

Н. В. Рашкевич

Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ МЕТОДИКИ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ НА ПОЛІГОНІ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З ТЕХНОЛОГІЧНИМ УСТАТКУВАННЯМ

В роботі запропонована математична модель попередження надзвичайної ситуації на полігоні твердих побутових відходів з технологічним устаткуванням. До складу моделі входять: рівняння, яке описує кількість загиблених осіб внаслідок виникнення надзвичайної ситуації; рівняння, яке описує умови існування рішень окремих задач оцінки умов визначення фізичного стану масиву відходів. Кількість постраждалих осіб внаслідок надзвичайної ситуації менше об'єктового рівня поширення наслідків небезпеки, а кількість осіб з порушенням умов життєдіяльності менше або дорівнює об'єктовому рівню.

Ключові слова: полігон твердих побутових відходів, надзвичайна ситуація, температура, вологість, щільність.

Постановка проблеми

Реконструкція діючих полігонів твердих побутових відходів (ТПВ) з урахуванням впровадження технології збору та утилізації біогазу для країн світу що розвиваються є першочерговим завданням в рамках вирішення ряду природоохоронних проблем. Однак потрібно враховувати, що більшість полігонів започатковані як стихійні звалища, що розташовані поблизу населених пунктів, а перманентний процес утворення відходів приводить до постійного збільшення площ та висоти зазначених об'єктів. Збільшення висоти складування відходів, їх вологості є причиною зростання напруги в масиві відходів. Полігони ТПВ з технологічним устаткуванням становлять однозначну небезпеку виникнення надзвичайних ситуацій (НС) [1]. У світі відомі чисельні випадки зсувів мас відходів з катастрофічними наслідками [2, 3]. Скорочення наслідків небезпеки НС є пріоритетним напрямком в діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України). Одним зі шляхів підвищення ефективності діяльності ДСНС України є розробка та впровадження методик попередження НС, які базувалися на сучасних досягненнях інформаційних технологій та відповідного їх математичного наповнення. Таким чином, формування математичного апарату, який адекватно описує попередження НС на полігоні ТПВ з технологічним устаткуванням є актуальним та нагальним завданням у сфері цивільного захисту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Пошук шляхів підвищення ефективності протидії однозначній небезпеці виникнення НС на полі-

гонах ТПВ з технологічним устаткуванням вимагає проведення аналізу світового та вітчизняного наукового підґрунтя.

Механізм руйнування та режим нестабільності полігонів ТПВ вивчені за допомогою польових досліджень [4, 5], випробувань фізичних моделей [6,7] та числового моделювання [8–10].

Автори [4] методом багатоканального аналізу поверхневих хвиль поєднали статичне зондування та польові спостереження. Це дозволило отримати дані про швидкість хвиль в масиві відходів, які в подальшому використовували для розширеної інтерпретації результатів зондування – дозволили ідентифікувати ТПВ як ґрунтоподібний матеріал, отримати інформацію про структуру стовпа відходів та нижнього шару ґрунту, тип поведінки ґрунту й механічні характеристики відходів.

Польові та лабораторні дослідження [5] показали, що тіло відходів можна поділити на декілька шарів за віком захоронення. Кожен з шарів відходів має індивідуальний склад та характеристики міцності на зсув. Результати трьохосного тесту [5] показали, що міцність на зсув збільшується з роками захоронення ТПВ.

Серія модельних випробувань центрифуг [6, 7] продемонстрували розвиток процесів відмов стійкості масиву відходів в умовах підвищеного рівня вологості. Співвідношення критичного рівня води та висоти масиву ТПВ склала близько 0,8 [7].

Міцність на зсув масиву відходів – це функція багатьох факторів таких як тип, склад, вік, процес розкладання відходів, ущільнення, щоденне покриття, умови зволоження, надмірний тиск та ін. [8, 9]. Кожен з цих факторів або комбінація факторів може привести до руйнування схилу масиву відходів. Се-

ред основних причин зсуву мас відходів автори [2] додатково розглядають вибух біогазу внаслідок підземних пожеж, що спричиняють розтріскування й осідання поверхні полігону.

Науковці [8] дослідили міцність на зсув шляхом зворотного аналізу відмов на схилах та висунули рекомендації для нормальних напружень менше 200 кПа питоме зчеплення становить 6 кПа, кут внутрішнього тертя 35° ; для нормальних напружень більше 200 кПа питоме зчеплення 30 кПа, кут внутрішнього тертя 30° .

Метод розрахунку стійкості масиву відходів [10] враховує розтягуючі сили в волокнах. Мобілізація розтягуючих сил залежить від нормальної напруги в волокнах. Компонент міцності на зрушення, що створюється розтягуючими силами, називається волокнистою когезією [9]. Змодельовані ситуації авторами [10] показують: без пожежі на звалищі загальна стабільність склала 1,13; з пожежею, коли міцність на розрив була втрачена, загальна стабільність – 1,00.

