

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА
УПРАВЛІННЯ

МІНІСТЕРСТВО ЕКОЛОГІЇ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БРОНИЦЬКИЙ ВАДИМ ОЛЕГОВИЧ

УДК 528.855:628.4.032:502.174 (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

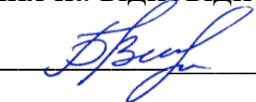
**ПРОГНОЗУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЗАКРИТИХ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ
ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В ЯКОСТІ ОСНОВ СПОРУД**

Спеціальність 21.06.01 – екологічна безпека

Галузь знань – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 В.О. Броницький

Науковий керівник – Ремез Наталя Сергіївна, доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

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). Запропоновано використання оцінки рівня ризиків забруднення навколишнього середовища закритими полігонами ТПВ, проведеного на основі використання методу експертних оцінок, яка передбачає опитування експертів – екологів та обчислення основних чинників впливу на довкілля з метою їх врахування при прогнозуванні можливості повторного використання полігонів. Вагомість обраних критеріїв враховується введенням коефіцієнтів значимості, визначених експертним шляхом. Встановлено, що показниками з найбільшим високим ступенем тяжкості ефектів є вплив атмосферного повітря (парниковий ефект, руйнування озонового шару, 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 тіла полігону ТПВ з врахуванням підстилаючого ґрунту. Для моделювання процесу деформування 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.

Розроблено ефективну методику розрахунку осідання полігону і підстилаючого та покриваючого ґрунтів з використанням сучасних моделей: Кулона–Мора для шарів ґрунту і SSC для відходів. Для моделювання процесу осідання полігону застосувався метод скінченних елементів з трикутною сіткою.

В результаті чисельного моделювання 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, якщо ґрунтова основа представлена глиною, то досягається осадка на 23% менше, ніж з піском, і на 14% менше, ніж з суглинком.

Отримано, що кут нахилу схилу полігону значно впливає на його стійкість: зі зменшенням кута відбувається значне зменшення осадки. Так, при зменшенні кута з 75° до 30° осадка зменшується на 5-22% в залежності від типу ґрунтів основи, причому найбільший спад спостерігається у найменш щільного ґрунту (піску), а найбільший – у глини. Отримані аналітичні залежності осідання полігону з різними підстилаючими ґрунтами від кута нахилу схилу.

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% (при куті нахилу схилу полігону 15°). Це викликано появою значних горизонтальних деформацій. Чим більше кут нахилу, тим швидше полігон руйнується, зокрема при куті нахилу 30° – через 20 років, при куті 45° – 13 років.

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

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.

Методології оцінки стійкості природно техногенного середовища під дією навантажень різного типу, розроблені в дисертаційній роботі, 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 .

Матеріали дисертації впроваджено в учбовому процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського в курсах лекцій “Основи екології та наноекологія”, “Екологізація виробництва та «зелені технології», «Стратегія охорони навколишнього середовища».

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

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 привантаження)

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-nbuv.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. Вып. 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. Вып. 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).*

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 solid waste landfills (MSW) are analyzed. It is proposed to use the assessment of the level of risks of environmental pollution by closed landfills, conducted on the basis of the method of expert assessments, which involves interviewing environmental experts and calculating the main environmental factors in order to take them into account when forecasting landfill reuse. The weight of the selected criteria is taken into account by introducing coefficients of significance determined by experts. It is established that the indicators with the highest severity of effects are the influence of atmospheric air (greenhouse effect, ozone depletion; surface deformation; impact 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 the processes of subsidence of the landfill body, taking into account the underlying soil. 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. An effective method for calculating the subsidence of the landfill and the underlying and covering soils

using modern models: Coulombs-More for soil layers and SSC for waste. The method of finite elements with a triangular grid was used to model the process of landfill subsidence.

As a result of numerical modeling, it was found that with the same landfill parameters, the underlying soil layer has a significant effect on the amount of sediment: the denser and less porous the soil, the less sediment. In particular, if the soil base is represented by clay, the sediment is achieved by 23% less than with sand, and 14% less than with loam.

It is obtained that the slope angle of the landfill significantly affects its stability: with decreasing angle there is a significant decrease in sediment. Thus, when the angle decreases from 75° to 30° , the sediment decreases by 5–22% depending on the type of base soil, with the largest decrease observed in the least dense soil (sand) and the largest in clay. Analytical dependences of landfill subsidence with different substrates on the slope angle are obtained.

It is obtained that the slope angle of the landfill significantly affects its stability: with decreasing angle there is a significant decrease in sediment. Thus, when the angle decreases from 75° to 30° , the sediment decreases by 5–22% depending on the type of base soil, with the largest decrease observed in the least dense soil (sand) and the largest in clay. Analytical dependences of landfill subsidence with different substrates on the slope angle are obtained.

It is established that the polygon in the form of a rectangular trapezoid is less stable than in the form of an equilateral trapezoid. Thus, for the clay base, the total deformation increased by 48%, for the sand base – by 23% and for loam – by 30% (at a slope angle of 15°). This is caused by the appearance of significant horizontal deformations. The greater the angle of inclination, the faster the landfill collapses, in particular at an angle of 30° – in 20 years, at an angle of 45° – 13 years.

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 for their further use as a basis for structures of different purposes.

A methodology and a set of programs for calculating the subsidence of the landfill body on the basis of mathematical modeling of landfill subsidence of solid waste at dynamic and static loads taking into account its interaction with the soil base, stratification of the underlying soil, geometric dimensions and shape of the landfill. is a scientific and methodological basis for sustainable social and environmental development and state potential; preservation and restoration of the environment.

According to the materials of the dissertation introduced in the educational process KPI. Igor Sikorsky in the lectures "Fundamentals of Ecology and Nanoecology", "Greening of production and green technologies", "Environmental Strategy".

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	15
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОГНОЗУВАННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ.....	23
1.1 Аналіз стану досліджень щодо поведження з твердими побутовими відходами в Україні	23
1.2 Аналіз складу твердих побутових відходів.....	29
1.3 Аналіз досліджень щодо стійкості полігонів твердих побутових відходів.....	35
1.4 Аналіз досліджень основних геотехнічних параметрів полігонів твердих побутових відходів.....	42
1.5 Аналіз методик оцінки стійкості полігонів твердих побутових відходів ..	49
Висновки до розділу 1	61
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ТА РИЗИКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЇХ ВПЛИВУ НА ПОЛІГОНАХ ТПВ ..	63
2.1. Багатокритеріальний аналіз вибору технології утилізації відходів з використанням парних порівнянь	63
2.2. Оцінка ризиків при освоєнні природно техногенних середовищ	78
Висновки до розділу 2	87
РОЗДІЛ 3 ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВ'ЯЗАНОЇ СИСТЕМИ «ПОЛІГОН ТПВ-ГРУНТОВА ОСНОВА».....	89
3.1 Математична постановка задачі про напружено-деформований стан зв'язаної системи «полігон ТПВ - ґрунтова основа»	89
3.2. Основні характеристики моделі SSC для моделювання полігону ТПВ ..	100
3.3 Диференційний закон для одновимірної повзучості.....	104

	13
3.4 Тривимірна модель консолідації	106
3.5. Модель Кулона-Мора для моделювання ґрунтів основи полігону ТПВ.	112
Висновки до розділу 3	117
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІГОНУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З ВРАХУВАННЯМ НАЙБІЛЬШ СУТТЄВИХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ	118
4.1 Дослідження осадки полігону твердих побутових відходів з врахуванням різних ґрунтових основ.....	118
4.2. Вплив нахилу кута схилу на осадку полігону.....	123
4.3 Вплив форми полігону на його осадку	127
4.4 Вплив шаруватості ґрунтів основи полігону на його осадку	128
4.5 Дослідження напружено-деформованого стану полігону твердих побутових відходів з врахуванням статичного та динамічного навантаження.....	134
4.5.1 Дослідження осадки полігону ТПВ з врахуванням статичного навантаження.....	134
4.5.2 Дослідження осадки полігону ТПВ з врахуванням динамічного навантаження.....	139
Висновки до розділу 4	144
РОЗДІЛ 5 МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІГОНУ ТПВ В ЯКОСТІ ОСНОВИ СПОРУД І КОНСТРУКЦІЙ.....	146
5.1 Методика прогнозування стійкості полігону твердих побутових відходів	146
5.2. Практичне застосування методики розрахунку осідання полігону	152
5.3. Попереднє планування та процедури закриття звалища для спорудження будівель та конструкцій.....	155

5.4 Спорудження та конструкція фундаментів будівель на закритому полігоні ТПВ	167
5.5 Заходи, направлені на захист будівель, що споруджені на основі закритого полігону ТПВ від звалищного газу	170
Висновки до розділу 5	173
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	178
ДОДАТОК А Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дослідження	191
ДОДАТОК Б Акт №1 впровадження результатів дисертаційного дослідження	193
ДОДАТОК В Акт №2 впровадження результатів дисертаційного дослідження	194

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ТПВ – тверді побутові відходи;

ЗГ – звалищний газ;

IУ - індекс узгодженості;

RPN (Risk Priority Number) – ступінь тяжкості ефектів;

ТЕЦ – теплоелектроцентрально;

SSC (Soft Soil Creep) – модель слабого ґрунту з врахуванням повзучості;

МГЕЗК – Міжурядова група експертів з питань змін клімату

SWC Env Ind (Seasonality of Municipal Waste Generation and Composition and Corresponding Fluctuations of Various Environmental Indicators for Waste Management and Treatment Facilities) – Сезонність утворення муніципальних відходів та відповідні коливання різних екологічних показників для об'єктів поводження та переробки відходів.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Україна посідає одне з перших місць у світі за кількістю побутового сміття на душу населення. Під полігони твердих побутових відходів та звалища відведено понад 160 тис. га земель. У зв'язку з відсотком відходів, які захороняються на полігонах в Україні (більше 90% від загальної кількості відходів, що утворилися), та з постійним збільшенням об'ємів відходів і, як наслідок, збільшення площ, що відводяться під полігони, гостро постає питання про екологічну безпеку та стійкість полігонів для 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 забруднення навколишнього середовища полігонами ТПВ найчастіше використовується метод експертних оцінок, який передбачає опитування експертів – екологів та обчислення основних чинників впливу на довкілля з метою їх врахування при прогнозуванні їх впливу на довкілля. Вагомість обраних критеріїв враховується введенням коефіцієнтів значимості, визначених експертним шляхом.

Оцінка стійкості полігона ТПВ здійснюється за допомогою прогнозування його осадки. Осадка викликана багатьма процесами, зокрема біодеградацією органіки, розчиненням та окисненням речовин, переорієнтацією відходів в тілі полігону. Осадка підрозділяється на осадку викликану первинною (миттєвою) та вторинною (довготривалою) консолідацією.

Моделі, що описують осадку полігону ТПВ можна розділити на моделі, що базуються на механіці ґрунтів, емпіричні моделі, реологічні моделі та моделі, які враховують біорозкладання. Існуючі методики оцінки осадки мають ряд недоліків. Зокрема 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 такою

важливою складовою полігону, як ґрунти, що лежать в його основі. Саме від типу, міцності, геотехнічних властивостей цього ґрунту залежить стійкість полігону, оскільки найбільше навантаження відчують саме вони.

Експериментальні методики затратні і ефективні 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.

Ґрунтуючись на спостереженнях крутих схилів звалища, які залишаються стабільними, можна зробити висновок, що основна увага при аналізі стійкості полігону повинна бути надана матеріалам, які лежать в основі ТПВ, (наприклад, геосинтетичним покриттям) і ґрунтам основи полігону, а не твердим побутовим відходам. Незважаючи на широкі дослідження в області оцінки стійкості полігонів, на даний час цьому питанню зовсім не приділено уваги.

Підвищення надійності методів розрахунку осадки може бути забезпечено за рахунок максимального врахування властивостей конкретного ґрунтового масиву, що залягає в основі полігону.

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 темами "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.

Ідея роботи полягає у відновленні навколишнього середовища шляхом застосування закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основ споруд.

Метою роботи 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 цієї мети передбачає розв'язання таких **завдань**:

- 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 підстилаючого ґрунту, статичного і динамічного навантаження на його деформацію та встановити залежності осадки полігону від цих параметрів для прогнозування і вибору можливого використання закритого полігону в якості основи споруди для підвищення екологічної безпеки навколишнього середовища;

- розробити методику 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.

Наукова новизна одержаних результатів представлена науковими положеннями, що виносяться на захист, в яких вперше:

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 вигляді поліномів другого степеня, 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 одержаних результатів полягає в наступному: 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 навколишнє середовище 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 впроваджено в учбовому процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського в курсах лекцій “Основи екології та наноекологія”, “Екологізація виробництва та «зелені технології», «Стратегія охорони навколишнього середовища».

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач були використані наступні методи досліджень: аналіз літературних джерел за тематикою дослідження; узагальнення відомих теоретичних результатів і практичного досвіду поводження з полігонами ТПВ, багатокритеріальний аналіз з використанням парних порівнянь для вибору технологій утилізації відходів; метод аналізу режимів відмов та наслідків для експертної оцінки ризиків повторного використання територій, зайнятих полігонів ТПВ; математичне моделювання процесів осідання полігону з використанням сучасних математичних моделей тіла полігону та підстилаючої ґрунтової основи; метод порівняння при встановленні достовірності отриманих результатів та для отримання кількісної оцінки одержаних результатів дослідження; метод абстрагування використовувався на етапі розробки спеціального програмного забезпечення для автоматизації розрахунків розробленого алгоритму оцінки стійкості полігону при статичних та динамічних навантаженнях для заданих фізико-механічних та геометричних параметрів.

Особистий внесок здобувача полягає у наступному.

Аналіз проблеми, постановка задач і вибір методів дослідження проведено спільно з науковим керівником дисертації. Особистий внесок 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.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі геоінженерії Інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського, науковий керівник професор кафедри геоінженерії, д.т.н., проф. Ремез Н. С..

Робота є результатом самостійних досліджень Броницького В. О.

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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОГНОЗУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

1.1 Аналіз стану досліджень щодо поводження з твердими побутовими відходами в Україні

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. Майже всі побутові відходи Східного (99,6%), а також Центрального (98,2%) регіонів захороняються на полігонах і сміттєзвалищах. Найнижчий показник щодо захоронення ТПВ на полігонах і сміттєзвалищах має Північний регіон (85,1%).

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 ресурсоемних багатовідхідних технологій, а також відсутністю ефективного управління відходами [1].

За даними Міністерства розвитку громад та територій України та державною службою статистики України за 2019 рік (без урахування даних АР Крим та м. Севастополь) утворилось майже 53 млн м³ побутових відходів, або понад 10 млн тонн, які захороняються на 6 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею майже 9 тис. га. [2-6]. У порівнянні з нормами ЄС (не більше 500 полігонів на країну) показник поточної кількості полігонів в Україні перевищує у 13 разів. На рис. 1.1 та 1.2 наведені статистичні дані щодо обсягів захоронення на полігонах та їхньої загальної кількості по областях України.

На 2019 рік є 339 закритих не діючих полігонів та звалищ. На рис. 1.3 наведена кількість таких об'єктів по областях держави. Згідно проведеного аналізу динаміки зростання кількості закритих полігонів (рис. 1.4) з кожним

роком кількість таких екологічно небезпечних об'єктів буде тільки збільшуватися.

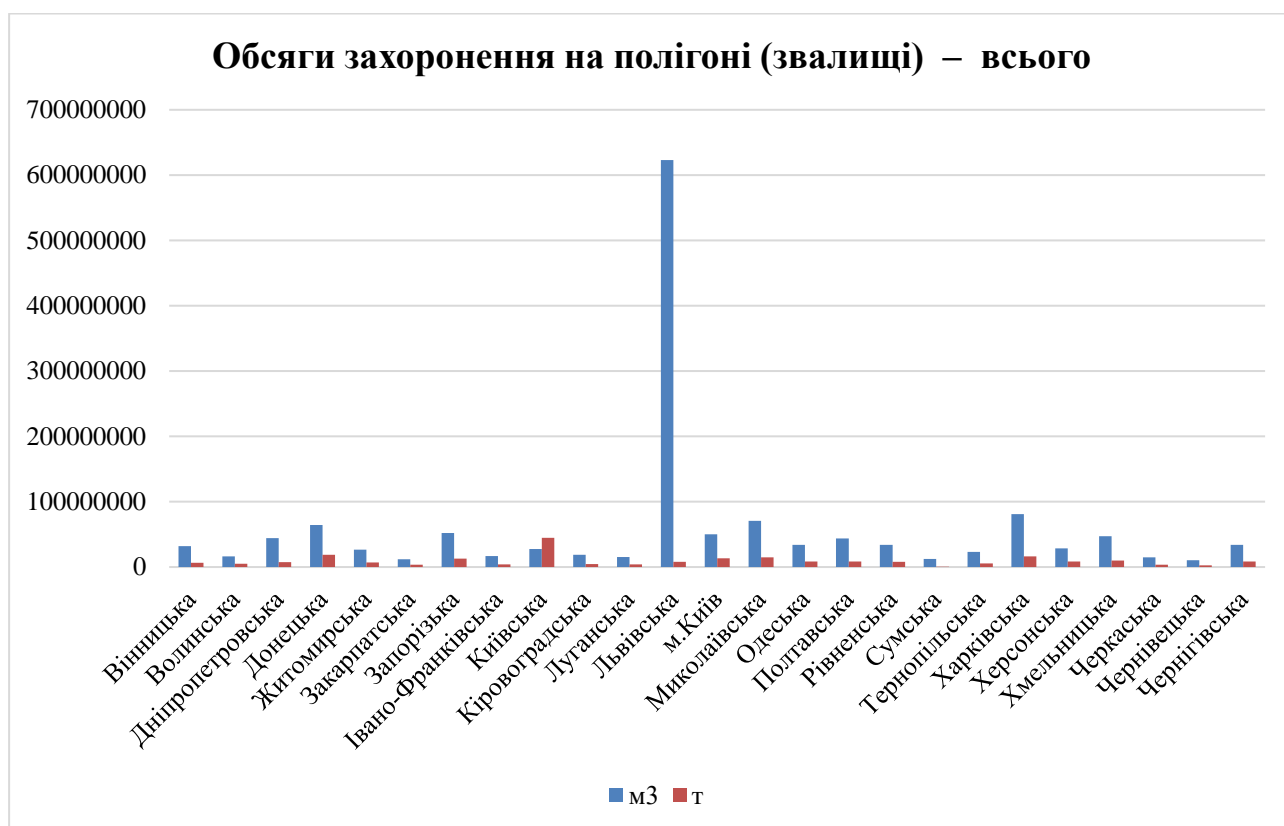


Рис. 1.1 Обсяги захоронення на полігонах

Послуги з вивезення побутових відходів охоплюють 78% населення України згідно Стану поводження [6].

Систему вилучення біогазу встановлено лише на 19 полігонах та експлуатуються когенераційні установки, потужність яких досягла 26 МВт [6].

Разом з тим, кількість перевантажених полігонів і сміттєзвалищ становить 258 од. (4,2%), а 905 од. (15%) не відповідають нормам екологічної безпеки [1-5]. На рис. 1.5 – 1.6 наведена відповідна статистика по областях України [6].

Неналежним чином проводиться робота з паспортизації та рекультивації сміттєзвалищ. З 1657 сміттєзвалищ, які потребують паспортизації, у 2019 році фактично паспортизовано 145 од. (потребує паспортизації 24,9% сміттєзвалищ від їх загальної кількості) [6].

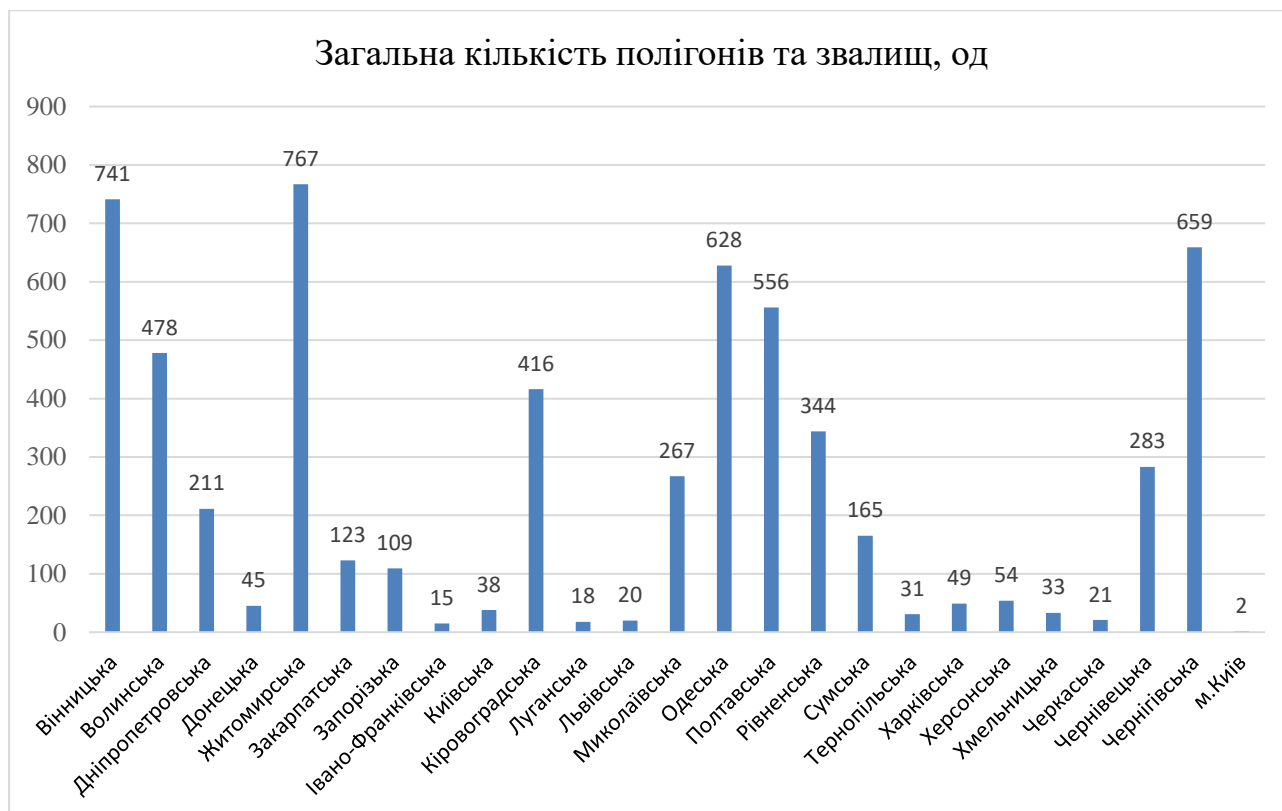


Рис. 1.2 Загальна кількість полігонів та звалищ

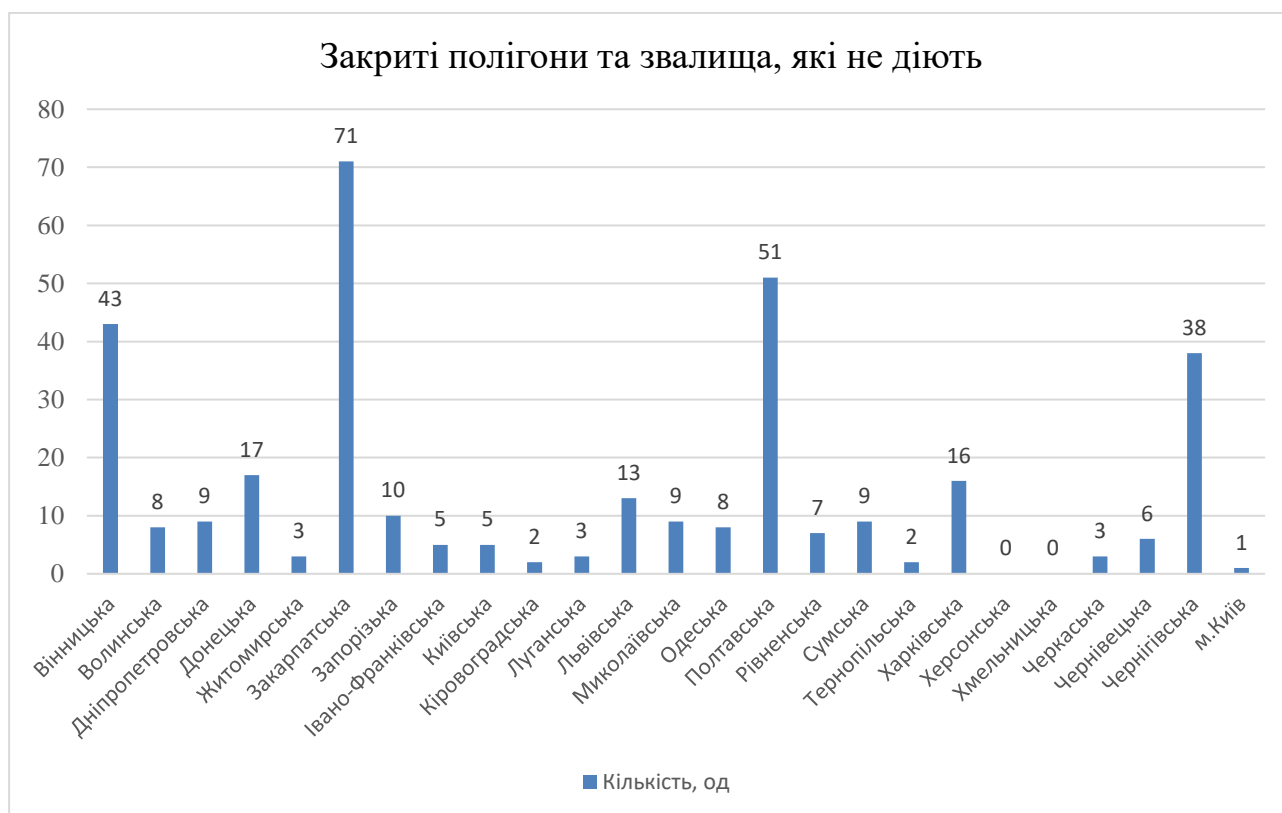


Рис. 1.3 Кількість закритих полігонів та звалищ, які не діють



Рис. 1.4 Кількість закритих полігонів та звалищ, які не діють по рокам



Рис. 1.5 Кількість перевантажених полігонів та звалищ

Найбільша кількість полігонів, які потребують паспортизації, знаходиться у Хмельницькій області (90% від загальної кількості полігонів в області) та Дніпропетровській області (68%).

