

**МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ  
УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА  
УПРАВЛІННЯ**



**БРОНИЦЬКИЙ ВАДИМ ОЛЕГОВИЧ**

УДК 528.855:628.4.032:502.174 (043.3)

**ПРОГНОЗУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЗАКРИТИХ ПОЛІГОНІВ  
ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В ЯКОСТІ ОСНОВ СПОРУД**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі геоінженерії Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Ремез Наталя Сергіївна,**  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри геоінженерії Інституту енергозбереження та енергоменеджменту

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Луцьова Оксана Володимирівна,**  
ДЗ «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління», доцент кафедри екологічної безпеки

доктор технічних наук, доцент  
**Петрук Роман Васильович,**  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри екології та екологічної безпеки

Захист відбудеться *28 квітня 2021 р. о 13.00 годині* на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.880.01 у Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління за адресою: 03035, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління за адресою: 03035, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп.2 та на сайті [www.dea.edu.ua](http://www.dea.edu.ua).

Автореферат розіслано *27 березня 2021 р.*

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 26.880.01



Т.Г. Іващенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Україна посідає перше місце у світі за кількістю побутового сміття на душу населення. У зв'язку з відсотком відходів, які захоронюються на полігонах в Україні (більше 93% від загальної кількості відходів, що утворилися) та з постійним збільшенням їх об'ємів і, як наслідок, збільшенням площ, що відводяться під полігони, гостро постає питання про екологічну безпеку та стійкість полігонів для і їх повторного використання в подальшому. Така ситуація ставить перед науковцями задачу щодо оцінки екологічних ризиків та стійкості звалищ при їх застосуванні в якості основи споруд.

Для оцінки рівня ризиків тиску на навколишнього середовища полігонами твердих побутових відходів (ТПВ) найчастіше використовується метод експертних оцінок, який передбачає опитування експертів-екологів та обчислення основних чинників впливу на довкілля. Застосування даної методики до закритих ТПВ надасть можливість обґрунтування теоретичних і практичних засад виведення їх з експлуатації як техногенно небезпечних об'єктів та відновлення навколишнього середовища за рахунок їх повторного використання.

Другим аспектом цієї задачі є оцінка стійкості полігона ТПВ за допомогою прогнозування його осадки. Експериментальні методики затратні і ефективні лише для конкретних умов, лабораторні аналізи не дозволяють зімітувати природні властивості та процеси, що відбуваються на звалищах. Тому раціонально застосовувати методи математичного моделювання.

Моделі, які описують осадку полігону ТПВ можна розділити на ті, що базуються на механіці ґрунтів, емпіричні, реологічні моделі та такі, які враховують біорозкладання. Однак, модель, яка включає в себе всі фактори і параметри, що впливають на осадку відсутня і її розробка є важливим питанням. Спільною рисою розроблених моделей є те, що вони враховують лише тверді побутові відходи, їхню поведінку та властивості, нехтуючи одною з основних складових полігону, що лежить в його основі – ґрунтами. Саме від типу, міцності, геотехнічних властивостей ґрунтів основи залежить стійкість полігону, оскільки найбільше навантаження відчують саме вони. Підвищення надійності методів розрахунку осадки може бути забезпечено за рахунок максимального врахування властивостей конкретного ґрунтового масиву основи полігонів.

Тому теоретичне обґрунтування екологічно безпечного застосування закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основ споруд є актуальною науково-практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні положення дисертаційної роботи щодо постановки завдання екологічних досліджень, методів і засобів їх розв'язання відповідають положенням Законодавства України щодо охорони навколишнього природного середовища та Концепції національної екологічної політики України на період до 2030 року. Дослідження проводились у відповідності з Стратегією сталого розвитку "Україна-2020", затвердженої Указом Президента України від 12.01.2015 р.; у відповідності з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки в Україні на період до 2020 р. з розділу «Раціональне природокористування» і стратегічним пріоритетним напрямом інноваційної діяльності в Україні на 2011–2021 рр. «Широке застосування технологій більш

чистого виробництва та охорони навколишнього природного середовища»; у рамках виконання наукових досліджень кафедри інженерної екології КПІ ім. Ігоря Сікорського за темою "Забезпечення збалансованого природокористування, зниження енергоємності виробництва та підвищення рівня екологічної безпеки підприємств на базі аналізу та синтезу оптимальних геотехнологічних процесів" (номер державної реєстрації 0111U010300), в якій автор брав участь як виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою є теоретичне обґрунтування екологічно безпечного застосування закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основ споруд для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та забезпечення раціонального використання природних ресурсів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

- проаналізувати сучасний стан поводження з полігонами ТПВ, статистику накопичення відходів та виявити шляхи зменшення шкідливого екологічного впливу закритих полігонів на довкілля;
- обґрунтувати технології утилізації відходів з найбільшим значенням глобального пріоритету – до повного і незворотного руйнування діоксинів і очищення димових газів до рівня безпечного для навколишнього середовища;
- дослідити ризики та небезпечні чинники впливу закритих полігонів ТПВ на навколишнє середовище для прогнозування можливості їх ліквідації як техногенно небезпечних об'єктів та повторного використання в якості основ споруд різного призначення;
- розробити просторову математичну модель процесу консолідації тілу полігону ТПВ, в якій враховувати основні чинники, що впливають на формування його осідання;
- провести математичне моделювання осідання полігону, на основі якого дослідити вплив фізико-механічних властивостей, геометричних параметрів полігону та підстиляючого ґрунту, статичного і динамічного навантаження на його деформацію та встановити залежностей осадки полігону від цих параметрів для прогнозування і вибору можливого використання полігону в якості основи споруди та підвищення екологічної безпеки;
- розробити методіку та комплекс програм для дослідження загальної осадки звалища з урахуванням головних чинників, що з врахуванням ризиків від впливу полігонів на довкілля дозволяє підвищити екологічну безпеку шляхом відновлення навколишнього середовища при повторному використанні полігонів в якості основ споруд.

**Об'єктом дослідження** є процес екологічно безпечної взаємодії полігону ТПВ з навколишнім середовищем для застосування в якості основ споруд.

**Предметом дослідження** є чинники та фактори, що найбільше впливають на закриті полігони твердих побутових відходів як основи споруд та управління їх екологічною безпекою.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач були використані наступні методи досліджень: аналіз літературних джерел за тематикою дослідження; узагальнення відомих теоретичних результатів і практичного досвіду прогнозування застосування закритих полігонів ТПВ; багатокритеріальний аналіз вибору технології утилізації відходів з використанням парних порівнянь; методологія аналізу режимів

відмов та наслідків для оцінки ризиків при освоєнні закритих полігонів, моделювання процесу осідання тіла полігону з використанням методу скінчених елементів; метод порівняння при встановленні достовірності отриманих результатів та для отримання їх кількісної оцінки.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що *уперше:*

- методом ієрархічного аналізу обґрунтовано екологічно безпечну технологію утилізації відходів з найбільшим значенням глобального пріоритету (до повного і незворотного руйнування діоксинів і очищення димових газів до рівня, безпечного для навколишнього середовища і здоров'я людини) – технологію спалювання в барабанних печах, яка в 1,9...2,1 рази перевищує значення для технологій спалювання в металургійних та цементних печах та при обробці з використанням піролізу чи газифікації;

- розроблено просторову математичну модель процесу консолідації тіла полігону ТПВ, яка відрізняється від існуючих комплексним врахуванням геометричних розмірів та форми полігону, динамічних та статичних навантажень, що дозволяє оцінити вплив цих чинників на навколишнє середовище при осіданні полігону;

- запропоновано враховувати при розрахунку стійкості полігону підстилаючий ґрунт як одного з основних чинників при формуванні осідання, що дозволить більш обґрунтовано оцінити вплив техногенно небезпечного об'єкта на навколишнє середовище та обґрунтувати теоретичні і практичні засади виведення їх з експлуатації;

- встановлені закономірності зміни напружено-деформованого стану полігону в залежності від типу підстилаючих ґрунтів, розмірів та взаємного розташування шарів та від фізико-механічних властивостей тіла полігону і його геометричних розмірів, що дозволило проводити комплексну оцінку стійкості закритих полігонів;

- отримано залежності осідання полігону ТПВ від величини статичного і динамічного навантаження, що дає можливість прогнозувати його стійкість і обирати тип споруди для його екологічно безпечного використання;

*набуло подальшого розвитку:*

- методологія аналізу режимів відмов та наслідків при експертній оцінці ризиків для розрахунків та наукового обґрунтування допустимих рівнів впливу закритих полігонів ТПВ на навколишнє середовище, яка дала змогу встановити, що показниками з найбільш високим ступенем тяжкості ефектів для ( $RPN > 125$ ) є: вплив атмосферного повітря  $RPN = 700$ ; деформації поверхні  $RPN = 400$ ; вплив на дихальні шляхи  $RPN = 384$ ; небезпека вибуху та пожежі  $RPN = 324$ .

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в розробленні методики та комплексу програм для розрахунку осідання тіла полігону на основі математичного моделювання закономірностей напружено-деформованого стану полігону при динамічних та статичних навантаженнях з врахуванням його взаємодії з ґрунтовою основою, шаруватості підстилаючого ґрунту, геометричних розмірів та форми полігону, яка з врахуванням експертної оцінки ризиків повторного використання

територій дає можливість відновити навколишнього середовища шляхом їх застосування в якості основ споруд.

Розроблені в дисертаційній роботі методології оцінки стійкості природно техногенного середовища під дією навантажень різного типу впроваджено на *ТОВ «П'ятий гідротехнічний підводний загін» (м. Київ)* при розрахунках стійкості берегоукріплення водних об'єктів на етапі проектування та початку будівництва берегозахисних та гідротехнічних споруд та можуть бути застосовані на інших виробничих об'єктах, які є джерелами екологічної небезпеки. Матеріали дисертації також впроваджено в учбовому процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського в курсах лекцій «Основи екології та наноекологія», «Екологізація виробництва та «зелені технології», «Стратегія охорони навколишнього середовища».

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено критичним аналізом літературних і патентних джерел, відповідністю методів дослідження поставленим в роботи мети і завданням, коректним застосуванням методів системного аналізу та прийняття управлінських рішень, відповідними теоретичними розрахунками, задовільною збіжністю результатів моделювання та експериментальних результатів, а також поширеною апробацією результатів досліджень.

