

## ТЕХНОЕКОЛОГІЯ

УДК 627.132:504.06:330.131.7

*С. В. Атаєв**Науково-виробнича екологічна група  
«Потенціал-Еко»*

### ДЕГАЗАЦІЯ РІВНЕНСЬКОГО ПОЛІГОНУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Розглядаються особливості реалізації проекту активної дегазації Рівненського полігону твердих побутових відходів. Наводяться результати розрахунків прогнозування синтезу біогазу та описуються рішення по його вловлюванню та утилізації. Оцінюється масштаб поширення парникових газів до і після дегазації. Активна дегазація «старих» полігонів може бути підставою для продовження їх експлуатації.

**Ключові слова:** тверді побутові відходи, дегазація, транспортування та утилізація біогазу, факельне спалювання, когенераційна установка, матриця впливу

Рассматриваются особенности реализации проекта активной дегазации Ровенского полигона твердых бытовых отходов. Приводятся результаты расчетов прогнозирования синтеза биогаза и описываются решения по его улавливанию и утилизации. Оценивается масштаб распространения парниковых газов до и после дегазации. Активная дегазация «старых» полигонов может быть основанием для продолжения их эксплуатации.

**Ключевые слова:** твердые бытовые отходы, дегазация, транспортирование и утилизация биогаза, факельное сжигание, когенерационная установка, матрица влияния

The features of realization of project of the active degassing of the Rivne ground of hard domestic wastes are examined. We give biogas synthesis forecasting calculations and describe solutions for its capture and utilization. The scale of distribution of greenhouse gases is estimated before and after degassing. The active degassing «of old» grounds can be founding for continuation of their exploitation.

**Keywords:** hard domestic wastes, degassing, portage and utilization of biogas, torch incineration, setting of cogeneration, matrix of influence

**Актуальність проблеми.** Найбільш поширеною та економічно обґрунтованою практикою утилізації твердих побутових відходів (ТПВ) на сьогодні залишається їх захоронення в межах полігонів. Так, наприклад, кількість сміття, що вивозиться на полігони, складає у Нідерландах до 55%, в США – 65%, в Канаді – 96%, в Росії – 97%. Всього на Україні є 4500 сміттєзвалищ та полігонів загальною площею майже 7,8 тис. га, 22% з яких не відповідають вимогам екологічної безпеки [1-3]. Отруєння ґрунтових та поверхневих вод токсичними сполуками, забруднення ґрунтового шару продуктами вилуговування, поява неприємного запаху, розкидання сміття вітром, самовільне загорання полігонів, безконтрольне утворення метану (CH<sub>4</sub>) та неестетичний вигляд – це лише частина проблем, що виникають внаслідок експлуатації полігонів. В силу багатьох причин, серед яких основними є недостатня кількість вільних земель під освоєння нових полігонів, відсутність засобів для безпечної експлуатації та рекультивациі старих сміттєзвалищ, полігони із систематичними порушеннями регламентів та норм продовжують експлуатуватись. Найбільша кількість таких полігонів у Луганській, Одеській, Херсонській, Харківській та Сумській областях. Із 3536 сміттєзвалищ та полігонів, які потребують рекультивациі, фактично рекультивовано 94. В таких умовах виникає необхідність у реалізації природоохоронних заходів на полігонах ТПВ, що

дозволяють перевести ризики їх експлуатації у площину добровільних ризиків, таких ризиків, з якими суспільство буде погоджуватися, адже повністю відмовитись від полігонів ТПВ, навіть таких, які вичерпали свій термін експлуатації, на сьогодні неможливо. Одним із таких найбільш ефективних практичних заходів є дегазація полігонів ТПВ – організований збір та утилізація біогазу (сміттевого газу) [1-5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Утворення біогазу та поширення його емісій за межі полігонів ТПВ сприяє не лише занепокоєнню населення прилеглих територій і погіршенню стану його здоров'я, але і розвитку парникового ефекту. Встановлено, що вплив емісії метану, що є основною складовою біогазу, на кліматичні зміни регіонів є найбільшим серед інших парникових газів [2, 3]. Саме наявність метану у біогазі привертає увагу інвесторів до проектів дегазації полігонів, оскільки при його утилізації виникає можливість продукувати тепло та електричну енергію.

Основною метою при зведенні перших систем збору та утилізації біогазу в США у 70-хх рр. минулого століття була необхідність захисту прилеглих територій полігонів від пожеж та вибухів, що спричинювалися завищеними концентраціями метану [4]. З часом при рості світових цін на традиційні енергоносії, появи лояльної політики з боку країн до компаній, що займаються будівництвом та експлуатацією біогазових станцій, на практиці почали реалізовувати проекти утилізації біогазу не лише із його повним спалюванням, але і з використанням інших технологій утилізації. За даними Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА) [4] у 2008 р. виробництво електроенергії на полігонах ТПВ при спалюванні біогазу складало 19279 ГВт·год. Будівництво систем збору та утилізації біогазу на полігонах ТПВ увійшло в практику розвинених країн Європи і Північної Америки. Зокрема, у США з метою отримання тепла та електроенергії використовуються понад 150 великих полігонів. Біогазові установки у США утилізують до 4,3 млрд. м<sup>3</sup>/рік біогазу. У Німеччині діє близько 4 тисяч біогазових установок (половина працюючих у світі). За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (ІЕА) при зростанні кількості ТПВ у світі попит на електроенергію, вироблену на полігонах ТПВ, зростатиме.

