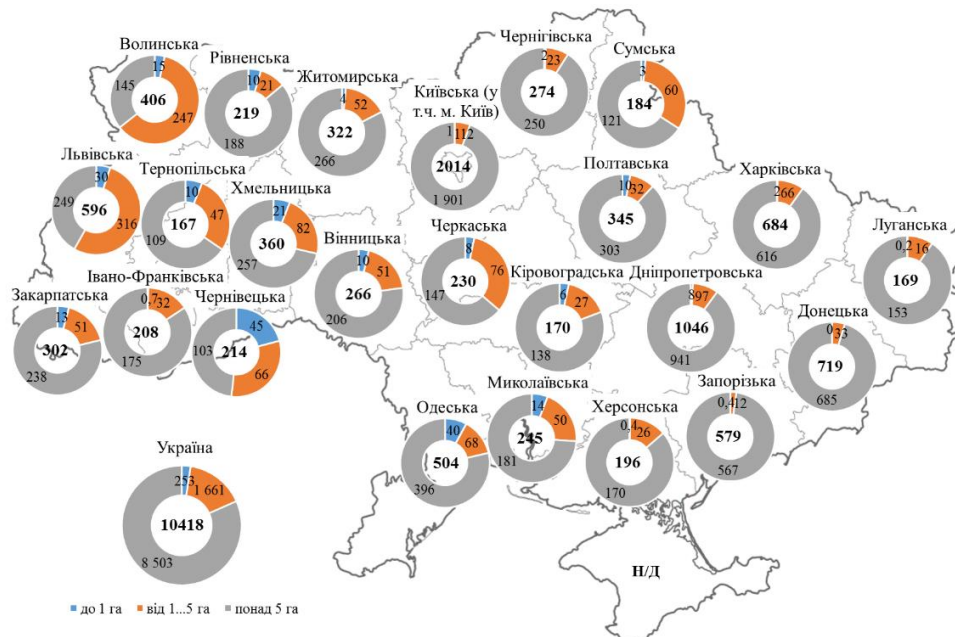


Рис. 3. Річні обсяги захоронення ПВ на полігонах та звалищах по областях України в 2021 р., тис. т.

Сатін І. В., Куций Д. В.

У регіональному розрізі, основна маса ПВ в 2021 р. захоронювалась на великих полігонах та звалищах північних, північно-східних, східних, південно-східних і південних областей України (за виключенням Сумської області). У північно-західних, західних, південно-західних та центральних областях України (за виключенням Дніпропетровської області) до половини ПВ захоронювалось на середніх і малих полігонах та звалищах. Така регіональна специфіка може пояснюватись практикою організації систем збирання відходів, розподілом населення, розвитком промисловості, розмірами населених пунктів та доступністю великих полігонів та звалищ.

Наприклад, в Дніпропетровській області є великі міські агломерації з великими полігонами та звалищами, де захоронюється 90,0% ПВ. Лише 9,3% ПВ області потрапляє на середні полігони та звалища невеликих міст та селищ. У цей же час, сільське населення Дніпропетровської області або не забезпечене належною

системою збирання відходів або не має власних малих полігонів та звалищ. Воно змушене вивозити відходи на великі і середні полігони та звалища сусідніх населених пунктів.

Абсолютна протилежна ситуація в Черкаській області. У цій області до третини ПВ (тобто за виключенням відходів великих міст Золотоноша, Канів, Умань, Черкаси) вивозиться на середні полігони та звалища.

Загалом на полігонах та звалищах України накопичено 252,8 млн. т ПВ станом на 2021 р. З них, за перерозподілом, 5,6 млн. т (2,2 %) накопичені на малих, 35,2 млн. т (13,9 %) – на середніх та 212,0 млн. т (83,9 %) – на великих полігонах і звалищах (рис. 4). З огляду на те, що основна маса ПВ накопичена на великих полігонах та звалищах, сумарна площа яких складає понад третину від загальної площі полігонів та звалищ України, вони є досить масивними і старими об'єктами, які мають найвищий пріоритет досліджень з точки зору обсягів емісій метану.

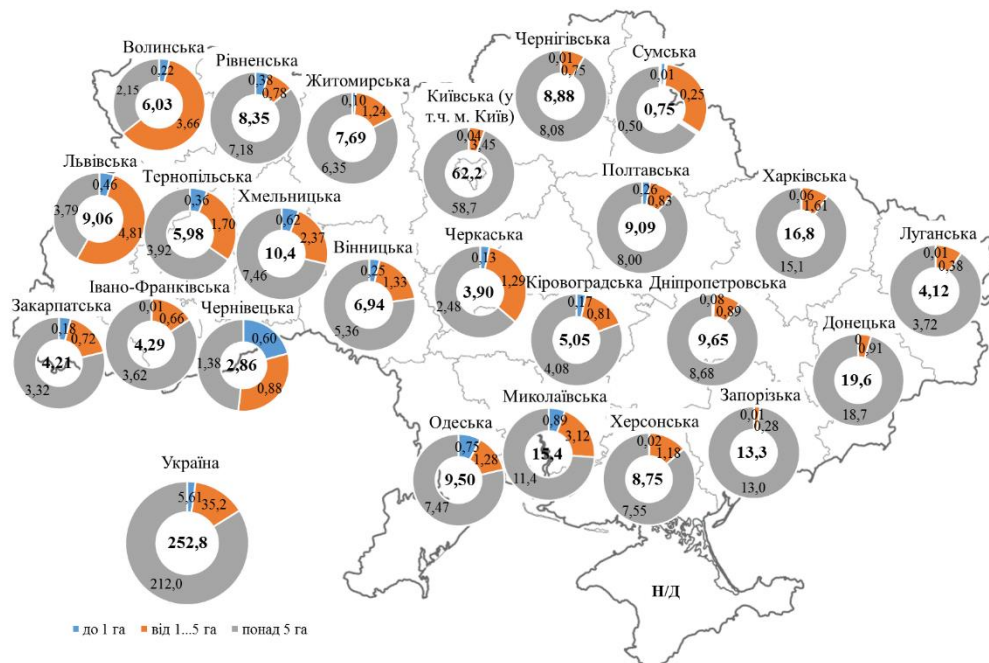


Рис. 4. Загальні обсяги накопичення ПВ на полігонах та звалищах по областях України в 2021 р., млн. т.

Найбільша кількість ПВ накопичена на великих полігонах та звалищах областей з найбільшими міськими агломераціями (Донецька, Київська, Харківська). Виключенням з них є Львівська область, де найбільший полігон або звалище обласного центру припинило експлуатацію в 2016 році (не обліковується) і наразі рекультивується, а його обсяги накопичення відходів не були враховані.