**Особистий внесок здобувача** полягає у проведенні літературного і патентного пошуків; розробці програм досліджень; участі у проведенні чисельних експериментів, аналізі та узагальненні результатів розрахунків, статистичної обробки та інтерпретації результатів дослідження. Наукові результати, отримані в дисертаційній роботі та винесені на захист, одержані автором і відображені у друкованих працях і електронних ресурсах. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використано лише ті ідеї і положення, що є результатом особистого дослідження.

**Апробація результатів дисертації.** Окремі положення дисертаційної роботи доповідались на семінарах Національного технічного університету України «КПІ» у 2015-2021 роках; на Міжнародних конференціях "Актуальные научные исследования в современном мире" (2018-2019 р.р.), на X науково-практичній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (2018), на V Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених ЖДТУ.

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 14 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у закордонному виданні, що входять до Scopus), 7 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, переліку використаних джерел та 3 додатків, містить 78 рисунків і 18 таблиць. Загальний обсяг роботи – 194 сторінки машинописного тексту, перелік використаних джерел містить 160 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтована актуальність обраної теми досліджень; визначені мета і задачі дисертаційної роботи, її наукова новизна й практична цінність; представлені відомості про зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; розкрито особистий внесок здобувача; наведено дані про публікації, апробацію, структуру та обсяг роботи.

**У першому розділі** виконано критичний аналіз результатів досліджень щодо поводження з поводження з побутовими відходами та полігонами ТПВ.

Загальною тенденцією для України є високий рівень захоронення відходів на полігонах – туди потрапляє 93%, трохи більше 2% спалюється, і лише 4,5% потрапляє на заготівельні пункти вторинної сировини і сміттєпереробні заводи. В Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року йдеться про проблему відходів як про масштабну, і таку, яка викликана, в першу чергу, домінуванням в національній економіці ресурсоємних багатовідхідних технологій, а також відсутністю ефективного управління відходами. Згідно державного вектору розвитку є потреба у будівництві нових полігонів у кількості 384 одиниць.

Негативний екологічний вплив на навколишнє середовище (атмосферне повітря, підземні води, тваринний і рослинний світ, ґрунти, необхідність вилучення великих земельних ділянок), а також на здоров'я людей – це головний результат неефективного управління відходами, який отримано в результаті значних обсягів утворення і накопичення відходів як у промисловому, так і побутовому секторі, розміщення відходів на полігонах або стихійних сміттєзвалищах, більшість з яких не відповідають вимогам екологічної безпеки, низький рівень використання відходів у якості вторинної сировини, низький рівень впровадження ефективних підходів і технологій поводження з відходами, орієнтація на полігонне захоронення відходів (вектор державного розвитку).

Дослідженням екологічних та правових проблем твердих побутових відходів присвячено чимало робіт українських науковців: Байцара Р.І., Білик Г.С., Бондара О.І., Васильківського І.В., Виговської В.П., Гінайла В.О., Єрмакова В.М., Зерука В.А., Ігнатенка О.П., Іщенко В. А., Калашника Я.Ю., Кватернюка С.М., Лимаренка В.О., Луцької О.В., Мальованого М.С., Медведєва О.І., Міщенко В.С., Петрука В.Г., Петрука Р.В., Романова М.В., Турчика П.М., Харламової О.В., Хрутьби В.О., Шмандія В.М. проблема безпечного застосування закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основ споруд, залишається актуальною.

З аналізу сучасного стану досліджень з проблем поводження з твердими побутовими відходами та полігонами ТПВ випливає наступне.

1. Загальною тенденцією для України є високий рівень захоронення відходів на полігонах – туди потрапляє 93%, що пов'язано, в першу чергу, з домінуванням в національній економіці ресурсоємних багатовідхідних технологій, а також відсутністю ефективного управління відходами

2. З аналізу складу твердих побутових відходів слідує, що на полігонах ТПВ захоронюють промислові відходи III та IV класів небезпеки, в результаті діяльності полігону на його території утворюються біогаз та фільтрат, які становлять екологічну небезпеку всім складовим навколишнього середовища. Тому оцінка ризиків впливу полігонів ТПВ на довкілля є актуальним завданням.

3. Аналіз експериментальних методик показав, що вони є затратні і ефективними лише для конкретних умов. Наприклад, методи зворотного аналізу базуються на врахуванні властивостей вже зруйнованих звалищ. В свою чергу лабораторні аналізи не дозволяють зімітувати природні властивості та процеси, що відбуваються на звалищах. Тому для врахування властивостей ґрунтового масиву та його характеристик доцільно застосовувати математичне моделювання.

4. В результаті проведеного аналізу робіт, які присвячені методам моделювання осадки відходів на полігоні ТПВ та вивченню факторів, що на неї впливають встановлено, що існує велика кількість досліджень щодо стабільності звалищ з урахуванням осадки відходів і практично відсутні щодо впливу підстиляючого ґрунту та його властивостей на осадку.

5. Розглянуто математичні моделі, що прогнозують осадку на полігоні, а саме моделі, що базуються на механіці ґрунтів, реологічні моделі, емпіричні моделі та моделі, що враховують біодеградацію. На даний час відсутня модель, яка враховує всі фактори і дозволяє достеменно спрогнозувати осадку ТПВ. Найбільш доцільним питанням є розробка узагальненої моделі осадки з урахуванням ґрунтів основи.

Обґрунтовано завдання роботи та вибрано напрямки їх вирішення для зменшення негативного впливу на довкілля шляхом використання закритих полігонів ТПВ в якості основи споруд різного призначення.

**У другому розділі** проведено багатокритеріальний аналіз вибору технології утилізації відходів з використанням парних порівнянь і оцінка ризиків при освоєнні природно техногенних середовищ.

У зв'язку з тим, що полігони ТПВ являють собою екологічну загрозу для навколишнього середовища, а державна політика спрямована на подальше відкриття нових полігонів доцільно розглянути шляхи раціонального поводження з відходами шляхом спалювання на сміттєспалювальних заводах і обґрунтувати найбільш ефективну технологію.

Для цього застосовувався багатокритеріальний аналіз вибору технології утилізації відходів з використанням парних порівнянь.

Енергетична утилізація ділиться на три основних типи: 1) збір біогазу на полігонах і звалищах ТПВ з наступним виробництвом електро- та/або теплової енергії; 2) механо-біологічна обробка ТПВ з можливим виробництвом біогазу та/або твердого палива з ТПВ з подальшим використанням на цементних заводах або в спеціалізованих ТЕЦ/котельнях; 3) термічна обробка/переробка змішаних (залишків після сортування) ТПВ з подальшим виробництвом електроенергії та/або тепла.

На даний час існують такі види утилізації теплових побутових відходів: 1) виробництво тепла і електроенергії з RDF (Refuse Derived Fuel) / SRF (Solid Recovered Fuel), отриманого після механічної та біологічної обробки; 2) класична сміттєспалювальна установка – спалювання змішаного потоку ТПВ після вилучення цінної сировини; 3) експериментальні технології: газифікація, піроліз.

За результатами дослідження, ефективність п'яти альтернативних методів обробки відходів була оцінена на основі 8 критеріїв. Кроки для застосування методу ієрархічного аналізу були наступні. Попарне порівняння критеріїв достовірності за дев'ятибальною шкалою з додаванням даних у відповідну матрицю розміром  $(n \times n)$ . Елементом матриці  $A(i, j)$  є інтенсивність прояву елемента ієрархії  $i$  щодо елемента ієрархії  $j$ , яка оцінюється за шкалою інтенсивності від 1 до 9. При порівнянні основних технологій утилізації ТПВ зазвичай постають такі питання: яке з них є більш важливим або більш значущим; що більш ймовірно; який має більшу перевагу тощо. Результатом є матриця парних порівнянь порядку  $A$ . В процесі заповнення матриці, якщо елемент  $i$  важливіше елемента  $j$ , клітинка  $(i, j)$ , відповідна рядку  $i$  і



стовпцю  $j$ , заповнюється цілим числом, а якщо елемент  $j$  важливіше елемента  $i$ , то клітинка  $(i, j)$  заповнюється дробовим числом.

Множина критеріїв, за якими оцінювалися технології визначається формулою:

$$C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8\}, \quad (1)$$

де:  $C_1$  – найменший рівень негативного впливу на навколишнє середовище;  $C_2$  – незалежність ефективності спалювання від попередньої підготовки чи сортування сміття;  $C_3$  – здатність генерувати тепло і електрику для різних систем використання;  $C_4$  – складність обладнання;  $C_5$  – кількість утворених відходів, обсяг димових газів;  $C_6$  – зона установки обладнання;  $C_7$  – вартість обладнання;  $C_8$  – суспільне визнання.

Далі реалізація методу розрахунки проводились за таким алгоритмом: 1) заповнення матриці парних порівнянь; 2) визначення середнього геометричного значення по кожному рядку матриці; 3) знаходження суми елементів середніх значень; 4) визначення вектора локальних пріоритетів; 5) знаходження суми елементів відповідних стовпців матриці; 6) розрахунок індексу та відношення узгодженості.

Результатом є розрахунок вектора локальних пріоритетів для кожного критерію на відношення його узгодженості. Проведено розрахунок глобальних пріоритетів для кожної технології.

Встановлено, що згідно вектору глобальних пріоритетів, значення показника технології відходів методом спалювання в барабанних/оберткових печах майже вдвічі перевищує значення інших технологій.

Проте, кількість закритих, закритих та підлягаючих рекультивації ТПВ складає 1727 одиниць. Даний показник буде лише збільшуватися, тому необхідно науково обґрунтувати можливість їх повторного використання. Насамперед необхідно провести оцінку ризиків при освоєнні закритих полігонів ТПВ. Для цього була використана методологія аналізу режимів відмов та наслідків (FMEA) - це спеціальна методика оцінки надійності та безпеки.

Найбільш важливі чинники у період після рекультивування є: 1) наслідки для людини: небезпека вибухів та пожеж ( $x_1$ ); вплив на дихальні шляхи ( $x_2$ ); санітарно-епідемічна небезпека ( $x_3$ ); 2) вплив на атмосферне повітря (парниковий ефект, виснаження озонового шару  $x_4$ ); 3) вплив на ґрунтовий покрив (загибель кореневої системи рослин у разі порушення газового режиму ґрунту  $x_5$ ); 4) накопичення важких металів у ґрунті ( $x_6$ ); 5) вплив на підземні води із систем збору та скидання води для фільтрації ( $x_7$ ); 6) деформації поверхні ( $x_8$ ).