Комплексна великомасштабна програма лабораторних досліджень [9] з використанням прямих зсувних (DS), тривісних та простих зсувних випробувань, з урахуванням впливу складу відходів, орієнтації волокнистих часток, обмеженої напруги, швидкості зміни напруги, сумісності напругодеформаційного стану та питомої ваги показала, що статична міцність DS на зсув ТБО краще всього характеризується когезією 15 кПа та кутом тертя 36° при нормальній нарузі 1 атм. зі зменшенням кута тертя на 5° для кожного логарифмічного циклу зростання нормальної напруги.

З огляду на те що ТПВ являють собою армогрунтоподібний матеріал [4, 10], справедливо розглядати методи розрахунку стійкості схилів (укосів) та зсувного тиску що викладені в положенні [11]: методи граничної рівноваги (диференційні методи); методи оцінювання напружено-деформованого стану методом скінчених елементів (інтегральні методи); комбіновані методи.

Система збору та утилізації біогазу з масиву відходів, як й сам масив, піддається стресам, які виникають внаслідок просідання, корозії або старіння матеріалів обладнання, пошкодження важкими механізмами, транспортними засобами (котками, бульдозерами, сміттєвозами), постійного зміну складу біогазу. Ефективне функціонування системи збору біогазу передбачає утримання величини перерахованих нижче параметрів в межах наступних діапазонів [12]: метан (CH_4) від 46 до 55%; кисень (O_2) від 0 до 0,5 %; азот (N_2) від 2 до 14 %; оксид вуглецю (CO) менше 25 об'ємних частин на мільйон; температура газу на оголовках свердловини $52\text{--}60^\circ\text{C}$. Максимальну кількість метану у складі біогазу в умовах полігону ТПВ можна тримати дотримуючись

температури в межах $30\text{--}40^\circ\text{C}$, вологість в межах 60–80 %. Під час дослідження складу біогазу практичний інтерес представляють методики Табасарана-Реттенбергера, АКГ ім. К. Д. Памфілова, А. М. Шаїмової та ін. [14].

З огляду на сучасні наукові дослідження, що направлені на встановлення закономірностей механіки масиву відходів, отримання максимальної кількості метану у складі біогазу, невирішеною частиною проблеми забезпечення цивільної безпеки є відсутність адекватної методики попередження НС на полігоні ТПВ з технологічним устаткуванням з урахуванням відповідного математичного наповнення.

Формування мети статті

Метою дослідження є формування математичного апарату в інтересах розробки методики попередження надзвичайної ситуації на полігоні твердих побутових відходів з технологічним устаткуванням.

Для досягнення поставленої мети треба вирішити наступні завдання: 1) розробити математичну модель, яка дозволяє попереджати надзвичайну ситуацію на полігоні твердих побутових відходів з технологічним устаткуванням; 2) довести адекватність математичної моделі в умовах її практичної реалізації.

Виклад основного матеріалу

Масив відходів на полігоні ТПВ є багатокомпонентною системою до складу якої входять тверда, рідка та газоподібна фази. Об'ємні співвідношення між фазами у часі та просторі змінюються, що істотно впливає на стійкість. Для розрахунку стійкості необхідно знати характеристики механічних властивостей масиву відходів, які окрім складу ТПВ та структурних особливостей, залежать від фізичного стану (щільності, вологості, температури).

Механіка масиву відходів, як армогрунтоподібного матеріалу, обумовлена: властивостями міцності, що визначаються з закону Кулона кутом внутрішнього тертя φ (град), питомим зчепленням c (МПа); деформаційними властивостями, що визначаються з закону ущільнення коефіцієнтом стисливості m_0 (МПа⁻¹), коефіцієнтом відносної стисливості m_v , модулем загальної деформації E (МПа); водопроникністю, що визначається з закону Дарсі коефіцієнтом фільтрації K_f (м/добу), коефіцієнтом консолідації C_v (см²/год).

Стійкість масиву відходів – здатність чинити опір руйнуванню що відбувається при зсуві однієї частини по відношенню до іншої по явно вираженій криволінійній поверхні ковзання під дією дотичних напружень від зовнішнього навантаження. Дотичні

напруження у товщі масиву виникають під дією власної ваги, а також додаткового перевантаження та пороводяного тиску. Відповідно до моделі Маслова зсув може статися в результаті обертання зсувного масиву навколо центра O (рис. 1).

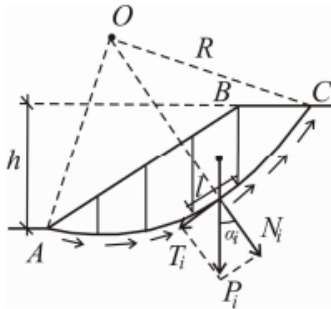


Рис. 1. Умови оцінки ступеня стійкості масиву

За поверхню ковзання приймають круглоциліндричну поверхню у вигляді дуги радіусом R з центром O , який може бути взятий довільно, але так, щоб в результаті побудови вийшов клин, який здатний до зсуву. Утворений клин ділять на ряд елементів вертикальними перетинами й знаходять вагу кожного елемента P_i . Сили ваги P_i складаються з N_i нормальної та T_i дотичної складових сили ваги. Зчеплення масиву відходів c враховують по всій поверхні ковзання.