У законодавстві України є норми, що вимагають розробки системи збору та утилізації біогазу на полігонах ТПВ. Відповідно до ст. 35-1 Закону України «Про відходи» «забороняється проектування, будівництво та експлуатація полігонів побутових відходів без оснащення системами вилучення та знешкодження біогазу». У ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування» зазначається: «При проектуванні полігонів ТПВ доцільно передбачати утилізацію біогазу, що утворюється при анаеробному розкладанні органічної складової відходів. Біогаз може використовуватись як паливо для енергетичних установок (котлоагрегати, промислові печі, стаціонарні двигуни-генератори) або для заправки в балони». Про необхідність процесу дегазації полігонів ТПВ сказано і у «Правилах з технічної експлуатації полігонів твердих побутових відходів» та «Правилах експлуатації полігонів побутових відходів».

На вітчизняних полігонах найефективніше себе зарекомендувала технологія активної дегазації [1-6]. Активна система дегазації ґрунтується на зборі біогазу за допомогою газових свердловин, в яких розташовуються перфоровані труби, що підключаються до газопереміщуючого обладнання – компресора або вентилятора і системи газопроводів. Активну систему дегазації полігонів рекомендують норми ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування». У цих же нормах наведено критерії ефективної роботи системи: «обсяги накопичених відходів мають складати не менше 1 млн. т, а середня глибина полігону більше 10 м». Вважається, що при виконанні цих умов система дегазації працює ефективно, оскільки на полігоні виділяється необхідний об'єм біогазу за рахунок зрілої стадії метаногенезу.

Метаногенез, як кінцева фаза анаеробної біодеструкції відходів, залежить від морфологічного складу відходів і наявності компонентів, що сприяють біодеструкції. Рослинні залишки, папір, текстиль, деревина та інші органічні фракції, що містяться у складі ТПВ, збільшують виділення біогазу та концентрацію в ньому метану [5, 6]. Перші

15-20 років  $1 \text{ м}^3$  відходів при розкладанні може виділяти  $1,0-1,5 \text{ м}^3/\text{рік}$  біогазу. Період повного розкладання складає близько 50 років. На генерування біогазу також впливає вологість і температура ТПВ, щільність їх укладання та режим експлуатації полігону.

Окрім об'єму біогазу, що може виділяти полігон, важливим питанням при реалізації проекту дегазації є шляхи його подальшого використання. Біогаз спалюють на різних технологічних установках з метою генерації тепла та електричної енергії [4]. Надалі вироблене тепло може використовуватись для опалення інфраструктури полігону ТПВ, самої біогазової станції, а електроенергія постачатись у об'єднану енергетичну систему країни. Зокрема, біогазові проекти з виробництвом електроенергії були реалізовані у містах Маріуполі, Вінниці та Києві. Фактична потужність біогазової станції у Маріуполі складає 170 кВт, у Вінниці – 1,2 МВт (рис. 1). Найбільш вдалим біогазовим проектом на Україні фахівці вважають експлуатацію п'ятірки біогазових двигунів компанії TEDOM потужністю 177 кВт кожний на полігоні площею 36 га м. Києва (рис. 1), на якому вже накопичено до 10 млн. т відходів. Крім того, планується введення у експлуатацію газопоршневої установки GE Jebacher потужністю 1,1 МВт в м. Бориспіль.



**Рис. 1. Біогазові станції на полігонах ТПВ у м. Вінниці (зліва) та м. Києві (справа)**

Окрім генерації енергетичних ресурсів на практиці використовують і спалювання біогазу у факельних установках. Розглядаються різні варіанти утилізації: паралельне виробництво енергетичних ресурсів і факельне спалювання надлишкового газу, повне факельне спалювання, варіанти резервування, коли факельні установки використовуються лише при надзвичайних (аварійних) ситуаціях тощо. Практично кожен проект дегазації вітчизняних полігонів має у своєму складі факельні установки. Так, на полігоні м. Маріуполя експлуатується факельна установка HOFGAS-Ready 800. Факельні установки згаданого виробника використовуються для утилізації біогазу на полігонах міст Алушта, Ялта та Львів (рис. 2). На Вінницькому полігоні експлуатується факельна установка Naase.

З екологічної точки зору спалювання біогазу в установках з різними тепловими двигунами та факелах призводить до зменшення емісій метану та інших парникових газів в районі полігонів ТПВ, але при згоранні біогазу у повітря викидаються оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), оксид вуглецю ( $\text{CO}$ ), оксиди сірки ( $\text{SO}_x$ ), сажа ( $\text{C}$ ) та ін. Продукти спалювання біогазу багато в чому схожі до процесу спалювання комерційного природного газу. Різниця полягає в тому, що біогаз, на відміну від природного газу, у своєму складі має більше домішок (зокрема, сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ )), питома вага яких може бути різною в залежності від ефекту очистки. Домішки зменшують теплотворну функцію біогазу та сприяють формуванню більшого спектру емісій продуктів згорання.

Основне призначення активної дегазації полягає у зменшенні емісії біогазу шляхом його примусового вловлювання та подальшого спалювання. Але якщо процес дегазації передбачає економічно необґрунтований відбір біогазу для виробництва енергетичних ресурсів, тоді такий проект може бути не реалізованим. А це втрачені екологічні ефекти –

припинення викидів метану, зменшення токсичності фільтрату, відновлення буферних екосистем тощо, що тягнуть за собою другорядні соціально-економічні ефекти – отримання прибутків від продажу одиниць скорочення викидів та електроенергії за «зеленим» тарифом, додаткові робочі місця, залучення інвестицій у біоенергетику, покращення стану здоров'я населення та зміна громадської думки щодо системи поводження із відходами, переведення ризиків експлуатації полігонів ТПВ, які вичерпали свій термін, у площину добровільних ризиків, ризиків, з якими погоджується суспільство.