Метан є частиною біогазу, який утворюється в тілі полігонів та звалищ внаслідок фізико-хімічних процесів розкладу органічної частини захоронених ПВ. Під надлишковим тиском газотворення біогаз потрапляє в атмосферу з тіла полігонів та звалищ, а разом з ним відбувається емісія метану. З огляду

на це, методика дослідження емісій метану базується на: 1) прогнозуванні кількості біогазу та 2) розрахунку емісій або скорочення емісій ПГ від потрапляння або уникнення потрапляння метану в атмосферу з кожного класу полігонів та звалищ. Дослідження емісій метану здійснювався за двома сценаріями: базовий та проектний.

У базовому сценарії передбачалось, що увесь біогаз, утворений в тілі полігону та звалища, потрапляє в атмосферу. Для прогнозування кількості утвореного біогазу застосовувалась Українська модель газотворення. В основі цієї моделі лежить відоме рівняння методу затухання першого порядку, яке доповнене коефіцієнтом врахування пожеж та виражене наступною залежністю (Ukraine landfill gas model

Сатін І. В., Куций Д. В.

- users manual | global methane initiative, б. д.):

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^l 2k \cdot L_0 \cdot \left[\frac{M_i}{10} \right] \cdot (e^{-kt_{ij}}) \cdot (MCF) \cdot F, \tag{1}$$

де Q_{LFG} – витрата утвореного біогазу, $m^3/год$; i – крок за шкалою часу 1,0 рік; n – розрахунковий рік або рік початку захоронення відходів; j – крок за шкалою часу 0,1 рік; k – швидкість утворення метану, $1/рік$; L_0 – потенціал утворення метану, $m^3/т$; M_i – маса відходів, захоронених на полігоні та звалищі протягом часу i , $т$; t_{ij} – вік j маси відходів, захоронених на полігоні та звалищі протягом часу i ; MCF – коефіцієнт корекції метану та F – коефіцієнт врахування пожеж.

Українська модель газоутворення багатокomпонентна.

1. Морфологічний склад ПВ в Україні, %

Найменування компоненту	Категорія відходів	Номер категорії	Значення
Харчові відходи	Швидкий розклад	I	31,84
Інші органічні відходи			1,40
Садово-паркові відходи	Помірно-швидкий розклад	II	3,64
Папір та картон	Помірно-повільний розклад	III	13,72
Текстиль			14,89
Гума	Повільний розклад	IV	1,86
Деревина			1,75
Інші неорганічні відходи	Не розкладаються	-	41,90

Основними параметрами рівняння (1) є швидкість утворення метану, потенціал утворення метану, маса відходів та вік маси відходів.

Швидкість утворення метану залежить від співвідношення

Тобто, витрата утвореного біогазу розраховується на основі індивідуальних параметрів рівняння (1), які характерні чотирьом категоріям відходів. Для визначення категорій відходів застосовувався їх морфологічний склад (Ukraine’s greenhouse gas inventory 1990-2021. Annual national inventory report for submission under the united nations framework convention on climate change and the Kyoto protocol, 2023), що наведений в таблиці 1. Він враховує їх багаторічні зміни і відображає середні значення за декілька десятиліть.

середньорічного рівня опадів до випаровування з поверхні суші і характеризує швидкість розкладу ПВ. На основі місцевих даних клімату в Українській моделі газоутворення уточнені значення цього параметру в

Сатін І. В., Куций Д. В.

розрізі областей України (Ukraine landfill gas model - users manual | global methane initiative, б. д.), що наведені в таблиці 2.

2. Рекомендовані значення швидкості утворення метану, 1/рік

Номер категорії	Найменування області			
	Луганська Херсонська	АР Крим Запорізька Кіровоградська Миколаївська Одеська	Вінницька Волинська Дніпропетровська Донецька Київська Кіровоградська Рівненська Сумська Харківська Черкаська Чернігівська	Житомирська Закарпатська Івано- Франківська Львівська Полтавська Тернопільська Хмельницька
I	0,110	0,120	0,140	0,150
II	0,055	0,060	0,070	0,075
III	0,022	0,024	0,028	0,030
IV	0,011	0,012	0,014	0,015

Потенціал утворення метану залежить від хімічного складу відходів і характеризує питому кількість метану, який загалом може утворюватися при розкладі 1 т ПВ. Даний параметр визначається на основі кількості органічного вуглецю, що міститься у ПВ, та його частки, яка переходить в метан (Матвеев & Куций, 2016). Рекомендовані значення цього параметру розраховані в Українській моделі газоутворення (Ukraine landfill gas model - users manual | global methane initiative, б. д.) та наведені в таблиці 3. Вони прийняті однаковими для всіх областей України на основі припущення про однаковий хімічний склад ПВ.

3. Рекомендовані значення потенціалу утворення метану, м³/т

Номер категорії	Значення
I	69
II	126
III	214
IV	201

Маса відходів, що накопичені на полігонах та звалищах України, прийнята на основі даних Мінрегіон (див. рис. 4). Для визначення щорічних обсягів захоронення ПВ (розбивки маси відходів) за період експлуатації полігонів та

Сатін І. В., Куций Д. В.

звалищ застосовувалось значення річних обсягів захоронення ПВ в 2021 р. (див. рис. 3) та здійснювався прогноз за попередні періоди з використанням коефіцієнту приросту, який варіювався в широких межах.

Вік маси відходів оцінений з моменту початку експлуатації полігону та звалища. Початок експлуатації оцінювався для класів полігонів та звалищ України шляхом усереднення їх років введення в експлуатацію, визначених на основі даних Мінрегіон.

В Українській моделі газоутворення також застосовується коефіцієнт корекції метану. Він враховує характеристики полігонів та звалищ, які впливають на окислення утвореного метану. МГЕЗК за такими характеристиками розділила полігони та звалища на декілька основних типів, для яких визначені характерні їм значення коефіцієнту корекції метану (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste, 2006), що наведені в таблиці 4.

4. Типові значення коефіцієнту корекції метану

Характеристика полігону або звалища	Значення
Контрольований анаеробний. Відходи складуються в межах окремих карт, які мають протипожежну систему, а також наявна хоча б одна з перерахованих характеристик: щоденне покриття, чи пошарова пересипка, чи механічне ущільнення відходів.	1,0
Контрольований напіванаеробний. Відходи складуються в межах окремих карт, які мають протипожежну систему, а також наявна хоча б одна з перерахованих характеристик: щоденне покриття відходів негерметичним матеріалом, чи система вентиляції біогазу, чи система відводу фільтрату.	0,5
Не контрольований глибокий або з високим рівнем фільтрату. Глибина відходів перевищує 5 м і практика експлуатації не відповідає вищеописаним критеріям.	0,8
Не контрольований неглибокий. Глибина відходів не перевищує 5 м і практика експлуатації не відповідає вищеописаним критеріям.	0,4

З огляду на прийняту класифікацію полігонів та звалищ України та їх характеристики, значення коефіцієнту корекції метану прийнято 0,4 для малих та 0,8 для середніх і великих полігонів та звалищ. Пояснюється це тим, що малі полігони та звалища не класифікуються як контрольовані інженерні об'єкти, в той час як переважна більшість великих полігонів та звалищ не відповідають контрольованим анаеробним об'єктам, зокрема через відсутність регулярної

Сатін І. В., Куций Д. В.