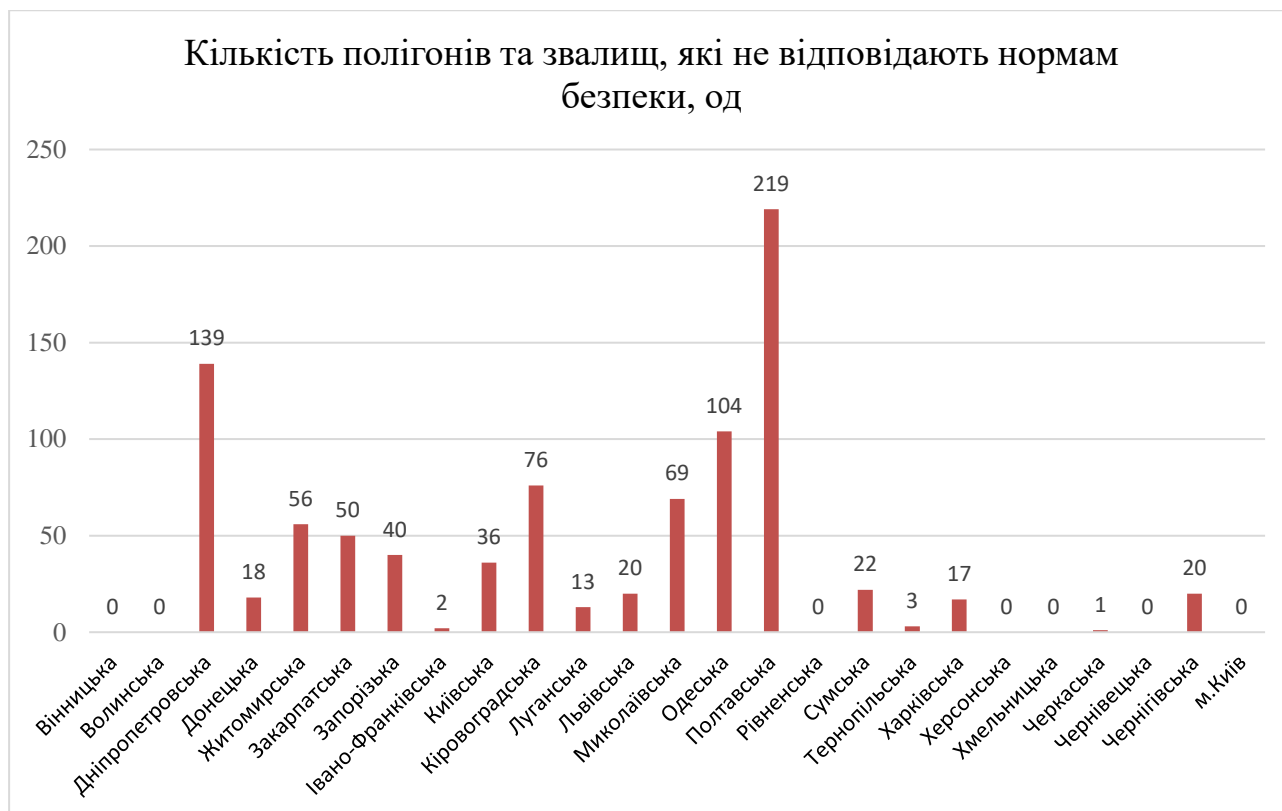


Рис. 1.6 Кількість полігонів та звалищ, які не відповідають нормам безпеки

З 483 сміттєзвалищ, які потребують рекультивації, фактично рекультивовано 57 од. (7% потребує рекультивації).

Найбільша кількість полігонів, які потребують рекультивації, розташовано у Черкаській області та у м. Києві.

З 4-х сміттєспалювальних заводів працює лише один – завод «Енергія», який спалює до 28% сміття м. Києва.

Згідно державного вектору розвитку є потреба у будівництві нових полігонів у кількості 384 одиниць. Найбільша потреба у будівництві нових полігонів у Закарпатській області – 44 одиниці. Але з аналізу рис. 1.5-1.6 випливає, що нові полігони потребують Одеська, Закарпатська, Вінницька та Чернігівська області, так як полігони в цих областях найбільш перенавантажені.

Через неналежну систему поводження з твердими побутовими відходами в населених пунктах, як правило, у приватному секторі, щорічно виявляється 26,9 тис. несанкціонованих звалищ, що займають площу 0,58 тис. га, з них ліквідовано у 2019 році 26,4 тис. несанкціонованих звалищ площею 0,53 тис. га.

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 санкціонованих сміттєзвалищах та/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).

Національна стратегія управління відходами, прийнята в 2017 році, ставить перед країною амбітні цілі. Наприклад, рівень захоронення муніципальних відходів має знизитися з 94% до 35% до 2030 року. Тобто, за 13 років Україні необхідно пройти шлях, на який іншим країнам знадобилося майже вдвічі більше часу: наприклад, 20 років знадобилося Польщі, щоб досягти зменшення частки захоронення муніципальних відходів з 98% до 42%; 20 років знадобилося Чехії, щоб знизити цей показник з 93% до 49% [7]. На рис. 1.7 наведено шлях Німеччини, Польщі, Чехії та України до ЄС щодо управління відходів [1, 8].

Аналіз стану сфери поводження з побутовими відходами в Україні з по 2018 рік наведений у праці [9]. Вплив сталого споживання природних ресурсів та виробництва на навколишнього середовища розглянуто у працях [10, 11]. Аналіз європейського законодавства з екологічної безпеки в порівнянні з українським наведено в [12].

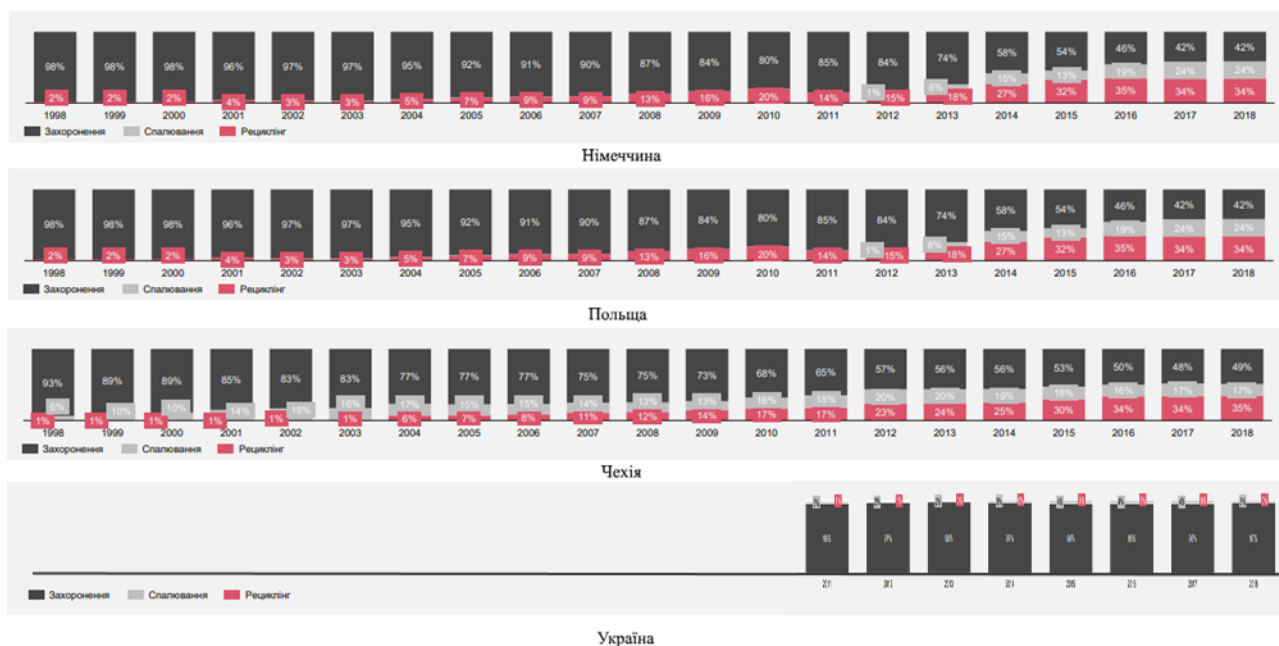


Рис. 1.7 Управління відходами у Німеччині, Польщі, Чехії та Україні

1.2 Аналіз складу твердих побутових відходів

Тверді побутові відходи – відходи, які утворюються в процесі життя і діяльності людини і накопичуються у житлових будинках, закладах соціально-культурного побуту, громадських, навчальних, лікувальних, торговельних та інших закладах (це харчові відходи, предмети домашнього вжитку, сміття, опале листя, відходи від прибирання і поточного ремонту квартир, макулатура, скло, метал, полімерні матеріали тощо) і не мають подальшого використання за місцем їх утворення. ("Правила надання послуг із збирання та вивезення твердих побутових відходів" затверджено Наказом Держбуду України від 21.03.2000 №54).

Тверді побутові відходи та їх компоненти, які збираються роздільно наступні: змішані; великогабаритні; макулатура; полімери; упаковка Тетра Пак та інша; метали; скло; текстиль; органічні компоненти, які здатні до біологічного розкладання; електричне та електронне обладнання; небезпечні компоненти та інші.

У ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основи проектування» наведено такі групи промислових відходів [13]:

- промислові відходи IV класу небезпеки, які приймаються на полігони твердих побутових відходів без обмеження і використовуються як ізолюючий матеріал: алюмосилікатний шлам Сб-г-43-6; азбестоцементний лом; азбесткрихта; відходи бентоніту; графіт відпрацьований виробництва карбїду кальцію; гіпсовмісткі відходи виробництва вітаміну вб; гашене вапно, вапняк, шлами після гасіння; тверді відходи крейди, хімічно осаджені; оксид алюмінію у вигляді відпрацьованих брикетів (при виробництві $AlCl_3$); оксид кремнію (при виробництві ПВХ і $AlCl_3$); відходи параніту; сплав солей сульфату натрію; селікогель (із адсорберів висушення нетоксичних газів); шлам з фільтр-пресів виробництва селікогелю (містить глину і кремнезем); шлам соди гранульований; відходи дистиляції у виді $CaSO_3$ содово-кремнистого виробництва; формівні стержневі суміші, що не містять важких металів; шлами хімводоочистки і пом'якшення води; хлорид-натрієві осади стічних вод виробництва лакових епоксидних смол; хлорне вапно нестандартне; тверді відходи виробництва шиферу; шлаки ТЕЦ, котельнь, що працюють на вугіллі, торфі, сланцях чи ТПВ; шліфувальні матеріали;

- промислові відходи III та IV класів небезпеки, які приймаються на полігони твердих побутових відходів з обмеженням і складаються разом (нормативи на 1000 м^3 твердих побутових відходів): кубові залишки виробництва оцтового ангїдрїду; резиту відходи (формальдегідна смола, що затверділа); тверді відходи виробництва полістирольних пластиків, які спінюються (відходи при виробництві електроізоляційних матеріалів; гетинакс електротехнічний листовий Ш-8,0; липка стрічка ЛСНПЛ-0,17; поліетиленова трубка ПНП; склолакотканина ЛСЕ-0,15; склотканина Е2-62; текстолїт електротехнічний листовий Б-16,0; фенопласт 03-010-02); тверді відходи суспензійного, емульсійного виробництва (сополїмерів стиролу з акрилонїтрилом чи метилметакрилатом; полістирольних пластиків; акрилонїтрилбутадієнстирольних пластиків; полістиролів);

- промислові відходи III та IV класів небезпеки, які приймаються на полігони твердих побутових відходів з обмеженням і складаються разом

(нормативи на 1000 м³ твердих побутових відходів) з додержанням особливих умов: активоване вугілля виробництва вітаміну В-6; відходи ацетобутилатцелюлози; дерев'яні та тирсово-стружкові відходи; обрізки хромових шкір; незворотна дерев'яна та паперова тара; обрізки шкірозамінників; відбілюючий ґрунт; фаолітів пил.

В результаті діяльності полігону на його території утворюються біогаз (суміш газів, що утворюється при анаеробному розкладанні органічної складової твердих побутових відходів) та фільтрат (рідка фаза, що утворюється на полігоні при захороненні твердих побутових відходів з вологістю більше 55% та внаслідок атмосферних осадів, обсяг яких перевищує кількість вологи, що випаровується з поверхні полігона).

В свою чергу у біогазі виділяються такі забруднюючі речовини як азоту діоксид, аміак, діоксид сірки, сірководень, вуглецю оксид, метан, завислі речовини (пил). Стан атмосферного повітря в зоні знешкодження та захоронення відходів оцінюють за змістом водяної пари, метану, азоту повітря, діоксиду сірки, фтористого водню, температурою повітря і іншими показниками.

Ґрунтовий покрив також є найважливішим компонентом природного середовища, що зазнає помітного антропогенного впливу в зоні захоронення відходів. Пріоритетні показники екологічного стану – ступінь засоленості останніх легкорозчинними солями, забрудненість важкими металами, наявність органічних забруднюючих речовин, реакція середовища. У першому випадку засолення ґрунтів визначається присутністю у водних витяжках іонів SO₄²⁻, Cl²⁻, HCO³⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na²⁺; у другому випадку – наявністю важких металів: Ni, Рь, Zn, Cr, V, Kd, Zr та ін. [14]

Таблиця 1.1 – Основні показники утворення та поводження з відходами

	2010	2015	2016	2017	2018
1	2	3	5	5	6
Утворено, тис.т	425914.2	312267.6	295870.1	366054.0	352333.9
у тому числі від економічної діяльності	419191.8	306214.3	289523.6	360196.0	346790.4

Продовження табл. 1.1

1	2	3	5	5	6
Утворено відходів на одну особу, кг	9285	7288	6934	8616	8335
Зібрано, отримано побутових та подібних відходів, тис.т	9765.5	11491.8	11562.6	11271.2	11857.2
Імпортовано, тис.т	4.1	3.4	7.9	112.0	89.4
Усього спалено, тис.т	1058.6	1134.7	1106.1	1064.3	1028.6
у тому числі з метою отримання енергії	840.3	1086.3	1035.3	1008.5	951.2
Утилізовано (R2-R11), тис.т	145710.7	92463.7	84630.3	100056.3	103658.1
Підготовлено до утилізації (R12-R12K), тис.т	6037.3	1940.5	2920.5	3357.8	3193.6
Видалено у спеціально відведені місця чи об'єкти (D1, D5, D12), тис.т	313410.6	152295.0	157379.3	169801.6	169523.8
у тому числі на спеціально обладнані звалища (D5)	207445.1	31142.8	33871.0	24619.1	26305.6
Видалено іншими методами видалення (D2-D4, D6,D7), тис.т	24318.0	55248.1	39390.4	55360.1	57674.2
Знешкоджено (D8, D9), тис.т	...	2616.0	186.7	248.8	212.1
Розміщено на стихійних звалищах, тис.т	87.4	14.4	12.4	3.7	2.5
Експортовано, тис.т	281.3	675.4	415.6	261.8	190.8
Вилучено внаслідок витікання, випаровування, пожеж, крадіжок, тис.т	1367.6	6.5	19.8	19.5	6.7
Накопичено відходів протягом експлуатації у місцях видалення відходів на кінець року, млн т	13267.5	12505.9	12393.9	12442.2	12972.4
у розрахунку на 1 км ² території країни, т	21984.2	21692.8	21495.6	21579.3	22498.9
у розрахунку на одну особу, кг	289236	291888	289274	292857	306896

Таблиця 1.2 – Утворення відходів від економічної діяльності за групами небезпечних складників, тис. т

	2010	2015	2016	2017	2018
Усього	419191.8	306214.3	289523.6	360196.0	346790.4
Відходи, що містять метали та їхні сполуки	22942.2	10099.2	11464.5	11348.1	11493.7
у тому числі					

Продовження табл. 1.2

	2010	2015	2016	2017	2018
відходи, що містять залізо та його сполуки	11572.6	6185.3	6029.5	5723.1	6073.7
відходи, що містять нікель та його сполуки	685.0	942.8	1002.4	833.1	993.8
відходи, що містять ртуть та її сполуки (у тому числі люмінесцентні лампи)	1.2	1.0	0.8	1.5	13.4
відходи, що містять свинець та його сполуки (у т. ч. батареї акумуляторні цілі чи розламані)	25.9	19.7	17.9	13.7	17.0
відходи, що містять цинк та його сполуки	4.7	3.7	5.7	5.4	5.5
Відходи, що містять неметали та їхні сполуки	4772.2	4403.3	3159.7	2426.1	2774.4
у тому числі					
відходи, що містять кремній та його сполуки (за виключенням хлорсиланів і кремнійорганічних мономерів)	3160.4	1559.9	2845.9	2169.1	2359.6
відходи, що містять неорганічні сульфідні	524.0	621.9	0.1	0.0	0.0
Відходи, що містять карбоніли металів	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Відходи, що містять корозійні речовини	521.7	16.7	16.0	15.3	20.0
у тому числі					
відходи, що містять кислотні розчини чи кислоти у твердому стані, відпрацьовані кислоти	461.5	9.5	16.0	9.1	11.9
Відходи, що містять органічні аміни, інші органічні азотовмісні сполуки	293.8	66.6	55.2	34.6	37.3
Відходи виробництва та застосування органічної хімії чи такі, що містять органічні сполуки інші	528.5	102.4	44.5	58.7	45.8
Відходи, що містять стійкі органічні забруднювачі (СОЗ)	0.8	0.0	0.0	0.0	0.1
Відходи пестицидів і агрохімікатів, непридатні чи заборонені пестициди	0.7	10.4	10.9	10.2	1.4
Відходи, що містять озоноруйнівні речовини	–	24.9	2.8	0.0	5.1
Відходи медичного, ветеринарного чи сільськогосподарського походження, фармацевтичної продукції та від лікування людей чи тварин	8196.8	9366.2	9339.9	8890.0	8297.3

	2010	2015	2016	2017	2018
у тому числі					
відходи сільськогосподарського виробництва (за виключенням пестицидів та отрутохімікатів, які прийшли у непридатність або заборонені для використання)	8171.4	9336.8	9323.9	8873.4	8283.6
Відпрацьовані нафтопродукти, продукти нафтопереробки	339.7	89.9	70.4	81.3	72.4
у тому числі					
нафтовідходи та нафтошлами	246.1	19.1	19.9	26.5	20.8
відходи, що містять відпрацьовані мастильно-охолоджувальні рідини, масляно-водяні, вуглеводнево-водяні суміші та емульсії	49.7	35.3	35.0	38.0	35.5
Відходи гірничої промисловості і розроблення кар'єрів при добуванні та збагаченні руд і мінеральної сировини	345117.8	258806.9	239441.9	312709.6	300222.6
Відходи, що містять забруднений ґрунт, пісок, глину включно з відходами драгування	474.6	77.1	131.0	148.2	169.8
Відходи пилогазоочищувальних споруд та установок	4639.4	4727.4	4525.1	4071.5	3984.2
Відходи від очищення промислових та комунальних стічних вод	2915.9	2241.6	2849.3	2784.7	2834.9
Відходи, що містять тару з під хімічних речовин	4.8	2.3	2.5	2.8	3.6
Залишки від операцій по видаленню промислових відходів	292.6	151.6	181.1	84.6	129.2
Інші відходи	28150.3	16027.8	18228.8	17530.3	16698.6

Таблиця 1.3 – Утворення відходів за категоріями матеріалів, тис. т.

	2015	2016	2017	2018
Усього	312267.6	295870.1	366054.0	352333.9
Використані розчинники	31.6	1.1	1.0	1.2
Відходи кислот, лугів чи солей	384.9	278.6	213.1	375.4
Відпрацьовані оливи	15.5	14.0	17.1	14.6
Хімічні відходи	913.4	940.7	834.2	806.1
Осад промислових стоків	3209.9	3919.8	3648.7	3630.3
Шлами та рідкі відходи очисних споруд	249.8	838.3	971.7	793.9

Відходи від медичної допомоги та біологічні	0.9	0.7	0.6	0.7
---	-----	-----	-----	-----

Продовження табл. 1.3

	2015	2016	2017	2018
Відходи чорних металів	3396.7	3706.0	3556.0	3402.2
Відходи кольорових металів	30.1	23.5	28.3	40.6
Змішані відходи кольорових та чорних металів	9.6	10.4	7.4	34.1
Скляні відходи	22.3	25.8	34.3	41.9
Паперові та картонні відходи	111.0	184.5	183.5	146.4
Гумові відходи	22.9	20.3	26.4	21.9
Пластикові відходи	42.9	51.9	48.6	47.2
Деревні відходи	683.1	933.8	779.9	829.8
Текстильні відходи	8.0	18.8	20.8	15.9
Відходи, що містять поліхлордифеніли	0.5	0.1	0.2	0.2
Непридатне обладнання	14.4	10.8	15.9	9.7
Непридатні транспортні засоби	3.1	2.0	1.2	1.6
Відходи акумуляторів та батарей	7.2	4.0	4.1	3.8
Відходи тваринного походження та змішані харчові відходи	897.0	990.6	587.6	607.5
Відходи рослинного походження	7742.3	8606.0	8782.3	7829.3
Тваринні екскременти, сеча та гній	4938.0	4288.7	3653.4	3233.8
Побутові та подібні відходи	6789.2	6946.2	6183.2	6211.2
Змішані та недиференційовані матеріали	7380.9	9429.1	9699.0	9164.1
Залишки сортування	35.6	81.9	63.2	63.6
Звичайний осад	397.6	693.6	515.1	643.5
Мінеральні відходи будівництва та знесення об'єктів	897.5	822.5	974.1	1023.1
Інші мінеральні відходи	235700.2	225883.5	265602.0	273157.7
Відходи згоряння	13896.0	13829.9	14157.0	13553.5
Ґрунтові відходи	788.2	501.7	367.2	451.7
Пуста порода від днопоглиблюваних робіт	23125.1	12500.1	45028.0	26126.0
Затверділі, стабілізовані або засклянілі відходи; мінеральні відходи, що утворюються після переробки	522.2	311.2	48.9	51.4

1.3 Аналіз досліджень щодо стійкості полігонів твердих побутових відходів

Проблеми стану довкілля в Україні та світі набувають все більшої актуальності, зважаючи на підвищення рівня антропогенного впливу на об'єкти природи. Серйозною проблемою світового масштабу виступає збільшення обсягів накопичення відходів. Протягом останніх десятиліть швидкість утворення твердих побутових відходів (ТПВ) у світі постійно збільшувалася.