Коефіцієнт стійкості K_{cm} – це відношення моментів всіх сил, що утримують схил M_{ym} , до моментів всіх сил, що діють на зсув M_{zc} відносно центру дуги ковзання:

$$K_{cm} = \frac{M_{ym}}{M_{zc}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n N_i \cdot tg\varphi + c \cdot l_i \right) R}{\sum_{i=1}^n T_i R} \quad (1)$$

де φ – кут внутрішнього тертя (град); $tg\varphi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя; c – зчепленням (МПа), l_i – довжина дуги i -го елемента.

Опір масиву на зсув визначається силами внутрішнього тертя та зчепленням. ТПВ за рахунок вмісту волокон характеризуються механічною (структурною) зв'язністю, а за рахунок наявності вологих липких компонентів – зчепленням.

Територія або схил масиву відходів вважається безпечним від зсуву у разі виконання умов:

$$K_{cm} = \frac{Y}{Z} \geq 1, \quad (2)$$

де Y – опір масиву зміщенню, кН; Z – зсувне зусилля, кН.

Попередження НС внаслідок зсуву мас відходів, вибуху біогазу на технологічному устаткуванні включає в себе заходи направлені на локалізацію наслідків впливу небезпеки – недопущення розвитку об'єктового рівня НС на більш високий рівень. Відповідно до Постанови КМУ від 24.03.2004 року № 368 «Про затвердження Порядку класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями» критеріями визначення рівня НС є показники наслідків q_{1-6} : кількість постраждалих; кількість загиблих осіб; кількість осіб з порушенням умов життєдіяльності; територія поширення; технічні і матеріальні ресурси, що необхідні для ліквідації наслідків НС; розмір збитків, завданих уражальними чинниками джерела НС.

Відповідно умови попередження НС на зазначеному об'єкті за пріоритетними наслідками (q_1 , q_2 , q_3 – кількість постраждалих, загиблих осіб, осіб з порушенням умов життєдіяльності внаслідок НС) є строге виконання системи рівнянь:

$$\begin{cases} q_1(\rho, w, T) < q^{об} \\ q_2(\rho, w, T) = 0 \\ q_3(\rho, w, T) \leq q^{об} \end{cases}, \quad (3)$$

де $q^{об}$ – кількісні показники наслідків НС, що відповідають об'єктовому рівню, (ρ, w, T) – щільність, вологість, температура масиву відходів на полігоні ТПВ.

Наслідки НС q_{1-3} пов'язані умовою вибору варіації рішень окремих задач з визначення φ_1 , φ_2 , φ_3 :

$$\Psi(q_1, q_2, q_3) = f_{q_1, q_2, q_3}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3), \quad (4)$$

Рішення задачі оцінки умов визначення щільності масиву відходів.

Масив відходів на полігоні ТПВ протягом свого життєвого циклу зазнає ущільнення: механічного під час розміщення ТПВ, ущільнення в результаті віджимання фільтрату, й біохімічної деструкції з утворенням біогазу.

Ущільнення відходів супроводжується стисненням твердих часток, води та повітря, що знаходяться в порах, між компонентами відходів, руйнуванням зв'язків між частками й їхнім взаємним зміщенням, та віджиманням вільної води. Ущільнюють відходи на полігоні за допомогою спеціальної важкої техніки (бульдозерами, катками, компакторами) – в залежності від кількості проїздів, щільність їх досягає порядку 1 т/м^3 . Навантаження силою P (МПа), що діють на площа поперечного перерізу масиву A (м^2), викликає стискальне напруження σ

(МПа) в масиві відходів:

$$\sigma = \frac{P}{A}, \quad (5)$$

Щільність масиву відходів ρ (т/м³) описується відношенням маси масиву відходів m (т) до об'єму V (м³). З глибиною щільність зростає, а пористість зменшується [15]. Пористість визначається:

$$n = 1 - V_{m\phi}, \quad (6)$$

де $V_{m\phi}$ – об'єм твердих часток (м³). Діюча напруга не може суттєво змінити $V_{m\phi}$ до та після деформації. Об'єм твердих часток в одиниці об'єму складає:

$$V_{m\phi} = \frac{1}{(1 + e_0)}, \quad (7)$$

де e_0 – початковий коефіцієнт щільності.

Зміна коефіцієнта пористості Δe_i ($\Delta e_i = e_0 - e_i$) під тиском P_i :

$$\Delta e_i = \frac{S_i(1 + e_0)}{h}. \quad (8)$$

де S_i – осідання від тиску P_i , h – висота складування відходів (м). Висота h залежить від проектно-експлуатаційних рішень.

