

## ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Протягом останніх десятиліть швидкість утворення твердих побутових відходів (ТПВ) в світі постійно збільшувалася. Кількість ТПВ щороку зростає на 3-6%. У різних країнах на одного жителя зазвичай припадає від 250 до 700 кг ТПВ на рік, а в окремих країнах - до 1000 кг на рік. Розміщення відходів на полігонах - найбільш часто використовуваний метод остаточної ліквідації твердих побутових відходів по всьому світу. Типова для України схема поводження з твердими побутовими відходами — нероздільний збір і захоронення (більше 90% усіх відходів) веде до засмічення земель; безповоротної втрати ресурсів і прибутку, який могла б дати правильно налагоджена комплексна переробка відходів; збільшення міграції відходів у навколишнє середовище (в даний час кількість ТПВ, що надходить, перевершує можливості природних екосистем). Після закриття полігону чи звалища залишаються величезні площі земель, які не використовуються. Найбільші під полігони зайняті площі в Дніпропетровській (140 га), Донецькій (330 га), Одеській (195 га), Запорізькій (153 га) та Луганській (129 га) областях. Після закриття полігону можливо його використання в якості основи для споруд і конструкцій, зокрема спортивних майданчиків, заповідників, автостоянок, промислових парків, місць відпочинку тощо.

Полігони являють собою дуже складні системи, в яких безліч процесів протікає одночасно. Утворення звалищного газу, в результаті розкладання відходів, змінює тиск газу і рідини в тілі полігону, які можуть вплинути на пористість, загальне напруження, ступінь їхньої насиченості, що в свою чергу викликає деформації, тобто осадки. Ці деформації негативно впливають на цілісність будь-якої структури, яка побудована на основі закритого звалища. Непередбачені осадки у кінцевому підсумку призводять до ряду проблем, таких як утворення тріщин в покриваючому шарі, пошкодження цілісності покриваючих і підстилаючих шарів, пошкодження систем збору газу і рідин і дренажних систем, зсувів, що призводять до катастрофічних наслідків і спричиняють руйнування конструкцій і навіть загибель людей. Зокрема, наприкінці ХХ сторіччя відбувся зсув звалища в штаті Мен (США), де вивільнилося майже 1,2 млн. м<sup>3</sup> відходів, а також на Філіпінах (в м. Пайатас), в результаті чого загинуло щонайменше 278 чоловік. Зсуви, що відбулися останнім часом на звалищах Рампке в США, Дона Хуана в Колумбії та в Індонезії є прикладами таких катастрофічних подій, які не лише коштували мільйони збитків, але і спричинили значне забруднення навколишнього середовища. Тому більш точний прогноз осадок і стійкості звалищ стає ключовим питанням при проектуванні і будівництві полігонів.

ТПВ представляють собою гетерогенну суміш відходів від різних галузей і сфер міського господарства. Маса відходів на звалищах присутня в трьох станах: твердому, рідкому і газоподібному. Тверда фаза включає в себе як відходи, так і ґрунти, якими покриваються шари ТПВ. Рідка фаза складається з інфільтрату, дощової води, проникаючої у відходи, і вологи, присутньої у відходах в момент розміщення. Основним джерелом газової фази на звалищах є гази, що утворюються при розкладанні органічних відходів.

Деформування твердих побутових відходів являє собою складний процес, що зумовлено самою природою ТПВ. Стійкість полігонів безпосередньо залежить від осадки, яка зазвичай виникає як результат первинного і вторинного стиснення.

Осадку ТПВ в основному пов'язана з такими чинниками: фізичними та механічними процесами, які включають в себе переорієнтацію частинок, рух більш дрібних частинок в порожнечі, а також руйнування пустот; хімічними процесами, які включають в себе корозію, самозаймання і окислення; процеси розчинення, які складаються з розчинення речовин в рідинах з подальшим формуванням інфільтрату; біологічним розкладанням органічних речовин з плином часу в залежності від вологості і кількості органічних складових у відходах. Значна осадка відбувається під час і відразу після розміщення відходів через фізичні і механічні процеси, які часто називають основною осадкою.

Істотна додаткова осадка відбувається повільнішими темпами протягом тривалого періоду часу в зв'язку з хімічними і біологічними процесами (біорозкладання), які часто називають вторинною осадкою. Вторинна осадка пов'язана також з механічною повзучістю відходів.

Прогнозування деформацій та осадки ґрунтів може здійснюватися на основі експериментальних даних, отриманих в ході лабораторних досліджень зразків відходів з полігонів за допомогою тестів прямого зсуву, тривісних тестів та ін. Цей метод є недосконалим, оскільки в лабораторних умовах не вдається відобразити умови полігону, в тому числі захопити в одному зразку всі шари і врахувати їхні геотехнічні та фізико - механічні властивості. Для запобігання зсувів та руйнувань на полігонах проводяться тести зворотного аналізу зруйнованих полігонів. Цей метод також не є задовільним, оскільки не може достовірно прогнозувати осадку на інших не зруйнованих полігонах в зв'язку з іншими природними умовами, складом відходів, конструкцією та типом полігону. Отже математичне моделювання є найприйнятнішим методом прогнозування деформації полігону.

Моделі, що описують осадку полігону ТПВ можна розділити на моделі, що базуються на механіці ґрунтів, емпіричні моделі, реологічні моделі та моделі, які враховують біорозкладання. На даний час модель, яка включає в себе всі фактори, що впливають на осадку відсутня і її розробка є важливим питанням.