Кількість ТПВ щорічно зростає на 3-6%. У різних країнах на одного мешканця зазвичай припадає від 250 до 700 кг ТПВ на рік, а в окремих країнах – до 1000 кг на рік. Згідно даних [15] доля відходів, що розміщуються на полігонах в країнах світу становить: Південна Корея – 52%, Польща – 90%, Тайвань – 95%, США – 54,3%, Китай – 83%.

В останні роки в багатьох розвинених країнах приділяється велика увага проблемі зменшення або стабілізації кількості відходів. Йдеться про спільне обмеження утворення відходів, сортування, використання вторинних ресурсів та переробку. Однак зменшити кількість відходів поки не вдається.

Україна займає одне з перших місць в світі за кількістю сміття на одиницю населення. В країні вже близько 7% території знаходиться під твердими побутовими відходами, і щороку утворюється 52 млн тонн побутового сміття, обсяг якого зростає кожного року на 1,5-2,5%. Лише 5% відходів переробляють, інші 95% вивозять на звалища та полігони. В Україні діє близько 6 тис. звалищ та полігонів сміття загальною площею 7,4 тис. га, 32 тис. несанкціонованих звалищ та 15 сортувальних ліній. Дуже часто полігони перенавантажені (близько 5%) або не відповідають встановленим нормам екологічної безпеки (близько 16%).

Типова для України схема поводження з твердими побутовими відходами – нероздільний збір і захоронення веде до засмічення земель; безповоротної втрати ресурсів і прибутку, який могла б дати правильно налагоджена комплексна переробка відходів; збільшення міграції відходів у навколишнє середовище (в даний час кількість ТПВ, що надходить, перевершує можливості природних екосистем). Найбільші площі під полігони зайняті в Дніпропетровській області (140 га), Донецькій області (330 га), Одеській області (195 га), Запорізькій області (153 га) та Луганській області (129 га).

З точки зору елементного складу основу ТПВ складають компоненти, що містять вуглець (табл. 1.4). Саме вони формують екологічне навантаження при розміщенні ТПВ в навколишньому середовищі.

ТПВ представляють собою дуже різноманітну, гетерогенну суміш відходів, від різних галузей і сфер міського господарства. Маса відходів на звалищах присутня в трьох станах: твердому, рідкому і газоподібному. Тверда фаза включає в себе як відходи, так і ґрунти, якими покриваються шари. Рідка фаза складається з інфільтрату, дощової води, що проникає у відходи, і вологи, присутньої у відходах в момент розміщення. Основним джерелом газової фази на звалищах є гази, що утворюються при розкладанні органічних відходів. Біогаз в основному містить метан CH_4 (приблизно 50-60% за об'ємом) і діоксид вуглецю CO_2 (40-50%) [16].

Таблиця 1.4 – Елементний склад компонентів ТПВ для країн Європи

Компоненти ТПВ	Хімічна формула					Зольність	Вологість
	C	H	O	N	S		
Харчові відходи	320	508	188	14,9	1,0	0,05	0,7
Одноразовий паперовий посуд, журнальний папір	581	952	441	3,4	1,0	0,06	0,06
Упаковка, офісний папір	581	952	441	3,4	1,0	0,06	0,06
Газети, гофрований картон	581	952	441	3,4	1,0	0,06	0,06
Садово-паркові відходи	425	636	254	6,41	1,0	0,045	0,6
Тканина, текстиль	979	1396	417	70,2	1,0	0,025	0,1
Шкіра	400	635	58,1	57,2	1,0	0,1	0,1

Розподіл газоносної здібності по компонентах ТПВ зображено на рис.1.8.

Хоча швидкість захоронення відходів знизилася від 84 до 61% від загального обсягу відходів, що виникли за останнє десятиліття [17], захоронення відходів на полігонах досі вважається найбільш поширеною стратегією поводження з ТПВ, оскільки це часто є найбільш економічно ефективним способом утилізації відходів. Крім того, закриті звалища вважаються придатними ділянками для забудови для численних цілей, таких як поля для гольфу, спортивних майданчиків, заповідників, автостоянок, промислових парків, місць відпочинку тощо [18, 19, 20].

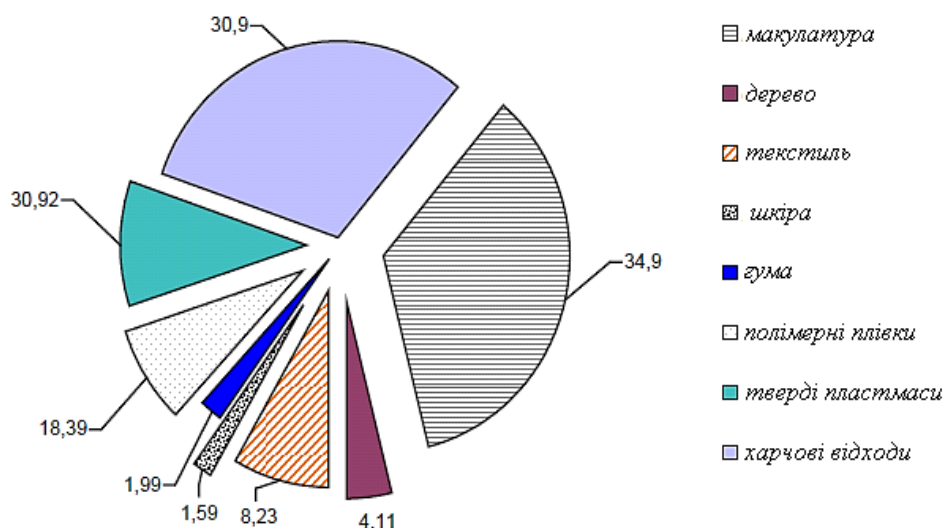


Рис. 1.8 Розподіл газозносної здібності по компонентах ТПВ

Навіть півстоліття тому закордоном, дослідники шукали способи використання полігонів після закриття для різних видів землекористування [21]. Хоча звалища побудовані так, що майбутнє використання не повинно бути обмежено, відбулося багато інцидентів, пов'язаних з неналежно спроектованими і побудованими полігонами [22, 23, 24]. Зокрема, в 1996 р. відбувся зсув звалища у штаті Мен (США), де вивільнилося майже 1,2 млн м³ відходів, [22], в м. Пайатас (Філіпіни), в результаті чого загинуло щонайменше 278 чоловік [25] (рис. 1.2, 1.3), а також зсуви на звалищах Рампке в США [26, 27, 28], Дона Хуана в Колумбії [29, 30], в Індонезії [31] є прикладами таких катастрофічних подій, які не тільки коштують мільйони доларів збитків, але і створюють величезні джерела забруднення навколишнього середовища [32].

28 травня 2016 року на території Грибовицького сміттєзвалища (м. Львів) почалася велика пожежа. Незабаром на сміттєзвалищі стався обвал ТПВ, внаслідок чого під завалами загинули троє рятувальників. 30 травня пожежу було ліквідовано, але 8 червня пожежа спалахнула знов, її намагались загасити за допомогою пожежних літаків.



Рис. 1.9 Аерозйомка руйнування звалища площею 12,7 га в м. Пайатас (Філіпіни) [25].



Рисунок 1.10 Маса відходів у зоні зсуву звалища в м. Пайатас (Філіпіни) [25].

Найбільш поширеними проблемами, пов'язаними з полігонами є оцінка стійкості насипу відходів і контроль газів, що утворюються в результаті розкладання органічної складової відходів.

Полігони являють собою дуже складні системи, в яких багато різних процесів протікає одночасно. Утворення звалищного газу, в результаті розкладання відходів, змінює тиск газу і рідин в тілі полігону. Ці зміни тисків рідин і газів впливають на пористість, загальне напруження, ступінь насиченості газів та рідин, що в свою чергу викликає деформації, тобто осідання. Ці

деформації можуть мати негативний вплив на цілісність будь-якої структури, що побудована на основі закритого звалища. Непередбачені осадки в кінцевому підсумку можуть призвести до ряду проблем, таких як утворення тріщин в покриваючому шарі, пошкодження цілісності покриваючих та підстилаючого шарів, пошкодження систем збору газу та рідин та дренажних систем. Тому більш точний прогноз осадки та стійкості звалищ стає ключовим питанням при проектуванні і будівництві полігонів [33].

Піонери в галузі механіки відходів А. Ландва і Дж. Кларк [34, 35] провели кілька дослідницьких проектів, щоб сформувавши міцну інженерну базу для аналізу стійкості звалища. Найбільший внесок в розвиток уявлень про фізико-механічну поведінку відходів на полігонах ТПВ зробили такі дослідники як Г. Джесбергер і Р. Кокель [36, 37], М. Габр і С. Валеро [38], М. Грізолія і К. Наполеоні [39, 40], Ф. Кьольш [41], Е. Кавазанян [42, 43], М. Маннасоро [44], К. Малер [45, 46], Н. Маззукато [47], М. Карвалью [48], С. Пелкі [49], С. Мачадо [50, 51, 52], Б. Кайседо [29, 30], Чу Сян-Ронг [53], О. Вілар і М. Карвалью [54], І. Тоугата [55], Д. Зеккос [27, 28], Н. Діксон і Д. Джонс [56], Дж. Нассіменто [57], К. Редді [58, 59, 60], М. Карімпур-фард [61] і Н. Шаріатмадарі [62]. Незважаючи на ці цінні внески, залишається ще ряд питань в механіці відходів, а саме оцінка стійкості полігонів з урахуванням ґрунтової основи, оскільки вона зазнає найбільшого впливу, яка досі не була розглянута.

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

Осадка ТПВ в основному пов'язана з фізичними та механічними процесами, які включають в себе переорієнтацію частинок, рух більш дрібних частинок в порожнечі, а також руйнування порожнеч; хімічними процесами, які включають в себе корозію, самозаймання і окислення; процесами розчинення, які складаються з розчинення речовин в рідинах, що просочуються, з подальшим формуванням інфільтрату; біологічним розкладанням органічних речовин з

плином часу в залежності від вологості і кількості органічних складових у відходах [63].

Слід відмітити, що найбільша осадка відбувається під час і відразу після розміщення відходів через фізичні і механічні процеси, які часто називають основною осадкою. Істотна додаткова осадка йде повільнішими темпами протягом тривалого періоду часу в зв'язку з хімічними і біологічними процесами (біорозкладання), які часто називають вторинною осадкою. Вторинна осадка пов'язана також з механічною повзучістю відходів. Надмірна осадка може викликати тріщини в системі покриття, а також може призвести до пошкодження систем збору газів, інфільтрату і систем дренажу [64, 65].

Осадка на звалищах, як правило, відбувається в три етапи [66, 67]. Перший етап – це миттєве стискання, яке відбувається під дією власної ваги та/або зовнішнього навантаження, прикладеного до відходів. Первинне стиснення, тобто другий етап - це компресія, пов'язана з розсіюванням води в порах і газу з порожнеч. Цей етап може бути завершений незабаром після розміщення відходів, тобто, протягом декількох місяців. Останній етап, вторинне стискання, як правило, викликається в результаті довгострокових ковзань, переорієнтації частинок і затримкою стискання деяких компонентів відходів. Цей етап може становити значну частину загальної осадки звалищ і відбувається протягом багатьох років. Загальна осадка визначається як сума осадок, викликаних первинним і вторинним стисканням.

Аналіз літературних джерел показав, що експериментальні методики оцінки стійкості звалища є витратними і ефективні тільки для конкретних умов. Зокрема, метод зворотного аналізу базується на врахуванні властивостей вже зруйнованих звалищ і не є задовільним для інших звалищ в зв'язку з відмінністю складу відходів, природних умов, властивостей тіла полігону і підстилаючого ґрунтового масиву. У свою чергу, за допомогою лабораторних аналізів не вдається відобразити умови полігону, в тому числі захопити в одному зразку всі шари відходів і врахувати їхні геотехнічні та фізико-механічні властивості. Тому для врахування напружено-деформованого стану шарів полігону і

підстилаючого ґрунтового масиву і його характеристик доцільно застосувати математичне моделювання.

Існуючі моделі, що описують осадку, можна розділити на: моделі, які базуються на механіці ґрунтів, емпіричні моделі, реологічні моделі та моделі, що враховують біорозкладання. Важливим питанням є розробка такої моделі яка включає в себе всі фактори, що впливають на осадку [63].

Однак, незважаючи на значний розвиток досліджень стійкості і осадки на полігонах твердих побутових відходів і велику кількість наукових робіт у даній галузі, чисельне моделювання з врахуванням типу і властивостей ґрунтів, що знаходяться під полігоном твердих побутових відходів не проводилося і модель, що враховує цей вплив відсутня. Тому виникає необхідність у дослідженні впливу підстилаючого шару ґрунту на стійкість і осадку полігону із застосуванням чисельного моделювання для подальшого будівництва на поверхні закритого полігону.

В даний час розроблено ряд методів, що дозволяють вивчати геомаханічні процеси на схилах кар'єрів і прогнозувати їх стійкість з урахуванням впливу природних і техногенних факторів.

1.4 Аналіз досліджень основних геотехнічних параметрів полігонів твердих побутових відходів

Ряд експериментів та досліджень було проведено для вивчення геотехнічних параметрів ТПВ на полігонах, зокрема такими вченими як А. Ландва, Х. Джессбергер, О. Вілар, Н. Діксон, Ш. Фенг, Т. Жан, Р. Кокель, С. Томас, С. Пелкі, Х. Ітох, С. Гомес, Дж. Каварзанян, К. Редді, В. Хьюстон та ін. [35, 36, 39, 42, 67-79]. Основними параметрами, на які звертали увагу дослідники, є зчеплення c і кут внутрішнього тертя φ . Вважається, що біорозкладання органічних складових у відходах може призвести до змін у розмірах частинок і складу ТПВ, властивостей зміщення на зсув, вміст вологи. Однак, величини міцності на зсув широко варіюються у літературі (зчеплення – від 0,7 до 71 кПа, кут внутрішнього тертя – від 10 до 53°). А. Зендер та ін. вважали, що на

швидкість осадки звалища в першу чергу впливають склад відходів та фактори, що впливають на біорозкладання [80].

Дослідження впливу повзучості осадки на загальну осадку і стійкість звалища проведено в роботах Т. Тану, Рао, Елагруді, М. Габра, К. Барейтера та ін. [81-91].

Додатковим фактором в процесі осідання полігону є зміна співвідношення осадки повзучості в загальній осадці через органічне розкладання. В роботах Д. Кодуто і Р. Хутріч [92] вказується, що осадка, яка викликана вторинною компресією, може бути збільшена за рахунок осадки повзучості, викликані біодеградацією. В. Памп [93], М. Сваті і К. Джозеф [94] встановили, що вторинна осадка, викликана природною біодеградацією, досягає 40-49% від загального обсягу осадки при рециркуляції фільтрату.

В роботі Ж. Янру [95] за допомогою методу великих прямих випробувань на зсув проведено вивчення міцності на зсув свіжих та захоронених твердих побутових відходів. Встановлено, що для свіжих зразків зчеплення збільшилося від 0 кПа до 19,89 кПа, а кут внутрішнього тертя зменшився з $27,84^\circ$ до $14,41^\circ$, в той час як біодеградація збільшилася з 0 до 63,83%. В тому ж дослідженні при тривісних випробуваннях в сухих умовах консолідації міцність на зсув, зчеплення і кут внутрішнього тертя зразків відходів безперервно зростають: осьова деформація - від 5% до 20%, а зчеплення - від 35,90 кПа до 66,42 кПа. Діапазон органічного вмісту і температури, при яких краще проходить біодеградація, варіювалися від 21,9% до 36,47% та 22° до 41° , відповідно.

Через один місяць результати випробувань для подрібненого свіжого зразка показують, що зчеплення змінювалося від 4,9 до 18,58 кПа, і кут внутрішнього тертя знаходиться в діапазоні від 14,12 до 24,44.

В зв'язку з необхідністю оцінки міцності на зсув ТПВ в статичному і сейсмічному аналізі стійкості схилів, найчастіше використовується підхід Кулона- Мора [96, 97].

Вплив зсуву та осьової деформації на міцність та зсув ТПВ вивчався експериментально за допомогою випробування на зсув такими вченими як

М. Грізоля, М. Габр, Р. Джонс, Н. Діксон, А. Буцца і М. Войнарович та ін. [98-101]. Огляд існуючих лабораторних даних показує, що більшість лабораторних тестів на зсув не продовжуються до достатнього переміщення або деформації, щоб мобілізувати пік опору ТПВ. Замість цього тест на зсув припиняється до мобілізації піку опору зсуву. На рисунку 1.11 показано типовий зв'язок зсуву і зміщення, викликаного напруженням від прямих випробувань ТПВ на зсув.

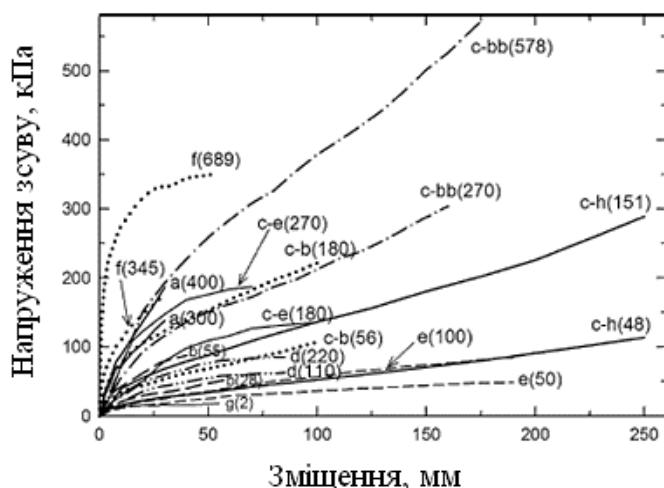


Рис. 1.11 Залежність зміщення від напруження побудована в результаті прямого тесту на зсув ТПВ [96]

Випробування були припинені при різних зсувних зміщеннях з максимальним зсувним зміщенням близько 250 мм.

В роботі М. Грізоля [39] було проведено тривісні випробування на стиск в ізотропно консолюдованих умовах. Дані тривісного стиснення (рис. 1.12) ТПВ показують безперервне зростання девіаторних напруг разом з осьовою деформацією, при цьому чітко визначеного пікового значення не досягається [102].

При дослідженні дренажних ізотропно консолюдованих тривісних випробуваннях на стиск зразків (200 мм в діаметрі і 400 мм у висоту) О. Вілар і М. Карвалью [54] встановили, що напружено-деформоване відношення є увігнутими вгору. Їх дані тривісних випробувань свідчать про те, що фрикційний опір ТПВ, як правило, повністю мобілізовано при осьових деформаціях, що

менші або дорівнюють 20%. Це може бути корисно для сейсмічних досліджень, які прогнозують велику кількість землетрусів, викликаних залишковою деформацією, тому що зчеплення значно впливає на обчислений коефіцієнт безпеки і прискорення виходу [103].

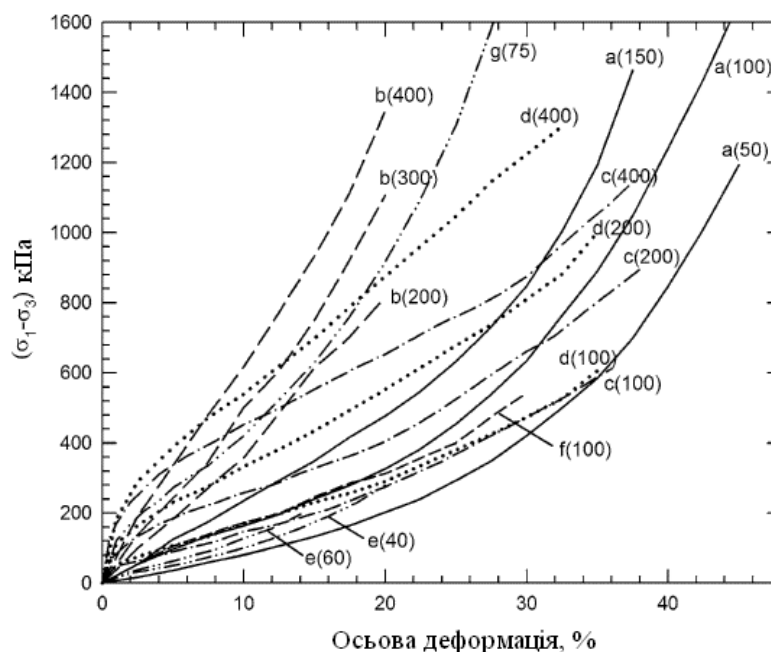


Рис. 1.12 Залежність девіатора напруг від осьової деформації побудована в результаті тривісного тесту на зсув ТПВ [82]

Дж. Гарріс та ін. [104] рекомендують, щоб критерій Мора-Кулона був пов'язаний з деякою величиною осьової деформації. Р. Айзенберг [105] підкреслює, що міцність на зсув відходів і щільність є функцією від конкретного складу відходів та оперативних методів, таких як тип відходів, склад, ущільнення, щоденне покриття, умови вологості, віку, тиску верхніх шарів і т.д. Айзенберг [105] повідомляє, що пікові параметри міцності на зсув змінюються від $\phi' = 20-35^\circ$ і $c' = 0-50$ кПа. Ці параметри міцності на зсув узгоджуються зі значеннями, запропонованими в [8], де $\phi' = 35^\circ$ і $c' = 0-25$ кПа. В. Міланов та ін. [106] повідомляють, що найбільш ймовірні або обґрунтовані параметри міцності на зсув ТПВ становлять $c' = 1-2$ кПа та $\phi' = 35-40^\circ$.

Збільшення попиту на вертикальне розширення існуючих звалищ і інтерес до мега-полігонів, створили потребу для характеристики міцності на зсув ТПВ

при високих нормальних напруженнях. Нелінійність міцності може бути оцінена з точки зору мобілізованого кута внутрішнього тертя [107], величина якого зменшується зі збільшенням нормального напруження. Це вказує на важливість залежної від напруження природи міцності на зсув ТПВ. О. Дель Греко і К. Оггері [108] також припускали, що міцність на зсув ТПВ залежить від напружень для нормальних напружень до 110 кПа і рекомендували залежний від напруги кут внутрішнього тертя ще в 1994 році. Існує мало даних при нормальних напруженнях більших, за 500 кПа. Нормальне напруження від 500 кПа відповідає глибині відходів в 40 м на основі типової питомої маси відходів $12,6 \text{ кН/м}^3$. Глибина відходів 40 м значно менше, ніж глибина 180 м, яка в даний час пропонується. Таким чином, було б розумно сконцентруватися на нормальних напруженнях, що перевищують 500 кПа. Одним з важливих аспектів є нормальне напруження в діапазоні до 1800 кПа, що відповідає висоті відходів близько 145 м на основі питомої ваги відходів $12,6 \text{ кН/м}^3$.

Ця висота наближається до висоти, пропонованої в даний час для звалища з висотою 180 м. Існує тенденція до нелінійного збільшення опору зсуву зі збільшенням нормального напруження для нормальних напружень менших за 1000 кПа.