Матриця спряжених характеристик та визначено значення пріоритету  $P_k$  та загальне значення всіх пріоритетів  $P_i$ :

$$P_k = \sum_{i=1}^8 x_i, k = \overline{1, n}; \quad (2)$$

$$P_i = \sum_{k=1}^n P_k, i = \overline{1, x_i}; \quad (3)$$

де  $n$  - кількість незалежних експертів.

Нормалізацію пріоритетного значення проводили для кожного пріоритету:

$$P_{k\_rel} = P_i / \sum P_i. \quad (4)$$

Далі заповнюються таблиці та розраховуються матриці: таблиця ранжування за вагою наслідків одним експертом, матриця спряжених характеристик за вагою наслідків (А), таблиця ранжирування по невиявленню одним експертом та матриця спряжених характеристик по ймовірності невиявленню (В).

На основі отриманих матриць результуючих спряжених ознак за методологією FMEA фактори класифікуються за сумарним критерієм RPN, значення якого визначається як добуток рангів A, B, E:

$$RPN = A \cdot B \cdot E. \quad (5)$$

В результаті розрахунків (табл. 1) встановлено, що показниками з високим ступенем тяжкості ефектів ( $RPN > 125$ ) є: вплив атмосферного повітря (парниковий ефект, руйнування озонового шару)  $RPN = 700$ ; деформації поверхні  $RPN = 400$ ; вплив на дихальні шляхи ( $x_2$ )  $RPN = 384$ ; небезпека вибуху та пожежі ( $x_1$ )  $RPN = 324$ .

Таблиця 1 – ранжування за RPN

Впливи		A		B	E	RPN
X <sub>1</sub>	0,098	4	0,1476	9	9	324
X <sub>2</sub>	0,1122	6	0,1453	8	8	384
X <sub>3</sub>	0,1013	5	0,1056	4	6	120
X <sub>4</sub>	0,1492	10	0,1498	10	7	700
X <sub>5</sub>	0,1373	9	0,1226	6	3	162
X <sub>6</sub>	0,1296	7	0,1249	7	5	245
X <sub>7</sub>	0,1362	8	0,0885	6	4	192
X <sub>8</sub>	0,1362	8	0,1158	5	10	400

У третьому розділі проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану полігону твердих побутових відходів та ґрунтової основи для прогнозування можливості його використання в якості основи споруди чи конструкції. Для врахування рідкої фази відходів та ґрунту використовується закон Дарсі у вигляді рівняння балансу сил:

$$-\nabla P - \frac{\eta}{K} \vec{u} + \rho \vec{f} = 0, \quad (6)$$

де  $P$  — зовнішній тиск;  $\rho$  — щільність;  $\eta$  — динамічна в'язкість;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $\vec{u}$  — швидкість фільтрації;  $\vec{f}$  — поле зовнішніх сил;  $K = \eta k / \rho g$  — коефіцієнт проникності, який характеризує здатність пористого середовища до пропускання флюїду.

Повна система рівнянь фільтрації нестисливої рідини також включає рівняння нестисливості:

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0, \quad (7)$$

та рівняння нерозривності:

$$\operatorname{div} \rho \vec{u} = -\rho t, \quad (8)$$

де  $t$  — пористість ґрунту.

Приймається, що стисливість скелету і порової рідини мала, що призводить до лінійної залежності пористості ґрунту від тиску.

Покриваючий і підстилаючий шари ґрунту описувалися узагальненою моделлю Кулона–Мора, в якій повна умова плинності складається з шести поверхонь плинності і з шести пластичних потенційних функцій.

Тіло полігону моделюється слабким ґрунтом з урахуванням повзучості, використовується модель Soft Soil Creep (SSC). На даний час ця модель найбільш повно описує такі властивості слабого ґрунту, як залежну від напружень жорсткість, а також вторинну компресію з урахуванням повзучості, крім того вона враховує як фізичну, так і геометричну нелінійність процесу деформування ґрунту.

Повна об'ємна деформація  $\varepsilon_v$ , викликана зростанням ефективних напружень з початкового значення  $p_0'$  до  $p'$  за період часу  $t_c+t'$ , складається з пружної  $\varepsilon_v^e$  та в'язкопластичної  $\varepsilon_v^{vp}$  складових. В'язкопластична складова є сумою деформації під час консолідації  $\varepsilon_v^{vp}_c$  та після консолідації  $\varepsilon_v^{vp}_{ac}$ . Зв'язок між деформаціями виражається в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^{vp}_c + \varepsilon_v^{vp}_{ac}; & \varepsilon_v^e &= \kappa^* \ln\left(\frac{p'}{p_0'}\right); \\ \varepsilon_v^{vp}_c &= (\lambda^* - \kappa^*) \ln\left(\frac{p'_{pc}}{p_0'}\right); & \varepsilon_v^{vp}_{ac} &= \mu^* \ln\left(\frac{\tau_c+t'}{\tau_c}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

є  $\mu^*$  – модифікований коефіцієнт повзучості;  $\tau_c$  – час консолідації, що залежить від геометрії зразку, що досліджується;  $t'$  – час, що минув з початку завантаження полігону;  $\kappa^*$  – модифікований коефіцієнт набухання;  $\lambda^*$  – модифікований коефіцієнт компресії (стиснення);  $t_c$  – час завершення первинної консолідації;  $p_0'$  – початкове ефективне напруження;  $p'$  – ефективне напруження;  $p'_{pc}$  – ефективне прекопсолідаційне напруження.

Рівняння для визначення вільної поверхні фільтраційного потоку при розрахунку несталого фільтрації в тілі полігону з урахуванням інфільтрації повинні задовольняти наступним граничним умовам: 1) тиск дорівнює атмосферному; 2) нормальна компонента швидкості на поверхні відсутня. На границях між шарами полігону та ґрунтовою основою виконуються умови рівності нормальних компонент напружень та швидкості фільтрації.

Початковими умовами є: швидкість фільтрації в шарах полігону та підстилаючого ґрунту дорівнює нулю; на поверхні діє атмосферний тиск, кожний шар відходів та ґрунтів має власні початкові фізико-механічні властивості, задаються початкові геометричні параметри полігону.

Для чисельного розв'язку задачі використовувався метод скінченних елементів.

**У четвертому розділі** викладені результати чисельного дослідження осадки полігону з найбільш впливовими чинниками: урахуванням підстилаючого ґрунту, шаруватості, форми полігону, куту нахилу схилів, а також проведено чисельне моделювання впливу статичного та динамічного навантаження на осадку полігону.

Осадка визначалася з урахуванням покрокового навантаження полігону через 30 років після його закриття, так як приблизно 90% осадок відбувається протягом перших п'яти років, і можуть тривати протягом 25-30 років більш повільними темпами.

Було досліджено вплив підстилаючого ґрунту (глина, пісок або суглинок) основи на осадку. Полігон, для якого було проведено моделювання, складається з десяти шарів відходів, товщина кожного шару 3 м. Кут нахилу схилу полігону складав  $75^\circ$ .

Встановлено, що максимальна вертикальна деформація для полігону з піском в якості ґрунту основи склала 4,95 м (рис. 1), а мінімальна – в шарі, що лежить в основі полігону (0,42 м). Це пояснюється тим, що нижчі шари полігону ущільнені більше, ніж верхні. Деформації ґрунту основи найбільші біля нижніх кутів тіла полігону (0,041 м), а найменші – в центрі (0,0101 м), тому що кути є концентраторами напружень, що в свою чергу викликає збільшення деформацій. Якщо підстилаючий ґрунт – глина (рис. 2), то можна спостерігати, що досягаються значно менші деформації (3,83 м).

З аналізу результатів чисельних розрахунків встановлено, при однакових умовах полігону підстилаючий ґрунтовий шар здійснює значний вплив на величину осадки: чим більш щільний і менш пористий ґрунт, тим менша осадка: якщо ґрунтова основа представлена глиною, то досягається осадка на 29% менше, ніж з піском, і на 17% менше, ніж з суглинком в якості основи.

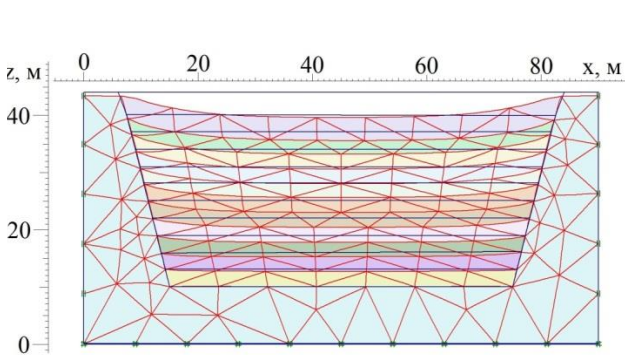


Рис. 1. Деформована сітка полігону з піщаним ґрунтом основи

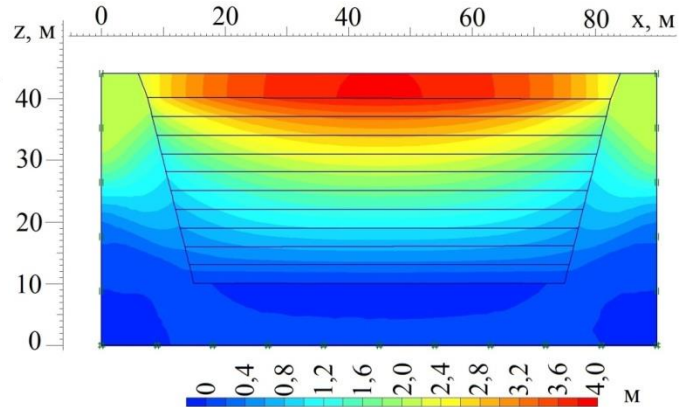


Рис. 2. Вертикальні деформації полігону з глинистим ґрунтом основи

Було проведено моделювання осідань полігону при шаруватих ґрунтах основи. В основі полігону, що моделюється, знаходяться глина і суглинок. Розглядалось три варіанти товщини глинистого шару: 2 м, 10 м і 15 м. Товщина суглинкового шару була постійною – 10 м. Встановлено, що максимальна вертикальна деформація полігону з товщиною глинистого шару основи, рівною 2 м, склала 3,6 м (рис. 3). Якщо товщина підстилаючого глинистого шару – 10 м (рис. 4), то можна спостерігати, що досягаються деформації на 3% менші (3,51 м).

При збільшенні товщини підстилаючого глинистого шару до 15 м, деформації, які досягаються - найменші в порівнянні з двома попередніми варіантами (3,48 м).

