

УДК 621.03.9

Н. В. Рашкевич¹, д.філос., викл. каф. (ORCID 0000-0001-5124-6068)

В. О. Шершньов¹, курсант (ORCID 0000-0002-3711-7048)

В. К. Словінський², к.т.н., заст. зав. відділу (ORCID 0000-0002-6194-3171)

В. М. Коновал³, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-6740-6617)

¹*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

²*Черкаський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, Черкаси, Україна*

³*Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна*

ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО АПАРАТУ МЕТОДИКИ ПРОТИДІЇ ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕЦІ ОБ'ЄКТІВ ЗАХОРОНЕННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Проаналізовано пожежовибухонебезпеку об'єктів захоронення побутових відходів з урахуванням тенденцій впровадження систем збору та утилізації біогазу (метану) – альтернативного джерела енергії для енергетичних установок. За результатами аналізу та синтезу факторів виникнення та поширення техногенної небезпеки, наявних математичних моделей та методик протидії техногенній небезпеці, визначено початкові та граничні умови існування математичного апарату методики протидії пожежовибухонебезпеці об'єктів захоронення побутових відходів, що є основою для подальшої розробки відповідної методики протидії надзвичайній ситуації. У ході аналізу встановлено, що вологість, температура масиву звалищних ґрунтів (побутових відходів), наявність у достатній кількості кисню у певний момент часу ініціюють утворення пожежовибухонебезпечної концентрації метану в масиві та сприяють поширенню небезпеки на полігонах або звалищах за наслідками впливу, як на довкілля, так й людей. Питома вага органічної складової, значення щільності масиву, висота захоронення відходів впливають на процес протидії небезпеці, а саме запобігання виникнення небезпечної події та попередження переростання надзвичайної ситуації з об'єктового на найбільш високий рівень поширення (місцевий), в першу чергу за наслідками першої групи пріоритетності, як то кількість жертв та постраждалих цивільних осіб та фахівців підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Визначено, що подальші дослідження будуть стосуватися: встановлення області ефективних рішень з вибору варіації рішень окремих задач з оцінки зазначених показників початкових та граничних умов існування математичного апарату в рамках розробки методики протидії надзвичайної ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів, що наближені до населених пунктів; розробки керуючого алгоритму відповідної методики та перевірку її достовірності шляхом порівняння результатів натурних та імітаційних досліджень.

Ключові слова: побутові відходи, пожежовибухонебезпека, математичний апарат, початкові умови, граничні умови

1. Вступ

У світі найбільш розповсюдженим способом поводження з побутовими відходами є захоронення на спеціальних полігонах або звалищах, площі яких з кожним роком розростаються та наближуються до населених пунктів [1, 2]. Невід'ємною частиною експлуатації даних об'єктів є процеси горіння, що протікають роками. Однак, особливо гостро стоїть проблема пожеж. А з огляду на рентабельність отримання та подальше використання біогазу, основою якого є газ метан, то й вибухів. Горіння відходів відбувається не лише на поверхні місць захоронення, а й у глибині мас накопичення відходів. Внаслідок вигорання утворюються порожнечі, які є причиною виникнення провалів та зсувів. Слід зазначити, що сьогодні в Україні ряд об'єктів захоронення побутових відходів офіційно становлять потенційну небезпеку виникнення надзвичайних ситуацій за ознакою біологічна, хімічна, а також пожежна, вибухова небезпеки та віднесені до Державного реєстру потенційно небезпечних об'єктів. Відповідно до статистичних даних, да-

них засобів масової інформації, на об'єктах захоронення побутових відходів відомі чисельні випадки небезпечних подій, пов'язаних з пожежовибухонебезпекою [3], що призводять до забруднення компонентів довкілля внаслідок додаткового утворення екологічно-небезпечних речовин (наприклад, діоксинів), поширення небезпеки на значні площі, загибелі, травмуванню людей, порушення умов життєдіяльності. Тому актуальності набуває вирішення проблеми щодо забезпечення пожежовибухонебезпеки об'єктів захоронення побутових відходів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Наукова спільнота, здебільшого, полігони та звалища розглядає як джерела забруднення довкілля в штатному режимі, внаслідок небезпечної події (НП) або надзвичайної ситуації (НС) пов'язаних з пожежовибухонебезпекою, акцентуючи увагу на небезпеці звалищного газу (біогазу) та фільтраційних вод (фільтрату), при цьому недостатньо уваги приділяє проблемі забезпечення цивільної безпеки – запобігання НП та попередження поширення НС.