С. Мачадо зазначив [52], що важливо враховувати вплив на осадку спільну дію напруженості, біодеградації і температури для прогнозування загальної осадки відходів. В. Хаандель [109] прийняв в якості розрахункового параметру утворення інфільтрату для оцінки ступеню біодеградації. Дж. Ріго і Д. Казуффі [110] прийшли до висновку, що висока температура може прискорити біологічний розпад органічних речовин у відходах і цим прискорити осадку.

Для прогнозування геотехнічних параметрів та стійкості полігонів часто проводиться аналіз параметрів зруйнованих звалищ.

У [22] проаналізовано чотири руйнування схилів звалища для оцінки мобілізованої міцності ТПВ. Зворотній аналіз звалищ у Варшаві (Польща), Стамбулі (Туреччина), Пайатасі (Філіппіни) і Гірія (Ізраїль) розглядається Хувай-Саріханом і Старком [111]. Руйнування схилів звалищ Круз-даш-Альмас

(Бразилія) і Леувігая (Індонезія) були проаналізовані в рамках дослідження [96]. Дані, отримані зі зворотного аналізу зруйнованих звалищ наведені в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Дані, щодо міцності на зсув, отриманої зі зворотного аналізу зруйнованих звалищ [96]

Назва або місце розташування звалища	Максимальна висота звалища, м	Середня ефективна напруга вздовж поверхні руйнування відходів, кПа	Зворотно-розрахована міцність на зсув, кПа
звалище в Нью-Джерсі	23	62	46
звалище в Мейні	27	34	35
звалище в Цинциннаті	84	90	103
звалище в східному Огайо	24,5	35	29
звалище у Варшаві (Польща)	26	106	40
звалище Дона Хуана (Колумбія)	60	55	34
звалище у Пайатас (Філіпіни)	33	95	69,5
звалище у Гірія (Ізраїль)	60	32	46
Звалище в Істанбулі (Туреччина)	45	65	72,5
звалище Круз дас Альмас (Бразилія)	40	28,9	20,3
звалище Леувігайя (Індонезія)	70	31,2	86

Одне з цих руйнувань схилу відбулося на полігоні Гнойная Грора, у Варшаві (Польща) [111]. Питома вага відходів становила 17 кН/м^3 (оскільки відходи змішуються зі знесеним сміттям) і природна вологість відходів становить 28-80%. Рівень ґрунтових вод / фільтрату на 3-5 м нижче поверхні землі. Геосинтетичні системи підкладки не були встановлені до розміщення відходів і, таким чином, відходи знаходились в контакті з природними матеріалами і ґрунтовими водами.

Отже, рівень ґрунтових вод відповідає рівню фільтрату. Схил не відчував великого ковзання, але із початком ковзання в будівлях у верхній частині полігону утворилися тріщини напруження. Деякі з спостережуваних будівельних тріщин швидше за все можуть бути викликані осадкою відходів, а не рухом схилу, але тріщини напруження спостерігалися при виникненні нестійкості. Оскільки схил відчув обширний рух, коефіцієнт безпеки передбачався близько одиниці для зворотного аналізу.

Для зворотного обчислення ефективного куту внутрішнього тертя ТПВ, передбачається встановлювати $c' = 0$ кПа. Зворотно розрахований $\phi' = 21^\circ$. Зворотно розрахований кут внутрішнього тертя розумно встановлювати враховуючи вік відходів. Полігон оцінюється віком 300 років [98]. Таким чином, очікується, що зворотно розраховане значення міцності на зсув ТПВ, буде порівняне з міцністю на зсув зчепленого ґрунту. Середня нормальна напружка на спостережуваній поверхні руйнування через відходи становить 106 кПа.

Ще одне звалище, що розташоване в Стамбулі (Туреччина) було проаналізовано у [96]. Звалище знаходиться в експлуатації з 1976 року. Склад відходів після видалення матеріалів сміттярами, що підлягають переробці, за оцінками, близько 70% харчових відходів / органічних, 10% паперу, 6% текстилю, 3% пластмаси, 3% металів [112]. Максимальна висота схилу ТПВ становила близько 45 м, з крутим кутом нахилу до 45° або навіть більше. ТПВ були розміщені без жодної підстилаючої системи. Відходи не ущільнювалися і не покриваються ґрунтом. Катастрофічний провал схилу відбувся в 1993 році і включив до 1 млн m^3 відходів. Проливні дощі і надмірний рівень інфільтрату, що утворився при розкладанні старих відходів, швидше за все стали спусковим механізмом, разом з недавно розміщеними відходами на верхній частині відходів [98].

Передбачається, що питома вага ТПВ $11 \text{ кН}/m^3$, тому що ніякої додаткової інформації немає. Середні нормальне і зсувне напруження на досліджуваній поверхні руйнування через відходи є 65 і 72,5 кПа відповідно.

Звалище Гірія знаходиться в Тель-Авіві (Ізраїль), і знаходилося в експлуатації з 1952 по 1998 [105]. Полігон досягає у висоту 60 м над оточуючим рівнем поверхні, з ухилом 45° або більше. Полігон не має ні інженерного нижнього шару підкладки, ні остаточного покриття, систем контролю фільтрату і газу. Бічні схили полігону Гірія знаходяться в діапазоні з 1,3Н: 1 V до 1,6Н: 1 V. В результаті крутих схилів, відсутності управління дренажу та ерозії, звалище відчуває малі і великі проблеми нестабільності. У 1997 відбулося головне руйнування схилу після періоду сильних дощів. Знімки, зроблені після провалу і

перетину секцій, які використовувалися при аналізі стійкості схилів наведені у [111]. Середні нормальне і зсувне напруження на досліджуваній поверхні руйнування через відходи є 32 і 46 кПа відповідно. Питома вага ТПВ є важливим параметром в інженерному аналізі роботи полігону, але значна невизначеність в даний час існує відносно її величини.

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

1.5 Аналіз методик оцінки стійкості полігонів твердих побутових відходів

Багатьма дослідниками було запропоновано моделі для прогнозування осадки ТПВ з урахуванням різних умов звалища. Багато з цих моделей засновано на механіці ґрунтів, консолідації і процесах вторинного стиснення, емпіричних рівняннях тощо. Важливість моделювання осадки, заснована на механічній поведінці ТПВ під навантаженням, була визнана останнім часом і робляться зусилля для розробки загальних моделей, щоб описати поведінку ТПВ в напруженому стані з плином часу.

Деформування твердих побутових відходів являє собою складний процес, що зумовлено самою природою ТПВ. Хоча властивості твердих побутових відходів відрізняються від властивостей традиційних ґрунтів, встановлено, що

масив ТПВ може бути змодельований слабким ґрунтом [113, 114], що масив ТПВ може бути змодельований подібно слабкому ґрунту. Соуерс та Еділ були першими, хто застосував принципи звичайної механіки ґрунтів для оцінки осадки внаслідок первинного стиснення [66, 68].

Найбільш розповсюдженою моделлю, що базується на механіці ґрунтів є модель слабого ґрунту з врахуванням повзучості Soft Soil Creep (SSC) [115].

Основними параметрами моделі є: модифікований коефіцієнт набухання – κ^* , модифікований коефіцієнт компресії (стискання) – λ^* , модифікований коефіцієнт повзучості – μ^* . Ці параметри можна визначити з одометричного тесту та з тесту ізотропної компресії. Параметр μ^* можна визначити вимірявши об'ємну деформацію за довгим проміжком часу побудувавши залежність від логарифму часу (рис. 1.13).

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

$$\lambda^* = \frac{\lambda}{1+e_0}; \kappa^* = \frac{\kappa}{1+e_0}. \quad (1.1)$$

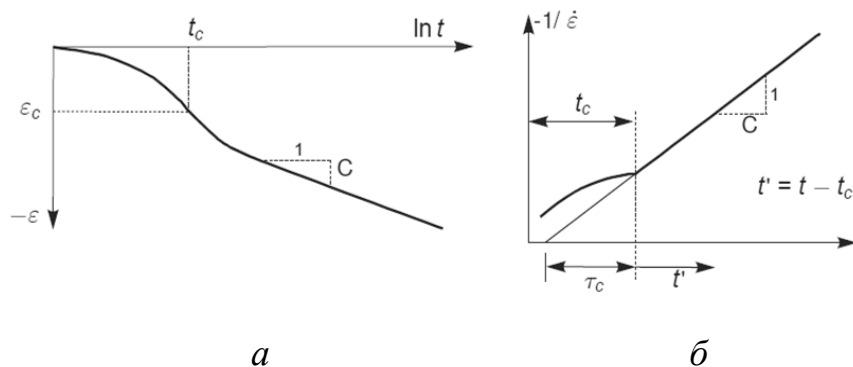


Рис. 1.13 Стандартний одометричний тест:

a – деформація повзучості, *б* – обернена величина деформації повзучості.

Відношення параметрів моделі до міжнародно-нормованих параметрів становлять:

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2,3(1+e_0)}; \lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1+e_0)}; \kappa^* = \frac{2C_s}{2,3(1+e_0)}, \quad (1.2)$$

де C_c – коефіцієнт компресії; C_s – коефіцієнт набухання; C_α – коефіцієнт повзучості.

Модель Cam-Clay розроблена вченими з Кембріджу для моделювання ґрунтів. Згідно цієї моделі в рамках критичної механіки ґрунтів, стан зразка ґрунту характеризується трьома параметрами: ефективною напругою p , девіаторною напругою зсуву q та питомим об'ємом v . Модель підсумовує, що коли зразок ґрунту повільно стискається під дією умов ізотропної напруги та в ідеально сухих умовах, відношення між v та $\ln p$ представляє собою пряму лінію початкової консолідації та декілька ліній зростання, які також називаються лініями розвантаження-навантаження (рис. 1.14).

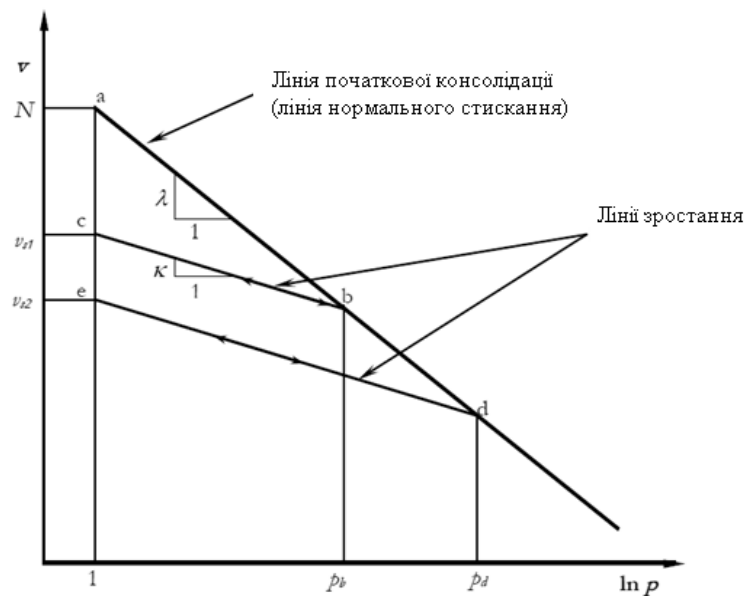


Рис. 1.14 Поведінка зразка ґрунту під ізотропним стисканням

Лінія початкової консолідації описується рівнянням:

$$v = N - \lambda \ln p', \quad (1.3)$$

а рівняння лінії зростання має вигляд:

$$v = v_s - \kappa \ln p', \quad (1.4)$$

де κ – коефіцієнт набухання; λ – коефіцієнт компресії (стискання); N – величина нормального стискання в одиницях тиску.

Г. Соуерс був найпершим, хто розробив модель прогнозування осадки відходів, базуючись на механіці ґрунтів, враховуючи стиснення [66]. Довгострокове стиснення, пов'язане з повзучістю і явищем біодеградації виражене у вигляді коефіцієнту вторинного стиснення C_α , в якому зменшення коефіцієнта пористості у вторинному стисненні пов'язано з часом, що пройшов між початковим часом t_1 і кінцевим часом t_2 . Модель може бути виражена у вигляді:

$$\Delta H = HC_c^* \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) + HC_\alpha \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right), \quad (1.5)$$

де ΔH – осадка, викликана первинною та вторинною консолідацією; H – початкова товщина шару відходів; C_c^* – коефіцієнт первинного стискання; σ_0 – діючий тиск навантажування, що діє на середину шару; $\Delta\sigma$ – приріст дії тиску навантаження, що діє на середину шару, в зв'язку зі спорудженням додаткового шару; C_α – коефіцієнт вторинного стиснення; t_1 – час закінчення початкового стиснення; t_2 – бажаний термін закінчення осадки, протягом якого здійснюється довгострокова осадка шару. Встановлено, що значення коефіцієнтів стиснення C_c^* і C_α для ТПВ знаходиться в діапазоні від 0,163 до 0,205 і 0,015 до 0,350, відповідно.

А. Бьярнгард і Л. Еджерс [116] підрозділяють вторинне стиснення на дві підфази, за допомогою коректування двох прямих, і вводять проміжний коефіцієнт вторинної компресії $C_{\alpha 1}$ і остаточний коефіцієнт вторинної компресії $C_{\alpha 2}$. Запропонована модель може бути виражена у вигляді:

$$\Delta H = HC_c^* \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) + HC_{\alpha 1} \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) + HC_{\alpha 2} \log\left(\frac{t_2}{t_2}\right), \quad (1.6)$$

де ΔH – осадка, викликана первинною та вторинною консолідацією; H – початкова товщина шару відходів; C_c^* – коефіцієнт первинного стискання; σ_0 – діючий тиск навантажування, що діє на середину шару; $\Delta\sigma$ – приріст дії тиску навантаження, що діє на середину шару, в зв'язку зі спорудженням додаткового шару; C_{a1} – середня величина вторинного стиснення; C_{a2} – довгострокова / остаточно величина вторинного стиснення; t_1 – тривалість початкового стиснення; t_2 – час для середнього вторинного стиснення; і t_3 – весь періоду часу, розглянутий в моделюванні. Типові значення величин параметрів: $C_c^* = 0,205$, $C_{a1} = 0,035$; $C_{a2} = 0,215$; t_1 = від 1 до 25 днів; і $t_2 = 200$ днів.

С. Хоссейн і М. Габр [83] розробили модель довгострокової осадки, що складається з трьох складових, як зазначено в рівнянні:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = C_{ai} \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) + C_{\beta} \log\left(\frac{t_3}{t_2}\right) + C_{af} \log\left(\frac{t_4}{t_3}\right), \quad (1.7)$$

де C_{ai} – коефіцієнт стиснення, який є функцією напруження і ступеня біорозкладання ($\sim 0,03$); t_1 - тривалість початкового стиснення; ($\sim 10-15$ днів); t_2 – час, для якого оцінюється стискання (\sim від 100 до 2000 днів); C_{β} – коефіцієнт, що враховує біодеградацію ($\sim 0,19$); t_3 – тривалість для біологічного стиснення (~ 3500 днів); C_{af} – коефіцієнт, що враховує повзучість; t_4 – тривалість повзучості в кінці біологічної деградації.

Механічне стиснення під дією прикладеної напруги та / або тиску власної ваги не були враховані. В зв'язку з біологічним розкладанням, органічна тверда маса перетворюється на газ і коефіцієнт пористості зростає з подальшим збільшенням осадки відходів. Модель була розроблена на результатах експериментальної програми.

Ступінь розкладу характеризується величиною газової генерації і вмісту целюлози та геміцелюлози у співвідношенні до лігніну. Фактори часу, t_1 , t_2 , t_3 , і t_4 для визначення величини стискання були визначені з кривої видобутку газу і використовуватися для розробки моделей.

Емпіричні моделі намагаються імітувати загальну поведінку відходів шляхом коригування емпіричних параметрів, для конкретної ділянки. В основному використовуються наступні математичні функції: логарифмічна функція, ступенева функція повзучості і гіперболічна функція. Осадку у вигляді логарифмічної функції відобразили Б. Ієн і Б. Скенлон [117]:

$$\Delta H = H_f \left[\alpha + \beta \log \left(t - \frac{t_c}{2} \right) \right], \quad (1.8)$$

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

Модель ступеневої функції повзучості представляє собою просте співвідношення залежної від часу деформації під дією постійної напруги і розроблена Т. Еділь та ін. [68]:

$$\Delta H = H_0 \Delta \sigma M' \left(\frac{t}{t_r} \right)^{N'}, \quad (1.9)$$

де ΔH – осадка; H_0 – початкова висота відходів; $\Delta \sigma$ – стискаюча напруга, що залежить від висоти відходів, щільності і зовнішнього навантаження; M' – опорна стисливість ($= 1,6 \cdot 10^{-5}$ до $5,8 \cdot 10^{-5}$ кПа); N' - ступінь стиснення ($= 0,50$ - $0,67$); t – час з початку навантаження; t_r – відносний час, що зазвичай вводиться, щоб зробити час безрозмірною величиною, звичайно приймається рівним одному дню [118]. Параметр M' залежить від конкретних умов на полігоні і N' – величина стиснення, яка варіюється в залежності від віку та умов розміщення відходів. Тим не менш, мінливість N' менше, ніж M' [68].

Х. Лінг та ін. [119] запропонував наступне гіперболічне рівняння для розрахунку осадки в даний момент часу, якщо попередня осадка полігону відома:

$$\Delta H = \frac{t}{\left(\frac{1}{\rho_0} \right) + \left(\frac{t}{S_{ult}} \right)}, \quad (1.10)$$

де ΔH – осадка; ρ_0 – початкова швидкість осадки (0,001 м/добу); S_{ult} – остаточна осадка; t – час, що минув з заповнення звалища.

Д. Кумулос і Т. Корялос [120] запропонували рівняння загасання, яке засноване на припущенні, що осадка звалища може бути приблизно описана прямою лінією, як функція логарифму часу. Основною перевагою даної моделі є те, що дані з різних точок на звалищі з різними характеристиками можуть бути згруповані та в порівнянні. Модель може бути виражена як:

$$Y = \frac{d\left(\frac{\Delta H}{H}\right)}{dt} = \frac{0,434C'_\alpha}{t_{c^*} + \frac{t}{2}}, \quad (1.11)$$

де Y – вертикальна швидкість деформації (виражена у відсотках на місяць або у відсотках на рік); C'_α – коефіцієнт вторинної компресії (0,02-0,25); t – час, що минув, місяць або рік; t_{c^*} – час наповнення, зазвичай приймається, як один місяць. Слід, однак, відзначити, що точність Y залежить від точності C'_α .

Р. Гібсон і К. Ло [121] запропонували модель, яка застосовується до торф'яних (слабких) ґрунтів. Ця модель використовується у [68] для прогнозування довгострокової повної осадки ТПВ. Модель використовує аналогію, який представляє основне і вторинне стискання, в якому стиск пружини виражає негайну компресію і поєднання поршня і пружини виражає повільну деформацію. Модель може бути виражена як:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \Delta\sigma a + \Delta\sigma b(1 - e^{-(\lambda/b)t}), \quad (1.12)$$

де ΔH – осадка; H_0 – початкова висота відходів; $\Delta\sigma$ – стискаюча напружка, що залежить від висоти відходів, щільності і зовнішнього навантаження; a – параметр первинного стискання ($1,0 \cdot 10^{-4}$ - $8,0 \cdot 10^{-5}$ кПа); b – параметр вторинного

стискання ($2,0 \cdot 10^{-3}$ - $1,6 \cdot 10^{-2}$ кПа); λ/b – швидкість вторинної компресії ($1,4 \cdot 10^{-4}$ - $9,0 \cdot 10^{-4}$ /добу); t – час, що минув з початку завантаження [118].

Г. Парк і С. Лі [122] запропонували модель осадки, яка враховує залежну від часу біодеградацію відходів. Передбачається, що швидкість осадки виражається через множину осідань, прямо пропорційну кількості твердих речовин, що розкладаються. Розчинення органічних матеріалів, як правило, виражається з використанням рівняння кінетики першого порядку. Проте, визначення кінетичних коефіцієнтів або констант гідролізу, а також їх зміна в умовах навколишнього середовища є дуже важким. Модель осідання може бути виражена як:

$$\begin{aligned}\varepsilon(t)_{mec} &= C_\alpha \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right); \\ \varepsilon(t)_{dec} &= \varepsilon_{tot_dec}(1 - e^{-k_1 t}),\end{aligned}\quad (1.13)$$

де C_α – величина вторинної компресії; k – константа швидкості розкладання першого порядку у відношенні до часу (2,37-1,35 / рік); ε_{tot_dec} – загальний обсяг стиснення, який виникає внаслідок розкладання органічних відходів (7,2-6,1%). Сума двох умов дає загальну деформацію стиску.

К. Хеттіарачі та ін. [86] також розробили модель осадки, що передбачає, що осадка за рахунок біодеградації відбувається за реакцією кінетики першого порядку. Загальна осадка виражається у вигляді комбінованого процесу механічного стиснення або $(\Delta H)_m$ і осадки, викликані біодеградацією або $(\Delta H)_b$. Модель має вигляд:

$$\begin{aligned}(\Delta H)_b &= H_i \left[\frac{M_{si}}{\rho_w} \sum_{j=1}^4 \frac{f_{sj}}{G_{sj}} (1 - \exp^{-\lambda_j t}) \right]; \\ (\Delta H)_m &= H_i C^* \log\left(\frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'}\right); \\ H_f &= H_i - (\Delta H)_b - (\Delta H)_m,\end{aligned}\quad (1.14)$$

де C^* – параметр стисливості (0,174-0,205); σ' – ефективна напруга; $\Delta\sigma'$ – різниця ефективних напруг; f_{sj} – початкова тверда фракція для кожної групи відходів (0,15-0,35); ρ_w – щільність води; G_{sj} – питома вага j -ої групи твердих відходів (1-3); λ_j – константа швидкості першого порядку для j -ої групи (0-0,001 / день).

А. Маркес [87] розробив складову реологічну модель для врахування первинних і вторинних механізмів стиснення, які керуються реологічними параметрами, які також враховуються при деградації відходів. Первинна компресія називається «миттєвою компресією», яка не залежить від часу. Це засновано на спостереженні, що відповідний процес є лінійним для кривих, коефіцієнт пористості яких є функцією логарифма прикладеної напруги. Модель представлена формулою:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = C'_c \log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right) + \Delta\sigma b \left(1 - e^{-ct'} + E_{dg}(1 - e^{-dt''})\right), \quad (1.15)$$

де ΔH – осадка; H – початкова висота відходів; C'_c – первинне стиснення; b – коефіцієнт вторинного механічного стиснення; c – величина вторинного механічного стиснення; E_{dg} – загальна стиснення, викликане деградацією відходів; d – коефіцієнт вторинного біологічного стиснення; t' – час, що минув з моменту завантаження; t'' – час, що минув з моменту розміщення відходів.