**Рис. 2. Факельні установки HOFGAS-Ready у системах утилізації сміттєвого газу**

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** За даними, наведеними у Технічному звіті з оцінки потенціалу відновлювальної енергетики в Україні (Програма USELF) [6], тільки 100 із 700 існуючих великих полігонів є потенційно придатними для організації збору і утилізації біогазу. При цьому виробництво електроенергії може бути практично доцільним тільки на найбільших полігонах в країні, оскільки одним з основних критеріїв економічної доцільності є здатність полігону виробляти достатню кількість біогазу протягом 10-15 років [5]. Такі полігони функціонують біля міст з великою кількістю населення, яке прямо корелює з обсягами утворення і накопичення відходів. Найбільш перспективними серед таких є полігони від міст Чернівці, Дніпропетровськ, Донецьк, Орджонікідзе, Хмельницький та Львів. Загальний розрахунковий обсяг енергії, яка може вироблятись зі звалищного газу на цих полігонах, становить біля 48 МВт, коливаючись від 600 кВт до більш ніж 5 МВт на рівні індивідуальних майданчиків. Розрахунки потенційної енергетичної потужності базуються на даних щодо обсягів накопичених відходів, але прогнозування об'ємів утворення біогазу залежить від віку полігону, кількості опадів, складу та товщини шару відходів тощо.

Визначення енергетичного потенціалу полігонів часто базується на недостовірних даних про морфологічний склад та об'єм складування відходів, товщину їх шару, в районі полігонів відсутні системи моніторингу за емісіями біогазу, станом фільтрату [2, 3, 5]. Зазвичай, оператори полігонів не володіють повним об'ємом інформації, який необхідний для прогнозування об'ємів біогазу за відомими прийнятими математичними моделями. На більшості полігонах не ведуться дослідження динаміки метаноформуєчих факторів. Характер експлуатації полігону також здійснює значний вплив на процес газоутворення. Захоронення будівельних відходів у тілі полігону призводить до нерівномірного розподілу біогазу, а наявність гіпсу – до підвищеного вмісту корозійно-активного сірководню ( $H_2S$ ) у складі біогазу. На полігонах виникають пожежі, що призводять до вигорання біогазу. При таких умовах частина полігонів з урахуванням вище перерахованих причин на думку багатьох експертів та спеціалістів непридатна для економічно обґрунтованої дегазації.

Зокрема, не відповідає критеріям економічно обґрунтованого відбору біогазу, в тому числі і вимог, наведених у ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів».

Основні положення проектування», Рівненський полігон ТПВ (рис. 3), який був введений у експлуатацію ще у 1959 році. За офіційними даними полігон заповнений відходами більш ніж на 90% та практично вичерпав свою потужність. Однак в силу економічних причин його експлуатація продовжується. При цьому проект рекультивативної відсутній. Це викликає невдоволення місцевого населення, ускладнює вивезення відходів з населених пунктів Рівненського району, сприяє погіршенню екологічної ситуації у регіоні.

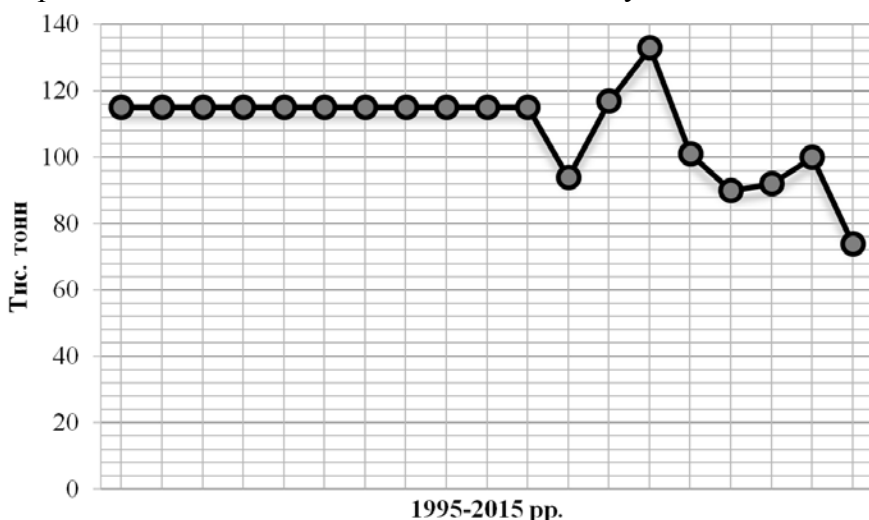


**Рис. 3. Супутниковий знімок Рівненського полігону ТПВ**

**Постановка завдання.** В рамках проведених досліджень наводиться аналіз технічних рішень щодо активної дегазації Рівненського полігону ТПВ (рис. 3), основна увага приділяється екологічним ефектам дегазації. В якості критерію підвищення безпеки полігону за рахунок активної дегазації, який знаходиться на стадії закриття, використовується масштаб поширення парникових газів до і після дегазації. За умови примусової дегазації розглядається можливість збільшення терміну експлуатації полігону.

**Виклад основного матеріалу.** Загальна площа Рівненського полігону складає 21 га, з яких під відходами зайнято 17 га. В межах території захоронення відходів можна розрізнити умовні робочі карти, які розміщені симетрично відносно центральної дороги та розмежовані відвалами відходів висотою 5 м і більше. В результаті різної висоти робочих карт сформувалась нерівномірна поверхня полігону, яка представлена, переважно, відкритими відходами. У західній частині полігону вона подекуди засипана шаром глини.

В ході геологічних вишукувань було встановлено, що тіло полігону складається з шарів відходів, які характеризуються різним ступенем розкладу. Приблизно 60% відходів від дна полігону насичені фільтратом, який періодично витікає в його західній та південній частині. Глибина відходів на полігоні змінюється від 6 до 20 м. Виходячи з середньої глибини відходів та площі полігону його об'єм складає 2,5 млн. м<sup>3</sup>.