В роботі [4] відмічено, що важливою характеристикою при оцінці пожежовибухонебезпеки об'єктів захоронення побутових відходів (ПВ) є морфологічний склад відходів. Колективом науковців [5] у підтвердження статистичних даних показано, що найбільшою категорією відходів є харчові та зелені відходи. Харчові та зелені відходи є сировиною утворення біогазу (метану), що здатний горіти та вибухати. ПВ являють собою гетерогенну суміш, в якій присутні майже всі хімічні елементи як у чистому вигляді, так і у вигляді різних сполук. Найбільш поширеними хімічними елементами є вуглець та водень [6]. Дослідження [6] показали піротехнічні характеристики зразків ПВ. Розглядаючи морфологічний склад, колективи авторів вищенаведених наукових робіт основну свою увагу приділяють саме теплотворній спроможності відходів з метою їх використання як сировини для отримання альтернативного джерела енергії. Але залишається невирішеним питання, яке пов'язане з виключенням горючої складової відходів з об'єкту захоронення відходів. На практиці на полігоні ПВ або звалищі повністю виключити горючу складову відходів неможливо.

У світі з кожним роком зростає інтерес до біогазу, як альтернативного джерела енергії [7], але при цьому недостатньо приділяється уваги протидії надзвичайним ситуаціям, де основні наслідки техногенної небезпеки впливають на життя та здоров'я людей, що працюють або мешкають поруч з об'єктом захоронення ПВ.

Основними компонентами біогазу є метан (в середньому до 60 % від загального складу) діоксид вуглецю, домішки азоту, сірководню, кисню, водню та інші гази [8]. На якісний та кількісний склад метану, впливає ряд факторів (кліматичні умови, сезонність, рівень життя населення, рівень розвитку ринку вторинної сировини), що вносять свої обмеження щодо надійного та безпечного отримання якісного метану у складі біогазу, що не враховано в жодній із проаналізованих роботах та не знайшло відображення у відповідних методиках протидії техногенній небезпеці.

Значна частина робіт, які присвячені проблематиці, що розглядається, орієнтовані саме на дослідження оптимальних умов максимального утворення горючого газу метану у складі біогазу в місцях захоронення відходів. В роботах [9, 10] наведено оптимальний діапазон вологості (60–80 %), температур (35–40 °C для мезофільної активності та 50–65 °C для термофільної активності). Однак, *civil security*. DOI: 10.52363/2524-0226-2021-34-17

дотримання оптимальних значень факторів утворення максимальної кількості метану може підсилити виникнення техногенної небезпеки – зниження стійкості масиву відходів, внаслідок надмірного зволоження, а високі температури до вигорання відходів та утворення пустот.

Найбільш поширеними причинами пожеж є збільшення вмісту кисню у масиві відходів внаслідок порушення технологій захоронення (недостатнє ущільнення або шар ізоляції, розміщення надмірної кількості відходів), перевищення об'ємів збору біогазу. Застосування великих обсягів води під час гасіння може призвести до потрапляння порції кисню у товщу відходів та підсилити процеси аеробного розкладання – утворення пожежовибухонебезпечного газу – метану. Дослідження [11] показали, що наростання температури в масиві ПВ залежить від вологості, морфологічного складу, вмісту активного вуглецю, щільності, теплоємності, теплопровідності та температуропровідності відходів. Зазначені вище роботи наголошують о пожежовибухонебезпеці на об'єктах захоронення ПВ, але не розкривають у повній мірі питання підвищення рівня техногенної безпеки – розробки основи для відповідної методики.

Прогнозування й попередження пожеж на полігонах ПВ, як фактора зниження стабільності техногенних об'єктів [12], вкрай ускладнено через різну питому теплоємність відходів. Поки вогонь або дим не вийшли на поверхню, виявити осередок загоряння візуально практично неможливо [13, 14]. Результати моделювання розподілу температури у масиві відходів за умови різної температури джерела горіння [15] свідчить про неможливість точного виявлення на поверхні контактними методами підземної пожежі. Стан розвитку фітоценозів можна використовувати як індикатор підземної пожежі, але, на жаль, низької оперативності. Наявні методи спостереження та контролю впливають на своєчасне виявлення факторів небезпеки, але у повній мірі не усувають саму небезпеку.