Встановлено, що при однакових характеристиках відходів і постійній товщині суглинкового шару збільшення товщини підстилаючого глинистого шару призводить до зменшення осадки тіла полігону. Так, при збільшенні глинистого шару з 2 м до 15 м відбулося зменшення осадки з 3,6 до 3,48 (на 3,45%).

При постійній величині глинистого шару (10 м) і трьох варіантів товщини суглинкового шару (2 м, 10 м і 15 м) величина максимальної вертикальної деформації у всіх трьох випадках однакова і складає 4,49 м, що значно більше, ніж коли нижній підстилаючий шар суглинковий (24,7% ... 29% в залежності від його товщини). Це пояснюється тим, що суглинковий ґрунт менш щільний і більше піддається стисканню і на нього здійснює тиск тіло полігону, а нижній більш щільний глинистий ґрунт діє як тверда стінка.

Далі визначався вплив нахилу кута схилу полігону. Дослідження для кута  $75^\circ$  наведено вище, для порівняння проведено моделювання для кутів нахилу схилів полігону  $30^\circ$  і  $60^\circ$ . Лінійні розміри полігонів з різними кутами нахилу схилів обирались таким чином, щоб об'єм тіла полігона залишався постійним.

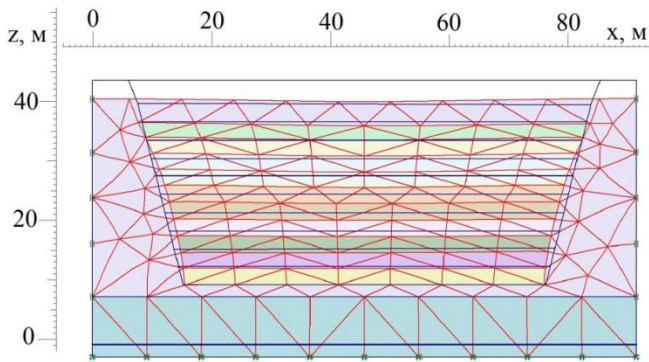


Рис. 3. Деформована розрахункова область полігону з товщиною глинистого шару основи 2 м

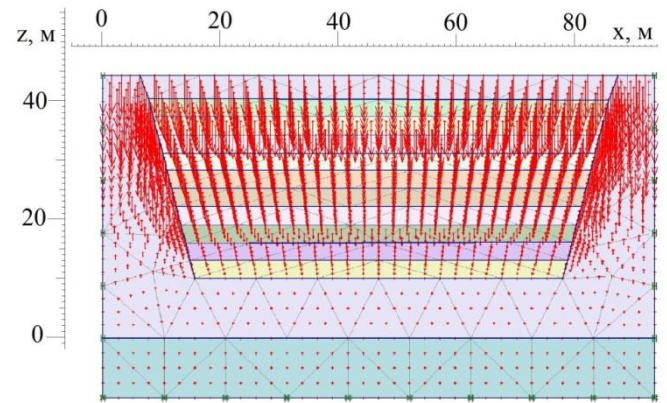


Рис. 4. Розподіл осідань на розрахунковій області полігону з товщиною глинистого шару основи 10 м

З аналізу чисельних розрахунків випливає, що вертикальні деформації полігону з глинистою основою і з кутом нахилу тіла полігону, рівному  $60^\circ$ , склали 3,8 м (рис. 5). При такому ж куті нахилу, максимальна вертикальна деформація склала: для полігону з піском – 4,34 м (рис. 6), з суглинком – 4,27 м. З порівняння цих результатів слідує, що величина кута нахилу тіла полігону істотно впливає на вертикальну деформацію: при зменшенні кута з  $75^\circ$  до  $60^\circ$  деформація зменшилась на 1 ... 14% в залежності від типу ґрунту основи.

Для встановлення впливу кута нахилу схилу полігону на його осадку, було проведено моделювання для полігону з кутом  $30^\circ$ . В результаті проведених досліджень встановлено, що різниця між величиною деформацій значно скоротилася. Так, якщо підстилаючий шар – пісок (рис. 7), то можна спостерігати, що досягаються вертикальні деформації (3,94 м), при суглинку – 3,89 м (рис. 8).

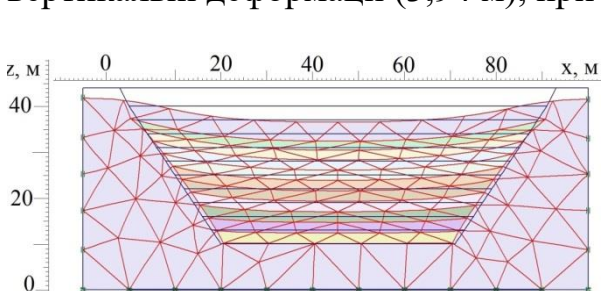


Рис. 5. Деформована розрахункова область полігону з глинистим підстилаючим ґрунтом (кут нахилу схилу полігону  $60^\circ$ )

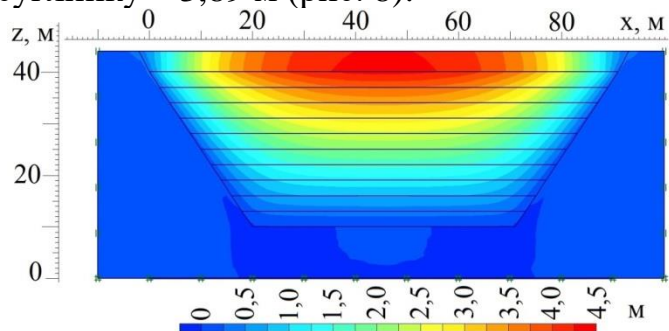


Рис. 6. Вертикальні деформації полігону з піщаним підстилаючим ґрунтом (кут нахилу схилу полігону  $60^\circ$ )

При глинистому підстилаючому шарі вертикальні деформації – найменші порівняно з двома попередніми варіантами (3,63 м).

Вперше встановлено, що зі зменшенням куту нахилу схилу полігону відбувається значне зменшення осадки, причому найбільший спад спостерігається у найменш щільного ґрунту (піску). Порівняння величини осадок показує, що при зменшенні кута з  $60^\circ$  до  $30^\circ$  деформація зменшилась на 5-10% в залежності від типу ґрунту основи. При зменшенні кута з  $75^\circ$  до  $30^\circ$  зменшення вертикальних деформацій



було найбільшим для піску (25,6%), в той час, як ця величина становить 14,9% для суглинка і 5,51% для глини. Зі зменшенням куту нахилу зменшується різниця між осадками полігону при різних ґрунтах основи.

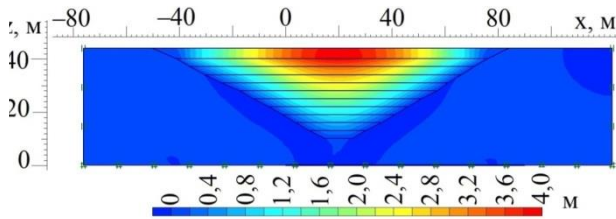


Рис. 7. Вертикальні деформації полігону з піщаним підстилаючим ґрунтом (кут нахилу схилу полігону 30°)

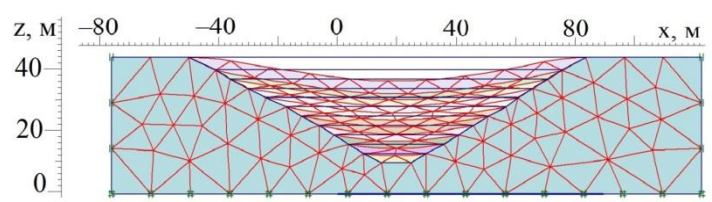


Рис. 8. Деформована розрахункова область полігону з суглинком, в якості підстилаючого ґрунту (кут нахилу схилу полігону 30°)

Отримані залежності осадки від куту нахилу схилів для різних ґрунтів основи полігону у вигляді полігону другого ступеню. Вони мають наступний вигляд:

$$\text{для глини} \quad y = -0,07x^2 + 0,18x + 3,72;$$

$$\text{для суглинка} \quad y = -0,09x^2 + 0,07x + 4,49;$$

$$\text{для піску} \quad y = 0,105x^2 - 0,925x + 5,77.$$

Ці залежності дають можливість визначити осадку полігонів ТПВ для проміжних значень кутів нахилу (від 30° до 75°).

Для встановлення впливу форми полігону на його осадку, було проведено моделювання для полігону в формі прямокутної трапеції при збереженні того ж об'єму відходів, як і в попередніх випадках. При цьому розглядалися три типи ґрунтів основи: пісок, глина та суглинок. В результаті проведених досліджень встановлено, що крім вертикальних деформацій, з'явилися також істотні горизонтальні деформації. Спостерігається значний вплив підстилаючого ґрунту на величину деформацій. Так, якщо підстилаючий шар – пісок (рис. 9), то можна спостерігати, що досягаються вертикальні деформації (5,78 м), при суглинку – 5,74 м. При глинистому підстилаючому шарі (рис. 10), вертикальні деформації – найменші по порівняно з двома попередніми варіантами (5,62 м).

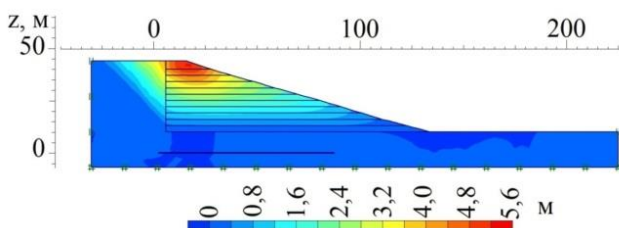


Рис. 9. Вертикальні деформації полігону з піщаною основою

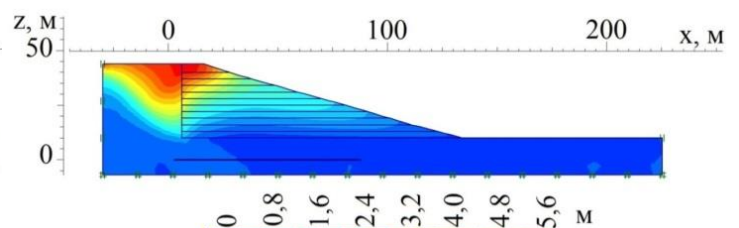


Рис. 10. Вертикальні деформації полігону з глинистою основою

При однакових параметрах тіла полігону, постійній товщині підстилаючого шару полігон в формі прямокутної трапеції менш стійкий, ніж у формі рівносторонньої трапеції. Так, для глинистої основи осадка збільшилася з 4,2 м до 5,62 м (на 33,8%), для піщаної основи і для суглинка в основі – на 34,7%. При цьому з'являються горизонтальні деформації, пов'язані з наявністю похилої вільної поверхні, величина яких знаходиться в зворотній залежності від підстилаючого ґрунту: найбільша для глинистої основи (3,22 м), а найменша для піщаної (2,8 м).