**Рис. 4. Динаміка накопичення ТПВ на Рівненському полігоні**

На полігон вивозяться відходи, утворені переважно міським населенням. Загальна кількість вивезених відходів оцінюється оператором полігону на основі кількості та об'єму сміттевозів. Отримані в такий спосіб дані за останні роки експлуатації наведені на рис. 4. Точний морфологічний склад відходів, вивезених на Рівненський полігон ТПВ, невідомий.

Вивезені на полігон відходи складаються в межах умовних робочих карт, експлуатація яких часто залежить від метеорологічних умов. Для складування відходів використовуються бульдозери, які працюють почергово. Подальше ущільнення відходів за допомогою більш важкої техніки не застосовується. По завершенню складування відходів більша їх частина залишається відкритою. Такий режим експлуатації полігону призводить до самозагорання відходів, пожеж, потрапляння опадів в тіло полігону. Синтез біогазу за таких умов постійно зменшується на фоні зростання витрат фільтрату.

Фактори, що описані вище, сприяють зниженню газотвірної здатності Рівненського полігону, досить тривалий період гальмували процес його дегазації. Частина інвесторів відмовлялась від проекту в силу його економічної недоцільності. Було прийнято рішення щодо проведення серії насосних тестів на різних ділянках полігону у різні періоди експлуатації, які підтвердили значний потенціал газоутворення. Подібним чином було реанімовано процедуру дегазації на деяких невеликих за об'ємом полігонах Київської, Івано-Франківської та Сумської областей [2, 3, 5]. Перевагою насосних тестів є можливість отримання додаткової інформації про стан тіла полігону, яка може використовуватись при проектуванні системи збору біогазу. Насосний тест точно визначає склад біогазу, радіус впливу свердловини, що дозволяє встановити швидкість його виходу. За даними насосних тестів на Рівненському полігоні у складі біогазу середній вміст метану ( $\text{CH}_4$ ) складав до 50%, вуглекислого газу ( $\text{CO}_2$ ) – до 35%, кисню ( $\text{O}_2$ ) – до 1%. Всі інші домішки, включаючи сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), були визначені неточно. Отже, за критеріями, наведеними у ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування», Рівненський полігон ТПВ був не придатний для економічно обгрунтованого збору і утилізації біогазу. При цьому за результатами насосних тестів вміст метану у біогазі свідчив про зрілу стадію метаногенезу і достатню кількість об'єму біогазу для виробництва з нього енергетичних ресурсів на когенераційних установках.

Точний вміст макрокомпонентів у складі біогазу став підставою для прогнозування динаміки його утворення впродовж наступних років експлуатації полігону.

Моделювання газоутворення є найбільш поширеним методом наближеного прогнозування біогазового потенціалу полігону. Частіше за все використовуються математичні моделі першого порядку, де основними розрахунковими параметрами є дані про кількість, склад і вік відходів [2, 5]. Тому, на практиці моделювання виходу біогазу із вітчизняних полігонів, через брак достовірної інформації виникають значні відхилення від реальних даних. В результаті біогазовий потенціал або занижується, що призводить до втрати інвестиційної привабливості дегазації, або завищується, що сприяє збільшенню терміну окупності, зниженню виробництва очікуваних енергетичних ресурсів.

Для прогнозування об'ємів метану  $Q$ , що утворюється за період  $t$  із відходів Рівненського полігону, скористалися Національною багатокомпонентною моделлю газоутворення, що розроблена для Національного кадастру антропогенних викидів:

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

$$A = (1 - e^{-k_j}) / k_j; \quad (2)$$

$$L_{0j,i} = DOC_j \cdot DOC_F \cdot 16/12 \cdot MCF_i; \quad (3)$$

де  $A$  – нормуючий множник, який коригує підсумовування;  $MWS_i$  – загальна маса відходів, які складаються на полігоні за  $i$ -ий рік експлуатації, т/рік;  $MWS_{j,i}$  – вміст  $j$ -ої категорії відходів у загальній масі відходів за  $i$ -ий рік експлуатації, %;  $k_j$  – постійна швидкості утворення біогазу, 1/рік;  $L_{0j,i}$  – потенціал утворення біогазу за  $i$ -ий рік експлуатації, т біогазу/т відходів;  $x$  – сума років накопичення ТПВ за попередній період, років;  $DOC_j$  – загальна маса органічного вуглецю (C), що розкладається в  $j$ -ій категорії відходів, т C/т

відходів;  $DOC_F$  – вміст органіки, що розкладається в одній тонні відходів, приймається 0,5;  $MCF_i$  – фактор корекції метану, що утворюється за  $i$ -ий рік експлуатації полігону.

На рис. 5 подано результати прогнозування динаміки утворення біогазу в районі Рівненського полігону ТПВ із урахуванням ефекту дегазації.

Ефективність вловлювання біогазу на Рівненському полігоні складає 50%, а витрата біогазу в системі – 400 м<sup>3</sup>/год.

Отже, поява системи збору і утилізації біогазу продовжила термін експлуатації

Рівненського полігону до 2030 року, робота якого залишалась під питанням. При цьому об'єми відходів, які може прийняти полігон за умови експлуатації системи збору і утилізації біогазу, були скориговані у сторону зменшення.

На основі серії проведених насосних тестів та результатів прогнозування витрат біогазу для його збору було вирішено облаштувати 26 газозбірних свердловин (рис. 6). Свердловини споруджувались в товщі відходів на глибині 1,5-3,5 м, що забезпечувало можливість подальшої безперешкодної експлуатації полігону. За допомогою компресорної установки в кожній свердловині створювалось розрідження до 1,0 кПа, яке необхідне для відкачування біогазу. Зібраний біогаз від свердловин надходив у газозбірні пункти. Для цього у траншеях прокладались трубопроводи біогазу (рис. 7) з ухилом у бік свердловини для стікання конденсату. В середині газозбірних пунктів знаходились точки підключення свердловин, через які зібраний біогаз потрапляв до магістрального газопроводу. Магістральний газопровід пронизував всі газозбірні пункти та транспортував біогаз до майданчика під технологічне обладнання елементів системи утилізації біогазу.