А. Маркес та ін. [88] здійснили подальший розвиток композитної моделі стисливості, яка включає три механізми одновимірного стиснення ТПВ: миттєву реакцію на навантаження, механічну повзучість і біологічне розкладання. Для реалізації композитної моделі, розміщення відходів ідеалізується як серія підвищень. Товщина підвищень може вважатися рівною товщині щоденних відсіків. Після того як всі шари були розміщені, можна визначити осадку ΔH поверхні полігону в будь-який час t . Загальна деформації визначається за допомогою формули:

$$\varepsilon = \varepsilon_p + \varepsilon_c + \varepsilon_b. \quad (1.16)$$

Три члени ε_p , ε_c , ε_b відображають деформацію, що відбувається в результаті миттєвої реакції на прикладене навантаження, деформацію, що залежить від часу в результаті механічної повзучості і деформацію, що залежить від часу, викликану біологічним розкладанням. Повна осадка тоді має вигляд:

$$\Delta H = \sum_{i=1}^N H_i [\varepsilon_{pi} + \varepsilon_{ci}(t) + \varepsilon_{bi}(t)], \quad (1.17)$$

де N – кількість підвищень на звалищі; H_i – вихідна товщина ущільненого шару i ; ε_{pi} – деформація в шарі i , в результаті миттєвої реакції на навантаження від верхніх шарів; ε_{ci} – деформація в момент часу t , в шарі i в результаті механічної повзучості, пов'язаного з напругою від власної ваги і ваги верхніх шарів; ε_{bi} – напруга в момент часу t в шарі i в зв'язку з біологічним розкладанням шару i . Деформації задаються у вигляді:

$$\varepsilon_{pi} = C'_c \log \left(\frac{\left(\frac{1}{2}\right) \gamma_i H_i + \sum_{j=i+1}^N \Delta \sigma_{ij}}{(1/2) \gamma_i H_i} \right), \quad (1.18)$$

$$\varepsilon_{ci}(t) = b \left[\frac{1}{2} \gamma_i H_i (1 - e^{-c(t-t_i)}) + \sum_{j=i+1}^N \Delta \sigma_{ij} (1 - e^{-c(t-t_j)}) \right], \quad (1.19)$$

$$\varepsilon_{bi}(t) = E_{DG} (1 - e^{-d(t-t_i)}), \quad (1.20)$$

де γ_i – питома вага шару i , значення, що представляє собою середню вагу розміщених відходів та щоденне покриття шару i . Оскільки t – час після того як всі шари полігону були розміщені, $t-t_i > 0$ і $t-t_j > 0$ для всіх значень i і j ; $\Delta \sigma$ – зміна вертикальних напружень, спричинених шаром j ($j = i + 1$) на шар i для $j > i$; t_i і t_j – час, за який шари i і j , відповідно, були розміщені. Теорія Буссінеска використовується для визначення змін у вертикальних напругах. C'_c – ступінь стиснення (0,0732 до 0,320); E_{DG} – загальна величина деформації, яка виникає в зв'язку з біологічним розкладанням (0,131 до 0,214); d – постійна швидкості

біологічного розкладання ($6,77 \cdot 10^{-4} - 2,57 \cdot 10^{-3}$ /день); b – коефіцієнт механічної повзучості ($2,92 \cdot 10^{-4} - 7,26 \cdot 10^{-4}$ м²/кН); c – константа швидкості механічної повзучості ($9,69 \cdot 10^{-4} - 2,55 \cdot 10^{-3}$ / день). Залежно від кількості інформації, доступної для конкретного полігона значення параметрів можна регулювати, щоб вони відповідали наявним даним.

І. Овейс [123] розробив модель, яка прогнозує осадку від механічних процесів і біорозкладання. Прогнозування здійснюється в наступних умовах: 1) механічна осадка в зв'язку з тиском відходів з наступних шарів; 2) механічна осадка в зв'язку з повзучістю при постійному ефективному напруженні; 3) осадка при розкладанні у зв'язку зі втратою маси або перетворенням органічної складової відходів у газ.

К. Лю та ін. [124] була розроблена модель, яка враховує утворення газу при біорозкладанні. Тиск газу в межах звалища, підвищується за рахунок накопичення газу при розкладанні відходів. Потік газу, який індукується при зростанні тиску газу, розраховується на основі концепції сталого потоку газу в ненасиченому середовищі. Осадку на звалищі виражається як сума розкладеної твердої органіки і частки газу, що утворилася. Величина осадки оцінюється шляхом прийняття установчих відносин між напругою та об'ємом ненасиченого ґрунту.

Сівакумар Бабу Г. Л. та ін. [63] запропонували конститутивну (узагальнюючу) модель, що спирається на наступні припущення: модель базується на еластопластичній поведінці у механіці ґрунтів в критичному стані з асоційованим потоком; вторинна компресія керується залежною від часу експоненційною функцією; біологічне розкладання пов'язане з часом і входить в загальну деформацію.

Р. Циммерман [125] запропонував реологічну модель, яка описує осадку міських відходів, базуючись на концепції мікропор. Модель складається з двох часткових диференціальних рівнянь, одне з яких нелінійне. Рівняння описують вплив кінцевих деформацій, біологічного і хімічного розпаду та величину повзучості.

С. Рао [126] презентував рівняння, за допомогою якого можна визначити осадку будь-якого шару відходів в процесі навантаження. Рівняння включає концепцію відносної висоти в узагальнюючій моделі Терцагі.

Дойчем [127] на основі польових даних осадки було проаналізовано рівняння первинної консолідації та множинна регресійна лінійна модель. Згідно цієї моделі, осадка відходів є лінійною функцією товщини відходів та застосованого способу навантаження. Регресійні коефіцієнти визначались використовуючи метод найменших квадратів. Довгострокове прогнозування проведено не було.

Б. Танг [128] використовував класичну теорію для прогнозування осадки на звалищі та оцінив оптимальний кут для проектування для покриваючої системи звалища. Непевності в умовах на поверхні були мінімізовані за допомогою метода спостереження та ймовірнісного метода.

М. Заміскі [129] оцінював умови в покритті полігону для оптимізації осадки та вартості. Одновимірна консолідаційна теорія використовувалася для моделювання осадки. Отримані дані в цілому узгоджувалися з результатами короткострокового вимірювання тиску.

Д. Бляйкер та ін. [130] розробили підхід, при якому осадка розраховується на різних глибинах і для різних випадків навантаження. Верхні шари підлягали додатковому навантаженню і деформація кожного шару прогнозувалася окремою. Для прогнозування осадки використовувалася модель Р. Гібсона і К. Ло [121]. Перевагою цього підходу є можливість оцінити зміну гідравлічної провідності відходів з глибиною.

М. Веріс та ін. [131] спостерігали осадку в польових умовах. Прогнозування осадки здійснювалися за допомогою моделі Р. Гібсона і К. Ло [121], а також оцінювався відсоток загальної осадки, який зазнали різні ділянки полігону.

Г. Боутвел та В. Фіоре [132] провели ряд польовий випробувань для оцінки необхідності тимчасового перенавантаження для зменшення постконструкційної

осадки. Класична теорія використовувалася для пошуку мінімального розміру заповнення, при якому осадка найменша.

Зокрема моделі, що базуються на механіці ґрунтів вивчали Д. Морріс і К. Вудс [133], І. Овейс і Р. Хера [134], Р. Сталгіс [135], Дж. Гурк і Ф. Олів'єр [136] та ін. Емпіричні моделі вивчали С. Пунямуртула [137], У. Жао [138] та ін.

Висновки до розділу 1

Проведений аналіз експериментальних та теоретичних досліджень дозволив зробити наступні висновки:

1. З аналізу стану досліджень щодо поводження з твердими побутовими відходами в Україні витікає, що загальною тенденцією 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 захороняють 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. 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.

4. 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 впливу властивостей

полігону ТПВ та підстилаючих ґрунтових масивів на процес його осідання доцільно застосовувати математичне моделювання.

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. Встановлено, що на даний час відсутня модель, яка враховує основні фактори і дозволяє достеменно спрогнозувати осадку ТПВ. Найбільш доцільним питанням є розробка узагальненої моделі осадки з урахуванням ґрунтів основи.

Виходячи з аналізу результатів досліджень, у роботі поставлені мета, об'єкт та предмет дослідження, викладені у «Вступі». На завершення, можна сказати, що основним завданням даної роботи є оцінка екологічно безпечної стійкості полігону з його пошаровим заповненням з урахуванням осадки ґрунту, що лежить в основі, за допомогою математичного моделювання і створення методики, алгоритму та програми, яка дозволить прогнозувати осадку на будь-якому полігоні без та з урахуванням додаткового статичного або динамічного навантаження, що дозволить оцінити його придатність в якості основи споруд та перевести з екологічно небезпечного об'єкту в екологічно безпечний для навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ ТА РИЗИКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЇХ ВПЛИВУ НА ПОЛІГОНАХ ТПВ

2.1. Багатокритеріальний аналіз вибору технології утилізації відходів з використанням парних порівнянь

Побутові сміттєзвалища є великими джерелами забруднення повітря за рахунок викидів парникових газів. Газ що виділяється на сміттєзвалищах може містити різні компоненти, які, як відомо, викликають «парникові ефекти». Викиди зі сміттєзвалища газу та стічні води можуть відбуватися десятки та сотні років. Рішення щодо управління ТПВ повинні бути технічно здійсненими, фінансово стійкими, соціально, юридично та екологічно прийнятними.

В ході виконання даної роботи були проведені порівняння існуючих методів термічної обробки відходів. При порівнянні основних технологій утилізації ТПВ зазвичай задають такі питання: яке з них є більш важливим або більш значущим; що більш ймовірно; який має більшу перевагу тощо. За результатами дослідження, ефективність п'яти альтернативних методів обробки відходів була оцінена на основі 8 критеріїв із застосуванням методу ієрархічного аналізу.

Проблеми проектування та експлуатація місць накопичення ТПВ або сміттєзвалищ, може впливати на період часу, протягом якого відбуваються значні природні зміни, які несуть за собою негативні екологічні загрози. Можна виділити два широкі типи стратегій звалищ. Традиційні сміттєзвалища, які є неконтрольованими, дозволяють без обмежень викидати в ґрунт забруднюючі речовини. Цей метод накопичення відходів не вважається належним для експлуатації, зважаючи на серйозний ризик, який може спричинити вилуговування підземних вод та потенційне накопичення звалищного газу. Тому сучасні сміттєзвалища повинні контролюватися та експлуатуватися за принципом "утримання", який дозволяє уникати забруднення довкілля.

Компонентами викидів парникових газів є дві основні сполуки вуглецю: метан (CH₄) та вуглекислий газ (CO₂).

Вважається, що максимум рівня виробництва звалищного газу буде досягнуто через місяці-роки після закриття полігону і після цього експоненціально зменшиться, досягнувши незначних обсягів приблизно через 25-30 років.

Кількість утвореного осаду залежить, головним чином, від кількості опадів у регіоні та типу покриву сміттєзвалища, які впливають як на кількість вологи, що проникає на сміттєзвалище, так і на початкову вологість відходів. Рівень інфільтрації повинен бути оцінений для кожного сміттєзвалища, де потрібна більш точна інформація, на відміну від використання середніх або регіональних середніх значень через велику різницю між ділянками. Наприклад, на етапі експлуатації полігону на сміттєзвалище проникає від 20 до 70% опадів.

Типові речовини з полігону, що надходять в ґрунт та воду, наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Типові викиди з полігону в ґрунт та воду

Компонент	Приклад
Основні іони	Ca, K, Na, NH ₄ , CO ₃ , SO ₄ , Cl
Важкі метали	As, Cd, Cr, Pb, Hg, Cu, Ni
Органічні сполуки	Хлорована органіка, фенол, бензол, специфічні пестициди
Інше	Мікробіологічні компоненти

Утилізація твердих відходів є гострою та поширеною проблемою як у міських, так і в сільських районах багатьох розвинених країн та країн, що розвиваються. Збір та захоронення твердих побутових відходів є однією з головних проблем міського середовища в більшості країн світу сьогодні. Рішення щодо управління ТПВ повинні бути фінансово стійкими, технічно здійсненими, соціально, юридично прийнятними та екологічно безпечними. Поводження з твердими відходами – найбільший виклик для влади як малих, так і великих міст.

Утилізацією вважається спалювання та спільне спалювання з високим рівнем відновлення енергії; перетворення відходів в матеріали, що використовуються як тверде, рідке або газоподібне паливо.

У свою чергу, саме енергетична утилізація ділиться на три основних типи: збір біогазу на полігонах і звалищах ТПВ з наступним виробництвом електро-та/або теплової енергії; 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; термічна обробка/переробка змішаних (залишків після сортування) ТПВ з подальшим виробництвом електроенергії та/або тепла.

Термічна обробка ТПВ є найбільш ефективним методом скорочення відходів і необхідності їх видалення. Можливі такі види утилізації теплових побутових відходів:

- виробництво тепла і електроенергії з RDF (Refuse Derived Fuel)/SRF (Solid Recovered Fuel), отриманого після механічної та біологічної обробки;
- класична сміттеспалювальна установка – спалювання змішаного потоку ТПВ після вилучення цінної сировини;
- експериментальні технології: газифікація, піроліз.

В даний час все більшого поширення набуває спалювання відходів, яке розглядається в розвинених країнах в якості основного способу утилізації відходів, які не можуть піддаватися вторинній переробці з технічних чи економічних принципів.

На підставі [139] сформульовані основні, загальноприйняті вимоги до процесу спалювання, виконання яких забезпечить запобігання утворенню діоксинів у відхідних газах:

- високі температури (1250 °C і більше);
- наявність окисно-відновного середовища;
- час перебування димових газів в зоні високих температур, достатній для розкладання діоксинів;

- максимально швидке охолодження димових газів для запобігання утворення вторинних діоксинів;
- багатоступенева система очищення димових газів від шкідливих компонентів;
- високий рівень автоматизації технологічного процесу термічного знешкодження відходів.

Сукупне виконання всіх зазначених умов призводить до повного і незворотного руйнування діоксинів і очищення димових газів до рівня, безпечного для навколишнього середовища і здоров'я людини.

В ході виконання даної роботи були проведені порівняння існуючих методів термічної обробки відходів: рухома решітка з повітряним охолодженням, з рідинним охолодженням, статична решітка з механізмом транспортування золи/відходів, ротаційна піч, киплячий шар, киплячий шар – обертовий, циркулюючий, газифікація – нерухомий шар, захоплений потік, рідкий шар, піроліз – короткий барабан, середній барабан. Порівняння проводились за:

- основними характеристиками відходів, що можуть утилізуватися;
- пропускну здатністю на лінію;
- перевагами;
- недоліками;
- якістю золи;
- обсягом димових газів;
- інформацією про вартість установки.

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, де оцінки мають значення, наведені в табл. 2.2.

При порівнянні основних технологій утилізації ТПВ зазвичай задають 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.

Таблиця 2.2 – Призначення інтенсивності

Визначення	Інтенсивність відносної важливості
варіанти не можна порівнювати	0
рівна важливість	1
помірна перевагу одного над іншим	3
істотна або сильна перевага	5
значна перевага	7
дуже велика перевага	9
проміжні рішення між двома сусідніми судженнями	2,4,6,8

Щоб обчислити власні вектори відповідно до даного методу, необхідно перемножити елементи в кожному рядку і взяти корінь n -го ступеня, де n – кількість елементів. Результуючий стовпець чисел був нормалізований шляхом ділення кожного числа на суму всіх чисел. Інший спосіб – нормалізувати елементи кожного стовпця матриці і потім усереднити кожен рядок. Ранжування елементів, які аналізуються з використанням матриці парного порівняння, засноване на обчисленнях основного власного вектора даної матриці. Головний власний вектор визначається рівністю $AW = \lambda_{\max} W$, де λ_{\max} – максимальне власне значення матриці A .

Індекс узгодженості (ІУ) в кожній матриці і для всієї ієрархії можна розрахувати наступним чином. Спочатку додається кожен стовпець суджень, потім сума першого стовпця збільшується на значення першого компонента нормалізованого вектора пріоритету, сума другого стовпця збільшується на другий компонент і т. д. Потім отримані числа складаються разом. Таким чином, ми можемо отримати значення, що позначається λ_{\max} . Для індексу узгодженості

маємо $IY = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$, де n – кількість елементів для порівняння. Для обернено симетричної матриці завжди $\lambda_{\max} \geq n$.

Загальні умови для всіх технологій наступні: мінімальна температура згоряння 850°C ; мінімальний час перебування вихлопних газів дві секунди після останньої подачі повітря для горіння; оптимальний вміст кисню (\sim менше 6%); вміст окису вуглецю у вихлопних газах є ключовим показником якості згоряння; димові гази обробляються багатоступінчастою системою очищення.

Починаючи оцінку доцільності впровадження конкретної технології поводження з відходами, вирішуються такі завдання: вибрати технології обробки відходів; розробити систему критеріїв, за якими буде проводитися аналіз.

Для спалювання відходів використовується кілька типів обладнання: спалювання в обертових печах – S_1 , термічна обробка з використанням піролізу – S_2 , спалювання в киплячому шарі – S_3 , спалювання на механічних колосникових решітках – S_4 , спалювання на металургійних або цементних печах – S_5 . Варіанти для аналізу за кількома критеріями:

$$S = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, \} \quad (2.1)$$

Критерії, за якими були оцінені варіанти: найменший рівень негативного впливу на навколишнє середовище (C_1); незалежність ефективності спалювання від попередньої підготовки чи сортування сміття (необхідність подрібнення і підвищення однорідності) (C_2); здатність генерувати тепло і електрику для різних систем використання (C_3); складність обладнання (простота обслуговування, надійна експлуатація) (C_4); кількість утворених відходів, обсяг димових газів (спалювання твердих відходів; ступінь концентрації) (C_5); зона установки обладнання (C_6); вартість обладнання (C_7); суспільне визнання (громадська думка) (C_8).

Таким чином маємо множину критеріїв, за якими оцінювались варіанти технологій:

$$C = \{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8\} \quad (2.2)$$

Варіанти технології термічної обробки відходів наступні: спалювання в барабанних (оберткових) печах (S_1); термічна обробка з використанням піролізу (газифікації) (S_2); спалювання в киплячому шарі (S_3); спалювання на механічних колосникових решітках (S_4); спалювання в металургійних або цементних печах (S_5).

Критерії варіантів технологій термічної обробки із вказаними характеристиками наведено нижче.

1. Найменший рівень негативного впливу на навколишнє середовище (C_1):

- повільне обертання барабана дозволяє отримати час обробки від 30 до 90 хвилин. Температури між 850° і 1000° C достатні для знищення небезпечних відходів, які не містять хлор. Для руйнування хлоровмісних відходів необхідна температура від 1100° до 1200° C (S_1);

- топкові гази, що утворюються в піролізних установках містять менше пилу, ніж в звичайних установках для спалювання, але тут витрачається більше допоміжного палива і, отже, обсяги вихідних газів великі (S_2);

- частинки можуть проскакувати і залишатися в шарі довше, ніж середній час перебування. Можливе зниження викидів SO_2 за допомогою вапняку і забезпечення відносно низького рівню NOX через низьку температуру згоряння (S_3);

- можливе спалювання медичних відходів. Якщо заражені відходи спалюються в цих духовках, їх необхідно попередньо дезінфікувати і стерилізувати або поміщати в печі в спеціально самозавантажувальні контейнери (S_4);

- при 1700° C вміст шкідливих речовин може бути зведений до мінімуму, але поліциклічні ароматичні вуглеводні можуть бути утворені на виході з установки (S_5).

2. Незалежність ефективності спалювання від попередньої підготовки чи сортування сміття (необхідність подрібнення і підвищення однорідності) (C_2):

- вимоги до складу і властивостей сировини менш суворі, ніж при будь-якому іншому способі спалювання. Технологія є комплексною в області переробки великогабаритних відходів зі змінним складом; можна спалювати відходи з високою зольністю і вологістю. Хороші умови теплообміну створюються від нагрітих газів до оброблюваного матеріалу. Фактично всі відходи, незалежно від типу і складу, можуть бути видалені (S_1);

- неефективний при роботі з різномірними відходами, таких як ТПВ, що вимагають високих витрат на попереднє сортування (S_2);

- не можуть бути спалені ТПВ з низькими температурами плавлення золи. Важкі фізичні домішки (металеві частинки у відходах) можуть потрапляти на повітророзподільну плиту, заважати флюїдизації і їх важко видалити з печі. Існують обмеження щодо розподілу часток за розміром і теплотворної здатності ТПВ (S_3);

- наявність металевих частинок в відходах при високих температурах ускладнює роботу решіток і вимагає додаткового очищення (S_4);

- вимоги до складу і властивостей сировини менш суворі, ніж для багатьох інших методів спалювання. Але коли токсичні компоненти потрапляють у відходи, існує можливість попадання токсичних газів в атмосферу (S_5).

3. Здатність генерувати тепло і електрику для різних систем використання (C_3):

- забезпечує значну кількість енергії у вигляді пари і/або електрики, яка чистіша, ніж енергія від нафти, вугілля або природного газу (S_1);

- низька енергоефективність в порівнянні зі звичайним спалюванням. Через високий вміст горючих речовин в твердих залишках під час піролізу рівень витрати палива приблизно в 1,6 рази нижче, ніж у випадку звичайного згоряння (S_2);

- споживання значної кількості енергоресурсів самою установкою (S_3);

- відносно великі втрати тепла при механічному (7-14%) і хімічному (до 2-5%) недопалі (S_4);

- неможливо отримувати тепло і електроенергію (основні виробничі підрозділи зазвичай не оснащені системами утилізації тепла, за винятком тепла для технологічних цілей) (S_5).

4. Складність обладнання (простота обслуговування, надійна експлуатація) (C_4):

- характеризується механічною надійністю. Однак використання дорогих термо і хімічно стійких футеровок в барабанних печах призводить до підвищення питомих витрат і витрат на технічне обслуговування (S_1);

- високі вимоги до системи управління технологічним процесом з метою уникнення аварійних ситуацій (S_2);

- порівняно складне устаткування, що забезпечує режим псевдозрідження оброблюваного матеріалу (S_3);

- можливість використання готового існуючого обладнання, наявність обертових елементів в зоні високої температури (S_4);

- можливість використання існуючих печей у виробництві. Однак основні виробничі печі є досить складними пристроями (S_5).

5. Кількість утворених відходів, обсяг димових газів (спалювання твердих відходів; ступінь концентрації) (C_5):

- хороша повнота вигорання ТПВ. Кількість зольного залишку становить $5 \div 10\%$ від початкового об'єму відходів, низький вміст пилу в газах. Повне згоряння органічного компонента і прожарювання шлаку, що можливо тільки в барабанній печі (S_1);

- задовільна повнота вигорання ТПВ. Важкі метали не плавляться, а виходять зі шлаком (S_2);

- задовільна повнота вигорання ТПВ. Однак існує ймовірність з'єднання і прилипання твердих речовин (S_3);

- добра повнота вигорання ТПВ. Можливий недопал, утворення токсичного шлаку, проскакування дрібних деталей в просторі шасі (S_4);

- добра повнота вигорання ТПВ. Залишки є частиною продукту (цементу) або можуть бути використані в якості флюсу (в металургії) (S_5).

6. Зона установки обладнання (C_6):

- невеликий простір, необхідний для організації виробництва (S_1);
- відносно невелика площа, необхідна для організації виробництва (S_2);
- велика площа, необхідна для організації виробництва (S_3);
- велика площа, необхідна для організації виробництва (S_4);
- невеликий простір, необхідний для організації виробництва.

Основне виробництво (металургійне або цементне) не є компактним, але додатковий простір для організації спалювання ТПВ невеликий) (S_5).

7. Вартість обладнання (C_7):

- невеликі початкові інвестиції; залежність вартості від виробничих потужностей (S_1);
- помірні початкові вкладення, проте потрібен кваліфікований персонал (S_2);
- помірні початкові вкладення, проте потрібен кваліфікований персонал (S_3);
- помірні початкові інвестиції, необхідність ремонтування обладнання після спалювання несортіваних ТПВ (S_4);
- невеликі початкові інвестиції; вартісна залежність від потужності.

Економічні переваги при низьких витратах на обробку завдяки використанню існуючого обладнання (S_5).

8. Суспільне визнання (громадська думка) (C_1):

- нейтральне ставлення (S_1);
- нейтральне ставлення. Існують негативні приклади піролізної установки для обробки автомобільних шин з недостатнім і неконтрольованим очищенням (S_2);
- нейтральне ставлення (S_3);

- помірно нейтральне ставлення. Технологія зрозуміла населенню, оскільки схожа з технологією спалювання твердого палива в топках котлів і печах для опалювання в приватних будинках (S_4);
- нейтральне ставлення. Спалювання ТПВ в металургійних або цементних печах може негативно сприйматися персоналом, що працює на існуючому металургійному цементному виробництві (S_5).

Згідно [18] проведено розрахунок за 8 критеріями 5 варіантів технології термічної обробки відходів. Найвище значення глобального пріоритету визначає кращий варіант відповідно до багатокритеріального методу оцінки.

Приведено приклад розрахунку для першого критерію – найменший рівень негативного впливу на навколишнє середовище за наступним алгоритмом.