Коефіцієнт пористості e_i за тиску P_i :

$$e_i = e_0 - \frac{S_i(1 + e_0)}{h}. \quad (9)$$

Оскільки площа поверхні масиву відходів на багато більша за схили боковим розширенням можна знехтувати, зміна щільності $\Delta\rho$ під тиском P знаходиться з виразу:

$$\Delta\rho = \frac{S_i A}{hA} = \frac{S_i}{h}, \quad (10)$$

Щільність скелету масиву відходів $\rho_{m\phi}$ (т/м³) виражається через щільність ρ та вологість w (%) масиву відходів:

$$\rho_{m\phi} = \frac{\rho}{1 + w}. \quad (11)$$

Ущільнення у разі збільшення навантаження відбувається за нелінійним законом. Проте в деякому діапазоні ущільнювального тиску криволінійний характер залежності $e_i - P_i$ можна апроксимувати прямою лінією АВ (рис. 2).

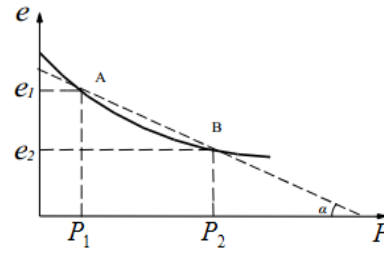


Рис. 2. Схема визначення коефіцієнта стисливості

Коефіцієнтом стисливості m_0 (МПа⁻¹) дорівнює:

$$m_0 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1}. \quad (12)$$

Відносна стисливість m_v дорівнює:

$$m_v = \frac{m_0}{1 + e_0}. \quad (13)$$

Модуль загальної деформації E (МПа) є коефіцієнтом пропорційності між напруженням σ і відносними деформаціями:

$$E = \frac{\beta}{m_v}, \quad (14)$$

де β – коефіцієнт, що враховує неможливість бічного розширення масиву.

Відповідно, рішення окремої задачі щодо оцінки умов визначення щільності масиву відходів описуються виразом (15):

$$\varphi_1 = f(P, n, h). \quad (15)$$

Таким чином, шукане рішення окремої задачі являє собою аналітичну залежність, яка описує зв'язок щільності масиву відходів у відповідності до варіації фізичних параметрів – сили навантаження P , пористості n , висота складування відходів h .

Рішення задачі оцінки умов визначення вологості масиву відходів. Вологість є обов'язковим фактором для життєдіяльності багатьох мікроорганізмів, серед яких метаноутворюючі бактерії. На початковому етапі формування масиву відходів його вологість залежить від морфологічний складу та кількості окремих компонентів ТБО.

Рівняння виходу біогазу при метановому бродінні описується залежністю [16]:

$$Q_m = 10^{-6} R \cdot (100 - w) \cdot (0,92Ж + 0,62В + 0,34Б), \quad (16)$$

$$w = 100 - \frac{Q_w}{10^{-6} R \cdot (0,92Ж + 0,62В + 0,34Б)}, \quad (17)$$

де Q_m – питома маса біогазу (кг/кг); w – середня вологість відходів (%); R – вміст органічною складовою у відходах (%); $Ж$ – вміст жироподібних речовин (%); $В$ – вміст вуглицевоподібних речовин (%); $Б$ – вміст білкових речовин (%).

Відповідно до удосконаленої моделі АКГ ім. Памфілова кількість біогазу з полігону ТПВ [17]:

$$Q = (1 - w) \cdot L_0 \cdot m \cdot \left(1 + \frac{k_1}{k_2 - k_1} \cdot e^{-k_1 \cdot \tau} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_2 \cdot \tau}\right), \quad (18)$$

$$w = 1 - \frac{Q}{L_0 \cdot M \cdot \left(1 + \frac{k_1}{k_2 - k_1} \cdot e^{-k_1 \cdot \tau} - \frac{k_2}{k_2 - k_1} e^{-k_2 \cdot \tau}\right)}. \quad (19)$$

де L_0 – потенціал генерації метану ($\text{м}^3/\text{т}$) при розкладанні органічної складової сухих відходів; m – маса відходів на поточний рік експлуатації полігону (т); k_1, k_2 – константи розкладання відходів в фазі ацетоногенеза та метаногенеза відповідно; t – час розкладання ТПВ (рік).

Однак, модель (18) включає велику кількість досить точних експериментальних даних, зокрема, за морфологічним складом кожної фракції ТПВ, що вкрай ускладнює її застосування на практиці.