Під час транспортування біогазу внаслідок негерметичності обладнання передбачаються його технологічні втрати, які є додатковим фактором забруднення повітря прилеглих територій [3, 5]. Втрати біогазу із трубопроводів сумуються як втрати біогазу

при їх умовній герметичності, забезпеченні продування та заповнення мережі біогазом в цілому. Повні втрати біогазу при експлуатації трубопроводів системи дегазації Рівненського полігону складатимуть 5,9 тис. м<sup>3</sup>/рік. Втрати біогазу із магістрального трубопроводу  $q_{вт}$  середнім діаметром труб  $D_{ср}$  прогнозувались на

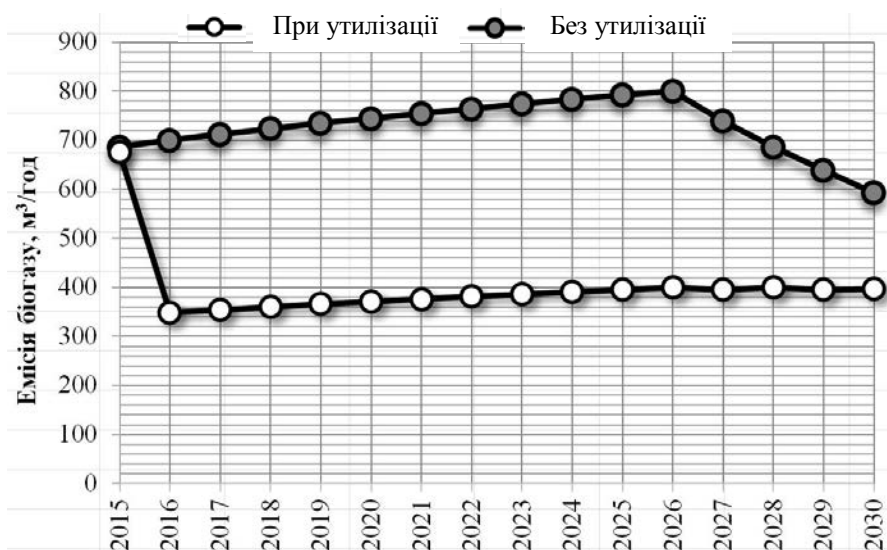


Рис. 5. Емісії біогазу в районі Рівненського полігону ТПВ



Рис. 6. Газозбірні свердловини



Рис. 7. Прокладання трубопроводів біогазу на полігоні ТПВ



основі залежності:

$$q_{\text{вт}} = 1113,5 \cdot \frac{D_{\text{cp}} \cdot P_{\text{cp}}}{T_{\text{cp}} \cdot Z_{\text{cp}}}, \quad (4)$$

де  $P_{\text{cp}}$  і  $T_{\text{cp}}$  – середній тиск (МПа) та температура ( $^{\circ}\text{K}$ ) біогазу за певний період експлуатації трубопроводу.

Такі втрати складають 0,004 млн.  $\text{m}^3/\text{рік}$ .

Кількість біогазу  $G$  (кг/год.), що виділяється через фланцеві з'єднання газозбірного пункту та мігрує через вентиляційні канали, розраховує за наступною залежністю:

$$G = 7,14 \cdot 10^{-5} \cdot P_{\text{cp}} \cdot m \cdot V \cdot \sqrt{\frac{M}{T}}, \quad (5)$$

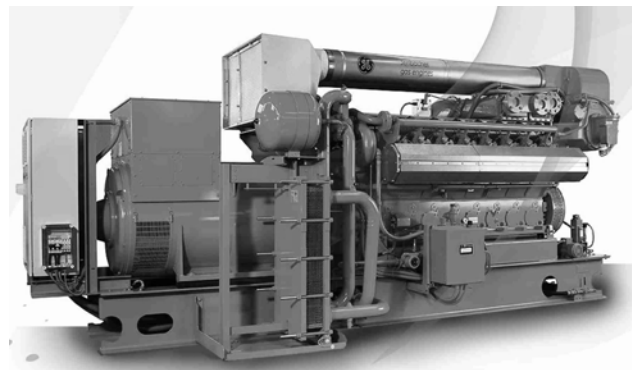
де  $P_{\text{cp}}$  – середній тиск у газозбірних пунктах, МПа;  $m$  – коефіцієнт негерметичності, для газозбірних пунктів приймається  $0,002 \text{ год}^{-1}$ ;  $V$  – об'єм газозбірного пункту,  $\text{m}^3$ ;  $M$  – молярна маса біогазу;  $T$  – температура біогазу,  $^{\circ}\text{K}$ .

Втрати біогазу із газозбірних пунктів дегазації становлять  $0,000024 \text{ m}^3/\text{рік}$ , а втрати із компресорної установки з урахуванням режиму її роботи –  $4,8 \text{ тис. m}^3/\text{рік}$ .