1. Заповнення матриці парних порівнянь.

$$AC1 = \begin{pmatrix} 1 & AC1_{01} & AC1_{02} & AC1_{03} & AC1_{04} \\ AC1_{10} & 1 & AC1_{12} & AC1_{13} & AC1_{14} \\ AC1_{20} & AC1_{21} & 1 & AC1_{23} & AC1_{24} \\ AC1_{30} & AC1_{31} & AC1_{32} & 1 & AC1_{34} \\ AC1_{40} & AC1_{41} & AC1_{42} & AC1_{43} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2.3)$$

$$AC1 = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 3 & 5 & 6 \\ 0,25 & 1 & 0,5 & 3 & 2 \\ 0,333 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 0,2 & 0,333 & 1 & 1 & 1 \\ 0,167 & 0,5 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

2. Визначення середнього геометричного значення по кожному рядку матриці.

$$AC11 = \begin{pmatrix} \sqrt[5]{AC1_{00} \cdot AC1_{01} \cdot AC1_{02} \cdot AC1_{03} \cdot AC1_{04}} \\ \sqrt[5]{AC1_{10} \cdot AC1_{11} \cdot AC1_{12} \cdot AC1_{13} \cdot AC1_{14}} \\ \sqrt[5]{AC1_{20} \cdot AC1_{21} \cdot AC1_{22} \cdot AC1_{23} \cdot AC1_{24}} \\ \sqrt[5]{AC1_{30} \cdot AC1_{31} \cdot AC1_{32} \cdot AC1_{33} \cdot AC1_{34}} \\ \sqrt[5]{AC1_{40} \cdot AC1_{41} \cdot AC1_{42} \cdot AC1_{43} \cdot AC1_{44}} \end{pmatrix}, \quad (2.4)$$

$$AC11 = \begin{pmatrix} 3,245 \\ 0,944 \\ 0,922 \\ 0,582 \\ 0,608 \end{pmatrix}.$$

3. Знаходження суми елементів середніх значень:

$$\sum AC11 = 6,302. \quad (2.5)$$

4. Визначення вектора локальних пріоритетів.

$$AC111 = \begin{pmatrix} \frac{AC1_0}{\sum AC11} \\ \frac{AC1_1}{\sum AC11} \\ \frac{AC1_2}{\sum AC11} \\ \frac{AC1_3}{\sum AC11} \\ \frac{AC1_4}{\sum AC11} \end{pmatrix}, \quad (2.6)$$

$$AC11 = \begin{pmatrix} 0,515 \\ 0,15 \\ 0,146 \\ 0,092 \\ 0,096 \end{pmatrix}.$$

5. Знаходження суми елементів відповідних стовпців матриці.

$$\begin{aligned} \sum AC1^{(0)} &= 1,95; \\ \sum AC1^{(1)} &= 7,833; \\ \sum AC1^{(2)} &= 6,5; \\ \sum AC1^{(3)} &= 11; \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\sum AC1^{(4)} = 11.$$

6. Визначення розрахункової величини λ_{max} .

$$\begin{aligned} \lambda_1 = & \sum AC1^{(0)} \cdot AC111_0 + \sum AC1^{(1)} \cdot AC111_1 + \\ & + \sum AC1^{(2)} \cdot AC111_2 + \sum AC1^{(3)} \cdot AC111_3 + \\ & + \sum AC1^{(4)} \cdot AC111_4 = 5.196; , \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{max} = \lambda_1; n = 5.$$

7. Розрахунок індексу узгодженості

$$IY = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{5.196 - 5}{5 - 1} = 0,049. \quad (2.9)$$

8. Розрахунок відношення узгодженості. $CU=1,12$ – згідно таблиці 2.3.

$$BU = \frac{IY}{CU} = \frac{0,049}{1,12} = 0,044. \quad (2.10)$$

Результатом є розрахунок вектора локальних пріоритетів для даного критерію на відношення його узгодженості.

Розрахунок для наступних критеріїв проводиться аналогічно.

Проведено розрахунок глобальних пріоритетів для кожної технології.

Вектор глобальних пріоритетів наступний:

- спалювання в барабанних печах (P_0);
- термічна обробка з використанням піролізу (газифікації) (P_1);
- спалювання в киплячому шарі (P_2);
- спалювання на механічних колосникових решітках (P_3);

- спалювання в металургійних або цементних печах (P_4).

$$P_{jr} = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3,137 \\ 0,758 \\ 0,932 \\ 1,393 \\ 1,821 \end{pmatrix}. \quad (2.11)$$

Найбільше значення глобального пріоритету має варіант S_1 – спалювання в барабанних печах. Далі по величині глобального пріоритету S_5 – спалювання в металургійних та цементних печах. Найменший показник у відносно новій технології – обробка з використанням піролізу чи газифікації. Узагальнені значення локальних пріоритетів наведено в табл. 2.2.

$$AC111 = \begin{pmatrix} AC111_0 \\ AC111_1 \\ AC111_2 \\ AC111_3 \\ AC111_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,515 \\ 0,15 \\ 0,146 \\ 0,092 \\ 0,095 \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

Таблиця 2.3 – Вектори локальних пріоритетів вибору установок для термічної утилізації відходів

Критерій	Вектор локальних пріоритетів	Відношення узгодженості (ВУ)	Значимість критерію (вага)
1	2	3	4
C_1	$AC111 = \begin{pmatrix} AC111_0 \\ AC111_1 \\ AC111_2 \\ AC111_3 \\ AC111_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,515 \\ 0,15 \\ 0,146 \\ 0,092 \\ 0,095 \end{pmatrix}$	0,044	1,0

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4
---	---	---	---

C_2	$AC222 = \begin{pmatrix} AC222_0 \\ AC222_1 \\ AC222_2 \\ AC222_3 \\ AC222_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,436 \\ 0,07 \\ 0,081 \\ 0,109 \\ 0,305 \end{pmatrix}$	0,046	1,0
C_3	$AC333 = \begin{pmatrix} AC333_0 \\ AC333_1 \\ AC333_2 \\ AC333_3 \\ AC333_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,535 \\ 0,078 \\ 0,183 \\ 0,163 \\ 0,041 \end{pmatrix}$	0,046	1,0
C_4	$AC444 = \begin{pmatrix} AC444_0 \\ AC444_1 \\ AC444_2 \\ AC444_3 \\ AC444_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,498 \\ 0,067 \\ 0,087 \\ 0,245 \\ 0,104 \end{pmatrix}$	0,066	1,0
C_5	$AC555 = \begin{pmatrix} AC555_0 \\ AC555_1 \\ AC555_2 \\ AC555_3 \\ AC555_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,331 \\ 0,071 \\ 0,093 \\ 0,129 \\ 0,377 \end{pmatrix}$	0,052	1,0
C_6	$AC666 = \begin{pmatrix} AC666_0 \\ AC666_1 \\ AC666_2 \\ AC666_3 \\ AC666_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,435 \\ 0,139 \\ 0,05 \\ 0,05 \\ 0,366 \end{pmatrix}$	0,062	1,0
C_7	$AC777 = \begin{pmatrix} AC777_0 \\ AC777_1 \\ AC777_2 \\ AC777_3 \\ AC777_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,201 \\ 0,106 \\ 0,106 \\ 0,098 \\ 0,488 \end{pmatrix}$	0,029	1,0
C_8	$AC888 = \begin{pmatrix} AC888_0 \\ AC888_1 \\ AC888_2 \\ AC888_3 \\ AC888_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,186 \\ 0,077 \\ 0,186 \\ 0,507 \\ 0,044 \end{pmatrix}$	0,044	1,0

Таким чином, розглянуто технології утилізації відходів: збір біогазу на полігонах, механіко-біологічна обробка ТПВ та термічна переробка змішаних відходів. Проведено порівняння методів термічної обробки відходів за однаковими характеристиками. Сформульовано основні вимоги до процесу спалювання відходів, які мінімізують вплив даного процесу на навколишнє середовище.

Проведено багатокритеріальний аналіз варіантів з використанням парних порівнянь [140], вибрано раціональну технологію утилізації відходів. Обґрунтована технологія для утилізації відходів методом спалювання в барабанних/обертюваних печах. Згідно вектору глобальних пріоритетів, значення показника даної технології майже вдвічі перевищує значення наступної «оптимальної» технології.

2.2. Оцінка ризиків при освоєнні природно техногенних середовищ

Розглянуто ризики розвитку таких природних техногенних середовищ, як звалища твердих побутових відходів, хвостосховища, відвали при видобутку корисних копалин для можливості їх повторного використання як основи конструкцій для цивільного та промислового будівництва. На прикладі Бориспільського звалища твердих побутових відходів висвітлено основні показники джерел ризику: вплив людини, ризик вибухів та пожеж, реакція органів дихання, санітарно-епідеміологічна небезпека, вплив на атмосферне повітря, вплив на ґрунтовий покрив, накопичення важких металів на підземних водах за наявності систем збору та зливу фільтраційної води, деформації поверхні.

Методологія аналізу режимів відмов та наслідків була використана для експертної оцінки ризиків повторного використання територій, зайнятих природним та техногенним середовищем, для будівництва цивільних та промислових об'єктів. Експертам було запропоновано оцінити акцію шляхом парних порівнянь. Порівняльне попарне порівняння полягало в послідовному порівнянні кожної дії між собою. Методологія передбачає рейтинг ризику на основі номера пріоритету ризику, який є результатом рейтингу, отриманого шляхом експертної оцінки тяжкості наслідків та ймовірності того, що об'єкт не буде виявлений, за частотою надзвичайних ситуацій. Усуваються ризики з найбільшим числом пріоритетів ризиків. Визначено можливі сценарії та комбінації сценаріїв спектру ризику (технічного, екологічного, соціального, економічного). Ці пріоритети були ранжировані за спаданням (від 10 до 0):

найвищий бал призначався максимальному значенню (найнебезпечнішому), яке мало ефект. Представлені результати експертної оцінки ознак тяжкості та невиявлення, отримані від одного експерта. Побудовано матриці суміжних ознак тяжкості та не виявлених ознак, складені всіма експертами. У нашій роботі взяли участь 16 експертів. На основі ранжування експертних показників були побудовані матриці для оцінки впливу джерел ризику на вибір напрямку санації та подальше використання природних техногенних середовищ. Результат був використаний для кількісної оцінки ризику, представленого матрицею критичності цієї індикаторної системи, мірою його впливу на її надійність.

Актуальність вирішення проблем, пов'язаних з розробкою звалищ, звалищ, відвалів та звалищ, закритих для прийому твердих побутових відходів, визначається дефіцитом вільного простору на урбанізованих територіях та необхідністю дорогої реабілітації старих сміттєвих відходів небезпечні в екологічному та санітарно-епідеміологічному плані. Оцінка ризику розвитку цих територій є ключовим фактором зменшення потенційних негативних наслідків. Найпоширенішим методом поводження з відходами в Україні є їх утилізація на звалищах твердих побутових відходів або звалищах. Щороку Україна виробляє понад 10 млн тонн твердих побутових відходів на існуючих звалищах та полігонах загальною площею 9,4 тис. га.

Польові дослідження з визначення складу твердих побутових відходів проводились у 2010-2011 рр. На полігоні твердих побутових відходів м. Бориспіль Київської області, середнє значення за класифікацією Державної служби статистики України місто з населенням 57,5 тис. жителів, розміщене в 15 км від Києва з великою діловою активністю та часткою населення, що проживає в приватному секторі. За даними місцевого управління житлово-комунального господарства, від загальної кількості освічених твердих побутових відходів третина становить частка адміністративних та комерційних установ; водночас 67% відходів – це частка населеного сектору, з яких 50,1% – житлових житлових будинків, і 49,9% – приватного сектору.

Враховуючи специфіку Борисполя, окремо вивчались тверді побутові відходи, які утворювались у багатоквартирних будинках, приватному секторі та офісних приміщеннях. Незважаючи на те, що такий розподіл досить умовний, склад твердих побутових відходів у цих трьох джерелах значно відрізняється, і такий підхід дозволив правильно оцінити різні потоки твердих побутових відходів та їх внесок у загальну кількість утворень комунальних твердих побутових відходів у м. Бориспіль.

Класифікація компонентів досліджуваних твердих побутових відходів у м. Бориспіль наведена в табл. 2.4. Він трохи відрізняється від класифікації органічних компонентів в керівних принципах МГЕЗК, був розроблений і заявлений у 2006 році для всіх країн-членів проекту SWC Env Ind: для України, Литви, Грузії та Росії.

Відсутність цивілізованої системи поводження з відходами протягом багатьох десятиліть призвело до великої різноманітності старих звалищ, багато з яких, незважаючи на тривалий термін служби (60 або навіть 100 років), наявність санітарної засипки із землі залишається джерелами метану та забруднення підземних вод.

Аналіз фізико-хімічних процесів в тілі звалища техногенного середовища, інженерно-технічні проблеми, що виникають у природних технічних середовищах на завершальних етапах життєвого циклу, дозволяють визначити такі екологічні ризики, спричинені депонованим без попередньої обробки природним технічним навколишнього середовища та запобігання активному містобудівному розвитку (повторному використанню) територій техногенного середовища: викиди та міграція біогазу; забруднення підземних вод, ґрунтів фільтратом; деформація багатокутника робочого органу; санітарно-епідемічна небезпека території звалища твердих побутових відходів.

Таблиця 2.4 – Класифікація компонентів твердих побутових відходів, м. Бориспіль

№	Група	Підгрупа	Примітка
1	Папір та картон	Змішаний папір	
		Офісний папір	
		Глянцевий папір	
		Газетна папір	
		Картон	
2	Пластик	ПЕТ-пляшки	Білі, Сині, Зелені, Коричневі
		ВТП	Вироби з твердого поліетилену
		ПВХ	Вироби з полівінілхлориду
		ПС	Полістирольні вироби
		Інший пластик	Пластик не входить до інших категорій
3	TetraPack		Багатошарова упаковка на картонній основі
4	Харчові відходи		Усі харчові відходи, крім кісток
5	Ландшафтні відходи		Трава, гілки, рослинні залишки та інший рослинний матеріал
6	Деревина		Великі гілки, бари, меблі тощо
7	Інша органіка		Текстиль, шкіра, гума тощо
8	Чорні метали		
9	Кольорові метали	Алюміній	
		Інші кольорові метали	
10	Скло	Прозоре	
		Коричневе	
		Зелене	
		Синє	
		Не упаковувати	
		Змішані	
11	Інша органіка		Будівельне сміття, кераміка, каміння, пісок, кістки тощо
12	Небезпечні відходи		Батарей, лампи, гострі предмети, медичні відходи тощо.

Отже, для забезпечення найбільш оптимального та економічного комплексу заходів з підготовки територій до господарського використання, враховуючи необхідну мінімізацію ризиків, необхідно з'ясувати, яким із цих ризиків слід керувати в першу чергу.

Класифікація ризиків такого роду є складним технічним та економічним завданням, що включає різні, іноді неоднакові фактори. Цю проблему можна вирішити за допомогою математичних та статистичних методів у поєднанні з евристичними методами, які в останні роки дедалі більше визнаються математиками, економістами та екологами, та які були розроблені, зокрема, у стандартах ISO 14000.

Аналіз режимів відмов та наслідків (FMEA) – це спеціальна методика оцінки надійності та безпеки, призначена для виявлення та усунення технічних проблем у складних системах та аналізу та оцінки ризиків, що відрізняються за характером та напрямком впливу, силою та часом виникнення.

Методологія аналізу FMEA базується на експертній оцінці проблеми, що вивчається. Експерти значною мірою заповнюють брак кількісної інформації. Методологія передбачає оцінку ризику за рангом RPN, що є добутком рангів, отриманих експертною оцінкою тяжкості наслідків (A) та ймовірності невизначення (B) об'єкта, на частоту надзвичайних ситуацій (E). Перш за все усуваються ризики з найвищим показником RPN.

Експертній групі було запропоновано розглянути вплив звалищ, закритих для прийому твердих побутових відходів, на навколишнє середовище та з точки зору ризику аварій, тяжкості наслідків та можливостей їх виявлення, а потім оцінити вплив та обґрунтувати свої відповіді. Ступінь тяжкості наслідків для навколишнього середовища та людей була визначена з урахуванням юридичної відповідальності відповідно до ISO 14000:

- відсутні державні чи законодавчі обмеження - низький потенціал небезпеки,
- підвищена увага в суспільстві, наявність спеціальних законодавчих обмежень – середній потенціал небезпеки,
- великий ризик нещасних випадків, викликає суперечки в суспільстві, значні законодавчі обмеження - велика потенційна небезпека.

Експертів запрошували ранжувати вплив за допомогою парних порівнянь. Порівняння пар полягало в послідовному порівнянні кожного опромінення один з одним: якщо А важливіший за В, призначається 1,0 бал; якщо В важливіший за А, призначається 0; якщо А і В рівні, призначається 0,5 бала. У період після культивування наслідками вважалися:

- наслідки для людини:
 - небезпека вибухів та пожеж (x_1);
 - вплив на дихальні шляхи (x_2);

- санітарно-епідемічна небезпека (x_3);
- вплив на атмосферне повітря (парниковий ефект, виснаження озонового шару x_4);
- вплив на ґрунтовий покрив (загибель кореневої системи рослин у разі порушення газового режиму ґрунту x_5);
- накопичення важких металів у ґрунті (x_6);
- вплив на підземні води із системами збору та скидання води для фільтрації (x_7);
- деформації поверхні (x_8).

Для кожного критерію була складена матриця спряжених характеристик та визначено значення пріоритету P_k та загальне значення всіх пріоритетів P_i :

$$P_k = \sum_{i=1}^8 x_i, k = \overline{1, n}; \quad (2.13)$$

$$P_i = \sum_{k=1}^n P_k, i = \overline{1, x_i}; \quad (2.14)$$

де n - кількість незалежних експертів.

Нормалізацію пріоритетного значення проводили для кожного впливу за формулою:

$$P_{k_rel} = P_i / \sum P_i. \quad (2.15)$$

Ранжування цих пріоритетів проводилось у порядку зменшення (від 10 до 0): найвищий бал призначався максимальному значенню (найбільш небезпечному), яке зазнало впливу. У таблицях 2.5, 2.7 наведені результати експертної оцінки ознак за ступенем тяжкості наслідків та невиявлення, отримані від одного експерта. У таблицях 2.6, 2.8 наведені матриці спряжених ознак за ступенем тяжкості наслідків та за не виявленням, складені за результатами оцінок усіма експертами. У нашій роботі взяли участь 16 експертів.

Таблиця 2.5 – Таблиця ранжування за вагою наслідків одним експертом

Впливи	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	P_k
X_1	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	1	4,5
X_2	0,5	0,5	1	1	0	0	0	0,5	3,5

X ₃	0,5	0	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	3,5
X ₄	0,5	0	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0	3,5
X ₅	1	1	1	0	0,5	0	0,5	0,5	4,5
X ₆	0	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0	4
X ₇	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	4,5
X ₈	0	0,5	0,5	1	0,5	1	0	0,5	4

Таблиця 2.6 – Матриця спряжених характеристик за вагою наслідків (А)

Впливи	Експерти:														P _i	ΣP _i	P _{i_опт}
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
X ₁	4,5	1,5	0,5	3,5	3,5	4,5	0,5	3,5	3,5	7,5	1,5	3,5	0,5	6,5	45	459	0,0980
X ₂	3,5	6,5	4,5	2,5	2,5	3,5	4,5	2	2,5	0,5	6,5	2,5	4,5	5,5	51,5		0,1122
X ₃	3,5	5	4,5	1,5	1,5	3,5	4,5	1	1,5	6,5	5	1,5	4,5	2,5	46,5		0,1013
X ₄	3,5	5,5	5,5	6,5	6,5	3,5	5,5	5	6,5	1,5	5,5	6,5	5,5	1,5	68,5		0,1492
X ₅	4,5	5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	3,5	4,5	3,5	5	4,5	4,5	5,5	63		0,1373
X ₆	4	5	6	2,5	3,5	4	6	4,5	3,5	4,5	5	3,5	6	1,5	59,5		0,1296
X ₇	4,5	1	5	4,5	5,5	4,5	5	6,5	5,5	4,5	1	5,5	5	4,5	62,5		0,1362
X ₈	4	2,5	2	6,5	7,5	4	2	6,5	7,5	3,5	2,5	7,5	2	4,5	62,5		0,1362

Таблиця 2.7 – Таблиця ранжирування по невиявленню одним експертом

Впливи	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	P _i
X ₁	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0,5	1,5
X ₂	1	0,5	1	0,5	0,5	1	1	1	6,5
X ₃	1	0	0,5	0	0	0,5	1	1	4
X ₄	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	1	6
X ₅	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	1	6
X ₆	1	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	4,5
X ₇	0,5	0	0	0	0	0	0,5	0	1
X ₈	0,5	0	0	0	0	0,5	1	0,5	2,5

На основі отриманих матриць результуючих спряжених ознак за методологією FMEA фактори класифікуються за сумарним критерієм RPN (таблиця 2.9), значення якого визначається як добуток рангів А, В, Е:

$$RPN = A \cdot B \cdot E. \quad (2.16)$$

Таблиця 2.8 – Матриця спряжених характеристик по ймовірності невиявленню (В)

	Експерти:
--	-----------

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	P_i	ΣP_i	P_{i_omi}
X ₁	1,5	4,5	1,5	6,5	6,5	1,5	4,5	6,5	5,5	6,5	5,5	5,5	5,5	3,5	65	440,5	0,1476
X ₂	6,5	5,5	6	5,5	5,5	6	5,5	2,5	2,5	5,5	5	2,5	2,5	3	64		0,1453
X ₃	4	1,5	4,5	3,5	3,5	4,5	1,5	3,5	2,5	3,5	7	2,5	2,5	2	46,5		0,1056
X ₄	6	6,5	5,5	0,5	2,5	5,5	6,5	1,5	7,5	0,5	4,5	7,5	7,5	4	66		0,1498
X ₅	6	4,5	2,5	5,5	6,5	2,5	4,5	4,5	1,5	5,5	2,5	1,5	1,5	5	54		0,1226
X ₆	4,5	5,5	5,5	2,5	3,5	5,5	5,5	3,5	3,5	2,5	2	3,5	3,5	4	55		0,1249
X ₇	1	1,5	4,5	2,5	2,5	4,5	1,5	3,5	2,5	2,5	1,5	2,5	2,5	6	39		0,0885
X ₈	2,5	2,5	1	5,5	1,5	1	2,5	1,5	6,5	5,5	3,5	6,5	6,5	4,5	51		0,1158

Таблиця 2.9 – Таблиця ранжування за RPN

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

Параметр ризику RPN вказує на зв'язок між причинами небезпеки. Перш за все усуваються ризики, при яких індекс RPN найбільше перевищує допустиме значення RPN = 125. Якщо один із показників А, В, Е дорівнює 9 або 10, слід розробити заходи щодо зменшення ризику. Значення RPN від 40 до 100 означає середній ризик, RPN < 40 незначний ризик. Параметри виправлення для зменшення ризику розробляються в такій послідовності: усунення причин надзвичайної ситуації (зменшення параметра Е); зменшення причинного ефекту (зменшення параметра А); з цієї причини висока ймовірність виявлення надзвичайної ситуації (зменшення параметра В).

На основі оцінки думок експертів щодо RPN можна зробити висновок, що показниками з високим ступенем тяжкості ефектів (RPN > 125) є:

- вплив атмосферного повітря (парниковий ефект, руйнування озонового шару x_4) RPN = 700;
- деформації поверхні (x_8) RPN = 400;

- вплив на дихальні шляхи (x_2) RPN = 384;
- небезпека вибуху та пожежі (x_1) RPN = 324.

Слід зазначити, що експертам важко оцінити санітарно-епідемічну небезпеку ґрунтів звалищ та ступінь небезпеки розвитку деформацій поверхні транспортних засобів. Вибір напрямку рекультивації та подальше використання території повинені здійснюватися з урахуванням мінімізації цих ризиків, насамперед – утворення, накопичення, міграція звалищного газу, зменшення впливу на озоновий шар, зменшення ризику деформація поверхні.

Комплекс заходів, включаючи попередню механічну та біологічну обробку природних середовищ перед похованням, системи збору та видалення фільтрату та біогаз, також зменшить екологічні ризики RPN до середніх та незначних ризиків.