Виходячи з рівняння водного балансу полігону ТПВ [18], кількість рідини в масиві відходів Q_P визначається вхідними потоками рідини Q_P^{Bx} (АО – атмосферні опади, ВВ – волога ТПВ; ПС – поверхневий стік води з прилеглих нагорних територій; Р – подача на поверхню відходів фільтрату для зволоження, рециркуляція фільтрату; З – технологічна подача води в пожежонебезпечний період; Інтр – інтрузія, надходження в масив відходів води з підземних горизонтів) та вихідних потоків рідини Q_P^{Bux} (ПС – поверхневий стік з полігону; БГ – втрати вологи з біогазом; БД – споживання води при біохімічному розкладанні; ВипВ – випаровування вологи з поверхні та транспірація рослинами; ВБВ – вбирання вологи відходами; ДР – відведення фільтрату дренажною системою; ПР – просочування в підземні горизонти; ПВ – зміна вологозапасу остаточного покриття):

$$Q_P = (Q_{АО} + Q_{ВВ} + Q_{ПС} + Q_P + Q_3 + Q_{Интр}) - (Q_{ПС} + Q_{БГ} + Q_{БД} + Q_{ВипВ} + Q_{ВБВ} + Q_{ДР} + Q_{ПР} + Q_{ПВ}) \quad (20)$$

Якщо $Q_P^{Bx} \gg Q_P^{Bux}$ відбувається надмірне накопичення рідини, що характерно за умов великої кількості атмосферних опадів або рециркуляції фільтрату при відмові поверхневого стоку з полігону, відведення фільтрату дренажною системою, коефіцієнт фільтрації протифільтраційного екрану не задовольняє нормативним вимогам (складає не більше 10^{-9} м/с). Якщо маса відходів, що складає зсувне тіло перенасичена рідиною (збільшена загальна маса), то відповідні напруження спричиняють появу надлишкового тиску, збільшуються ймовірність нерівномірних просідань, зсувів.

Водопроникність кількісно характеризується коефіцієнтом фільтрації K_f (м/добу):

$$K_f = \frac{Q_P}{A \cdot t \cdot l}, \quad (21)$$

де Q_P – кількість рідини (м^3), A – площа поперечного перерізу (м^2); t – час (доба); l – напірний градієнт.

Коефіцієнт фільтрації мас відходів K_f залежить від коефіцієнта пористості e :

$$e = \frac{n}{V_{me}} = \frac{1 - V_{me}}{V_{me}}, \quad (22)$$

де n – пористість масиву відходів; V_{me} – об'єм твердих часток в одиницю об'єму масиву відходів (м^3).

Від вологості залежать фізико-механічні властивості масиву відходів: при малій вологості масив знаходиться в твердому стані; зі збільшенням переходить в пластичний стан (зміна форми не викликає порушення цілісності); при подальшому збільшенні – в текучий стан. З ростом вологості зчеплення c та кут кутот внутрішнього тертя φ знижуються за рахунок ослаблення структурних зв'язків та впливу рідини на контакт частинок.

Вологість масиву відходів w (%) визначається:

$$w = \frac{m_p}{m_m} \cdot 100\%, \quad (23)$$

де m_p – маса рідини (т); m_m – маса твердої фази (т).

Вміст вологи з висотою масиву змінюється без збереження закономірностей: може збільшуватись, або зменшуватись. Низьке водонасичення нижніх шарів свідчить про глибоке залягання в тілі полігону ґрунтових вод та зниження проникності техногенних відкладень [15].

Внаслідок підвищення щільності масиву відходів (консолідації) під впливом навантаження у часі

обсяги рідини зменшуються. Коефіцієнт консолідації C_v (см²/год) визначається:

$$C_v = \frac{K_f(1+e)}{m_0\gamma_p} \quad (24)$$

де γ_p – питома вага рідини (Н/м³).

Для верхньої зони масиву відходів (аеробної) характерний інфільтраційний режим. Коефіцієнт стійкості K_{cm} визначається:

$$K_{cm} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n N_i t g \varphi + c \cdot l_i \right) \cdot R}{\sum_{i=1}^n T_i R} \quad (25)$$

Для нижньої зони масиву відходів (анаеробної) характерний фільтраційний режим. На зниження водопроникності впливає заповнення порового простору біогазом, колоїдною масою органіки, що розклася. В напірному режимі пори відходів заповнюються повністю по всій висоті насиченого шару рідиною. Коефіцієнт стійкості K_{cm} при гідростатичному зважуванні відходів визначається:

$$K_{cm} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (N_i - D_i) \cdot t g \varphi + c \cdot l_i \right) \cdot R}{\sum_{i=1}^n T_i R} \quad (26)$$

де D_i – величина гідростатичного тиску в середині основи розрахункового i -го елемента (кПа).

$$D_i = h_i \cdot \gamma_p, \quad (27)$$

де h_i – висота шару, що насичений рідиною (м).

Відповідно, рішення окремої задачі щодо оцінки умови визначення вологості масиву відходів описуються виразом (28):

$$\varphi_2 = f(Q_P^{Bx}, Q_P^{Bux}, \rho). \quad (28)$$

Шукане рішення окремої задачі являє собою аналітичну залежність, яка описує зв'язок вологості масиву відходів у відповідності до варіації вхідних Q_P^{Bx} та вихідних потоків рідини Q_P^{Bux} , щільності ρ .