Автором в роботі [16] сформульований математичний апарат методики попередження НС каскадного типу поширення, пов'язаних зі зсувом звалищних ґрунтів на полігоні ПВ з ліквідаційним енергоємним технологічним устаткуванням. Математична модель, складається з аналітичних рівнянь залежності кількості загиблих осіб, постраждалих, осіб з порушенням умов життєдіяльності від фізичних властивостей звалищних ґрунтів, як-то вологість, щільність, температура, та технологічних показників наявного енергетичного устаткування. Умовою існування запропонованої моделі є набір початкових та граничних умов не переростання наслідків НС за межі об'єктового рівня поширення небезпеки з урахуванням отримання максимальної кількості метану у складі біогазу. В роботі [17] запропонована модель уточнена та запропонована лабораторна установка щодо проведення експериментальних досліджень з перевірки достовірності математичного апарату та відповідної методики попередження надзвичайних ситуацій. Але, з огляду на наявність не тільки небезпеки пов'язаної зі зсувом звалищних ґрунтів, невирішеною частиною проблеми є відсутність комплексної дієвої методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення ПВ, на основі адекватного математичного апарату.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми забезпечення пожежовибухобезпеки об'єктів захоронення побутових відходів залишається відсутність математичного апарату, який сформовано на єдиних методологічних

підходах щодо процесу попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежовибухонебезпекою технологій збору та утилізації біогазу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення умов формування математичного апарату методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів, що наближені до населених пунктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

– визначити початкові та граничні умови існування математичного апарату методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів;

– визначити основні рівняння зв'язку математичного апарату методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів.

4. Формування математичного апарату методики протидії пожежовибухонебезпеці об'єктів захоронення побутових відходів

4.1. Визначення початкових та граничних умов існування математичного апарату

На об'єктах захоронення ПВ існує ймовірність виникнення як НП, так й НС, що характеризуються розмірами заподіяних наслідків. Метан, як складова звалищного газу (біогазу), є небезпечним фактором виникнення та поширення пожежі, вибуху – НП або НС.

Математичне моделювання є основним інструментом дослідження процесу метаногенерації. Для розрахунку газоенергетичного потенціалу біогазу (метану) розроблена значна кількість математичних моделей: Табасарана-Реттенбергера, Б. Вебера, LandGEM, АКГ ім. К. Д. Памфілова, А. М. Шаїмової та ін. Найбільш вагомими факторами для дослідження метаногенерації є вологість, морфологічний склад, вміст активного вуглецю, щільність, температура в масиві відходів, висота складування, термін експлуатації об'єкту.

Оптимальним підходом отримання повних та достовірних даних оцінки, прогнозу метаногенерації є поєднання результатів математичного моделювання з польовими дослідженнями. Однак, використання методів прямих польових вимірювань обмежені. Обмеженість пов'язана зі складністю та високою їх вартістю.

ПВ на об'єктах захоронення зазнають складних фізичних, хімічних та біологічних перетворень з виділенням звалищного газу.

Початковий обсяг після вивантаження ПВ на карту захоронення значно зменшується за рахунок самоущільнення. З метою зменшення займаного обсягу, відходи ущільнюються за допомогою спеціальної важкої техніки (бульдозерами, катками) – щільність досягає 1 т/м^3 . Утворений субстрат має аномальні геофізичні характеристики, аномальні інженерно-геологічні показники, а також неоднорідні фільтраційні властивості та погану водовіддачу. Чим вище щільність (мікробіологічне життя в такому матеріалі сповільнюється), тим менше утворюється газу, а зменшення фракцій відходів збільшує газоутворення.

Серед хімічних процесів на об'єктах захоронення ПВ переважають окислювально-відновні і фотохімічні реакції, відбувається гідроліз і деполімеризація, утворення важко розчинних та комплексних сполук.

Біологічне розкладання відбувається під дією великої кількості мікроорганізмів. Головне місце займають бактерії, які забезпечують початок процесу розкладання органічних речовин і швидке підвищення температури. Спочатку розвивається група мезофільних бактерій, а після розігріву середовища відходів починає активно розвиватися група термофільних бактерій, які здатні розщеплювати більш стійкі органічні сполуки. Потрібно враховувати, що ряд хімічних речовин (наприклад важкі метали) є токсичними та виступають інгібіторами для діяльності мікроорганізмів.