пересипки. Прийняті значення коефіцієнту корекції метану залишалися незмінними між областями України.

Специфічний коефіцієнт врахування пожеж в Українській моделі газоутворення показує, що в частині відходів, які вигоріли внаслідок пожежі, утворення біогазу відбувається з меншою інтенсивністю, або не відбувається взагалі. Він розраховується як добуток площі відходів, що вигоріли, помноженої на степінь впливу пожежі, яка визначена як: слабка (0,3), середня (0,7), сильна (1,0). Однак оцінити середню площу відходів, що вигоріли, та степінь впливу пожежі для визначених класів полігонів та звалищ неможливо через відсутність інформації. При прогнозуванні утворення біогазу даний параметр не застосовувався.

Для розрахунку емісій ПГ від потрапляння метану в атмосферу з кожного класу полігонів та звалищ в базовому сценарії застосовувалось наступне рівняння (CDM. Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site, 2011):

$$BE_{CH_4} = Q_{LFG} \cdot \rho_{CH_4} \cdot (1-f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot (1-OX), \quad (2)$$

де BE_{CH_4} – базові емісії ПГ з полігонів та звалищ за визначений період, tCO_2 ; ρ_{CH_4} – густина метану, $0,7168 \text{ кг/Нм}^3$; f – вміст метану в біогазі, 50%; GWP_{CH_4} – глобальний потенціал потепління метану, $25 \text{ тCO}_2/\text{тCH}_4$; OX – коефіцієнт окислення метану у шарі покриття полігону та звалища.

Під час розрахунку емісій ПГ на основі рівняння (2) коефіцієнт окислення метану не застосовувався, оскільки фактично більшість полігонів та звалищ України залишаються непокритими і відходи прямо контактують з атмосферним повітрям, що дозволяє вільний вихід метану без окислення у верхніх шарах покриття.

У проектному сценарії передбачалось, що частина від утвореного біогазу може бути відібрана і в послідуєчому утилізована з скороченням викидів метану. Для цього визначались та аналізувались заходи щодо видалення і

Сатін І. В., Куций Д. В.

утилізації біогазу, які можливо застосовувати на виділених класах полігонів та звалищ України.

В частині заходів щодо видалення біогазу, визначалась можливість улаштування систем збирання біогазу (Юрченко та ін., 2019; Степаненко & Проскурня, 2009; Жук та ін., 2012; Мазур & Гонтарук, 2022; Тітова, 2023), способи підвищення їх ефективності (Barlaz та ін., 2009; Oonk, 2012; Duan та ін., 2022; Giordano та ін., 2024) і альтернативи щодо уникнення або скорочення емісій метану. Варто відмітити, що наразі системи збирання біогазу рекомендовані чинними державними-будівельними нормами (ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування», б. д.) та нормативно-правовими актами (Рекомендації з удосконалення експлуатації діючих полігонів та звалищ твердих побутових відходів, 2006; Правила експлуатації полігонів побутових відходів, 2010). З 1 січня 2030 р. вони стануть обов'язковими для кожного полігону та звалища згідно Закону України «Про управління відходами» від 20.06.2022 р. №2320-IX.

За результатами цього аналізу визначено, що малі полігони та звалища технічно не придатні до улаштування систем збирання біогазу, оскільки мають дуже малу глибину. Основним заходом щодо скорочення емісій метану з цього класу полігонів та звалищ може бути їх засипка ґрунтом та розвиток рослинності, які здатні частково окислити потік метану (Chanton та ін., 2009). Однак, оцінити скорочення емісій від розвитку природного біопокриття не представляється можливим. Альтернативним заходом є санація (очищення від відходів) територій малих полігонів та звалищ із сортуванням та вивезенням залишків ПВ на регіональні полігони. При цьому, будь який з вище перелічених заходів буде призводити до незначних скорочень емісій метану через застосування низько ефективних біопокриттів або природнього окислення відсортованих ПВ. Тому, прогнозування збирання біогазу на малих полігонах та звалищах не здійснювалось.

Середні полігони та звалища характеризуються глибиною, якої достатньо для улаштування горизонтальних систем збирання біогазу. Для роботи таких

Сатін І. В., Куций Д. В.

систем і зменшення інфільтрації повітря в тіло полігону та звалища над ними необхідно забезпечити нарощування додаткового шару ПВ або улаштування шару рекультивації. З огляду на Національну стратегію управління відходами, що затверджена Розпорядженням КМУ від 08.11.2017 р. №820-р, кількість полігонів та звалищ будь-яких класів має бути зменшена. Продовження експлуатації середніх полігонів та звалищ і збільшення висоти ПВ не передбачається. Натомість найбільш вірогідним залишається єдиний захід – їх рекультивація. З огляду на значну вартість комплексу робіт рекультивації і значні площі середніх полігонів та звалищ, економічно доцільним буде виконання часткової рекультивації, що включає вирівнювання поверхні полігону та звалища і улаштування захисного екрану із ґрунту (рис. 5а).

Великі полігони та звалища мають технічні характеристики, достатні для продовження існуючої практики улаштування вертикальних або горизонтальних систем збирання біогазу (рис. 5б). Ефективність таких систем може бути підвищена за рахунок рекультивації (рис. 5в), потреба у якій висока через значний вплив цього класу полігонів та звалищ на довкілля. Рекультивація полігонів та звалищ також передбачена Національною стратегією управління відходами. Тому, для великих полігонів та звалищ прогнозування кількості зібраного біогазу здійснювалось для двох варіантів заходів: спорудження систем збирання біогазу на діючих і рекультивованих полігонах та звалищах.