Рішення задачі оцінки умов визначення температури масиву відходів. Температура масиву відходів залежить від температури ТПВ $T_{ТПВ}$, теплопровідності ТПВ $\lambda_{ТПВ}$, температури атмосферного повітря $T_{атм.л.}$. Температура, тепловий потік,

теплове навантаження в масиві відходів змінюється з часом та викликають зміни внутрішньої енергії.

$$Q_{відводу} + Q_{генерації} - Q_{відводу} = Q_{накопичення}. \quad (29)$$

Процес переносу тепла описується законом Фур'є. Для функції Q трьох просторових перемінних (x, y, z) та часу t , рівняння теплопровідності має вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = Q(x, y, z, t), \quad (30)$$

де $a = \frac{\lambda}{C \cdot \rho}$ – коефіцієнт температуропровідності, що характеризує швидкість зміни температури (м²/с).

При певних умовах швидкість виділення тепла в масиві відходів може перевищувати швидкість відводу тепла, що призводить до безперервного збільшення температури та займання горючої складової ТПВ, як наслідок вигорання, утворення пустот та втрата стійкості масиву.

Температура масиву відходів впливає на процес розкладання відходів – утворення біогазу, а також на умови роботи інженерного устаткування. Для попередньої оцінки питомого виходу біогазу Q_B (м³/т), що утворюється з 1 т відходів однорідного складу за час t (рік), в США та деяких державах Європи використовується Методика Табасарана-Реттенбергера:

$$Q_B = 1,868 \cdot C_0 \cdot (0,014 \cdot T + 0,028) \cdot (1 - 10^{-kt}), \quad (32)$$

$$T = \frac{\left(\frac{Q_B}{1,868 \cdot C_0 \cdot (1 - 10^{-kt})} - 0,028 \right)}{0,014} \quad (33)$$

де C_0 – вміст органічного вуглецю; T – температура у товщі масиву відходів (°С); k – константа розкладання, що дорівнює відношенню кількості вуглецю до загального азоту, C/N; t – час з моменту захоронення відходів (рік).

Відповідно, рішення окремої задачі щодо оцінки умови визначення температури масиву відходів описуються виразом (34):

$$\varphi_3 = f(Q_{відводу}, Q_{генерації}, Q_{відводу}). \quad (34)$$

Таким чином, шукане рішення окремої задачі являє собою аналітичну залежність, яка описує зв'язок температури масиву відходів у відповідності до

варіації кількості тепла що підводиться $Q_{\text{відводу}}$, генерується $Q_{\text{генерації}}$, відводиться $Q_{\text{відводу}}$.

Математична модель попередження надзвичайної ситуації на полігоні твердих побутових відходів з технологічним устаткуванням має вид (35) та умови її існування (36):

$$\begin{cases} q_2(\rho, w, T) = 0 \\ \Psi(q_1, q_2, q_3) = f_{q_1, q_2, q_3}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \end{cases}, \quad (35)$$

$$\begin{cases} q_1(\rho, w, T) < q^{\text{об}} \\ q_3(\rho, w, T) \leq q^{\text{об}} \end{cases}. \quad (36)$$

З огляду на те, що небезпечними факторами виникнення НС на полігоні ТПВ з технологічним устаткуванням є зсув мас відходів та вибух біогазу, заходи попередження розвитку небезпеки базуються на регулюванні умов фізичного стану масиву відходів, моніторингу біогазу.

Висновки

1. У ході досліджень розроблена математична модель попередження надзвичайної ситуації на полігоні твердих побутових відходів з технологічним устаткуванням у складі двох рівнянь зв'язку, а саме рівняння, яке описує кількість загиблих осіб внаслідок надзвичайної ситуації та умови існування рішень окремих задач оцінки умов визначення щільності, вологості, температури масиву відходів, та відповідних граничних умов опису кількості постраждалих та кількості осіб з порушенням умов життєдіяльності внаслідок надзвичайної ситуації.

2. Попередження надзвичайної ситуації включає в себе комплекс заходів спрямованих на недопущення збільшення кількості постраждалих, загиблих осіб, осіб з порушенням умов життєдіяльності переростання з об'єктового рівня на більш високий рівень. Наслідки пов'язані умовою вибору варіації рішень окремих задач з визначення фізичного стану масиву відходів.

Література

1. Рашкевич, Н.В. Аналіз техногенної небезпеки технологій поводження з твердими побутовими відходами [Текст] / Н.В. Рашкевич // Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст». Серія: Технічні науки та архітектура. – 2019. – № 152. – С. 58–66.

2. Lavigne, F., Wassmer, P., Gomez, C., Davies, T., Hadmoko, D.S., T Yan W M Iskandarsyah, Pratomo, I. (2014). The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 1, 10.