Аеробне розкладання відбувається у верхніх шарах масиву захоронення на глибині 50–80 см та, зазвичай, є досить коротким, оскільки його тривалість обмежена кількістю кисню. Дана стадія характеризується утворенням двоокису вуглецю, води, нітратів, нітритів, азоту, органічних залишків та великої кількості тепла. По мірі ущільнення відходів та ізоляції їх ґрунтом аеробна фаза мікробіологічного розкладання прагне стати анаеробною – аеробні мікроорганізми переходять в анаеробний стан. Це викликано недостатнім надходженням кисню в товщу відходів для задоволення умов аеробного процесу.

Анаеробне розкладання протікає повільніше та супроводжується на порядок меншим виділенням тепла. В фазі гідролізу під дією бактерій відбувається розпад легко- та середньорозкладаємих та гідроліз целюлозовмісних відходів. В ацетогенній (кислій) фазі – подальший розпад целюлози з утворенням низькомолекулярних кислот, спиртів. Середовище в тілі полігону стає дуже кислотним. Кислоти знижують водневий показник, що сприяє розпаду легко- та середньорозкладаємих відходів. Кислоти разом з вологою вивільнюють поживні речовини для метаноутворюючих мікроорганізмів. Потім настає метаногенна фаза в якій розкладаються кислоти, що були утворені в ацетогенній фазі, зі значним утворенням метану. З часом кількість поживної складової зменшується і процес утворення метану затухає. Анаеробні мікроорганізми отримують необхідну для життєдіяльності енергію в результаті розкладання органічних речовин. Питома вага органічної складової ПВ (паперу, деревини, текстилю, рослинних й харчових залишків) визначає кількість поживних мікроелементів, які потрібні для метаноутворюючих мікроорганізмів.

Вологість є обов'язковим фактором для життєдіяльності багатьох мікроорганізмів, серед яких й метаноутворюючі. Розчинність діоксиду вуглецю у воді вище, ніж розчинність метану, тому високий рівень вологості ПВ збільшує вміст метану в газовій фазі. Фактичне утримання вологи в масиві визначається вихідною вологістю ТПВ, заходами дотримання технологій захоронення.

Температура, як і вологість, є визначальним фактором активності бактерій. Мезофільні групи метаноутворюючих бактерій активно працюють при температурі до 40 °С, термофільні – до 70 °С. Оптимальне значення температури для ефективного процесу утворення метану в межах 30–40 °С. Рівень утворення газу істотно знижується при зміні значення оптимальної температури [9].

З урахуванням аналізу факторів, що сприяють утворенню метану у складі звалищного газу (біогазу), початковими умови виникнення небезпеки описується виразом (1):

$$\begin{cases} w(t) = w_0 \\ T(t) = T_0 \\ O_2(t) = O_{2_0} \end{cases}, \quad (1)$$

Таким чином, початковими умовами існування математичного апарату методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення ПВ, що наближений до населених пунктів, є набір значень вологості w , температури масиву звалищних ґрунтів (ПВ) T , наявність у достатній кількості кисню O_2 , які у певний момент часу t ініціюють утворення пожежовибухонебезпечної концентрації метану в масиві та поширення небезпеки за наслідками впливу.

Граничними умовами протидії небезпеці описуються виразом (2):

$$\begin{cases} C_{\text{поч}} \leq C \leq C_{\text{кін}} \\ \rho_{\text{поч}} \leq \rho \leq \rho_{\text{кін}} \\ h_{\text{поч}} \leq h \leq h_{\text{кін}} \end{cases}, \quad (2)$$

Таким чином, граничними умовами існування математичного апарату методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення ТПВ, що наближені до населених пунктів, є набір інтервальних значень питомої ваги органічної складової C , щільності ρ , висота захоронення відходів h , які впливають на процес протидії небезпеці.

4.2. Визначення основних рівнянь зв'язку математичного апарату методики протидії надзвичайній ситуації

З урахуванням сучасних вітчизняних наукових підходів у сфері цивільного захисту України та відповідної нормативної бази (Наказ МВС України від 06.08.2018 № 658 «Про затвердження Класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій», Національний класифікатор України «Класифікатор надзвичайних ситуацій» ДК 019:2010, Постанова КМУ від 24.03.2004 № 368 «Про затвердження Порядку класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями»), НС являють собою умовний рівень перебігу НП, який досягається за одним або кількома домінуючими ознаками, з погляду рівня загрози, та/або можливостей протидії підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Відповідно до числа негативних наслідків НС слід відносити: кількість жертв q_1 та кількість постраждалих q_2 , як наслідок першої групи пріоритетності; кількість осіб з порушенням умов життєдіяльності q_3 та розмір заподіяної шкоди q_4 – наслідки другої групи пріоритетності; площа поширення небезпеки НС q_5 та затрати на ліквідацію наслідків НС q_6 – наслідки третьої групи пріоритетності.