Зворотна картина спостерігається для горизонтальних деформацій: найменша для піску – 2,8 м; найбільша для глини – 3,22 м. Це пов'язано з тим, що ґрунти основи є більш щільними середовищами, ніж тіло полігону. Чим щільніший ґрунт, тим більший протитиск він здійснює, діючи як тверда стінка. Достовірність отриманих результатів підтверджується задовільним співставленням розрахункових даних з експериментальними даними інших авторів.

З метою оцінки можливості використання полігону ТПВ після його природного осідання через 25-30 років після закриття проведено чисельне моделювання впливу статичного та динамічного навантаження на осадку полігону.

Отримані аналітичні залежності осідання полігону ТПВ з різними підстиляючими ґрунтами від величини статичних і динамічних навантажень у вигляді поліномів 2 степеня, які дають можливість здійснювати прогнозування осідання полігонів з метою їх подальшого використання в якості основи споруд різного призначення.

Деформована розрахункова область полігону з піщаною основою при вертикальному статичному розподіленому навантаженні, рівному 5 кПа, та вертикальні деформації представлені на рис. 11, максимальна вертикальна деформація склала 5,06 м. Осадку полігону з глинистою основою становить 4,11 м, що на 23% менше, ніж з піщаною (рис. 12).

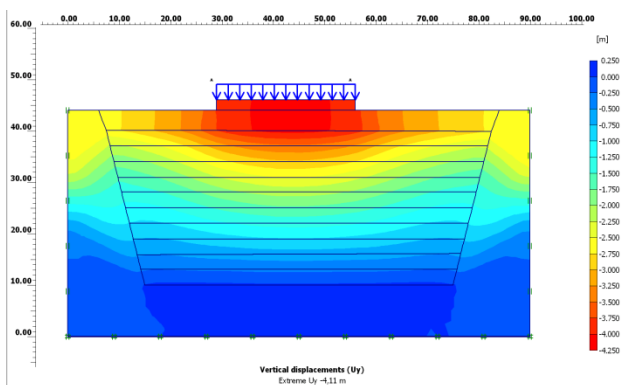


Рис. 11. Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 5 кПа (глина в основі)

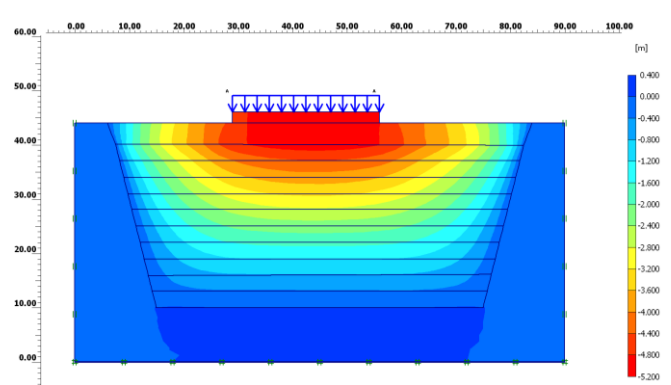


Рис. 12. Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 5 кПа (пісок в основі)

Якщо величина вертикального навантаження збільшується до 50 кПа то можна спостерігати, що досягаються деформації, рівні 5,19 м. Встановлено, що при такій же величині навантаження (50 кПа) вертикальні деформації полігону з глинистим шаром основи менші і складають 4,23 м, при суглинку – 4,95 м. Що нижче на 23% і 5% відповідно. Зі збільшенням статичного навантаження до 100 кПа, зростає і осадка: до 5,32 м для піщаної основи, 5,17 м – для суглинистої і до 4,42 м – для глинистої.

Вперше встановлено, що найбільших вертикальних деформацій зазнає полігон з піском в якості ґрунту основи. Слід зазначити, що величина осідання з максимальним навантаженням по відношенню до осідання без навантаження найбільша у глини (33,7%), мінімальна – у піску (19,2%). Це пояснюється тим, що більш пористий нестійкий ґрунт основи пісок за 30 років досяг найбільшого максимального осідання і в подальшому деформується у меншій мірі, ніж глина, яка ще не досягла остаточної деформації.

При збільшенні навантаження з 5 до 180 кПа, осідання зростає на 3...17% для піску, 3...19% для суглинку та на 3...25% для глини. Встановлено, що при подальшому підвищенні рівня навантаження (більше 180 кПа) відбувається руйнування тіла полігону.

Отримані аналітичні залежності осідання полігону ТПВ з різними підстилаючими ґрунтами від величини статичного при навантаження (рис. 15):

$$\text{для глини} \quad y = 0,0243x^2 + 0,0686x + 3,79;$$

$$\text{для суглинку} \quad y = 0,0043x^2 + 0,2129x + 4,29;$$

$$\text{для піску} \quad y = 0,0277x^2 - 0,008x + 4,945.$$

Це дає можливість здійснювати прогнозування осідання полігонів з метою їх подальшого використання в якості основи споруд різного призначення.

Моделювання осідання з врахуванням динамічного навантаження дозволить прогнозувати придатність конкретного закритого звалища, до використання в якості дороги, транспортної магістралі, швидкісної траси тощо.

У результаті чисельного розрахунку встановлено, що якщо величина вертикального навантаження 50 кПа то можна спостерігати, що досягаються деформації, рівні 4,19 м для глини (рис. 13) і 5,06 м для піску (рис. 14).

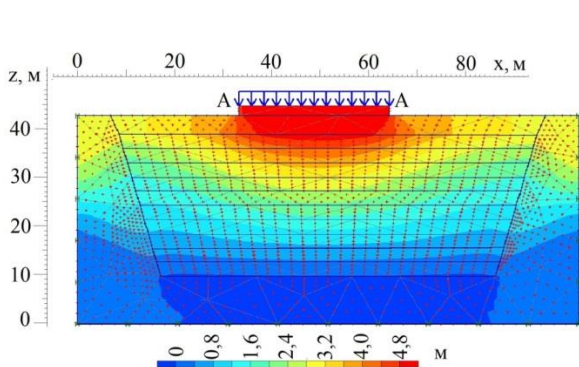


Рис. 13. Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленням динамічним навантаженням 50 кПа (глина в основі)

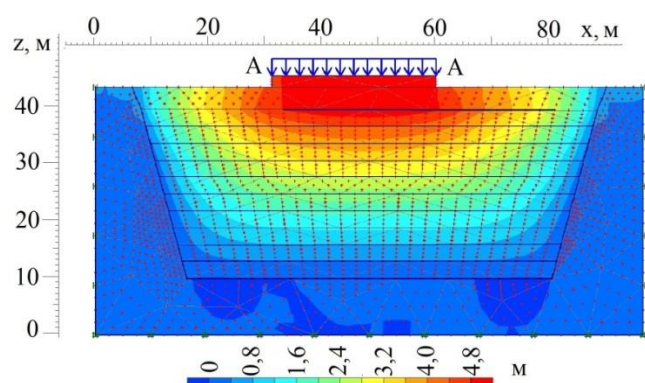


Рис. 14. Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленням динамічним навантаженням 50 кПа (пісок в основі)

Зі збільшенням навантаження до 100 кПа, осадка полігону з піщаною основи зростає на 4,2% (5,27 м), з глинистою – на 4,8% (4,39 м).

Встановлено, що при динамічних навантаженнях підстилаючі ґрунти аналогічно впливають на осідання полігону ТПВ, але величина осідань менше на 0,5-4% в залежності від підстилаючого ґрунту.

Найбільших вертикальних деформацій зазнає полігон з піском в якості ґрунту основи. Величина осідання з максимальним навантаженням по відношенню до осідання без навантаження найбільша у глини (28,7%), мінімальна – у піску (18,6%). Отримано, що при збільшенні навантаження з 5 до 180 кПа, осідання зростає на 1,2-17,4% для піску та на 2,5 – 21% для глини.

Це дає можливість здійснювати прогнозування осідання полігонів з метою оцінки їх стійкості при статичних та динамічних навантаженнях різної природи: будівлі, рекреаційні зони, дороги, транспортні магістралі тощо.



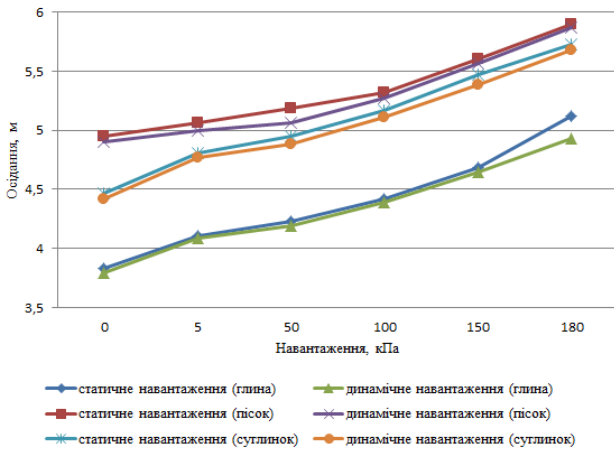


Рис. 15. Залежність осідання полігону з глинистим та піщаним ґрунтом основи від вертикального розподіленого статичного та динамічного навантажень

Отримані аналітичні залежності осідання полігону ТПВ з різними підстилаючими ґрунтами від величини динамічних навантажень (рис. 15):

для піску

$$y = 0,035x^2 - 0,0516x + 4,928;$$

для суглинку

$$y = 0,0068x^2 + 0,1922x + 4,266;$$

для глини

$$y = 0,0096x^2 + 0,1491x + 3,672.$$

У п'ятому розділі На базі алгоритмів розрахунків проведених у попередніх розділах була розроблена методика розрахунку осадки закритого полігону твердих побутових відходів із застосуванням методу скінчених елементів, що базується на математичному моделюванні закономірностей із врахуванням геометричних та фізико-механічних параметрів полігону та ґрунтової основи. На основі розробленої методики був реалізований пакет прикладних програм на мові програмування С# для оперативного розрахунку осадки закритого полігону, який пропонує для цього вирішення трьох взаємозв'язаних і послідовних задач: 1) прогнозування осідання полігонів з врахуванням підстилаючого ґрунту; 2) прогнозування осідання полігонів з врахуванням статичних навантажень; 3) прогнозування осідання полігонів з врахуванням динамічних навантажень. Вибір задачі можна здійснити в головному вікні програми (рис. 16).