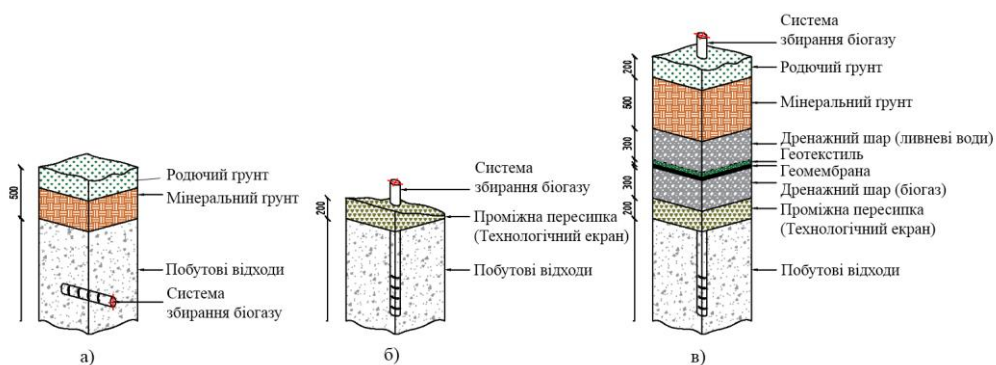


Рис. 5. Заходи щодо збирання біогазу і скорочення емісій метану з полігонів та звалищ України

Сатін І. В., Куций Д. В.

Для розрахунку кількості біогазу, що може бути видалений з тіла полігону та звалища системою збирання біогазу у проектному сценарії, застосовувалось наступне рівняння:

$$Q'_{LFG} = Q_{LFG} \cdot K_C, \quad (3)$$

де Q'_{LFG} – витрата зібраного біогазу, м³/год; K_C – ефективність системи збирання біогазу.

Визначальним параметром в рівнянні (3) є ефективність системи збирання біогазу. Згідно з Українською моделлю газоутворення значення цього параметру рекомендується розраховувати на основі факторів, які найбільше впливають на роботу системи збирання біогазу, а саме: розмірів (глибини) полігонів та звалищ, їх інженерних характеристик і практики експлуатації, а також степені охоплення системою збирання біогазу (Ukraine landfill gas model - users manual | global methane initiative, б. д.). Для цього застосовується наступне рівняння:

$$K_C = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7, \quad (4)$$

де K_1 – коефіцієнт глибини полігону та звалища; K_2 – коефіцієнт охоплення площі полігону та звалища системою збирання біогазу; K_3 – коефіцієнт верхнього шару засипки полігону та звалища; K_4 – коефіцієнт нижнього протифільтраційного екрану полігону та звалища; K_5 – коефіцієнт наявності карт складування відходів; K_6 – коефіцієнт ступені ущільнення відходів; K_7 – коефіцієнт наявності фільтрату.

Коефіцієнт K_1 розраховується в залежності від середньої глибини полігону та звалища. Ефективний збір біогазу може здійснюватися на полігоні та звалищі глибиною більше 10 м. Якщо глибина полігону та звалища менше вказаного значення, то на кожний метр зменшення глибини від 10 м застосовується понижуючий фактор 5%. На основі середньої площі та загальних обсягів

Сатін І. В., Куций Д. В.

накопичення ПВ, оцінено, що середні полігони та звалища мають глибину біля 6,5 м, а великі полігони та звалища – біля 14,0 м.

Коефіцієнт K_2 розраховується як відношення площі полігону та звалища, охопленої системою збирання біогазу, до загальної площі полігону та звалища, занятої ПВ. Значення коефіцієнту охоплення системою збирання біогазу приймалися на основі досвіду їх проектування для середніх полігонів та звалищ, а також для двох варіантів великих полігонів та звалищ, а саме: збирання біогазу на діючих і рекультивованих полігонах та звалищах.

Коефіцієнт K_3 розраховується як сума добутків частки площі полігону та звалища і типу його покриття. Згідно з Українською моделлю газоутворення (Ukraine landfill gas model - users manual | global methane initiative, б. д.) розглядаються чотири типи покриття, а саме: остаточна засипка (0,90), проміжна пересипка (0,80), щоденний тимчасовий шар пересипки (0,75) та відходи без покриття (0,50). З урахуванням визначених заходів щодо збирання біогазу, на середніх полігонах та звалищах ПВ передбачено спорудження шару ґрунту по всій їх площі (див. рис. 5а), який може відповідати проміжній пересипці. На великих полігонах та звалищах система збирання біогазу може влаштовуватись в ході їх експлуатації або після рекультивації. Експлуатація передбачає використання проміжної пересипки (див. рис. 5б), яка зазвичай охоплює до половини площі полігону та звалища, а друга половина залишається не покритою. Рекультивація передбачає спорудження остаточного шару засипки на всій площі полігону та звалища (див. рис. 5в).

Коефіцієнт K_4 розраховується виходячи з наявності нижнього протифільтраційного екрану. Він представляє собою фактор дисконтування 5%, якщо такий екран відсутній. Встановлено, що середні полігони та звалища утворились переважно як несанкціоновані МВВ. Вони не мають нижнього протифільтраційного екрану. Великі полігони та звалища збудовані переважно за проектною документацією або виникли в місцях (в глиняних кар'єрах тощо), що мають нижній протифільтраційний екран.

Сатін І. В., Куций Д. В.

Коефіцієнт K_5 розраховується в залежності від практики використання окремих карт для захоронення відходів. Він представляє собою фактор дисконтування 5%, якщо ПВ складуються в межах полігону та звалища хаотично без використання окремих карт. Хаотична практика складування відходів характерна середнім полігонам та звалищам, які мають малу площу і заповнюються в залежності від наявності доступу і вільного місця. Великі полігони та звалища часто мають окремі карти, які експлуатуються по чергово.

Коефіцієнт K_6 розраховується в залежності застосування важкої техніки (котків-ущільнювачів) для ущільнення відходів на полігоні та звалищі. Він представляє собою фактор дисконтування 3%, якщо така техніка не застосовується. Фактична практика експлуатації показує, що переважна більшість полігонів різних класів не мають або обмежено застосовують наявну важку техніку для ущільнення відходів.

Коефіцієнт K_7 розраховується в залежності від наявності та частоти появи фільтрату на тілі полігону та звалища. Він представляє собою фактор дисконтування, який змінюється від 10 до 18% (більше значення відповідає більш вологому клімату) у випадку утворення калюж фільтрату на тілі полігону та звалища після опадів, або від 20 до 36% у випадку наявності калюж на тілі полігону та звалища на постійній основі. Оскільки визначити наявність фільтрату для кожного класу полігонів та звалищ не має можливості, даний параметр не розраховувався і не застосовувався в розрахунках.

З урахуванням вищенаведених припущень визначені коефіцієнти рівняння (4) та розрахована ефективність систем збирання біогазу для середніх і великих полігонів та звалищ, що наведена в таблиці 5. При цьому, ефективність систем збирання біогазу розрахована окремо для діючих та рекультивованих великих полігонів та звалищ.

5. Ефективність системи збирання біогазу

Коефіцієнт	Рекультивовані середні полігони та звалища	Діючі великі полігони та звалища	Рекультивовані великі полігони та звалища
K_1	0,83	1,00	1,00

Сатін І. В., Куций Д. В.