3. Рашкевич, Н.В. Спосіб виявлення пожеж на території полігону твердих побутових відходів [Текст] / Н.В. Рашкевич, І.А. Черепньов, І.О. Ковальов // Інженерія природокористування. – 2019. – № 3 (13). – С. 102–109.

4. Оффрихтер, В.Г. Оценка геотехнических характеристик ТБО полевыми методами [Текст] / В.Г. Оффрихтер, М.А. Безогодов, Я.В. Оффрихтер // Акад.вестник УралНИИПроект РААСН. – 2015. – № 3. – С. 58–65.

5. Zhan, T.L.T., Chen, Y.M., Ling W.A. (2008). Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. *Engineering Geology*, 97, 3–4, 97–111.

6. Yun-min Chen, Jun-chao Li, Chun-bao Yang, Bin Zhu, Liang-tong Zhan (2017). Centrifuge modeling of municipal solid waste landfill failures induced by rising water levels. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(12), 1739-1751.

7. Zhu, B., L. Wang, Y.M. Chen (2018). Centrifugal model tests on static and seismic stability of landfills with high water level. Proceedings of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. *Physical Modelling in Geotechnics*, V. 2, United Kingdom

8. Huvaj-Sarihan, N., Stark, T.D. (2008). Back-Analyses of Landfill Slope Failures. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 12.

9. Bray, J.D., Zekkos, D., Kavazanjian, E.J., Athanasopoulos, G.A., Reimer, M. (2009). Shear strength of municipal solid waste. *ASCE J Geotechnical Geoenvironmental Eng*, 135(6), 709–722.

10. Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C., Damanhuri, E. (2005). Stability of landfills—The Bandung dumpsite disaster. CISA (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy).

11. ДБН В.1.1-46:2017. Інженерний захист територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів. Основні положення [Текст] – Київ: Мінрегіон Укр., 2017. – 41 с.

12. Solid Waste Association of North America (SWANA). *Landfill Gas Operation and Maintenance Manual of Practice*. (1997).

13. Шаимова, А.М., Изучение факторов метангенерации в условиях полигона твердых бытовых отходов [Текст] / А.М. Шаимова, Л.А. Насырова, Р.Р. Фасхутдинов // Башкирский химический журнал. – 2011. – Том 18. – № 2. – С. 172–176.

14. Rashkevich, N., Goncharenko, I., Anishenko, L. et al. (2018). Biogas from the municipal solid waste polygon. *Scientific Journal «ScienceRise»*, 9 (50), 39–42.

15. Карлушина, Н.В. Комплексная оценка воздействия полигона твердых бытовых отходов г. Иркутска на компоненты окружающей среды [Текст] / Н.В. Карлушина, А.В. Тулохонова, О.В. Уланова // Инженерная геология. – 2/2014. – С. 54–62.

16. Методические указания по расчету количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых отходов [Текст] / Н.Ф. Абрамов, В.Г. Корнеев, Э.С. и др. – М. : АКХ им. К.Д. Памфилова, 1995. – 25 с.

17. Рекомендации по расчету образования биогаза и выбору систем дегазации на полигонах захоронения твердых бытовых отходов [Текст] / Н.Ф. Абрамов, Я.И. Вайсман, С.В. и др. – М.: ФГУП Федерального центра благоустройства и обращения с отходами, 2003. – 27 с.

18. Методика расчета водного баланса полигонов захоронения твердых бытовых отходов [Текст] / Я.И. Вайсман, М.А. Таглов и др. – Пермь, 2002. – 19 с.

References

1. Rashkevich, N.V., Cherepnev, I.A., Kovalev, I.O. (2019). Method of fire detecting at a municipal solid waste landfill. *Engineering of nature management*, 3 (13), 102–109.