У роботі [141] з використанням методології Failure Mode and Effects Analysis проведена оцінка ризиків реконструкції території на прикладі Бориспільського сміттєзвалища твердих побутових відходів. Визначено основні показники джерел ризиків: вплив людини; небезпека вибухів та пожеж; вплив на дихальні шляхи; санітарно-епідемічна небезпека; вплив на атмосферне повітря; вплив на ґрунтовий покрив; вплив на підземні води, коли доступні системи збору та скидання води для фільтрації; деформації поверхні. Визначено можливі сценарії та їх поєднання спектру ризику (технічного, екологічного, соціального, економічного). На основі рейтингу показників експертів будуються матриці для оцінки впливу джерел ризику. На основі оцінки експертного висновку щодо RPN було встановлено, що показниками високої серйозності були атмосферні ефекти повітря (парниковий ефект, виснаження озонового шару RPN = 700; деформації поверхні RPN = 400; ефекти дихання RPN = 384; вибух та пожежна небезпека RPN = 324. Результат був використаний для вибору напрямку рекультивації та подальшого використання природних техногенних середовищ.

У працях [142, 143] проведено математичне моделювання перенесення марганцю у водному середовищі та моделювання процесу адсорбції при очищенні вод від фенолу щодо зниження x_7 . У праці [144] розглянуто фотокалатічний метод для очищення повітря для зменшення впливу x_2 .

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто технології утилізації відходів: збір біогазу на полігонах, механіко-біологічна обробка ТПВ та термічна переробка змішаних відходів. Проведено порівняння методів термічної обробки відходів за однаковими характеристиками. Сформульовано основні вимоги до процесу спалювання відходів, які мінімізують вплив даного процесу на навколишнє середовище – запобігають утворенню діоксинів у відхідних газах.

2. Проведено багатокритеріальний аналіз варіантів з використанням парних порівнянь, вибрано раціональну технологію утилізації відходів. Обґрунтована технологія для утилізації відходів методом спалювання в барабанних/обертючих печах. Згідно вектору глобальних пріоритетів, значення показника даної технології майже вдвічі перевищує значення інших існуючих технологій.

3. З використанням методології Failure Mode and Effects Analysis проведена оцінка ризиків реконструкції території на прикладі Бориспільського сміттєзвалища твердих побутових відходів. Визначено основні показники джерел ризиків: вплив людини; небезпека вибухів та пожеж; вплив на дихальні шляхи; санітарно-епідемічна небезпека; вплив на атмосферне повітря; вплив на ґрунтовий покрив; вплив на підземні води, коли доступні системи збору та скидання води для фільтрації; деформації поверхні. Визначено можливі сценарії та їх поєднання спектру ризику (технічного, екологічного, соціального, економічного).

4. На основі рейтингу показників експертів побудовано матриці для оцінки впливу джерел ризику. На основі оцінки експертного висновку щодо RPN встановлено, що показниками високої серйозності є атмосферні ефекти повітря (RPN = 700); деформації поверхні (RPN = 400); ефекти дихання (RPN = 384); вибух та пожежна небезпека (RPN = 324). Цей результат є основою для вибору напрямку рекультивації та подальшого використання природних техногенних середовищ.

РОЗДІЛ 3

ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗВ'ЯЗАНОЇ СИСТЕМИ «ПОЛІГОН ТПВ-ГРУНТОВА ОСНОВА»

3.1 Математична постановка задачі про напружено-деформований стан зв'язаної системи «полігон ТПВ - ґрунтова основа»

У даному розділі проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану ґрунтової основи та полігону твердих побутових відходів для прогнозування можливості його використання в якості основи споруди чи конструкції. Задача вирішується в два етапи. На першому етапі розглядається гідродинамічний аспект проблеми з урахуванням фільтраційних сил.

Зважаючи на різноманітність властивостей відходів, що знаходяться як в твердому, так і в рідкому стані в тілі полігона та відмінність протікання процесів під час навантаження доцільно застосовувати різні моделі середовища. Тому тверда складова відходів моделюється слабким ґрунтом з урахуванням повзучості за допомогою моделі Soft Soil Creep (SSC), яка найбільш повно описує такі властивості слабого ґрунту, як залежну від напружень жорсткість, а також вторинну компресію з урахуванням повзучості. Слід зазначити, що модель SSC враховує як фізичну, так і геометричну нелінійність процесу деформування ґрунту. Для описання рідкої фази відходів та в'язкопластичного середовища використовується закон Дарсі, що виражає залежність швидкості фільтрації від градієнту напору.

Гідродинамічні аспекти проблеми полягають в урахуванні фільтраційних сил, що діють на скелет ґрунтового середовища, і параметрів взаємодії рідкої і твердої фаз ґрунту (тиску, напруження і пористості) у процесі консолідації. У припущенні безвихрової течії фільтраційного потоку і розподілу сил опору рівномірно по перерізу елемента використовується узагальнений закон Дарсі і рівняння нерозривності. Закон Дарсі – закон фільтрації рідин і газів в пористому середовищі. Історично закон був отриманий А. Дарсі експериментально, але

може бути отриманий за допомогою усереднення рівнянь Нав'є-Стокса, що описують течію в масштабі пор. Система диференціальних рівнянь в часткових похідних доповнюється початковими і граничними умовами. Закон Дарсі (закон фільтрації рідин і газів в пористому середовищі) виражається в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} u_{x,ij} &= -k_{x,ij} \Delta_x H_{ij} \\ u_{y,ij} &= -k_{y,ij} \Delta_y H_{ij} \end{aligned} \quad (3.1)$$

де u — швидкість фільтрації; k — коефіцієнт фільтрації; H — напор.

Рівняння нерозривності наступне:

$$\Delta \operatorname{div}(\rho_{ij} \bar{u}_{ij}) = -\bar{\Delta}_t(\rho_{ij} m_{ij}) \quad (3.2)$$

де m_{ij} — пористість и щільність ґрунту; div — скінчена дивергенція в елементі через центровані різниці в просторі; Δ_t — одностороння різниця «вперед» в часі t .

Приймається, що стисливість скелету і порової рідини мала, що призводить до лінійної залежності пористості ґрунту від тиску. Взаємодія скелету ґрунту і рідини характеризується об'ємною силою, пропорційною градієнту напору в напрямку s :

$$-F_{ij} = \Phi_{ij} = -\gamma \Delta_s H_{ij} \quad (3.3)$$

Тоді при спільній дії на скелет ґрунту фільтраційних і гравітаційних сил напружений стан визначається з рівнянь рівноваги елементів ґрунтової області, які отримані шляхом проектування прикладених сил на осі координат:

$$\begin{aligned} \Delta_x \sigma_{x,ij} + \Delta_y \tau_{xy,ij} + \gamma \Delta_x H_{ij} &= \rho_{ij} \Delta_{tt} u_{ij} \\ \Delta_y \sigma_{y,ij} + \Delta_x \tau_{xy,ij} + \gamma \Delta_y H_{ij} &= \rho_{ij} \Delta_{tt} v_{ij} \end{aligned} \quad (3.4)$$

де u, v — компоненти переміщень у вузлах основної мережі; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ — компоненти напружень у вузлах допоміжної мережі ґрунтової області.

У результаті чисельної ітерації отримуємо усталений фільтраційний потік, параметри якого використовуються для розрахунку фільтраційних сил, що діють на елементи скелета, що деформується. Параметри фільтраційного потоку мають також самостійне значення при вирішенні задач будови дренажу та ін. При розрахунку консолідації ґрунту фільтраційні параметри перераховуються на кожному етапі.

Різницеві рівняння для визначення вільної поверхні фільтраційного потоку при розрахунку несталої фільтрації в тілі полігону (з урахуванням інфільтрації) повинні задовольняти наступним граничним умовам:

- 1) тиск дорівнює атмосферному

$$p = p_{atm} \approx const, \quad (3.5)$$

- 2) нормальна компонента швидкості на поверхні відсутня

$$v_n = 0. \quad (3.6)$$

У фундаментальній механіці суцільних середовищ при вивченні течій рідин і газів в пористому середовищі широко застосовується диференціальна форма закону Дарсі (для руху в полі тяжіння):

$$\vec{u} = -\frac{K}{\eta} \nabla (\rho g z + P), \quad (3.7)$$

де P — зовнішній тиск; ρ — щільність; η — динамічна в'язкість; g — прискорення вільного падіння; z — вертикальна координата.

Можна переписати закон Дарсі у вигляді рівняння балансу сил:

$$-\nabla P - \frac{\eta}{K} \vec{u} + \rho \vec{f} = 0, \quad (3.8)$$

де \vec{f} – поле зовнішніх сил; η – динамічна в'язкість рідини чи газу; $K = \eta k / \rho g$ – коефіцієнт проникності. Коефіцієнт проникності характеризує здатність пористого середовища до пропускання флюїду.

Повна система рівнянь фільтрації нестисливої рідини також включає умову нестисливості:

$$\begin{aligned} -\nabla P - \frac{\eta}{K} \vec{u} + \rho \vec{f} &= 0, \\ \operatorname{div} \vec{u} &= 0. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Вода в пористих породах може знаходитися в різних станах. При невеликому вмісті вона вбирається в зерна ґрунту (гігроскопічна вода, зі збільшенням вологості вона починає обволікати зерна ґрунту у вигляді плівок, при подальшому збільшенні вологості вона заповнює вузькі пори, врешті решт вода може заповнити всі пори за виключенням окремих ділянок, зайнятих пухирцями повітря).

В останньому стані вода отримує здатність рухатися під дією сили тяжіння. Її називають гравітаційною або ґрунтовою водою. Для неї можна застосовувати закони, споріднені законам гідродинаміки.

В кожній з пор ґрунту відбувається складний рух зі зміною швидкості і прискорення за величиною і напрямком від точки до точки. Пори мають різний напрямок і різну форму стінок, а тому в кожному виділеному об'ємі ґрунту повинні знаходитися найрізноманітніші за величиною і напрямком швидкості. Тому неможливо розглядати швидкості окремих часток.

Більш коректно було б розглядати середні значення швидкостей в певному об'ємі. В теорії фільтрації звично розглядати не швидкості, а витрати через певну площадку. Вектор витрати через одиничну площадку позначимо

через v . Якщо V – середня швидкість часток деякого об'єму, то її можна віднести до центру тяжіння цього об'єму, координати якого позначимо через x, y, z . Вектор має складові $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}$. Тоді, позначаючи пористість ґрунту через σ , можемо записати:

$$v = \sigma V, \quad (3.10)$$

якщо складові вектору v позначити через u, v, ω , то

$$u = \sigma \frac{dx}{dt}, v = \sigma \frac{dy}{dt}, \omega = \sigma \frac{dz}{dt}. \quad (3.11)$$

В гідродинаміці при виведенні рівнянь руху розглядають прискорення часток рідини, які виражаються через швидкості наступним чином:

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} v_y + \frac{\partial v_x}{\partial z} v_z. \quad (3.12)$$

Вважаючи швидкості v_x, v_y, v_z та їх зміну за координатами $\frac{\partial v_x}{\partial x}, \dots$ – малими, їх добутками можна знехтувати, залишаючи в рівняннях складових прискорення лише члени $\frac{\partial v_x}{\partial t}, \frac{\partial v_y}{\partial t}, \frac{\partial v_z}{\partial t}$.

Перепишем рівняння руху окремих часток рідини в порах наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x, \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y, \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f_z - g, \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

де p – тиск рідини; ρ – щільність; g – прискорення сили тяжіння. Вісь z спрямована вгору. Через f_x, f_y, f_z позначені складові сил опору, яких зазнає частка рідини в порі. Ці сили опору залежать від тертя часток рідини об частки ґрунту. Сили внутрішнього тертя частин рідин об інші частини рідин дуже малі в порівнянні з силами зовнішнього тертя [142].

Можна провести усереднення рівнянь за деяким об'ємом, достатньо малому, щоб врахувати зміни при русі від одного до іншого місця, але достатньо великому в порівнянні з розмірами пор. Тоді можна буде під $v_x, v_y, v_z, f_x, f_y, f_z$ розуміти їхні середні значення за об'ємом. При цьому f_x, f_y, f_z - складові сил опору, отримані експериментальним шляхом.

Таким чином, закон Дарсі можна тлумачити як лінійний закон опору, при якому опір пропорціональний першому ступеню швидкості фільтрації. Цю залежність можна записати у вигляді:

$$f_x = -\frac{gu}{k}, f_y = -\frac{gv}{k}, f_z = -\frac{g\omega}{k}. \quad (3.14)$$

Враховуючи, що коефіцієнт k зберігає для руху, що не встановився, те ж значення, що і для руху, що встановився, тоді рівняння матиме вигляд

Можна сказати, що при реальних значеннях коефіцієнта фільтрації ($k = 1-100$ м/добу) членами, що містять диференціювання за часом, можна знехтувати, тоді маємо

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{gu}{k}, \\ \frac{1}{\sigma} \frac{\partial v}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{gv}{k}, \\ \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \omega}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{g\omega}{k} - g. \end{aligned} \right\} \quad (3.15)$$

Кожне з попередніх рівнянь можна переписати у вигляді:

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial U}{\partial t} = f - \frac{1}{\lambda} U. \quad (3.16)$$

Введемо змінну

$$V = U - \lambda f. \quad (3.17)$$

Тоді

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\lambda}{\sigma} \frac{\partial f}{\partial t} - \frac{V}{\lambda}. \quad (3.18)$$

Якщо $\frac{\partial f}{\partial t}$ залишається обмеженим при всіх t , то $\frac{\lambda}{\sigma} \frac{\partial f}{\partial t}$ буде дуже малим.

Покладаючи $k = 100$ м/добу $= \frac{1}{864}$ м/с, $g \approx 10$ м/с², отримаємо

$$\lambda = \frac{k}{g} = \frac{1}{8640} \text{ с}, \quad (3.19)$$

і членом $\frac{\lambda}{\sigma} \frac{\partial f}{\partial t}$ дійсно можна знехтувати, якщо $\frac{\partial f}{\partial t}$ не дуже велике. Рівняння, що

залишається $\frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\lambda} V$ при інтегруванні має вигляд:

$$V = V_0 e^{-\frac{\sigma t}{\lambda}}. \quad (3.20)$$

Права частина прямує до нуля настільки швидко, що вже через долю секунди можна вважати, що $V = 0$, $U = \lambda f$, тобто знехтувати членами

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial u}{\partial t}, \frac{1}{\sigma} \frac{\partial v}{\partial t}, \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \omega}{\partial t}.$$

Тоді рівняння можна переписати вводячи п'єзометричний напір h , у вигляді:

$$v = -k \text{ grad } h, h = \frac{p}{\rho g} + z. \quad (3.21)$$

Лінійні інерційні члени зберігають в окремих випадках, наприклад для виведення співвідношень.

Рухи, в яких можна знехтувати силами інерції по відношенню до сил тертя, Л. Прандтль називає повзучими. В них звичайно опір пропорційний першому ступеню швидкості.

Рівняння містять чотири невідомі функції: u , v , ω і p . Приєднаємо до цих рівнянь рівняння нерозривності. Рідину, що рухається вважатимемо такою, що не стискається. Виведення рівняння нерозривності відбувається таким же чином, як і гідродинаміці рідини, що не стискається.

Виділимо елементарний об'єм в формі паралелепіпеда з ребрами dx , dy , dz , що паралельні до осей координат. Витрата рідини через площадку, перпендикулярну до осі x і таку, що знаходиться на відстані x від початку координат дорівнює $\sigma u \, dy \, dz$. Витрата через площадку, паралельну першій і що відповідає абсцисі $x+dx$ дорівнює

$$\left[\sigma u + \frac{\partial}{\partial x} (\sigma u) dx \right] dy \, dz. \quad (3.22)$$

Різниця між вихідною і вхідною кількістю рідини в напрямку осі x дорівнює $\frac{\partial}{\partial x} (\sigma u) dx \, dy \, dz$. В напрямку осей y і z відповідно отримаємо вирази для зміни витрат $-\frac{\partial}{\partial y} (\sigma v) dx \, dy \, dz, \frac{\partial}{\partial z} (\sigma \omega) dx \, dy \, dz$.

Сумуючи три отриманих вирази, будемо мати загальне перевищення кількості рідини, що виходить з об'єму $dx \, dy \, dz$, над кількістю рідини, що входить в об'єм. Сума повинна дорівнювати нулю завдяки нестисливості рідини. Після ділення на $dx \, dy \, dz$ отримаємо рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial}{\partial x} (\sigma u) + \frac{\partial}{\partial y} (\sigma v) + \frac{\partial}{\partial z} (\sigma \omega) = 0. \quad (3.23)$$

Якщо пористість ґрунту σ не залежить від координат, то отримаємо:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0, \quad (3.24)$$

тобто рівняння нерозривності має той самий вигляд, що і гідродинаміці нестискаємої рідини, а швидкість фільтрації має потенціал (при постійних k).

Рівняння плаского руху ґрунтових вод можна записати у вигляді

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -k \frac{\partial h}{\partial x}, v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -k \frac{\partial h}{\partial y}. \quad (3.25)$$

Вважаючи вісь y вертикальною, а x – горизонтальною, матимемо

$$h = \frac{p}{\rho g} + y + C, \varphi = -k \left(\frac{p}{\rho g} + y \right) + C_1. \quad (3.26)$$

Якщо вісь y спрямована вниз, то

$$h = \frac{p}{\rho g} - y + C, \varphi = -k \left(\frac{p}{\rho g} - y \right) + C_1. \quad (3.27)$$

Тоді

$$\Delta \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0. \quad (3.28)$$

З рівняння нерозривності

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.29)$$

впливає, що існує функція току $\psi(x, y)$ така, що

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (3.30)$$

Зводячи попередні рівняння, отримаємо

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (3.31)$$

Рівняння (2.28) є умовами Даламбера-Ейлера (Коші-Рімана). Якщо вони виконуються, то, як відомо, лінійна комбінація функцій φ і ψ

$$\omega = \varphi + i\psi \quad (3.32)$$

є функцією комплексної змінної $z = x + iy$. Функцію ω називають комплексним потенціалом.

Деформація полігону моделюється слабким ґрунтом з урахуванням повзучості з використанням моделі Soft Soil Creep (SSC).

Повна об'ємна деформація ε_v , викликана зростанням ефективних напружень з початкового значення p_0' до p' за період часу $t_c + t'$, виражається у вигляді суми пружної складової ε_v^e та в'язкопластичної складової ε_v^{vp} . В'язкопластична складова складається з деформації під час консолідації $\varepsilon_v^{vp}_c$ та після консолідації $\varepsilon_v^{vp}_{ac}$. Зв'язок між деформаціями виражається в наступному вигляді [143]:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^{vp}_c + \varepsilon_v^{vp}_{ac}, \quad (3.33)$$

доданки якої розраховуються за формулами:

$$\varepsilon_v^e = \kappa^* \ln \left(\frac{p'}{p_0'} \right); \quad (3.34)$$

$$\varepsilon_v^{vp} = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left(\frac{p'_{pc}}{p'_0} \right); \quad (3.35)$$

$$\varepsilon_v^{vp} = \mu^* \ln \left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c} \right), \quad (3.36)$$

де μ^* – модифікований коефіцієнт повзучості; τ_c – час консолідації, що залежить від геометрії зразку, що досліджується; t' – час, що минув з початку завантаження полігону; κ^* – модифікований коефіцієнт набування; λ^* – модифікований коефіцієнт компресії (стиснення); t_c – час завершення первинної консолідації; p'_0 – початкове ефективне напруження; p' – ефективне напруження; p'_{pc} – ефективне прекопсолідаційне напруження. Ізотропне ефективне напруження p' визначається за формулою:

$$p' = \frac{1}{3} (\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz}). \quad (3.37)$$

Відношення параметрів моделі до міжнародно-нормованих параметрів наступне:

$$\mu^* = \frac{C_\alpha}{2,3(1 + e_0)}; \quad \lambda^* = \frac{C_c}{2,3(1 + e_0)}; \quad \kappa^* = \frac{2C_s}{2,3(1 + e_0)}, \quad (3.38)$$

де C_c – коефіцієнт компресії; C_s – коефіцієнт набування; C_α – коефіцієнт повзучості; e_0 – початковий коефіцієнт пористості.

Співвідношення між об'ємною деформацією і значенням ефективних напружень з урахуванням повзучості зображено на рис. 3.1.

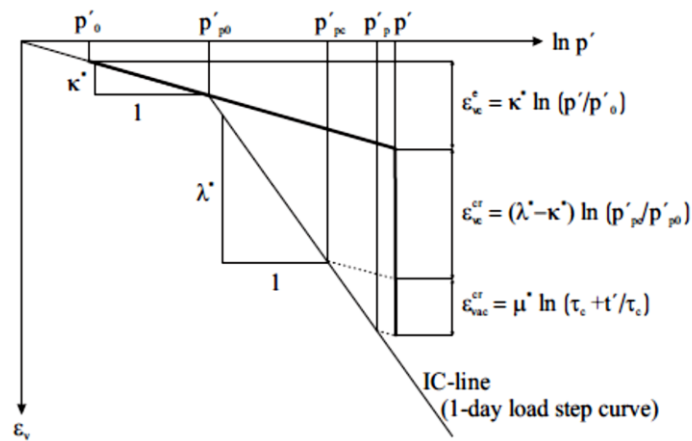


Рис. 3.1 Логарифмічне співвідношення між об'ємною деформацією і значенням ефективних напружень з врахуванням повзучості

Визначення значення μ^* за допомогою стандартного одометричного тесту, а також різниця між t' і τ_c показана на рис.3.2.

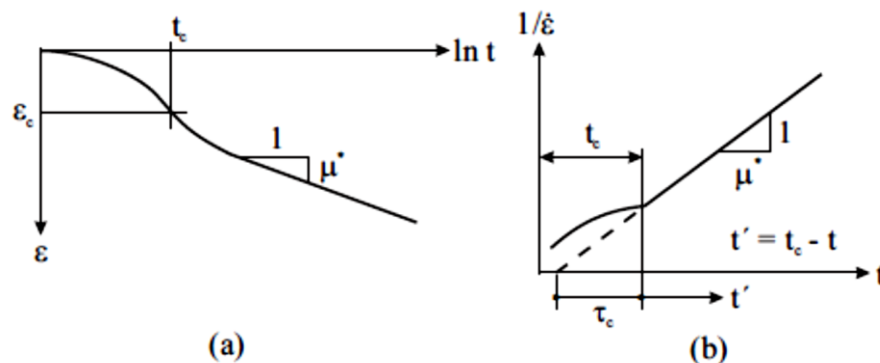


Рис. 3.2 Консолідація та повзучість при проведенні стандартного одометричного тесту

3.2. Основні характеристики моделі SSC для моделювання полігону ТПВ

В Україні та інших країнах світу з кожним роком зростають обсяги будівництва. Чим менше площ земель залишаються вільним, тим гостріше постає питання використовувати закриті полігони в якості основи для споруд та конструкцій. Для прогнозування деформації та осадки системи «полігон ТПВ – ґрунтова основа» використовувалася модель SSC. Ця модель застосовується для

розрахунку осадок фундаментів та насипів, а також екскавації та побудови тунелів.

Перевагою даної моделі перед іншими є те, що вона враховує не лише первинну компресію, а і повзучість і вторинну компресію, що є особливо важливим для полігонів ТПВ, в яких саме вторинна компресія відіграє найважливішу роль. Її тривалість може становити 10-30 років. Це необхідно враховувати на етапі проектування спорудження конструкції на основі полігону ТПВ. Особливістю тіла полігону є його висока стисливість. Великі первинні осадки фундаментів і насипів, як правило, супроводжуються істотними осадками в результаті повзучості в більш пізні роки. У таких випадках бажано оцінити повзучість за допомогою метода кінцевих елементів.

Основними характеристиками моделі SSC є: залежна від напруження жорсткість; різниця між первинним навантаженням та розвантаженням-перевантаженням; вторинна, залежна від часу компресія; врахування прекоңсолідаційного напруження; критерії руйнування Кулона-Мора.