Хоча властивості відходів відрізняються від властивостей традиційних ґрунтів, встановлено, що масив ТПВ може бути змодельований слабким ґрунтом. Найбільш розповсюдженою моделлю, що базується на механіці ґрунтів є модель слабого ґрунту з врахуванням повзучості Soft Soil Creep (SSC). Основними параметрами моделі є модифікований коефіцієнт набухання  $\kappa^*$ , модифікований коефіцієнт компресії (стискання)  $\lambda^*$ , модифікований коефіцієнт повзучості  $\mu^*$ . Ці параметри можна визначити з одометричного тесту та з тесту ізотропної компресії. Параметр  $\mu^*$  можна визначити вимірявши об'ємну деформацію за довгий проміжок часу, побудувавши залежність від логарифму часу.

Відношення параметрів цієї моделі до параметрів моделі Cam-Clay становлять:

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e_0}; \kappa^* = \frac{\kappa}{1+e_0}. \quad (1)$$

Відношення параметрів моделі до міжнародно-нормованих параметрів становлять:

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2,3(1+e_0)}; \lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1+e_0)}; \kappa^* = \frac{2C_s}{2,3(1+e_0)}, \quad (2)$$

де  $C_c$  – коефіцієнт компресії;  $C_s$  – коефіцієнт набухання;  $C_\alpha$  – коефіцієнт повзучості.

Модель Cam-Clay розроблена вченими з Кембріджу для моделювання ґрунтів. Згідно цієї моделі в рамках критичної механіки ґрунтів, стан зразка ґрунту характеризується трьома параметрами: ефективною напругою  $p$ , девіаторною напругою зсуву  $q$  та питомим об'ємом  $v$ . Згідно цієї моделі, коли зразок ґрунту повільно стискається під дією ізотропної напруги та в ідеально сухих умовах, відношення між  $v$  та  $\ln p$  представляє собою пряму лінію початкової консолідації.

Емпіричні моделі намагаються імітувати загальну поведінку відходів шляхом коригування емпіричних параметрів для конкретної ділянки. В основному використовуються наступні математичні функції: логарифмічна функція, ступенева функція повзучості і гіперболічна функція осадки. Осадка у вигляді логарифмічної функції має вигляд:

$$\Delta H = H_f \left[ \alpha + \beta \log\left(t - \frac{t_c}{2}\right) \right], \quad (3)$$

де  $\Delta H$  – осадка;  $H$  – початкова товщина шару відходів;  $\alpha$  – місцевий параметр ( $=0,00095H_f+0,00969$ );  $\beta$  – місцевий параметр ( $=0,00035H_f+0,00501$ );  $t$  – час, що минув з початку заповнення звалища;  $t_c$  – період спорудження.

Парк і Лі запропонували модель осадки, яка враховує залежну від часу біодеградацію відходів. Передбачається, що швидкість осадки виражається через множину осадок, прямо пропорційну кількості твердих речовин, що розкладаються. Розчинення органічних матеріалів, як правило, виражається з використанням рівняння кінетики першого порядку. Проте, визначення кінетичних коефіцієнтів або констант гідролізу, а також їх зміна в умовах навколишнього середовища є дуже складним. Модель осідання може бути виражена як:

$$\varepsilon_{mec} = C_\alpha \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right); \varepsilon_{dec} = \varepsilon_{tot\_dec} \left( -e^{-k_1 t} \right), \quad (4)$$

де  $C_\alpha$  – величина вторинної компресії;  $k$  – константа швидкості розкладання першого порядку у відношенні до часу ( $2,37 - 1,35$  на рік);  $\varepsilon_{tot\_dec}$  – загальний обсяг стиснення, який виникає внаслідок розкладання органічних відходів ( $7.2 - 6.1$  %). Сума двох умов дає загальну деформацію стиснення.

Маркес розробив складову реологічну модель для врахування первинних і вторинних механізмів стиснення, які керуються реологічними параметрами, які також враховуються при деградації відходів. Первинна компресія називається «миттєвою компресією», яка не залежить від часу. Це засновано на спостереженні, що відповідний процес є лінійним для кривих, коефіцієнт пористості яких є функцією логарифма прикладеної напруги. Модель представлена за допомогою формули:

$$\frac{\Delta H}{H} = C'_c \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) + \Delta\sigma b \left( -e^{-ct'} \right) + E \left( -e^{-dt''} \right), \quad (5)$$

де  $\Delta H$  – осадка;  $H$  – початкова висота відходів;  $C'_c$  – первинне стиснення;  $b$  – коефіцієнт вторинного механічного стиснення;  $c$  – величина вторинного механічного стиснення;  $E$  – загальне стиснення, викликане деградацією відходів;  $d$  – коефіцієнт вторинного біологічного стиснення;  $t'$  – час, що минув з моменту завантаження;  $t''$  – час, що минув з моменту розміщення відходів.

Спільною рисою цих та інших моделей є те, що вони враховують лише тверді побутові відходи, їхню поведінку та властивості, нехтуючи такою важливою складовою полігону, як ґрунти, що лежать в його основі. Саме від типу, міцності, геотехнічних властивостей цього ґрунту залежить стійкість полігону, оскільки найбільше навантаження відчувають саме вони. Ґрунтуючись на спостереженнях крутих схилів звалища, які залишаються стабільними, можна зробити висновок, що основна увага при аналізі стійкості полігону повинна бути надана матеріалам, які лежать в основі ТПВ, (наприклад, геосинтетичним покриттям) і ґрунтам основи полігону, а не твердим побутовим відходам. На даний час цьому питанню зовсім не приділено уваги.

Для прогнозування оцінки стійкості полігону нами пропонується вивчення його осадки з обов'язковим дослідженням напружено-деформованого стану підстилаючої ґрунтової основи, яка моделюється пружним середовищем з умовою міцності Кулона-Мора з урахуванням поетапного навантаження кожного шару відходами. Це дасть змогу оцінити можливість використання полігону в якості основи будівлі або конструкції з врахуванням типу ґрунту.