Враховуючи наведене вище, реалізація методики протидії НС, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення ПВ, повинна забезпечити відсутність ураження як цивільних осіб, так і фахівців підрозділів ДСНС України. Це можливо досягнути на основі розробки та дотримання ефективних організацій-

них, оперативних, інформаційних заходів, що базуються на математичному апараті – загальне рівняння (3):

$$Q(t) = f(w, \rho, T, O_2, C, h, t), \quad (3)$$

У випадку, коли $Q(t) = \dot{I}$ – розглядається запобігання НП (негативні наслідки q не настали), аналітичне рівняння (3), описує зв'язок залежності вибухопожежонебезпечної концентрації метану від вологості w , щільності ρ , температури T , та наявності у достатній кількості кисню O_2 , органічної складової C в масиві звалищних ґрунтів (ПВ), висоти h та часу t розкладання відходів. У випадку, коли $Q(t) = HC$ – розглядається попередження HC (територія поширення небезпеки, затрати на ліквідацію наслідків, розмір заподіяної шкоди, кількість загиблих, постраждалих, осіб з порушенням умов життєдіяльності не досягли місцевого рівня), аналітичне рівняння (3), описує зв'язок залежності кількості загиблих та постраждалих осіб, як наслідків першого рівня пріоритетності.

Основні рівняння зв'язку математичного апарату методики протидії HC представляють собою систему (4), умовою існування є набір початкових умов (1) виникнення небезпеки та граничних умов (2) запобігання виникнення та попередження поширення небезпеки, що пов'язані з фізико-хімічними властивостями масиву звалищних ґрунтів (ПВ):

$$\begin{cases} Q_{\text{запобіг}}(t) = f_{\text{запобіг}}(w, \rho, T, O_2, C, h, t), \text{ за умови } q_{1...6} = 0 \\ Q_{\text{попередж}}(t) = f_{\text{попередж}}(w, \rho, T, O_2, C, h, t), \text{ за умови } q_{1...6}^{\text{об}} \leq q_{1...6} < q_{1...6}^{\text{міс}}, q_{1...6} \neq 0, \end{cases} \quad (4)$$

Таким чином, визначено систему рівнянь зв'язку з урахуванням початкових та граничних умов існування математичного апарату, що дозволяє у подальшому розробити керуючий алгоритм та саму методику протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів, що наближені до населених пунктів. Система описує зв'язок залежності кількості загиблих та постраждалих осіб, як наслідків першого рівня пріоритетності, від фізико-хімічних властивостей звалищних ґрунтів, висоти масиву захоронення, часу розкладання відходів.

5. Обговорення результатів дослідження щодо протидії пожежовибухонебезпеці об'єктів захоронення побутових відходів

В основу розробки математичного апарату, за результатами аналізу та синтезу факторів виникнення та поширення пожежовибухонебезпеки на об'єктах захоронення побутових відходів, що викладені в нормативній літературі у сфері цивільної безпеки, наукових джерелах, статистичних звітах, покладене поняття «протидії надзвичайній ситуації», що включає заходи з запобігання виникнення та попередження поширення техногенної небезпеки. Під попередженням розуміється не допустити переростання надзвичайної ситуації з об'єктового на найбільш високий рівень поширення (місцевий), в першу чергу за наслідками першої групи пріоритетності, як то кількість жертв та постраждалих.

Об'єкти захоронення побутових відходів являють собою так звані біохімічний реактор, в якому внаслідок анаеробного розкладання органічної складової

утворюється звалищний газ (біогаз). Основну об'ємну масу біогазу складають гази – метан та діоксид вуглецю. Метан є більш небезпечною складовою з точки зору вирішення задач цивільної безпеки. На полігонах або звалищах широке розповсюдження отримують системи збору й утилізації пожежовибухонебезпечного газу. Цим дослідженням притаманні обмеження які пов'язані з тим, що процес розкладання органічної складової відходів відбувається нерівномірно з різною інтенсивністю: на одній частині об'єкту може переважати аеробне розкладання з виділенням вуглекислого газу, на другій – інтенсивне виділення метану. Кисень повітря зв'язує вуглець і перешкоджає утворенню метану. Під час вибору відповідної технології зниження небезпеки об'єктів захоронення побутових відходів необхідно враховувати: морфологічний склад – відсоток органічної складової; час та висоту захоронення; гарантії доставки відходів (їх склад і кількість); відстань до електричної мережі; наявність поблизу кінцевого споживача для прямого використання біогазу; можливість до капітальних та експлуатаційних затрат на впровадження технологій; наявність постачальників обладнання та послуг; наявність та кваліфікацію операторів для експлуатації та обслуговування обладнання.