K ₂	0,60	0,72	0,80
K ₃	0,80	0,65	0,90
K ₄	0,95	1,00	1,00
K ₅	0,95	1,00	1,00
K ₆	0,97	0,97	0,97
K ₇	1,00	1,00	1,00
K _C	0,35	0,45	0,70

В частині заходів щодо утилізації біогазу, визначались технічні рішення щодо його спалювання, використання або окислення (Пухнюк та ін., 2012; Зіновчук & Горобець, 2012), які призводять до скорочення емісій метану з середніх та великих полігонів та звалищ у проектному сценарії. Зокрема, на середніх полігонах та звалищах обсяг збирання біогазу оцінюються незначними, а якість низькою. Можливими варіантами його утилізації може бути спалювання на факелі або окислення метану шляхом пропущення зібраного біогазу через біофільтр. Спалювання на факелі вибрано основним заходом для середніх полігонів та звалищ.

На великих полігонах та звалищах обсяги збирання біогазу оцінюються достатніми для його енергетичної утилізації, а якість високою. Найпоширенішим способом енергетичної утилізації біогазу, у тому числі в Україні, є його використання в когенераційних установках (КГУ) з виробництвом і постачанням електроенергії в мережу. Цей захід вибраний як основний для великих полігонів та звалищ.

З огляду на прийняти заходи з утилізації біогазу, скорочення емісій ПГ у проектному сценарії може бути розраховане на основі загального рівняння (CDM. ACM0001: Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities, 2009):

$$PE_{CH_4} = PE_{flare} + PE_{elec} + EL_{LFG} \cdot CEF_{elec}, \quad (5)$$

Сатін І. В., Куций Д. В.

де PE_{CH_4} – проектні скорочення емісії ПГ з полігонів та звалищ за визначений період, tCO_2 ; PE_{flare} – проектні скорочення емісії ПГ внаслідок спалювання метану на факелі, tCO_2 ; PE_{elec} – проектні скорочення емісії ПГ внаслідок утилізації метану в КГУ, tCO_2 ; EL_{LFG} – загальна кількість електроенергії виробленої з біогазу, яка за відсутності проектної діяльності була б вироблена генеруючими потужностями на викопному паливі, що підключені до мережі, МВт*год; SEF_{elec} – коефіцієнт емісій ПГ генеруючих потужностей на викопному паливі, $tCO_2/MВт*год$.

В залежності від класу полігонів та звалищ і відповідних йому заходів з утилізації біогазу кількість додатків в загальному рівнянні (5) змінювалась. Зокрема, для середніх полігонів та звалищ проектні скорочення емісії ПГ дорівнювали скороченню емісій ПГ внаслідок спалювання метану на факелі. Для великих полігонів та звалищ проектні скорочення емісії ПГ дорівнювали скороченню емісій ПГ внаслідок утилізації метану в КГУ. При цьому, додаткова частка скорочення емісій ПГ від заміщення електроенергії виробленої з викопних палив має місце для великих полігонів та звалищ. Однак, вона не оцінювалась, оскільки в основі цієї роботи було порівняння між емісією та скорочення емісій ПГ від захоронення ПВ на різних класах полігонів та звалищ.

Згідно з державними будівельними нормами (ДБН В.2.4-2-2005 "Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування", б. д.) спалювання біогазу може здійснюватися тільки на закритому факелі. Для розрахунку проектного скорочення емісій ПГ внаслідок деструкції метану на закритому факелі застосовується наступне рівняння (CDM. ACM0001: Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities, 2009):

$$PE_{flare} = Q'_{LFG} \cdot \rho_{CH_4} \cdot (1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot \varepsilon_{flare}, \quad (6)$$

де ε_{flare} – ефективність деструкції метану на закритому факелі, 90,0%.

Для розрахунку проектного скорочення емісій ПГ від утилізації метану в КГУ застосовується наступне рівняння (CDM. ACM0001: Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities, 2009):

$$PE_{elec} = Q_{LFG}' \cdot \rho_{CH_4} \cdot (1 - f) \cdot GWP_{CH_4} \cdot \varepsilon_{CHP}, \quad (7)$$

де ε_{CHP} – ефективність деструкції метану в КГУ, 91,5%.

Результати дослідження та їх обговорення. За результатами досліджень визначено, що загальні емісії ПГ з усіх класів полігонів та звалищ України становлять 5 833,5 тис. тCO₂, з яких 75,2 тис. тCO₂ (1,3%) утворюються на малих, 935,4 тис. тCO₂ (16,0%) – на середніх і 4 822,9 тис. тCO₂ (82,7%) – на великих полігонах та звалища (рис. 6). Розподіл емісій ПГ між класами полігонів та звалищ корелюється з кількістю відходів, які накопичені в їх межах. Емісії ПГ з малих полігонів та звалищ ПВ досить незначні. Це дозволяє нехтувати ними в майбутніх дослідженнях емісії ПГ від полігонів та звалищ України.

В ході порівняння результатів цих досліджень з даними інвентаризації ПГ в Україні (Ukraine's greenhouse gas inventory 1990-2021. Annual national inventory report for submission under the united nations framework convention on climate change and the Kyoto protocol, 2023), оцінено, що отримані загальні емісії ПГ на 32,9% нижчі. При відносно однакових вхідних даних різних методик досліджень, отримана різниця пояснюється вищою точністю Української моделі газоутворення і її параметрів порівняно з методикою МГЕЗК.



В свою чергу, потенціал скорочення емісій ПГ визначено для двох варіантів сукупних заходів: 1) збирання та спалювання біогазу на рекультивованих середніх (див. рис.5а) і збирання та утилізація біогазу на діючих великих (див. рис. 5б) полігонах та звалищах, а також 2) збирання та спалювання біогазу на рекультивованих середніх (див. рис.5а) і збирання та утилізація біогазу на рекультивованих великих (див. рис. 5в) полігонах та звалищах. Отримані результати додатково порівнювались із фактичним скороченням емісій ПГ, які

Сатін І. В., Куций Д. В.

досягались системами збирання біогазу, що експлуатувалися в 2021 р. (НКРЕКП, 2022). Фактичні скорочення емісій ПГ розраховані на основі рівняння (7) за кількістю виробленої електроенергії, яка була перерахована в кількість біогазу на основі припущення, що вміст метану в ньому становить 50%.