Отже, втрати біогазу при його транспортуванні складають до  $0,015 \text{ млн. m}^3/\text{рік}$ . Ці втрати одночасно призводять до забруднення повітря емісіями біогазу на фоні існуючого в районі полігону – біогазу, що не може утилізуватися системою дегазації (за попередніми підрахунками  $2,6 \text{ млн. m}^3/\text{рік}$ ). Загальна маса біогазу, що виділяється у повітря через неорганізовані джерела дегазації Рівненського полігону ТПВ, складає  $13,2 \text{ т/рік}$  або  $0,42 \text{ г/с}$ . Серед найбільших забруднювачів (макро- і мікроскладових біогазу) варто виділити метан ( $\text{CH}_4$ ) –  $6,6 \text{ т/рік}$  або  $0,21 \text{ г/с}$ ; вуглекислий газ ( $\text{CO}_2$ ) –  $4,63 \text{ т/рік}$  або  $0,15 \text{ г/с}$ ; аміак ( $\text{NH}_3$ ) –  $0,27 \text{ т/рік}$  або  $0,0086 \text{ г/с}$ ; метилмеркаптан ( $\text{CH}_3\text{SH}$ ) –  $0,27 \text{ т/рік}$  або  $0,0086 \text{ г/с}$ .

До складу компресорної установки системи утилізації біогазу входить відцентрова газодувка, а також включений вузол підготування біогазу та факел для його перманентного спалювання. Біогаз з магістрального газопроводу спочатку подається в вузол підготування, в якому від нього відокремлюється волога та пил. Відокремлена волога з рештками конденсату з магістрального газопроводу зливається в дренажний колодязь. Далі підготовлений біогаз потрапляє в відцентрову газодувку, яка зі сторони всмоктування створює розрідження, необхідне для відкачування біогазу, а зі сторони нагнітання – надлишковий тиск, необхідний для роботи факельної установки та когенераційного модуля (рис. 8). Після газодувки біогаз подається на факел для перманентного спалювання, або в когенераційний модуль для утилізації з виробництвом електроенергії та тепла.

У системі дегазації Рівненського полігону утилізація зібраного біогазу шляхом факельного спалювання виступає не основним технологічним рішенням. Факельна установка використовується в тому випадку, якщо у системі збору біогазу з'являється його надмірна кількість. Такий варіант перманентного спалювання використовується як метод резервування у роботі системи дегазації. На випадок відмови обладнання або інших надзвичайних ситуацій факельна установка здатна утилізувати весь об'єм зібраного



**Рис. 8. Загальний вигляд когенераційної установки для утилізації біогазу на Рівненському полігоні ТПВ**



біогазу. Основним робочим варіантом утилізації біогазу є виробництво електроенергії шляхом його спалювання у стаціонарному поршневному двигуні (рис. 8).

Факельний спосіб спалювання органічного палива, на відміну від шарового, полягає в тому, що частинки палива рухаються разом з газоповітряним потоком в топковому просторі [1, 4, 5]. Цим забезпечується дуже ретельне перемішування частинок палива з повітрям, інтенсивне їх горіння, виходить більш однорідний, стійкий факел горіння і відбувається повне вигорання горючих елементів. При цьому продуктами згорання біогазу є оксиди азоту у перерахунку на діоксид азоту ( $\text{NO}_x$ ), оксид вуглецю ( $\text{CO}$ ), оксиди сірки у перерахунку на діоксид сірки ( $\text{SO}_x$ ), сажа ( $\text{C}$ ), неметанові леткі органічні сполуки (НЛОС), метан ( $\text{CH}_4$ ), сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) та діоксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ).

Об'ємна витрата  $W_v$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) та швидкість виходу  $U$  ( $\text{м}/\text{с}$ ) біогазу, що спалюється у факельній установці, розраховувались за залежностями [7]:

$$W_v = 0,785 \cdot U \cdot d_0^2, \quad (6)$$

$$U = 0,5U_{зв}; \quad (7)$$

$$U_{зв} = 91,5 \cdot \left[ K \cdot \frac{(T_0 + 273)}{\mu_r} \right]^{0,5}; \quad (8)$$

де  $U_{зв}$  – швидкість поширення звуку при спалюванні біогазу,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $d_0$  – діаметр сопла факельної установки,  $\text{м}$ ;  $K$  – показник, що залежить від температури  $T_0$  ( $^\circ\text{C}$ ) спалювання та умовної молекулярної маси біогазу  $\mu_r$  (14,19  $\text{кг}/\text{моль}$ ), 1,45.

Швидкість поширення звуку становитиме  $U_{зв} = 93,5$   $\text{м}/\text{с}$ , а швидкість виходу газоповітряної суміші –  $U = 47$   $\text{м}/\text{с}$ . При спалюванні біогазу у факелі виділяється сажа ( $\text{C}$ ).

Валові  $W_b$  ( $\text{т}/\text{рік}$ ) та максимальні разові  $W_{\text{мр}}$  ( $\text{г}/\text{с}$ ) викиди продуктів факельного спалювання біогазу в районі Рівненського полігону розраховувались за залежностями [7]:

$$W_b = 0,001 \cdot q_i \cdot W_{\text{мр}} \cdot T, \quad (9)$$

$$W_{\text{мр}} = 0,278 \cdot q_i \cdot W_g, \quad (10)$$

$$W_g = 2826 \cdot U \cdot d_0^2 \cdot \rho_H, \quad (11)$$

де  $q_i$  – граничний викид  $i$ -ої забруднюючої речовини при факельному спалюванні біогазу,  $\text{кг}/\text{кг}$ , визначається розрахунковим способом для метану ( $\text{CH}_4$ ), сірководню ( $\text{H}_2\text{S}$ ) і діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), для інших речовин – за довідковими даними [7];  $T$  – час роботи факельної установки,  $\text{год}/\text{рік}$ ;  $W_g$  – масова витрата біогазу,  $\text{кг}/\text{хв}$ .