Особливістю запропонованого методу і отриманих результатів, в порівнянні з існуючими, є подолання труднощів щодо підвищення рівня пожежовибухонебезпеки полігонів або звалищ побутових відходів з наявними системами збору та утилізації біогазу в контексті забезпечення цивільної безпеки шляхом врахування залежності наслідків техногенної небезпеки від фізико-хімічних властивостей звалищних ґрунтів (побутових відходів). У ході досліджень визначена математична основа для розробки методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів, що наближені до населених пунктів, реалізація якої дозволить запобігти небезпечній події або попередити надзвичайну ситуацію – обмежити поширення небезпеки з об'єктового рівня на більш високий (місцевий), захистити від ураження цивільних осіб та фахівців підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

Подальші дослідження направлені на: встановлення області ефективних рішень з вибору варіації рішень окремих задач з оцінки зазначених показників початкових та граничних умов існування математичного апарату в рамках розробки методики протидії надзвичайної ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів, що наближені до населених пунктів; на розробку керуючого алгоритму відповідної методики та перевірку її достовірності шляхом порівняння результатів натурних та імітаційних досліджень за t-критерієм Стьюдента.

6. Висновки

1. Визначено початкові та граничні умови існування математичного апарату методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів. Початковими умовами існування математичного апарату методики протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів є умови виникнення техногенної небезпеки, які змінюються з часом, а саме вологість, температура масиву звалищних ґрунтів (побутових відходів), наявність у достатній кількості кисню у певний момент часу ініціюють виникнення небезпеки – утворення пожежовибухонебезпечної концентрації метану в масиві та поширення небезпеки за наслідками впливу. Граничними умовами існування математичного апарату

методики протидії надзвичайній ситуації є умови запобігання виникнення та попередження поширення техногенної небезпеки, а саме питома вага органічної складової, щільність масиву, висота захоронення відходів впливають на процес протидії небезпеці. Наведений перелік є достатнім для вирішення питань цивільної безпеки – протидії пожежовибухонебезпеці об'єктів захоронення побутових відходів, захистити від ураження цивільних осіб та фахівців підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій.

2. Визначено систему рівнянь зв'язку з урахуванням початкових та граничних умов існування математичного апарату, що дозволяє у подальшому розробити керуючий алгоритм та саму методику протидії надзвичайній ситуації, пов'язаної з пожежовибухонебезпекою об'єктів захоронення побутових відходів, що наближені до населених пунктів. Система описує зв'язок залежності кількості загиблих та постраждалих осіб, як наслідків першого рівня пріоритетності, від фізико-хімічних властивостей звалищних ґрунтів, висоти масиву захоронення, часу розкладання відходів. Процес протидії надзвичайній ситуації включає в себе комплекс заходів спрямованих на недопущення виникнення пожежовибухонебезпечної концентрації метану в масиві звалищних ґрунтів при цьому основні наслідки небезпеки відсутні (дорівнюють нулю) – умова запобігання, а при вже існуючій небезпеці обмежити кількість постраждалих, загиблих осіб – умова попередження поширення небезпеці.

Література

1. Kaza S., Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development. Washington, DC: World Bank. 2018. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174>
2. Eurostat. Municipal waste management operations. 2020. URL: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasmun (дата звернення: 01.09.2021).
3. World Fire Statistics. International Association of Fire and Rescue Service. 2018. URL: <http://www.ctif.org/ctif/world-fire-statistics>
4. Серєда Т. Г., Михайлова М. А., Шалаєва Е. В. Проблеми пожарной безопасности полигонов твёрдых бытовых отходов. Материалы конференции. Секция 4: Современные технологии ликвидации ЧС и техническое обеспечение аварийно-спасательных работ. С. 336–341. URL: <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C52/105.pdf>
5. Suthar S., Singh P. Household solid waste generation and composition in different family size and socio-economic groups: A case study. Sustainable Cities and Society. 2015. Vol. 14. P. 56–63. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.07.004>
6. Götze R., Boldrin A., Scheutz C., Astrup T. Physico-chemical characterisation of material fractions in household waste: Overview of data in literature. Waste Management. 2016. Vol. 49. P. 3–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.008>
7. Statistical Report 2018. Annual Statistical Report of the European Biogas Association. URL: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2018>