За першим варіантом сукупних заходів, потенціал скорочення емісій ПГ може досягати до 41% від загальних емісій ПГ з полігонів та звалищ України (рис. 7). За рахунок діючих систем збирання біогазу фактичне скорочення емісій ПГ наразі складає близько 10% від загальних емісій ПГ з полігонів та звалищ України, що підтверджується даними (Ukraine's greenhouse gas inventory 1990-2021. Annual national inventory report for submission under the united nations framework convention on climate change and the Kyoto protocol, 2023). При цьому, фактичне скорочення емісій ПГ в чотири рази менше від їх потенціалу. Пояснюється це тим, що в Волинській, Дніпропетровській, Житомирській, Кіровоградській, Миколаївській, Полтавській, Черкаській та Чернівецькій областях у 2021 р. працювали не всі або не працювали взагалі збудовані системи збирання біогазу. Відновлення роботи непрацюючих систем призведе до збільшення фактичного скорочення емісій ПГ. Їх подальше збільшення до рівня потенціалу скорочення емісій ПГ можливе за рахунок будівництва нових систем збирання біогазу, які наразі споруджуються у Львівській (с. Збиранка) та Харківській (м. Дергачі) областях.

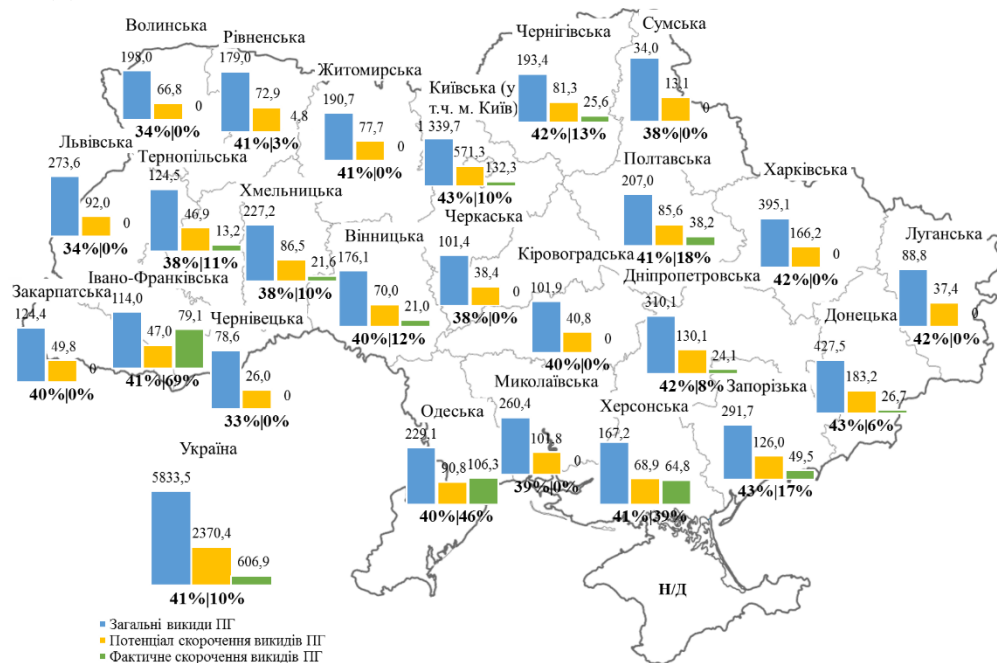


Рис. 7. Скорочення емісій ПГ на рекультивованих середніх і діючих великих полігонах та звалищах по областях України в 2021 р., тис. тCO₂

Найбільшим потенціалом скорочення емісій ПГ володіють Донецька, Київська та Харківська області, тобто області з найбільшими емісіями ПГ з великих полігонів та звалищ. При цьому, у Івано-Франківській, Одеській та Херсонській областях потенціал скорочення викидів ПГ виглядає вичерпаним через значні фактичні скорочення емісій ПГ. Пояснюватись це може як завищеними даними щодо виробленої електроенергії (НКРЕКП, 2022), так і заниженими даними щодо кількості ПВ, які захоронювались на полігонах та звалищах цих областей (Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2021 рік, 2022).

Найменшим потенціалом скорочення емісій ПГ володіє Сумська та Чернівецька області, де досить повільно розвивається сфера управління ПВ, а їх загальне накопичення на полігонах та звалищах є найменшим в Україні.

За другим варіантом сукупних заходів, потенціал скорочення емісій ПГ може досягати до 61% від загальних емісій ПГ з полігонів та звалищ України (рис. 8). В цьому варіанті, фактичні скорочення емісій ПГ, які досягаються за рахунок діючих систем збирання біогазу, майже в шість разів нижчі їх потенціалу. Збільшення різниці між потенціалом і фактичним скороченням

Сатін І. В., Куций Д. В.

емісій ПГ пояснюється впливом рекультивації великих полігонів та звалищ, яка призводить до вагомого підвищення кількості збирання біогазу, що визначальним чином впливають на потенціал скорочення емісій ПГ від полігонів та звалищ України.

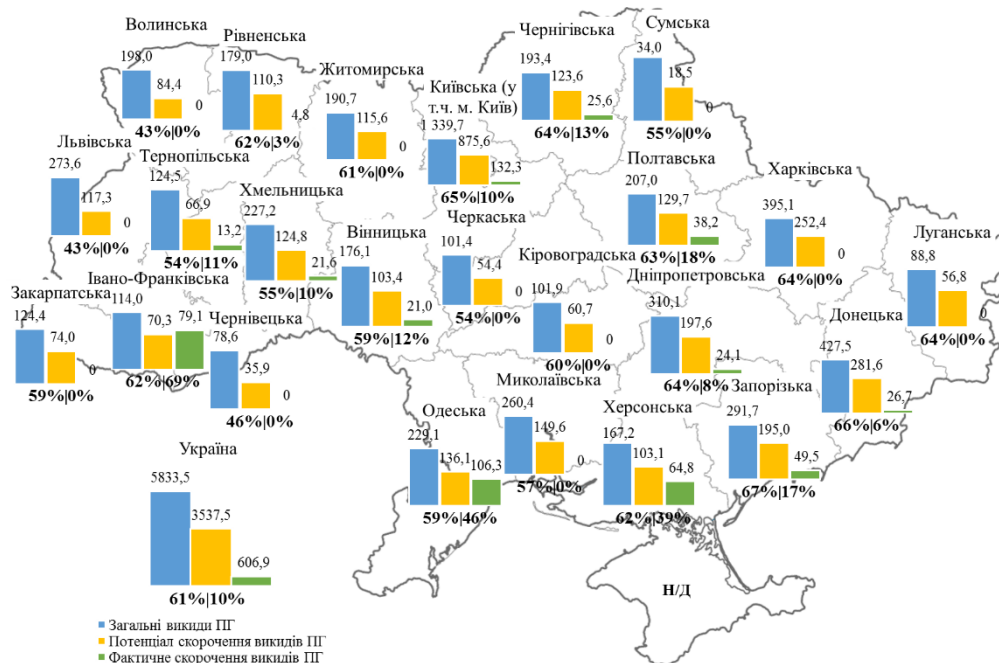


Рис. 8. Скорочення емісій ПГ на рекультивованих середніх і великих полігонах та звалищах по областях України в 2021 р., тис. тCO₂

Таким чином, найбільші емісії ПГ та один із найбільших потенціалів скорочення емісій ПГ наявний в областях (Донецькій, Київській та Харківській) з найбільшими міськими агломераціями України, де накопичена найбільша кількість ПВ на великих полігонах та звалищах. Рекультивація цих полігонів значно впливає на потенціал скорочення емісій ПГ. Тому, дані області з точки зору скорочення емісій ПГ визначені найбільш пріоритетними щодо запровадження або розширення систем збирання біогазу і рекультивації полігонів та звалищ.