Отже, спалювання біогазу у факельній установці призводитиме до локального забруднення наступними продуктами згорання: оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ) – 0,0004  $\text{т}/\text{рік}$  або 0,4937  $\text{г}/\text{с}$ ; оксид вуглецю ( $\text{CO}$ ) – 0,1111  $\text{т}/\text{рік}$  або 1,0286  $\text{г}/\text{с}$ ; оксиди сірки ( $\text{SO}_x$ ) – 0,0001  $\text{т}/\text{рік}$  або 0,0247  $\text{г}/\text{с}$ ; сажа ( $\text{C}$ ) – 0,0016  $\text{т}/\text{рік}$  або 0,1234  $\text{г}/\text{с}$ ; НЛОС – 0,0016  $\text{т}/\text{рік}$  або 0,1234  $\text{г}/\text{с}$ ; метан ( $\text{CH}_4$ ) – 0,0000001  $\text{т}/\text{рік}$  або 0,0007  $\text{г}/\text{с}$ ; діоксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) – 0,1947  $\text{т}/\text{рік}$  або 1,3619  $\text{г}/\text{с}$ . Вище встановлені продукти згорання були характерні лише для ситуацій, коли у системі дегазації витрата біогазу перевищуватиме 400  $\text{м}^3/\text{год}$  (подія малоймовірна), та при виникненні аварій, коли система утилізації відмовила і факельна установка спалює весь зібраний об'єм біогазу. При реалізації згаданих аварійних ситуацій максимально-можливі концентрації продуктів спалювання на межі санітарної зони (500  $\text{м}$ ) і житлової забудови не перевищуватимуть встановлені норми допустимих концентрацій. Крім того, було змодельовано режим експлуатації факельної установки, при якому виникають несприятливі метрологічні умови, а саме, повний штиль. За таких умов при факельному спалюванні біогазу концентрація метану ( $\text{CH}_4$ ) на межі найближчої житлової забудови становитиме 0,0000001  $\text{мг}/\text{м}^3$  при масі викиду 0,0007  $\text{г}/\text{с}$ . Слід зазначити, що до експлуатації системи дегазації полігону концентрація метану ( $\text{CH}_4$ ) на межі хутора Нарада складала 0,138  $\text{мг}/\text{м}^3$ , що вже викликало дискомфорт для населення при нормі 50  $\text{мг}/\text{м}^3$ .

Основні об'єми продуктів згорання біогазу для нормальної експлуатації системи дегазації Рівненського полігону ТПВ пов'язані із роботою стаціонарного двигуна (рис. 8), який одночасно генерує електроенергію та тепло через процес когенерації.

По класу енергетичних установок когенераційні модулі, в тому числі і газопоршневі двигуни (рис. 8), відносяться до класу міні-ТЕЦ [4-6]. Коефіцієнт корисної дії таких установок складає 92-95%. Популярність двигун-генераторних установок на вітчизняних полігонах для утилізації біогазу (рис. 1) обумовлена наявністю широкого вибору моделей і типів обладнання від різних виробників, обізнаністю виробничого персоналу про принципи роботи двигуна, який дуже схожий на автомобільний двигун [6]. Зазвичай, це двигун з іскровим запалюванням, який працює на природному газі, в модифікації, яка придатна працювати на газі з нижчою теплотворною спроможністю. Стаціонарні двигуни є генераторами реактивної потужності. Це означає, що в залежності від рівня вихідної потужності і компенсації коефіцієнта потужності може виникати таке явище, як самозбудження генератора, яке призводить до зростання вмісту вищих гармонік в струмі. Це, в свою чергу, може впливати на стабільність підключення до енергомережі, особливо у випадку енергетичних систем меншої потужності. Станції на біогазі мають очевидну перевагу, оскільки можуть працювати в режимі базисного навантаження в умовах контрольованого і регульованого надходження палива. Це дає можливість відстежувати навантаження і зменшувати дисбаланс напруги у системі, який створює в мережі ефект пульсації напруги. Станції на біогазі зазвичай мають потужність не більше 5 МВт. Проектована станція має діапазон потужності 0,5-0,7 МВт.

Валовий викид  $i$ -ої забруднюючої речовини  $E_i$  (т/рік), що надходить в повітря з димовими газами при згоранні біогазу у двигуні, визначався за залежністю [8]:

$$E_i = 10^{-6} \cdot k_i \cdot B \cdot Q_i^r, \quad (12)$$

$$B = B_v \cdot \rho_n, \quad (13)$$

$$Q_i^r = Q_{iv}^r / \rho_n, \quad (14)$$

$$Q_{iv}^r = 358,2[\text{CH}_4] + 126,3[\text{CO}] + 108[\text{H}_2] \quad (15)$$

де  $k_i$  – показник емісії  $i$ -ої забруднюючої речовини, г/ГДж, визначається розрахунковим способом або за довідковими даними [8];  $B$  – витрата біогазу, т/рік;  $Q_i^r$  – нижча теплота згорання палива, МДж/кг;  $B_v$  – об'єм біогазу, що спалюється, тис. м<sup>3</sup>;  $Q_{iv}^r$  – об'ємна нижча теплота згорання біогазу при нормальних умовах, МДж/нм<sup>3</sup>;  $\rho_n$  – густина біогазу при нормальних умовах, 1,24 кг/нм<sup>3</sup>;  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2$  – вміст макрокомпонентів у біогазі, %.