8. Aghdam E., Scheutz C., Kjeldsen P. Impact of meteorological parameters on extracted landfill gas composition and flow. *Waste Management*. 2019. Vol. 87. P. 905–914. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.045>

9. Arsova L. Anaerobic digestion of food waste: current status, problems and an alternative product [M.S. thesis] Berlin, Germany: Columbia University. 2010. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.462.7158&rep=rep1&type=pdf>

10. Majdinasab A., Yuan Q. Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: A review. *Ecological Engineering*. 2017. Vol. 104. P. 116–130. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.015>

11. Hanson J., Yeşiller N., Oettle N. Oettle Spatial and Temporal Temperature Distributions in Municipal Solid Waste Landfills. *Journal of Environmental Engineering*. 2010. Vol. 136. 8. 11. URL: https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1194&context=env_fac

12. Faitli J., Magyar T., Erdélyi A., Murányi A. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. *Waste Management*. 2015. Vol. 36. P. 213–221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.028>

13. Frid V., Doudkinski D., Liskevich G., Shafran E., Averbakh A., Korostishevsky N., Prihodko L. Geophysical-geochemical investigation of fire-prone landfills. *Environ Earth Sci*. 2010. Vol. 60. P. 787–798. doi: 10.1007/s12665-009-0216-0

14. Musilli A. Landfill elevated internal temperature detection and landfill fire index assessment for fire monitoring. *Theses and Dissertations*. 2016. 168 p. URL: <https://rdw.rowan.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=3342&context=etd>

15. Попович В. В., Домінік А. М. Особливості температурного поля сміттєзвалищ. Науково-технічний збірник: Комунальне господарство міст. Серія: Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика. 2015. № 120 (1). С. 209–212. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/download/4876/4833/+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ua>

16. Рашкевич Н. В. Розробка керуючого алгоритму методики попередження надзвичайних ситуацій на полігоні твердих побутових відходів з ліквідаційним енергоємним технологічним устаткуванням. Науково-технічний збірник. Комунальне господарство міст. 2020. Т. 3. № 156. С. 188–194. doi: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-188-194

17. Дівізінюк М., Мірненко В., Рашкевич Н., Шевченко О. Розробка лабораторно-експериментальної установки для перевірки достовірності математичної моделі та розробленої на її основі методики попередження надзвичайних ситуацій на полігонах твердих побутових відходів з технологічним ліквідаційним енергоємним устаткуванням. *Social Development and Security*. 2020. Vol. 10. № 5. С. 15–27. doi: 10.33445/sds.2020.10.5.2

N. Rashkevich¹, PhD, Lecturer of the Department

V. Shershnyov¹, Cadet

V. Slovinskyi², PhD, Deputy Head of Department

V. Konoval³, PhD, Associate Professor of the Department

¹*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

²*Cherkasy Scientific Research Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs in Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

³*Cherkassy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

FORMATION OF MATHEMATICAL APPARATUS OF METHODS OF FIRE AND EXPLOSION SAFETY CONTROL OF LANDFILLS

The fire and explosion hazard of landfills is analyzed taking into account the trends of introduction of biogas (methane) collection and utilization. According to the results of analysis and synthesis of factors of occurrence and spread of man-caused danger, available mathematical models and methods of counteraction to man-caused danger, the authors determined the initial and boundary conditions of is the basis for further development of appropriate methods of emergency response. During the analysis it was found that humidity, temperature of the landfill, the presence of sufficient oxygen at a certain point in time initiate the formation of explosive concentrations of methane in the array and contribute to the spread of hazards in landfills. The specific weight of the organic component, the value of the density of the array, the height of waste disposal affect the process of counteracting the danger, namely preventing a dangerous event and preventing the emergency from the object to the highest level of distribution, primarily in the first priority group, such as the number of victims and injured civilians and specialists of the State Emergency Service of Ukraine. A system of communication equations is determined by synthesis, taking into account the initial and boundary conditions of the mathematical apparatus, which allows to further develop a control algorithm for emergency response related to fire and explosion hazardous landfills close to settlements. Further research is aimed at: establishing the area of effective solutions for the choice of variation of solutions of individual problems to assess these indicators of the initial and boundary conditions of the mathematical apparatus in the development of emergency response methods associated with fire and explosion hazards; to develop a control algorithm for the appropriate methodology and verify its reliability.