Найменші емісії ПГ та один із найменших потенціалів скорочення емісій ПГ характерний малим областям з повільним розвитком сфери управління ПВ (Сумська, Чернівецька). Крім того, в цих областях наявна відносно велика частка малих та середніх полігонів, дегазація яких не може бути практично здійснена

Сатін І. В., Куций Д. В.

або має низьку ефективність, що призводить до зменшення потенціалу скорочення емісій ПГ порівняно з рештою областей України. Ці області з точки зору скорочення емісій ПГ визначені найменш пріоритетними щодо запровадження або розширення систем збирання біогазу.

Варто зазначити, що вищенаведена оцінка пріоритетності жодним чином не має впливати на реальну потребу та можливості розбудови систем збирання біогазу та рекультивацію полігонів та звалищ в будь-якій області України, необхідність розбудови яких залишається високою.

Висновки і перспективи. В Україні зберігається практика захоронення понад 90% зібраних ПВ на біля 7 тис. полігонів та звалищ, які займають площу понад 9,6 тис. га. Це призводить до постійного зростання емісій ПГ, які, за уточненими розрахунками, могли досягати до 5 833,5 тис. тСО₂ в 2021 році. При цьому, біля 82% всіх емісій ПГ припадають на близько 320 великих полігонів та звалищ. Саме цей клас полігонів становить пріоритет з точки зору досліджень емісій ПГ від захоронення ПВ.

Наявні системи збирання біогазу, які реалізовані переважно на великих полігонах та звалищах, забезпечують фактичні скорочення емісій ПГ біля 10%, що є недостатнім з точки зору ефективного зменшення їх впливу на довкілля та зміну клімату. Зберігається значний залишковий потенціал скорочення емісій ПГ, який може досягати від 40 % до 60 % загальних емісій ПГ. Для його реалізації доцільно продовжувати розвивати систем збирання біогазу та підвищувати їх ефективність.

Першочергово, рекомендується розбудова існуючих або впровадження нових систем збирання біогазу на великих полігонах та звалищах, що може збільшити скорочення викидів ПГ до чотирьох разів від сьогоденного рівня поточних викидів ПГ. В подальшому або одночасно, доцільно підвищувати ефективність споруджених систем збирання біогазу шляхом рекультивації великих полігонів та звалищ. Ці заходи довозлять потенційно збільшити фактичні скорочення викидів ПГ до шести разів (вполовину від рівня попереднього збільшення). Але вони є більш технічно складними і дорогими, що

Стосовно середніх і малих полігонів та звалищ, вони характеризуються незначними емісіями ПГ порівняно з великими полігонами та звалищами. При цьому, середні і малі полігони та звалища мають обмежені або взагалі не мають технічних можливостей для збирання біогазу. Для переважної більшості з них рекомендується рекультивація з використанням ґрунтової засипки або санація їх території з сортуванням та вивезенням залишків ПВ на великі (регіональні) полігони.

13. ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування». *Портал Єдиної державної електронної системи у сфері будівництва*. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200370846212294438?doc_type=2.

Сатін І. В., Куций Д. В.

14. Матвєєв Ю. Б., Куций Д. В. Дослідження потенціалу утворення біогазу при зброджуванні харчових відходів. *Відновлювана енергетика*. 2016. № 3. С. 73–80.

15. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. *IPCC - Task Force on National Greenhouse Gas Inventories*. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.

16. CDM. Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site. *CDM: CDM-Home*. URL: <https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/tools/am-tool-04-v5.1.0.pdf>.

17. Barlaz M. A., Chanton J. P., Green R. B. Controls on landfill gas collection efficiency: instantaneous and lifetime performance. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2009. Vol. 59, no. 12. P. 1399–1404. URL: <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.12.1399>.

18. Oonk H. Efficiency of landfill gas collection for methane emission reduction. *Greenhouse Gas Measurement and Management*. 2012. Vol. 2, no. 2-3. P. 129–145. URL: <https://doi.org/10.1080/20430779.2012.730798>.

19. Duan Z., Kjeldsen P., Scheutz C. Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations. *Waste Management*. 2022. Vol. 139. P. 269–278. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.023>.

20. Landfill gas collection efficiency: categorization of data from existing in-situ measurements / C. R. Giordano et al. *Waste Management*. 2024. Vol. 175. P. 83–91. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.042> (date of access: 22.05.2024).

21. Рекомендації з удосконалення експлуатації діючих полігонів та звалищ твердих побутових відходів: Наказ від 10.01.2006 р. № 5. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0005667-06#Text>.

22. Правила експлуатації полігонів побутових відходів: Наказ від 01.12.2010 р. № 435. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1307-10#Text>.

23. Chanton J. P., Powelson D. K., Green R. B. Methane oxidation in landfill cover soils, is a 10% default value reasonable?. *Journal of Environmental Quality*. 2009. Vol. 38, no. 2. P. 654–663. URL: <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0221>.

24. Пухнюк О. Ю., Матвєєв Ю. Б., Куций Д. В. Аналіз світового досвіду енергетичного використання біогазу полігонів ТПВ. *Відновлювана енергетика*. 2012. Т. 2. С. 70–77.

25. Зіновчук Н. В., Горобець О. В. Використання енергетичного потенціалу твердих побутових відходів в Україні. *Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету*. 2012. Т. 1, № 2. С. 333–341.

26. CDM. ACM0001: Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities. *CDM: CDM-Home*. URL: <https://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/UJBDVFYQLQSEWCM73XG14Z692TRHO0>.

References

1. State of the waste management sector in Ukraine for 2021. (2022). Retrieved from <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/terretoryi/stan-sferypovodzhennya-z-pobutovymy-vidhodamy-v-ukrayini-za-2021-rik/>

2. Yurchenko, A., Kulikova, D., Dmitruk, E., Cheberiyachko, L., Bezpiaty, I. (2019). Municipal solid waste landfills biogas utilization. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 57, 192–202. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/57.192>

3. Geletukha, G.G. (Ed.). (2023). *Energy generation from biomass in Ukraine: technologies, development, prospects*. Kyiv: VD “Academperiodyka”.