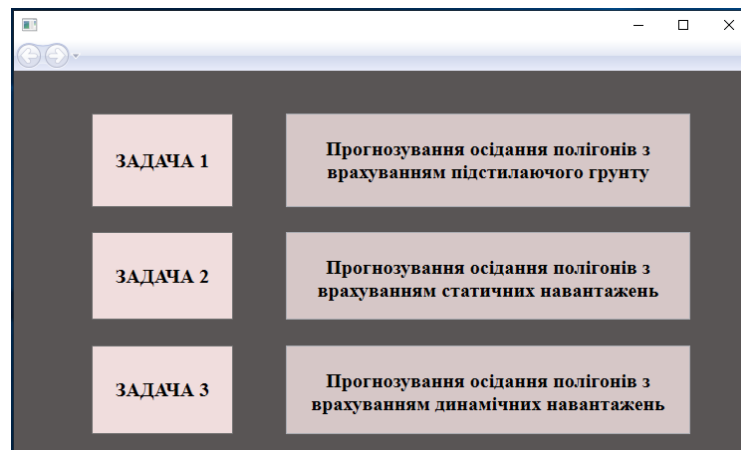


Рис. 16. Головне вікно робочої програми

При виборі «Задача 1» у відкритому підвікні спочатку заповнюються початкові дані – геометричні параметри полігону і тип підстилаючого ґрунту. У залежності від того, який саме підстилаючий ґрунт (пісок, суглинок, глина) буде використовуватися для прогнозування осідання заповнюються його фізико-механічні параметри: модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, питома вага ґрунту, питома вага водонасиченого

грунту, коефіцієнти фільтрації в горизонтальному та вертикальному напрямках, питома зчеплення, кут внутрішнього тертя та час, що минув після закриття полігону. У наступному підвікні програми вводяться вихідні фізико-механічні параметри відходів: питома вага, питома вага водонасиченого ґрунту, питома зчеплення, кут внутрішнього тертя, початковий коефіцієнт пористості, коефіцієнт компресії, коефіцієнт набухання.

Результати розрахунку коефіцієнтів набухання, компресії, консолідації та зв'язок між деформаціями в залежності від типу ґрунту виводиться у вікні програми. Наприклад, на рис. 17. наведено залежність об'ємної деформації від ефективних напружень.

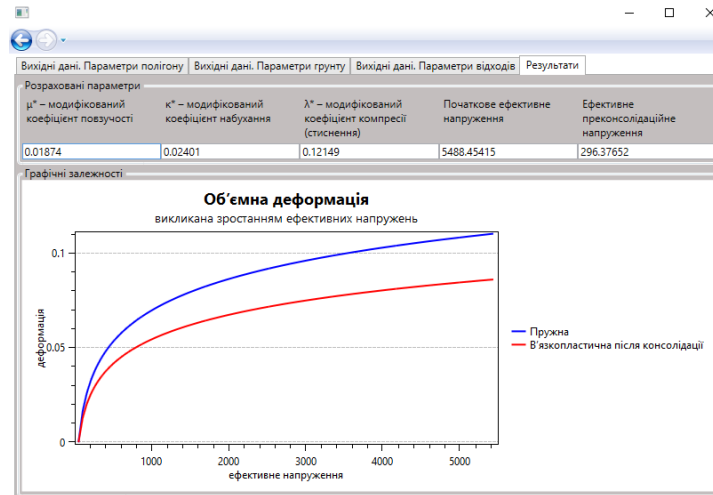


Рис. 17. Залежність об'ємної деформації від ефективних напружень

Вибір моделі прогнозування для статичного навантаження «Задача №2» чи динамічного навантаження «Задача №3» здійснюється після завершення розрахунків «Задача №1» і пов'язаний з категорією застосування полігону (статичні споруди або дороги, траси тощо). Вибір задач здійснюється у головному меню програми або за допомогою випадального меню головного вікна Меню -> Задача №1; -> Задача №2; -> Задача №3.

Для апробації розробленої методики прогнозування стійкості полігону проводилось дослідження його осадки з урахуванням напружено-деформованого стану підстилюючої ґрунтової основи і пересипання шарів відходів на прикладі полігону ТПВ, розташованому в м. Бориспіль, Київської області. Полігон введено в експлуатацію в 2003 році відповідно до проекту на місці відпрацьованого піщаного кар'єру, його площа складає 6,5 га. Полігон приймав виключно ТПВ в кількості близько 85 тис. тон в рік. Загальна кількість відходів оцінюється в 0,723 млн тон, середня глибина становить 18-20 м. Кут нахилу схилу було розраховано зі співвідношення кількості шарів, глибини полігону і обсягу відходів, і він становить 75°. Осадка визначалася на ділянці полігону 50x50 м з урахуванням покрокового навантаження полігону відходами через 10 та через 30 років після його закриття. На різних ділянках полігону в його основі знаходяться глина і пісок. Було проведено моделювання для двох варіантів: з проміжним пересипанням піском через кожні 3 м відходів і без нього.

Встановлено, що через 10 років осадка полігону з глинистою основою складе 2,01 м, а при пересипці шарів відходів шарами піску – 1,37 м. При піщаній основі деформація без пересипки становитиме 2,33 м, а з пересипкою – 1,61 м.

З аналізу чисельних розрахунків слідує, що максимальна вертикальна деформація полігону з глинистою основою через 30 років становить 2,27 м. Якщо підстилаючий шар пісок, то деформація значно збільшується і становить 2,61 м.

Встановлено, що на полігоні з пересипанням спостерігаються значно менші деформації в порівнянні з полігоном без пересипання: на 32% менше на полігоні з глинистою основою, на 30% - з піщаною. Так, якщо підстилаючий шар – глина (рис. 18), то досягаються вертикальні деформації 1,55 м, якщо в основі пісок (рис. 19) – 1,82 м. У процентному співвідношенні осадка до висоти полігону становить 14,2% і 15,26% відповідно, що узгоджується з даними інших дослідників.

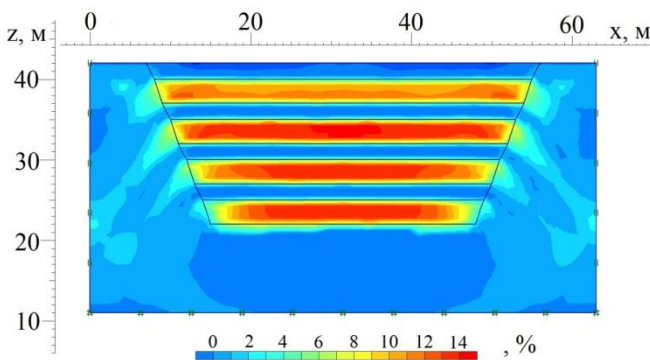


Рис. 18. Вертикальні зміщення полігону з пересипанням і з глинистим підстилаючим шаром

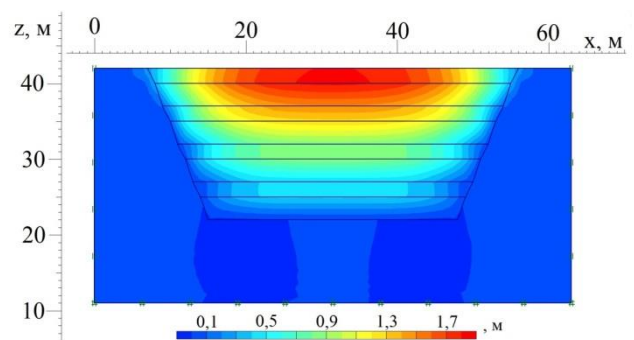


Рис. 19. Вертикальні деформації полігону з пересипанням і з піщаним підстилаючим шаром

Найбільших вертикальних статичних навантажень (300 кПа) через 30 років після закриття полігону може витримати полігон з глинистою основою і з пересипкою, деформації складають 2,99 м. При такій же величині динамічних навантажень осадка становить 2,9 м. При такій же величині навантаження полігон з піщаною основою зазнає руйнування, при 250 кПа деформації полігону складають: 2,63 м при статичному навантаженні і 2,57 м – при динамічному.

В результаті проведених досліджень можна зробити висновок, що при попередньому плануванні полігону необхідно передбачити пересипання шарів ТПВ і вибрати ділянки з більш щільним ґрунтом для можливості використання його після закриття в якості основи споруд. Якщо не було попереднього планування і/або в основі лежить слабкий ґрунт, необхідно застосовувати різні методи ущільнення або використовувати його з меншими навантаженнями (парки, рекреаційні зони, поля для гольфу).

Залежно від запланованого використання звалища необхідно враховувати наступні фактори: товщина покриваючого шару, підстилаючі шари ґрунту, кут нахилу схилу полігону та розміщення відходів, ступінь ущільнення, використання добавок і цементу для укріплення звалища, селективне розміщення відходів.

З проведеного аналізу можна запропонувати наступний набір критеріїв, які повинні бути виконані, перш ніж розглядати полігон для цілей редевелопмента:

- звалище повинно бути закрите принаймні 10 років до перепланування;

- відходи повинні бути розміщені на глибині менше 10 м;
- полігон повинен мати стабільно низький вміст вологи;
- звалище не повинно містити токсичних або небезпечних матеріалів, зокрема рідких відходів;
- використання полігону повинно відповідати його умовам.

На рис. 20 наведено загальний алгоритм поводження з закритим полігоном ТПВ для переведення його з категорії «екологічно небезпечний об'єкт» в категорію «екологічно безпечний об'єкт».

Наведені рекомендації щодо використання закритого звалища в якості основи споруд. Ефективне використання полігону після закриття вимагає довгострокового планування. Закриті санітарні полігони можна використати як рекреаційні парки або парки відпочинку, притулки для тварин, тенісні корти, поля для гольфу, стоянки для автомобілів, гірки для катання на лижах чи санного спорту або для побудови комерційних або промислових будівель. Планування особливо важливо там, де передбачається спорудження будівлі на території або поблизу полігону.