Keywords: solid waste, fire and explosion hazard, methane, initial conditions, boundary conditions

References

1. Kaza, S., Yao, L. Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Urban Development. Washington. DC: Word Bank. Retrieved from <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174>
2. Eurostat. Municipal waste management operations. (2020). Retrieved from http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasmun
3. World Fire Statistics. (2018). International Association of Fire and Rescue Service. Retrieved from <http://www.ctif.org/ctif/world-fire-statistics>
4. Sereda, T. G., Mikhaylova, M. A., Shalayeva, Ye. V. (2010). Problemy pozharnoy bezopasnosti poligonov tvordykh bytovykh otkhodov. Materialy konferentsii. Sektsiya 4: Sovremennyye tekhnologii likvidatsii CHS i tekhnicheskoye obespecheniye avariyno-spasatel'nykh rabot, 336–341. Retrieved from <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C52/105.pdf>
5. Suthar, S., Singh, P. (2015). Household solid waste generation and composition in different family size and socio-economic groups: A case study. Sustainable Cities and Society, 14, 56–63. doi: [org/10.1016/j.scs.2014.07.004](https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.07.004)
6. Götze, R., Boldrin, A., Scheutz, C. Astrup, T. F. (2016). Physico-chemical characterisation of material fractions in household waste: Overview of data in literature. Waste Management, 49, 3–14. doi: [10.1016/j.wasman.2016.01.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.008)
7. Statistical Report 2018. (2018). Annual Statistical Report of the European Biogas Association. Retrieved from <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2018>

8. Aghdam, E., Scheutz, C., Kjeldsen, P. (2019). Impact of meteorological parameters on extracted landfill gas composition and flow. *Waste Management*, 87, 905–914. doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.045
9. Arsova, L. (2010). Anaerobic digestion of food waste: current status, problems and an alternative product [M.S. thesis] Berlin, Germany: Columbia University. Retrieved from <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.462.7158&rep=rep1&type=pdf>
10. Majdinasab, A., Yuan, Q. (2017). Performance of the biotic systems for reducing methane emissions from landfill sites: A review. *Ecological Engineering*, 104, 116–130. doi: 10.1016/j.ecoleng.2017.04.015
11. Hanson, J. L. Yeşiller, N., Oettle, N. K. (2010). Spatial and Temporal Temperature Distributions in Municipal Solid Waste Landfills. *Journal of Environmental Engineering*, 136, 8, 11. Retrieved from https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1194&context=cenv_fac.
12. Faitli, J., Magyar, T., Erdélyi, A., Murányi, A. (2015). Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 36, 213–221. doi: org/10.1016/j.wasman.2014.10.028
13. Frid, V., Doudkinski, D., Liskevich, G. et al. (2010). Geophysical-geochemical investigation of fire-prone landfills. *Environ Earth Sci.*, 60, 787–798. doi: 10.1007/s12665-009-0216-0
14. Musilli, A. (2016). Landfill elevated internal temperature detection and landfill fire index assessment for fire monitoring. *Theses and Dissertations*, 168. Retrieved from: <https://rdw.rowan.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=3342&context=etd>
15. Popovych, V. V., Dominik, A. M. (2015). Osoblyvosti temperaturnoho polya smittyezvalyshch. *Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk: «Komunalne hospodarstvo mist*, 120 (1), 209–212. Retrieved from <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/article/download/4876/4833/+&cd=1&hl=ru&ct=clnk&gl=ua>
16. Rashkevych, N. V. (2020). Rozrobka keruyuchoho alhorytmu metodyky poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy na polihoni tverdykh pobutovykh vidkhodiv z likvidatsiynym enerhoyemnym tekhnolohichnym ustatkuvanniam. *Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk «Komunalne hospodarstvo mist»*, 3, 156, 188–194. doi: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-188-194
17. Divizinyuk, M., Mirnenko, V., Rashkevych, N., Shevchenko, O. (2020). Rozrobka laboratorno-eksperymentalnoyi ustanovky dlya perevirky dostovirnosti matematychnoyi modeli ta rozroblenoyi na yiyi osnovi metodyky poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy na polihonakh tverdykh pobutovykh vidkhodiv z tekhnolohichnym likvidatsiynym enerhoyemnym ustatkuvanniam. *Social Development and Security*, 10, 5, 15–27. doi: 10.33445/sds.2020.10.5.2

Надійшла до редколегії: 05.10.2021

Прийнята до друку: 18.11.2021