4. Shmarin, S.L., Slivinskaya, V.V., Remez, N.S., Filozof, R.S., Nakhshina, A.D., Mykhaylenko V.P. (2014). Influence of climatic factors on estimation of greenhouse gas emissions from the burial place of solid waste in Ukraine. *Physical Geography and Geomorphology*, 2(74), 133–140.

5. Ukraine's greenhouse gas inventory 1990-2021. Annual national inventory report

Сатін І. В., Куций Д. В.

for submission under the united nations framework convention on climate change and the kyoto protocol. (2023, May). Retrieved from <https://unfccc.int/documents/628276>

6. Stepanenko, D., Proskoornya, T. (2009). Receiving and utilization of biogas from waste. *Proceedings of Tavria State Agrotechnological University*, 5(9), 134–143.

7. Zhuk, H.V., Pyatnichko, A.I., Bannov, V.E. (2012). System of biogas collection and utilization of landfill solid domestic waste. *Industrial Gases*, 3, 65–68.

8. Mazur, K., Gontaruk, Y. (2022). Prospects for biogas production from waste of enterprises and households on solid waste landfills. *Easters Europe: Economy, Business and Management*, 2(35), 63–71.

9. Titova, A. (2023). Utilization of biogas from the household waste landfill as an element of environmental and energy security. *Transactions of Kremehchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 1(138), 41–47.

10. Information on renewable energy facilities (as of January 1, 2022). Retrieved from <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/energetichni-pidpriyemstva>

11. Ukraine landfill gas model - users manual | global methane initiative. (n. d.). Retrieved from <https://www.globalmethane.org/>. <https://www.globalmethane.org/resources/details.aspx?resourceid=2326>

12. Rezakova, T.A., Matveev, Yu.B., Kutsyi, D.V. (2011). Modeling of landfill gas flow in the porous media of MSW landfill. *Industrial Heat Engineering*, 7(33), 112–113.

13. DBN B.2.4-2-2005 Municipal solid waste landfills. Basic design provisions. (with Amendment 1 and Amendment 2). (n. d.). Retrieved from https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3200370846212294438?doc_type=2

14. Matveev, Yu.B., Kutsyi, D.V. (2016). Investigation of biogas potential during digestion of food waste. *Renewable Energy*, 3, 73–80.

15. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 5: Waste. (2006). Retrieved from <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>

16. CDM. Tool to determine methane emissions avoided from disposal of waste at a solid waste disposal site. (2011). Retrieved from

<https://cdm.unfccc.int/methodologies/PAMethodologies/tools/am-tool-04-v5.1.0.pdf>

17. Barlaz, M. A., Chanton, J. P., & Green, R. B. (2009). Controls on landfill gas collection efficiency: instantaneous and lifetime performance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(12), 1399–1404. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.12.1399>

18. Oonk, H. (2012). Efficiency of landfill gas collection for methane emission reduction. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 2(2-3), 129–145. <https://doi.org/10.1080/20430779.2012.730798>

19. Duan, Z., Kjeldsen, P., & Scheutz, C. (2022). Efficiency of gas collection systems at Danish landfills and implications for regulations. *Waste Management*, 139, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.023>

20. Giordano, C. R., Van Brunt, M. E., Halevi, S. J., Castaldi, M. J., Orlovits, Z., & Illes, Z. (2024). Landfill gas collection efficiency: Categorization of data from existing in-situ measurements. *Waste Management*, 175, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.12.042>

21. Order of the Ministry of Construction, Architecture and Housing and Communal Services of Ukraine No. 5 “Recommendations for improving the operation of existing municipal solid waste landfills and dumps”, (2006, January). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0005667-06#Text>

22. Order of the Ministry of Housing and Communal Services of Ukraine No. 435 “Rules for operation of municipal waste landfills” (2010, December). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1307-10#Text>

23. Chanton, J. P., Powelson, D. K., & Green, R. B. (2009). Methane oxidation in landfill cover soils, is a 10% default value reasonable? *Journal of Environmental Quality*, 38(2), 654–663. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0221>

Сатін І. В., Куций Д. В.

24. Puknhyuk, L.Yu., Matveev, Yu.B., Kutsyi, D.V. (2012). Analysis of the world experience of energy use of biogas from MSW landfills. *Renewable Energy*, 2, 70–77.

25. Zinovchyk, N.V., Horobets, O.V. (2012). Use of energy potential of municipal solid waste in Ukraine. *Bulletin of the Zhytomyr National Agro-Ecological University*, 1(2), 333–341.

26. CDM. ACM0001: Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities. (2009). Retrieved from <https://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/UJBDVFYLLQKSEWCM73XG14Z692TRHO0>

GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM MUNICIPAL WASTE DISPOSAL SITES AND MEASURES FOR ITS REDUCTION

I. V. Satin, D. V. Kutsyi

Abstract. Disposal of household waste at landfills and dumps leads to greenhouse gas emissions. Usually emissions are estimated based on the IPCC methodology, which takes into account the amount and composition of household waste as well as the climate conditions of the region. However, greenhouse gas emissions are significantly influenced by the technical and operational parameters of landfills and dumps. The Ukrainian landfill gas model, which is adapted to local conditions, allows these parameters to be taken into account.

The objective of this study was the estimation of greenhouse gas emissions from certain classes of landfills and dumps, taking into account their specific parameters based on the Ukrainian landfill gas model, as well as the development of measures for its reduction. For this, landfills and dumps were classified by area, which indirectly characterizes their capacity and place of location. Based on the results of the classification, it was determined that out of more than 7,000 landfills and dumps in Ukraine, about 320 are classified as large sites. These sites occupy more than a third of the total area of landfills and dumps in Ukraine and contain up to 84% of disposed household waste. Large landfills and dumps are a priority for greenhouse gas emissions study.

According to the results of greenhouse gas emissions study, their total amount is estimated to be 5,833.5 thousand tCO₂. These amount 32.9% less than similar estimates according to the IPCC methodology, which is explained by the higher accuracy of the Ukrainian landfill gas model and its parameters. Of the total amount of greenhouse emissions, up to 40% can potentially be reduced by the continued development of landfill gas collection systems, which actually reduced about 10% greenhouse gas emission in 2021. This potential can be increased by half and the reduction of greenhouse gas emissions can potentially reach up to 60% of their total emissions from landfills and dumps. For this purpose, the rehabilitation of the landfills and dumps should be conducted along with the development of landfill gas collection systems. However, rehabilitation is a complex and expensive measure, and the rationale for its application may be the subject of further research.

Keywords: dump, landfill, landfill gas, methane

Сатін І. В., Куций Д. В.

How to Cite: Satin, I., & Kutsyi, D. (2024). Greenhouse gas emissions from municipal waste disposal sites and measures for its reduction. *Scientific Reports of NULES of Ukraine*, 0(3/109). doi:[http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi.3\(109\).2024.003](http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi.3(109).2024.003)