При експлуатації стаціонарного двигуна процес утилізації зібраного біогазу на Рівненському полігоні ТПВ сприяє утворенню наступної маси парникових газів: азоту оксид ( $\text{N}_2\text{O}$ ) – 0,0921 т/рік або 0,0029 г/с; метан ( $\text{CH}_4$ ) – 0,0460 т/рік або 0,2107 г/с; диоксид вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) – 3050,5 т/рік або 1,5119 г/с. Оскільки в районі полігону присутнє фонове забруднення емісіями біогазу, який не вловлюється системою дегазації (за попередніми підрахунками 2,6 млн. м<sup>3</sup>/рік), був виконаний прогноз забруднення повітря з урахуванням фону та системи утилізації біогазу (враховувалась одночасна експлуатація стаціонарного двигуна і факельної установки). Основними забруднювачами повітря в районі Рівненського полігону ТПВ є мікрокомпоненти біогазу – сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ) – 0,004-0,006 мг/м<sup>3</sup>, аміак ( $\text{NH}_3$ ) – 0,01-0,138 мг/м<sup>3</sup>, ксилол ( $\text{C}_8\text{H}_{10}$ ) – 0,01-0,08 мг/м<sup>3</sup> та толуол ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ ) – 0,24-0,56 мг/м<sup>3</sup>; за концентраціями макрокомпонент біогазу (метану та вуглекислого газу) в районі полігону спостережень не ведуть. Зокрема, інструментальними замірами до будівництва системи дегазації було встановлено, що середня концентрація метану ( $\text{CH}_4$ ) на межі хутора Нарада у теплий період року складає 0,138 мг/м<sup>3</sup>. Така концентрація метану ( $\text{CH}_4$ ) на відстані від полігону майже 500 м свідчила про зрілу стадію метаногенезу. Після введення в експлуатацію системи дегазації

метан ( $\text{CH}_4$ ) інструментальним способом не був визначений. Це свідчить про значний екологічний ефект для прилеглих територій при дегазації Рівненського полігону ТПВ.

**Висновки.** Досвід збору і утилізації біогазу на Рівненському полігоні ТПВ свідчить, що активну дегазацію полігонів слід розглядати не лише як інвестиційно привабливий вид діяльності, що дозволяє генерувати та реалізовувати енергетичні ресурси за «зеленим» тарифом, але і як технологічний захід, що спрямований на покращення екологічної ситуації в районі полігону. За рахунок зменшення емісій біогазу на практиці виникає можливість продовження терміну експлуатації полігонів, які вичерпали свій ресурс. Так, при дегазації Рівненського полігону термін його експлуатації було продовжено до 2030 року. При цьому полігон зможе приймати надалі відходи на захоронення, а система дегазації сприятиме зменшенню поширення емісій біогазу під час їх біодеструкції. З врахуванням середньої товщини відходів на полігоні біогаз може мігрувати за межі їх складування на відстань більше 200 м, а продукти самозаймання відходів – до 600 м. Однаково небезпечними та токсичними для населення і природних об'єктів буферних екосистем Рівненського полігону є емісії біогазу та продукти горіння відходів. При експлуатації системи дегазації масштаб поширення біогазу набагато зменшився. Зокрема, емісія метану ( $\text{CH}_4$ ) на межі житлової забудови була повністю відсутня, до будівництва системи дегазації концентрація складових біогазу створювала дискомфорт для населення, відчувалась у повітрі. Імовірність виникнення пожеж на полігоні за рахунок самозаймання відходів зменшилась у двічі, оскільки процес дегазації вловлює до 2,6 млн.  $\text{м}^3$ /рік емісій біогазу. Дегазація полігону також вплинула на склад фільтрату. В районі впливу газозбірних свердловин аналізи фільтрату підтвердили зменшення концентрацій нітратів ( $\text{NO}_3^-$ ), аміаку ( $\text{NH}_3$ ), хлоридів ( $\text{Cl}^-$ ) та нітритів ( $\text{NO}_2^-$ ). За прогнозами стан фільтрату при подальшому накопиченні ТПВ покращуватиметься. Активна дегазація полігону стала причиною відновлення деградованих фітоценозів буферних екосистем. При експлуатації системи дегазації слід очікувати і покращення стану ґрунтів прилеглих територій, збільшення біорізноманіття буферних екосистем.

### Література

- 1 Коровяка Е.А. Регенерация метана, выделяемого мусорными свалками, и возможности его утилизации в Днепропетровском регионе / Е.А. Коровяка, Е.А. Василенко, Э.С. Манукян // Геотехнічна механіка. – 2014. – №117. – С. 215–224.
- 2 Пухнюк А.Ю. Полевые исследования для оценки потенциала образования биогаза на полигонах твердых бытовых отходов Украины / А.Ю. Пухнюк, Д.В. Куцый, Ю.Б. Матвеев // Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». – 2012. – №105. – С. 482–495.
- 3 Пятничко А.И. Результат обследования полигонов ТБО Украины для установления объемов добычи и состава биогаза / А.И. Пятничко, Г.В. Жук // Технические газы. – 2010. – №2. – С. 63–66.
- 4 Куцый Д.В. Тенденции развития технологий энергетической утилизации биогаза с производством электроэнергии на полигонах ТБО / Д.В. Куцый, Ю.Б. Матвеев, А.Ю. Пухнюк // Коммунальная и промышленная теплоэнергетика. – 2011. – т. 33, №6. – С. 64–72.
- 5 Матвеев Ю.Б. Энергетическое использование бытовых отходов / Ю.Б. Матвеев // Твердые бытовые отходы. – 2011. – №4. – С. 10–15.
- 6 ПРОГРАМА ФІНАНСУВАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ (ПРОГРАМА USELF). Технічний звіт з оцінки потенціалу відновлюваної енергетики в Україні: Проектні сценарії для Програми фінансування відновлюваної енергетики в Україні: Біогаз, 2011.
- 7 Методика расчета выбросов вредных веществ в атмосферу при сжигании попутного нефтяного газа на факельных установках. – СПб.: НИИ Охраны атмосферного воздуха, 1997. – 57 с.
- 8 Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. Том I. УкрНТЕК, Донецьк, 2004. – 167 с.

© С. В. Атаєв

*Надійшла до редакції 06 лютого 2017 р.  
Рекомендував до друку  
докт. техн. наук Л. Я. Побережний*