2. Lavigne, F., Wassmer, P., Gomez, C., Davies, T., Hadmoko, D.S., T Yan W M Iskandarsyah, Pratomo, I. (2014). The 21 February 2005, catastrophic waste avalanche at Leuwigajah dumpsite, Bandung, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 1, 10.
3. Rashkevich, N.V. (2019). Analysis of technogenic danger of solid waste management technologies. *Naukovo-tehnichnyy zbirnyk «Komunal'ne gospodarstvo mist»*. Seriya: Tekhnichni nauky ta arkhitektura, 152, 58–66.
4. Ofrikhter, V.G., Bezgodov, M.A., Ofrikhter, Ya.V. (2015). Otsenka geotekhnicheskikh kharakteristik TBO polevymi metodami. *Akad.vestnik UralNIIproyekt RAAS*, 3, 58–65
5. Zhan, T.L.T., Chen, Y.M., Ling W.A. (2008). Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou landfill, China. *Engineering Geology*, 97, 3–4, 97–111.
6. Yun-min Chen, Jun-chao Li, Chun-bao Yang, Bin Zhu, Liang-tong Zhan (2017). Centrifuge modeling of municipal solid waste landfill failures induced by rising water levels. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(12), 1739-1751.
7. Zhu, B., L. Wang, Y.M. Chen (2018). Centrifugal model tests on static and seismic stability of landfills with high water level. Proceedings of the 9th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics. United Kingdom. *Physical Modelling in Geotechnics*, 2.
8. Huvaj-Sarihan, N., Stark, T.D. (2008). Back-Analyses of Landfill Slope Failures. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 12.
9. Bray, J.D., Zekkos, D., Kavazanjian, E.J., Athanasopoulos, G.A., Reimer, M. (2009). Shear strength of municipal solid waste. *ASCE J Geotechnical Geoenvironmental Eng*, 135(6), 709–722.
10. Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C., Damanhuri, E. (2005). Stability of landfills—The Bandung dumpsite disaster. CISA (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Landfill Symposium, Cagliari (Italy).
11. DBN V.1.1-46:2017. (2017). *Inzhenernyy zakhyst terytoriy, budivel' i sporud vid zsuiv ta obvaliv. Osnovni polozhennya*. Minrehion Ukrainy, 41.
12. *Solid Waste Association of North America (SWANA). Landfill Gas Operation and Maintenance Manual of Practice. (1997).*
13. Shaimova, A.M., Nasyrova, L.A., Faskhutdinov, R.R. (2011). Izucheniye faktorov metangeneratsii v usloviyakh poligona tverdykh bytovykh otkhodov. *Bashkirskiy khimicheskiy zhurnal*, 18, 2, 172–176.
14. Rashkevich, N., Goncharenko, I., Anishenko, L. et al. (2018). Biogas from the municipal solid waste polygon. *Scientific Journal «ScienceRise»*, 9 (50), 39–42.
15. Karlushina, N.V. Tulokhonova, A.V. Ulanova, O.V. (2014). Kompleksnaya otsenka vozdeystviya poligona tverdykh bytovykh otkhodov g. Irkutsk na komponenty okruzhayushchey sredy. *Inzhenernaya geologiya*, 2, 54–62.
16. Abramov, N.F., Korneyev, V.G., Sannikov, E.S., Terlovskiy, P.M., Rusakov, N.V. (1995). *Metodicheskiye ukazaniya po raschetu kolichestvennykh kharakteristik vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu ot polygonov tverdykh bytovykh otkhodov*, 25.
17. Abramov, N.F., Vaysman, Ya.I i dr. (2003). *Rekomendatsii po raschetu obrazovaniya biogaza i vyboru sistem degazatsii na polygonakh zakhoroneniya tverdykh bytovykh otkhodov*, 27.
18. Vaysman, Ya.I., Tagilov M.A. i dr. (2002). *Metodika rascheta vodnogo balansu polygonov zakhoroneniya tverdykh bytovykh otkhodov*, 19.

Рецензент: д.т.н., с. н. с., начальник наукового відділу проблем цивільного захисту та техногенно-екологічної безпеки науково-дослідного центру Р. І. Шевченко, Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна.

Автор: РАШКЕВИЧ Ніна Владиславна
аспірант
Національний університет цивільного захисту
України
E-mail – nine291085@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

FORMATION OF MATHEMATICAL APPARATU FOR THE METHODOLOGY OF EMERGENCY PREVENTION ON SOLID WASTE LANDFILL WITH TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

N. Rashkevich

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

The landfill with technological equipment becomes a clear danger of emergencies. The dangerous factors of emergencies there is landslides of waste mass, explosion of biogas on technological equipment. Modern scientific research aimed at establishing the laws of soil mechanics, obtaining the maximum amount of methane in the biogas composition, an unresolved part of the problem of ensuring civil security is the lack of an adequate method of emergency prevention. In the course of research, by the author was developed a mathematical model of emergency prevention on solid waste landfill with technological equipment. The mathematical model consists of an equation that describes the number of casualties due to an emergency and an equation that describes the existence of solutions to separate problems of estimating the conditions for determining the density, humidity, temperature of the waste mass. The desired solution of a separate problem is an analytical dependence that describes the relationship of the density of the waste mass in accordance with the variation of the physical parameters of the load force, porosity, height of waste storage. The desired solution of a separate problem is an analytical dependence that describes the relationship of the humidity of the waste mass in accordance with the variation of the input and visible fluid flows, density. The desired solution of a separate problem is an analytical dependence that describes the relationship of the temperature of the waste mass in accordance with the variation of the amount of heat supplied, generated, discharged. The number of people affected by an emergency is less than the objective level of the effects of the hazard, and the number of people with impaired living conditions is less than or equal to the objective level. Emergency prevention involves a set of measures aimed at preventing an increase in the number of victims, casualties, and persons with impaired living conditions from an object level to a higher level.

Keywords: solid waste landfill, emergency, temperature, humidity, density.