Важливою характеристикою звалища є його несуча спроможність. Низька несуча здатність може бути подолана зокрема за рахунок збільшення товщини ґрунту, що використовується для покриваючого шару. Таким чином, ґрунт чинить опір як ударному, так і обертальному зсуву. Мінімальна рекомендована товщина ґрунту повинна бути в 1,5 рази більше ширини структурних фундаментів.

Для підвищення несучої здатності полігону використовується розміщення і ущільнення спеціальних речовин (летюча зола, вапно тощо). Включення стабілізаторів в ґрунт під час розміщення покриваючого шару також може підвищити несучу здатність полігону. Хімічні речовини, такі як вапно, портландцемент, та ін. змішуються з ґрунтом. Бажаний ефект може бути посилено цементацією або гідроізоляцією для досягнення більшої щільності і більш низької проникності. Уприскування вапняного шламу для закріплення ґрунту також дає можливість для підвищення несучої здатності. Там, де інші способи досягнення високої несучої здатності основи невідомі, для підтримки можуть бути використані системи дамб або паль.

Ступінь обмежень буде залежати від цілого ряду чинників, в тому числі від складу відходів, віку відходів, ступеню ущільнення відходів, клімату і інженерних систем на полігоні. В цілому, звалища з відносно молодими відходами, які тільки недавно були закриті матимуть значно більші обсяги генерації метану і безперервного осідатимуть, ніж старіші звалища і, таким чином, будуть мати значно серйозніші проблеми, пов'язані з негайним повторним використанням. У той час як перепланування для м'якого використання (тобто парків, полів для гольфу, озеленення і т. д.) може зменшити до деякої міри проблеми, пов'язані з конструкцією фундаменту і контролю звалищного газу (ЗГ).

М'які застосування зазвичай включають в себе відкритий простір. Отже, потенціал для накопичення вибухонебезпечних рівнів сміттєвих газів менше для м'яких застосувань, ніж для жорстких. Однак, якщо газ не контролюється належним чином, він може все ще надавати ризики вибухів і ризик для здоров'я і може негативно вплинути на рослинність. Тому контроль міграції газу є важливим питанням для м'якого використання.

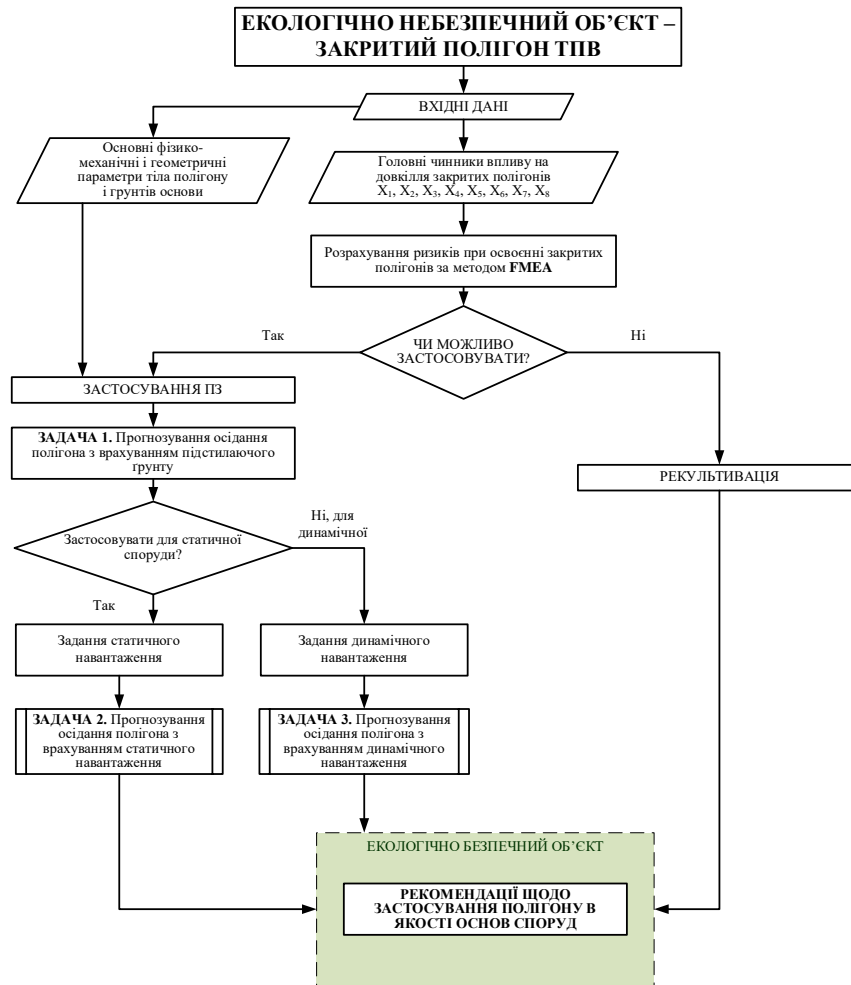


Рис. 20. Загальний алгоритм поводження з закритим полігоном ТПВ для переведення його з категорії «екологічно небезпечний об'єкт» в категорію «екологічно безпечний об'єкт»

Осадка звалища також залишається серйозною проблемою для м'якого використання. Комунікації, бруковані ділянки і підсобні приміщення чутливі до великих сумарних і/або диференціальних осадок. Крім того, деякі м'які види використання можуть бути ще менш стійкими до диференціальної осадки, ніж при твердому використанні (наприклад, спортивні майданчики). Тому, як і в жорсткому використанні, вплив осадки після закриття необхідно ретельно враховувати при плануванні використання полігону.

Найбільш істотна відмінність між м'яким і жорстким використанням є те, що м'яке застосування часто включає рослинність і зрошення. Зокрема, в посушливих і напівпосушливих кліматичних умовах, після закриття полігони можуть вимагати додавання значної кількості води в верхній частині полігону для зрошення. Якщо покриваючий шар звалища не забезпечує відповідний опір інфільтрації, відбувається збільшення вироблення газу, осадка, і забруднення підземних вод. Після закриття полігону для м'якого використання необхідно враховувати не тільки інфільтрацію і міграцію ЗГ через верхню частину полігону, але і по периметру покриваючого шару і під звалищем.

При проектуванні споруд на звалищі, необхідно також враховувати системи газової вентиляції, які будуть запобігати накопиченню метану в межах структур. Ці елементи можуть включати в себе вентиляційні труби, всмоктувальні нагнітачі, або різні засоби природної вентиляції.

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі прогнозування використання закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основи споруд, що забезпечує раціональне використання природних ресурсів і дотримання норм безпечних впливів та відновлення навколишнього середовища шляхом повторного застосування закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основ споруд.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному.

1. Проведено аналіз існуючих проблем накопичення відходів на території України. Визначено, що стан управління екологічною безпекою територій, що зайняті полігонами ТПВ, вимагає розроблення дієвих заходів для виправлення існуючого стану. Виявлено шляхи зменшення шкідливого екологічного впливу закритих полігонів ТПВ на довкілля.

2. Вперше методом ієрархічного аналізу обґрунтовано екологічно безпечну технологію утилізації відходів з найбільшим значенням глобального пріоритету (до повного і незворотного руйнування діоксинів і очищення димових газів до рівня, безпечного для навколишнього середовища і здоров'я людини) – технологію спалювання в барабанних печах, яка в 1,9...2,1 рази перевищує значення для технологій спалювання в металургійних та цементних печах та при обробці з використанням піролізу чи газифікації.

3. Вперше із застосування методології аналізу режимів відмов та наслідків для експертної оцінки ризиків для розрахунків та наукового обґрунтування допустимих рівнів впливу закритих полігонів ТПВ на навколишнє середовище встановлено, що показниками з найбільш високим ступенем тяжкості ефектів ( $RPN > 125$ ) є: вплив атмосферного повітря  $RPN = 700$ ; деформації поверхні  $RPN = 400$ ; вплив на дихальні шляхи  $RPN = 384$ ; небезпека вибуху та пожежі  $RPN = 324$ .

4. Розроблено просторову математичну модель процесу консолідації тілу полігону ТПВ, яка відрізняється від існуючих комплексним врахуванням геометричних розмірів та форми полігону, динамічних та статичних навантажень, що дозволяє оцінити вплив цих чинників на навколишнє середовище при осіданні полігону.

5. Вперше при розрахунку стійкості полігону запропоновано враховувати підстилаючий ґрунт як одного з основних чинників при формуванні його осідання, що дозволяє більш обґрунтовано оцінити вплив техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище та обґрунтувати теоретичні і практичні засади виведення їх з експлуатації.

6. Вперше чисельно встановлено, що при однакових параметрах полігону підстилаючий ґрунтовий шар здійснює значний вплив на величину осадки: чим більш щільний і менш пористий ґрунт, тим менша осадка. Зокрема, при глинистій ґрунтовій основі осадка на 23% менше, ніж при пісчаній, і на 14% – ніж при суглинистій.

7. Отримано, що зі зменшенням кута нахилу схилу полігону відбувається значне зменшення осадки. Так, при зменшенні кута з  $75^\circ$  до  $30^\circ$  осадка зменшується на 5...22% в залежності від типу ґрунтів основи, причому найбільший спад спостерігається у найменш щільного ґрунту (піску), а найбільший – у глини.



8. Встановлено, що полігон в формі прямокутної трапеції менш стійкий, ніж в формі рівносторонньої трапеції. Так, для глинистої основи, загальна деформація збільшилася на 48%, для піщаної основи – на 23% і для суглинку – на 30%. Це викликано появою значних горизонтальних деформацій. Чим більше кут нахилу, тим швидше полігон руйнується, зокрема при куті нахилу  $30^\circ$  – через 20 років, при куті  $45^\circ$  – через 13 років.

9. Отримані аналітичні залежності осідання полігону ТПВ з різними підстилаючими ґрунтами від величини статичних та динамічних навантаження у вигляді поліномів другого степеня, які дають можливість здійснювати прогнозування осідання полігонів з метою їх подальшого використання в якості основи споруд різного призначення.

10. Розроблено методику та комплекс програм для розрахунку осідання тіла полігону на основі математичного моделювання закономірностей осідання полігону ТПВ при динамічних та статичних навантаженнях з врахуванням його взаємодії з ґрунтовою основою, шаруватості підстилаючого ґрунту, геометричних розмірів та форми полігону, яка із застосуванням експертної оцінки ризиків повторного використання територій є науково-методичним підґрунтям для забезпечення сталого соціально-екологічного розвитку та потенціалу держави; збереження та відновлення навколишнього середовища.

### Основні положення і результати роботи опубліковано в:

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Remez N., **Bronytskyi V.** Estimation of risks for development of naturally technogenic environments. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2019. №4. С. 128-133. Url: <http://energy.kpi.ua/issue/view/12162>. (Особистий внесок: виділені основні показники джерел виникнення ризиків і проведена оцінка ризиків освоєння природно-техногенного середовища).

2. Remez N., **Bronytskyi V.** Forecasting the stability of the solid waste landfill under its creation. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. №1. С. 146-151. Url: <http://energy.kpi.ua/issue/view/8041>. (Особистий внесок: проведено моделювання осадки полігону твердих побутових відходів із застосуванням методу скінчених елементів з метою прогнозування його стійкості при створенні і подальшому використанні в якості основи споруд; за допомогою мови програмування C# створено програмне забезпечення для встановлення залежностей осадки полігону від властивостей підстилаючих ґрунтів та від величини статичного навантаження).

3. Гребенюк Т.В., Ремез Н.С., Прокопенко В.В., **Броницький В.О.** Багатокритеріальний аналіз вибору технології утилізації відходів з використанням парних порівнянь. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. Кременчук: КрНУ, 2020. Випуск 4(123). Р. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.34-41>. Url: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/vupysk4>. (Особистий внесок: проаналізовані методи утилізації твердих побутових відходів).

4. Гребенюк Т.В., Науменко Д.П., **Броницький В.О.** Математичне моделювання перенесення марганцю у водному середовищі на прикладі річок Хомора і Случ. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2018. Випуск 4(23) ISSN 2306-

9716. С. 92-95. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2018-4-23-20>. Url: <http://www.ecoj.dea.kiev.ua/4-23-2018>. (Особистий внесок: проаналізовано одновимірну математичну модель трансформації й перенесення забруднюючих речовин).

5. Hrebeniuk T.V., Dychko A.O., **Bronytskyi V.O.** Modelling of process of adsorption at wastewater treatment from phenol. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2019. Випуск 1(24). Т. 2 С. 5-7. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-1-24-2-1>. Url - <http://www.ecoj.dea.kiev.ua/1-24-2-2019>. (Міжнародна наукометрична база даних «Index Copernicus») (Особистий внесок: Проаналізовано особливості врахування сорбційних властивостей сорбційних матеріалів під час очищення стічних вод).

6. **Броницький В.О.**, Левін О.В., Голяченко О.Ю. Використання фотокалатічного методу на промислових підприємствах для очищення повітря від органічних забруднень. *Проблеми охорони праці в Україні: Збірник наукових праць*. 2016. Вип. 31. С. 88-94 Url: <http://www.irbis-nbu.gov.ua/article>. (Особистий внесок: сформульовано мету і задачі дослідження, проаналізовано отримані результати установки для очищення повітря).

*Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних:*

7. Remez N., Dychko A., Kraychuk S., Ostapchuk N., Yevtieieva L., Bronitskiy V. Simulation of seismic explosion waves with underground pipe interaction. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2018. Volume 55: Issue 2. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2018-0018>. P. 37-44. Url: <https://www.scopus.com/article>. (**Scopus**) (Особистий внесок: взято участь у моделюванні параметрів ґрунту, досліджені закономірності зміни напружено-деформованого стану системи залежно від глибини).

*Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

8. Remez N., **Bronytskyi V.** Stress-strain state of the solid waste landfill with account of underlying soils. *Актуальные научные исследования в современном мире: XXXVI Международная научная конференция, Переяслав-Хмельницький, 2018*. Вип. 4(36), ч. 10. Url: <https://journals.indexcopernicus.com/search/journal>. (Особистий внесок: проведено моделювання напружено-деформованого стану звалища твердих побутових відходів з урахуванням підстилаючих ґрунтів).

9. Ремез Н.С., **Броницький В.О.** Прогнозування стійкості комбінованого природо-техногенного середовища. *Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів: матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, м. Житомир, ЖДТУ, 18-19 квітня 2018*. С. 16-17. Url: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/09/16.pdf>. (Особистий внесок: Проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану комбінованого природо-техногенного середовища та ґрунтової основи для прогнозування його стійкості для подальшого використання.)

10. Ремез Н.С., **Броницький В.О.** Аналіз стану сфери поводження з побутовими відходами в Україні. *«Енергетика. Екологія. Людина»: матеріали X науково-технічної конференції Інституту енергозбереження та енергоменеджменту*.



Зб. наукових праць ІЕЕ КПІ імені Ігоря Сікорського. Київ: 2018. С. 377-380. Url: <http://en.iee.kpi.ua/files/2018/dopovidi2018.pdf> (*Особистий внесок*: проаналізовано поточний стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні).

11. **Bronytskyi Vadim**, Bilous Anna. The effect of sustainable consumption and production on ecology. *Актуальные научные исследования в современном мире*: XLVIII Международная научная конференция, Переяслав-Хмельницкий. 2019. Вип. 4(48), ч. 2. Url: <https://journals.indexcopernicus.com/search/journal>. (*Особистий внесок*: проаналізовано вплив сталого використання та виробництва на екологію).

12. **Bronytskyi Vadim**, Bilous Anna. The effect of sustainable consumption and production on ecology. *Актуальные научные исследования в современном мире*: LV Международная научная конференция, Переяслав-Хмельницкий. 2019. Вип. 11(55), ч. 3. С. 78-82. Url: <https://journals.indexcopernicus.com/search/journal>. (*Особистий внесок*: проаналізовано вплив сталого використання та виробництва на екологію).

13. **Bronytskyi Vadim**, Bilous Anna. Comparative analysis of European water ecological legislation and Ukrainian. *Актуальные научные исследования в современном мире*: XXXVII Международная научная конференция, Переяслав-Хмельницкий. 2018. Вип. 5(37), ч. 8. Url: <https://journals.indexcopernicus.com/search/journal>. (*Особистий внесок*: проведено порівняльний аналіз законодавств).

14. **Броницький В.О.**, Гребенюк Т.В., Репін М.В., Федоренко Д.О. Вплив діяльності підприємств деревообробної промисловості на довкілля. *Актуальные научные исследования в современном мире*: LXI Международная научная конференция, Переяслав-Хмельницкий. 2019. Вип. 5(61), ч. 4. Url: <https://journals.indexcopernicus.com/search/journal>. (Наукометричні БД: РИНЦ, Google Scholar, Бібліометрика української науки, Index Copernicus) (*Особистий внесок*: проаналізовано основні джерела забруднення атмосферного повітря).

## АНОТАЦІЯ

**Броницький В.О. Прогнозування використання закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основи споруд.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ, 2021.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню важливої науково-прикладної задачі прогнозування використання закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основи споруд, що забезпечує раціональне використання природних ресурсів і дотримання норм безпечних впливів та відновлення навколишнього середовища шляхом повторного застосування закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основ споруд.

Проаналізовано екологічні наслідки поводження з відходами в Україні та світі, сучасний стан та перспективи використання полігонів твердих побутових відходів (ТПВ). З використання методу експертних оцінок встановлено, що показниками з найбільшим високим ступенем тяжкості ефектів є вплив атмосферного повітря; деформації поверхні; вплив на дихальні шляхи; небезпека вибуху та пожежі.

Для прогнозування стійкості полігонів ТПВ з метою їх повторного використання в якості основ споруд проведено чисельні експерименти на базі математичного моделювання процесів осідання полігону ТПВ. Для моделювання процесу осідання полігону застосовувався метод скінченних елементів. Розроблено просторову математичну модель процесу консолідації полігону ТПВ, в якій вперше запропоновано враховувати підстилаючий ґрунт, так як він є одним з основних чинників при формуванні осідання. В результаті застосування розробленої методики та комплексу програм отримано закономірності осідання полігону ТПВ від фізико-механічних властивостей тіла полігону та ґрунту, форми та куту нахилу полігону, взаємного розташування підстилаючих ґрунтів. Отримані аналітичні залежності осідання полігону ТПВ з різними підстилаючими ґрунтами від величини статичних і динамічних навантажень у вигляді поліномів 2 степеня, які дають можливість здійснювати прогнозування осідання полігонів з метою їх подальшого використання в якості основи споруд різного призначення.

**Ключові слова:** екологічна небезпека, методологія оцінки, екологічні ризики, полігони твердих побутових відходів, ґрунтова основа, математичне моделювання.

## SUMMARY

**Bronytsky V.O. Forecasting the use of closed landfills for solid waste as a basis for construction.** – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 21.06.01 – environmental safety. State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and applied problem of forecasting the use of closed landfills as a basis for buildings, which ensures the rational use of natural resources and compliance with safety standards and environmental restoration by reusing closed landfills as a basis for buildings.

The ecological consequences of waste management in Ukraine and the world, the current state and prospects for the use of landfills for solid waste (MSW) are analyzed. Using the method of expert assessments, it was found that the indicators with the highest severity of effects are the influence of atmospheric air; surface deformation; effects on the respiratory tract; danger of explosion and fire.

To predict the stability of landfills for the purpose of their reuse as the basis of structures, numerous experiments were conducted on the basis of mathematical modeling of landfill subsidence processes. The finite element method was used to model the landfill subsidence process. A spatial mathematical model of the solid waste landfill consolidation process has been developed, in which it is first proposed to take into account the underlying soil, as it is one of the main factors in the formation of subsidence. As a result of application of the developed technique and a set of programs the regularities of landfill subsidence are obtained from the physical and mechanical properties of the landfill body and soil, shape and angle of the landfill, the mutual location of the underlying soils. Analytical dependences of landfill subsidence with different underlying soils on the magnitude of static and dynamic loads in the form of polynomials of 2nd degree are obtained, which make it possible to predict landfill subsidence with the aim of their further use as a basis for different purposes.

**Key words:** ecological danger, assessment methodology, ecological risks, landfills of solid household waste, soil basis, mathematical modeling.

**БРОНИЦЬКИЙ ВАДИМ ОЛЕГОВИЧ**

**ПРОГНОЗУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЗАКРИТИХ ПОЛІГОНІВ  
ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В ЯКОСТІ ОСНОВ СПОРУД**

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

---

Підписано до друку 24.03.2021 р. Формат 60×90/16мм.  
Обл.-вид. арк. 0,9. Ум.-друк. арк. 0,9  
Папір офісний. Друк цифровий. Тираж 100 прим. Зам №052142

---

Канцтовари / Поліграфія  
01001, м. Київ, вул Михайлівська, 17/2,  
Тел. 044-360-6181