Особливістю моделювання полігону є лінійна залежність його напруження від одометричної жорсткості. При побудові кривої залежності жорсткості від напруження, крива має вигляд залежності:

$$E_{OED} = \frac{\sigma}{\lambda^*} = \frac{\sigma \cdot E_{oed}^{ref}}{p^{ref}}, \quad (3.39)$$

де p^{ref} – табличне значення напруження (довідкове); E_{oed}^{ref} – табличне значення одометричної жорсткості (довідкове); E_{OED} – одометрична жорсткість, що має розмірність напруження, і відповідно до закону Гука співвідноситься з модулем Юнга E наступним чином:

$$E_{OED} = \frac{(1 - \nu)E}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}, \quad (3.40)$$

де ν - коефіцієнт Пуассона.

Критерієм руйнування є критерій Кулона-Мора:

$$f(\underline{\sigma}', c, \varphi) = 0, \quad (3.41)$$

який відповідно враховує ефективне зчеплення c , кут внутрішнього тертя φ та кут ділантасії ψ .

Бузман [144] запропонував наступне рівняння для опису повзучості під дією постійної ефективної напруги:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - C_B \log\left(\frac{t}{t_c}\right), \text{ при } t > t_c, \quad (3.42)$$

де C_B – матеріальна константа; ε_c – деформація до кінця консолідації; t – час, вимірний з початку завантаження полігону; t_c – час, до кінця первинної консолідації. При цьому значення напружень та деформацій – від'ємні.

Перепишемо рівняння в наступному вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon_c - C_B \log\left(\frac{t_c + t'}{t_c}\right), \text{ при } t' > 0, \quad (3.43)$$

де $t' = t - t_c$ – ефективний час повзучості.

Гарлангер [145] запропонував рівняння повзучості в наступній форму:

$$e = e_c - C_\alpha \log\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right), \quad (3.44)$$

$$C_\alpha = C_B(1 + e_0) \text{ при } t' > 0,$$

де e – коефіцієнт пористості

Баттерфілд [146] запропонував наступне рівняння:

$$\varepsilon^H = \varepsilon_c^H - C \ln \left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c} \right); \quad (3.45)$$

при цьому:

$$\varepsilon^H = \ln \left(\frac{1 + e}{1 + e_0} \right). \quad (3.46)$$

Верхній індекс "H" використовується для позначення логарифмічною (істинної) деформації, тобто $\varepsilon^H = \varepsilon$.

Для незначних деформацій:

$$C = \frac{C_\alpha}{(1 + e_0) \ln 10} = \frac{C_B}{\ln 10}. \quad (3.47)$$

Спираючись на літературні джерела можна зробити висновок, що деформація в кінці консолідації ε_c складається з пластичної деформації ε_c^e та деформації повзучості ε_c^c в кінці консолідації і може бути описана за допомогою рівняння:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c^e + \varepsilon_c^c = -a \ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'} \right) - (b - a) \ln \left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}} \right); \quad (3.48)$$

$$a = \frac{C_s}{(1 + e_0) \ln 10}; \quad (3.49)$$

$$b = \frac{C_c}{(1 + e_0) \ln 10}; \quad (3.50)$$

де σ_0' - початкове ефективне напруження перед навантаженням; σ' - кінцеве ефективне напруження при навантаженні; σ_{p0} - преконсолідаційне напруження перед навантаженням; σ_{pc} - преконсолідаційне напруження в кінці консолідації.

Підставивши (3.46) і (3.47) в (3.45) отримаємо

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c = -a \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right) - (b - a) \ln\left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_{p0}}\right) - c \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right), \quad (3.51)$$

де ε – повна деформація, викликана зростанням ефективних напружень з σ_0' до σ' за період часу $t_c + t'$ (рис. 3.3).

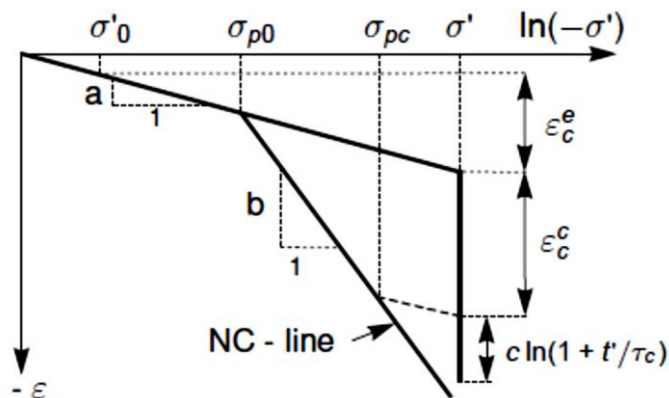


Рис. 3.3 Ідеалізована напружено-деформована крива, отримана з одометричного випробування з відокремленням приросту деформації на пружну складову та складову повзучості (для $t_c + t' = 1$ день, побудована –NC-лінія – лінія нормальної консолідації)

3.3 Диференційний закон для одновимірної повзучості

Попередні рівняння підкреслити зв'язок між накопиченою повзучістю і часом, для заданого постійного ефективного напруження. Для вирішення питань з перехідним або постійним завантаженням, необхідно сформулювати установчий закон в диференційній формі.

Приймаємо, що преконсолідаційне напруження цілком і повністю залежить від величини деформації повзучості, яка накопичується протягом часу, тоді рівняння (2.48) можна переписати у вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c = -a \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'}\right) - (b - a) \ln\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{p0}}\right), \quad (3.52)$$

де

$$\sigma_p = \sigma_{p0} \exp\left(\frac{-\varepsilon^c}{b - a}\right). \quad (3.53)$$

Треба зазначити, що значення ε^c – від'ємне, тому $\sigma_p > \sigma_{p0}$.

З попереднього рівняння одержано залежність преконсолідаційного напруження σ_p від часу. З рівнянь (2.48) і (2.49) випливає:

$$\varepsilon^c - \varepsilon_c^c = -(b - a) \ln\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{pc}}\right) = -c \ln\left(\frac{\tau_c + t'}{\tau_c}\right). \quad (3.54)$$

Таким чином, отримано так звану лінію нормальної консолідації при ступінчастому завантаженні при $\sigma_p = \sigma'$. Отже ввівши $t' = \tau - t_c$ та $\sigma_p = \sigma'$ в рівняння (3.51) отримаємо:

$$(b - a) \ln\left(\frac{\sigma'}{\sigma_{pc}}\right) = c \ln\left(\frac{\tau_c + \tau_c}{\tau_c}\right) \text{ при } OCR = 1. \quad (3.55)$$

Звідки:

$$\tau_c = \tau \left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma'}\right)^{\frac{b-a}{c}}. \quad (3.56)$$

Тоді може бути сформульовано диференційне рівняння повзучості:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^c = -a \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} - \frac{c}{\tau_c + t'} = -a \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} - \frac{c}{\tau_c} \left(\frac{\sigma_{pc}}{\sigma_p}\right)^{\frac{b-a}{c}}. \quad (3.57)$$

Після елементарних перетворень можна отримати:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}^e + \dot{\varepsilon}^c = -a \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} - \frac{c}{\tau} \left(\frac{\sigma'}{\sigma_p} \right)^{\frac{b-a}{c}}. \quad (3.58)$$

3.4 Тривимірна модель консолідації

Для розширення одновимірної моделі для загальних напружено-деформованих станів, відомі інваріанти напружень приймаються для ізотропних напружень p та девіаторного напруження q . Ці інваріанти використовуються для визначення нової одиниці напруження p^{eq} :

$$p^{eq} = p' + \frac{q^2}{M^2(p' + c \cdot ctg \varphi)}, \quad (3.59)$$

де c – зчеплення; φ – кут внутрішнього тертя; q – напруження; p' – преконсолідаційне напруження; p^{eq} – еквівалентне преконсолідаційне ізотропне напруження; M – параметр ґрунту, так звана «лінія критичного стану», представлена на рис.2.4. Параметр M можна визначити за формулою:

$$M = \frac{6 \sin \varphi_{cv}}{3 - \sin \varphi_{cv}}, \quad (3.60)$$

де φ_{cv} - кут внутрішнього тертя критичного стану.

Еквівалентне напруження зсуву визначається за формулою:

$$q = \sqrt{\frac{1}{2} \left((\sigma'_{xx} - \sigma'_{yy})^2 + (\sigma'_{yy} - \sigma'_{zz})^2 + (\sigma'_{zz} - \sigma'_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \right)}. \quad (3.61)$$

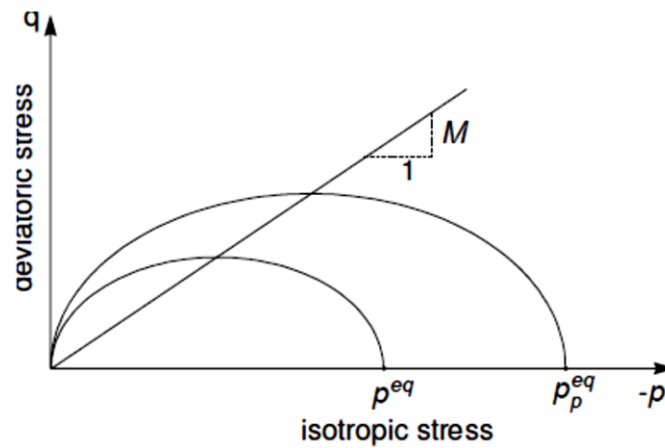


Рис 3.4 Діаграма еліпсів p^{eq} еквівалентного преконсолідаційного ізоотропного напруження

При нормально консолидованому стані напружень та деформацій $\sigma'_2 = \sigma'_3 = K_0^{nc} \sigma'_1$, де K_0^{nc} – коефіцієнт бічного (латерального) напруження при нормальній консолидації. Тоді отримаємо:

$$p^{eq} = \sigma'_1 \left[\frac{1 + 2K_0^{nc}}{3} + \frac{3(1 - K_0^{nc})^2}{M^2(1 + 2K_0^{nc})} \right]; \quad (3.62)$$

$$p_p^{eq} = \sigma_p \left[\frac{1 + 2K_0^{nc}}{3} + \frac{3(1 - K_0^{nc})^2}{M^2(1 + 2K_0^{nc})} \right],$$

де p_p^{eq} – узагальнене преконсолідаційне напруження, пропорційне до одновимірного напруження. Підставляючи в рівняння (2.55) p^{eq} і p_p^{eq} та ε_v замість ε отримаємо

$$-\dot{\varepsilon}_v^c = \frac{c}{\tau} \left(\frac{p^{eq}}{p_p^{eq}} \right)^{\frac{b-a}{c}}, \quad (3.63)$$

де

$$p_p^{eq} = p_{p0}^{eq} \exp \left(\frac{-\varepsilon_v^c}{b-a} \right). \quad (3.64)$$

Замість параметрів a , b і c в одомірній моделі введемо параметри, які співвідносяться наступним чином:

$$\mu^* = c; \lambda^* = b; \kappa^* \approx 2a. \quad (3.65)$$

Використовуючи нові параметри μ^* , κ^* і λ^* рівняння (3.60) і (3.61) матиме вигляд:

$$-\dot{\varepsilon}_v^c = \frac{\mu^*}{\tau} \left(\frac{p^{eq}}{p_p^{eq}} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}}, \quad (3.67)$$

$$p_p^{eq} = p_{p0}^{eq} \exp\left(\frac{-\varepsilon_v^c}{\lambda^* - \kappa^*}\right). \quad (3.68)$$

Параметри μ^* , κ^* , λ^* можуть бути отримані з ізотропного випробування на стиск і одометричного випробування. При побудові логарифму напруження в залежності від деформації, ділянка може бути апроксимована двома прямими лініями. Нахил лінії нормальної консолідації дає модифікований коефіцієнт компресії λ^* , а нахил лінії розвантаження (або повторного стиснення) може бути використано для обчислення модифікованого коефіцієнта набухання κ^* .

Для введення загальних деформацій повзучості, ми приймаємо точку зору, що деформація повзучості залежить від часу пластичної деформація. Таким чином, логічно припустити закон потоку для швидкості деформації повзучості, як звичайно, робиться в теорії пластичності. Для розробки такого закону потоку, зручно прийняти позначення вектора i з урахуванням основних напрямків:

$$\begin{aligned} \underline{\sigma} &= (\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3)^T; \\ \underline{\varepsilon} &= (\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3)^T, \end{aligned} \quad (3.69)$$

де T використовується для позначення переміщення.

Подібно до одновимірної моделі в тривимірній моделі присутні і пружні деформації і деформації повзучості. Використовуючи закон Гука для пружної складової, і правило потоку для складової повзучості, отримуємо:

$$\underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{\dot{\varepsilon}}^e + \underline{\dot{\varepsilon}}^c = \underline{\underline{D}}^{-1} \underline{\dot{\sigma}}' + \lambda \frac{\partial g^c}{\partial \underline{\sigma}'}, \quad (3.70)$$

де матриця пружності і пружна потенційна функції визначаються наступним чином:

$$\underline{\underline{D}}^{-1} = \frac{1}{E_{ur}} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{ur} & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & 1 & -\nu_{ur} \\ -\nu_{ur} & -\nu_{ur} & 1 \end{bmatrix}, g^c = p^{eq}, \quad (3.71)$$

де ν_{ur} – коефіцієнт Пуассона; E_{ur} – модуль пружності.

З попереднього рівняння випливає

$$\dot{\varepsilon}_v^c = \dot{\varepsilon}_1^c + \dot{\varepsilon}_2^c + \dot{\varepsilon}_3^c = \lambda \left(\frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_{1}} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_{2}} + \frac{\partial p^{eq}}{\partial \sigma'_{3}} \right) = \lambda \cdot \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} = \lambda \cdot \alpha. \quad (3.72)$$

Причому $\alpha = \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'}$, з рівнянь (2.63), (2.64) і (2.66) отримаємо

$$\underline{\dot{\varepsilon}} = \underline{\underline{D}}^{-1} \underline{\dot{\sigma}}' + \frac{\dot{\varepsilon}_v^c}{\alpha} \frac{\partial p^{eq}}{\partial p'} = \underline{\underline{D}}^{-1} \underline{\dot{\sigma}}' - \frac{1\mu^*}{\alpha\tau} \left(\frac{p^{eq}}{p_p^{eq}} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \underline{\sigma}'}, \quad (3.73)$$

де

$$p_p^{eq} = p_{p0}^{eq} \exp\left(\frac{-\varepsilon_v^c}{\lambda^* - \kappa^*}\right). \quad (3.74)$$

З останнього рівняння можна отримати ε_v^c :

$$-\varepsilon_v^c = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left(\frac{p_p^{eq}}{p_{p0}^{eq}} \right). \quad (3.75)$$

Коефіцієнт M з урахуванням вищенаведених формул можна визначити наступним чином:

$$M = 3 \sqrt{\frac{\frac{(1 - K_0^{nc})^2}{(1 + 2K_0^{nc})^2} + \frac{(1 - K_0^{nc})(1 - 2\nu_{ur}) \left(\frac{\lambda^*}{\kappa^*} - 1 \right)}{(1 + 2K_0^{nc})(1 - 2\nu_{ur}) \frac{\lambda^*}{\kappa^*} - (1 - K_0^{nc})(1 + \nu_{ur})}}{}}}. \quad (3.76)$$

Коефіцієнт Пуассона для завантаження нормально консолидованих матеріалів, грає незначну роль, але він є важливим в задачах розвантаження. Наприклад, для вивантаження в одновимірному випробуванні на стиск (одометричному випробуванні), співвідношення відносно невеликого коефіцієнта Пуассона призведе до невеликого зменшення бічного стресу та зменшення вертикального напруження. У результаті, співвідношення горизонтального і вертикального напруження зросте. Отже, коефіцієнт Пуассона не повинен бути заснований на нормально консолидованому значенні K_0^{nc} для, а повинен базуватися на співвідношенні приросту горизонтального напруження до приросту вертикального напруження при одометричному розвантаженні й перевантаженні:

$$\frac{\nu_{ur}}{1 - \nu_{ur}} = \frac{\Delta\sigma_{xx}}{\Delta\sigma_{yy}}. \quad (3.77)$$

Щоб отримати тривимірну модель для пружних деформацій треба визначити модуль пружності E_{ur} як залежну від напруження тангенційну міцність:

$$E_{ur} = 3(1 - 2\nu_{ur})K_{ur} = -3(1 - 2\nu_{ur})\frac{p'}{\kappa^*}. \quad (3.78)$$

Об'ємний модуль K_{ur} залежить від напруження згідно закону:

$$K_{ur} = -(p + c \cdot ctg\varphi)' / \kappa^*. \quad (3.79)$$

Тоді об'ємна пружна деформація:

$$\dot{\varepsilon}_v^e = \frac{\dot{p}'}{K_{ur}} = -\kappa^* \frac{\dot{p}'}{p' + c \cdot ctg\varphi} \quad (3.80)$$

або інтегруючи

$$-\varepsilon_v^e = \kappa^* \ln \left(\frac{p' + c \cdot ctg\varphi}{p_0' + c \cdot ctg\varphi} \right). \quad (3.81)$$

Таким чином, в тривимірній моделі пружна деформація залежить від ефективного напруження p' , а не від головного напруження σ' як в одновимірній моделі. Однак ефективне напруження може бути перетворене в головне напруження. Для одновимірного стиснення при нормальній лінії консолідації $\frac{p'}{p_0'} = \frac{\sigma'}{\sigma_0'}$. В результаті можна отримати простий закон:

$$-\varepsilon_v^c = \kappa^* \ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'} \right), \quad (3.82)$$

причому для одновимірної моделі:

$$-\varepsilon_v^c = a \ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'} \right). \quad (3.83)$$

Для надконсолідованих напружено-деформованих станів використовується наступне рівняння:

$$\frac{\dot{p}'}{p'} = \frac{1 + \nu_{ur}}{1 - \nu_{ur}} \frac{1}{1 + 2K_0} \cdot \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} \quad (3.84)$$

з рівняння випливає, що

$$-\dot{\varepsilon}_v^e = \kappa^* \frac{\dot{p}'}{p'} = \frac{1 + \nu_{ur}}{1 - \nu_{ur}} \frac{\kappa^*}{1 + 2K_0} \cdot \frac{\dot{\sigma}'}{\sigma'} \quad (3.85)$$

де K_0 залежить значною мірою від ступеню надконсолідації. Для більшості ситуацій доцільно вважати $K_0 \approx 1$, $\nu_{ur} \approx 0,2$. Тоді

$$-2\dot{\varepsilon}_v^e = \kappa^* \ln \left(\frac{\sigma'}{\sigma_0'} \right). \quad (3.86)$$

3.5. Модель Кулона-Мора для моделювання ґрунтів основи полігона ТПВ

Модель Кулона-Мора є продовженням закону тертя Кулона для загальних напружених станів. Насправді, ця умова гарантує, що закон тертя Кулона підходить до будь-яких площин в матеріальному елементі. Критерій міцності Мора-Кулона зазвичай використовується для аналізу несучої здатності ґрунтових масивів. При навантаженні ґрунти працюють переважно на зсув по поверхні з найменшою несучою здатністю. Тому зсувна міцність є визначальною міцністю. характеристикою для ґрунтів. Руйнування реалізується в той момент, коли величина зсувного (дотичного) напруження досягає межі міцності ґрунту на зсув. Тому зв'язок між нормальними напруженнями і дотичними напруженнями є критерієм міцності для ґрунтів.

Пластичність пов'язана з розвитком незворотних деформацій. Для того щоб оцінити, чи відбуваються чи ні пластичні деформації, вводиться функція f – поверхня плинності, що залежить від напруження і деформації. Пластичні поверхні пов'язані з умовою $f = 0$. Ця умова часто може бути представлена у вигляді поверхні в просторі основних напружень. Абсолютно-пластична модель є конститутивною моделлю з фіксованою поверхнею плинності, тобто поверхня плинності, який повністю визначається параметрами моделі і на яку не впливає деформація. Для напружених станів, представлених точками всередині поверхні плинності, поведінка є пружною і всі деформації є оборотними.

Деформації та їхні швидкості розділяються на пружну та пластичну складову:

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \underline{\underline{\varepsilon}}^e + \underline{\underline{\varepsilon}}^p; \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p. \quad (3.87)$$

Закон Гука використовується щоб поєднати швидкість напруження зі швидкістю пружних деформацій і з врахуванням (2.81) має вигляд.

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}'}} = \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^e = \underline{\underline{D}}^e (\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\varepsilon}}}^p). \quad (3.88)$$

Відповідно до класичної теорії пластичності [147], швидкості пластичних деформації пропорційні до похідної функції плинності по відношенню до напруження. Це означає, що швидкості пластичних деформації можуть бути представлені у вигляді векторів, перпендикулярних поверхні плинності. Цю класичну форму теорії називають пов'язана пластичність. Тим не менш, для функцій типу Кулона-Мора, теорія пластичності переоцінює дилатансію. Таким чином, на додаток до функції плинності, вводиться пластична потенційна функція g . Загалом, швидкості пластичних деформації записуються в наступному вигляді:

$$\underline{\dot{\varepsilon}}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'}, \quad (3.89)$$

де λ – пластичний множник. У випадку виключно пружної поведінки $\lambda = 0$, у випадку пластичної поведінки λ є позитивною:

$$\begin{aligned} \lambda = 0 \text{ для } f < 0 \text{ або } \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \underline{\dot{\varepsilon}}^e &\leq 0; \\ \lambda > 0 \text{ для } f = 0 \text{ або } \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \underline{\dot{\varepsilon}}^e &> 0. \end{aligned} \quad (3.90)$$

Ці рівняння можуть бути використані для отримання наступного відношення між швидкістю ефективного напруження і швидкістю деформацій для пружної ідеально-пластичної поведінки [148, 149]:

$$\underline{\dot{\sigma}}' = \left(\underline{D}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \cdot \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \right) \underline{\dot{\varepsilon}}, \quad (3.91)$$

де

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'}$$

Якщо поведінка матеріалу пружна, величина α дорівнює нулю, у той час як для пластичної величина α дорівнює одиниці.

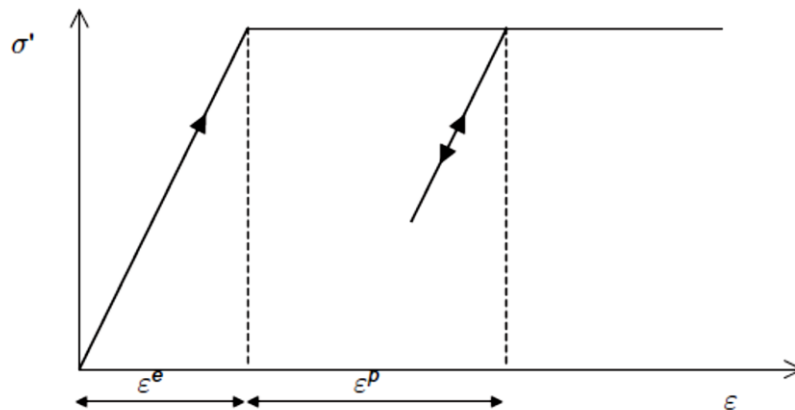


Рис. 3.5 Основний вигляд пружної ідеально пластичної моделі

Викладена вище теорія пластичності обмежені, щоб згладити поверхні плинності і не охоплює контури мультиповерхні плинності, як в моделі Кулона-Мора. Для такої поверхні плинності теорія пластичності була продовжена [151] та іншими, щоб врахувати вершини потоку за участю двох або більше пластичних потенційних функцій:

$$\underline{\dot{\epsilon}}^p = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma}'} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma}'} + \dots \quad (3.92)$$

Так само, кілька квазінезалежних функції плинності (f_1, f_2, \dots) використовуються для визначення величини множників ($\lambda_1, \lambda_2 \dots$).

Повна умова плинності Кулона-Мора складається з шести функцій (поверхонь плинності f), які формулюються наступним чином:

$$\begin{aligned} f_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_{2} - \sigma'_{3}) + \frac{1}{2}(\sigma'_{2} + \sigma'_{3}) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_{3} - \sigma'_{2}) + \frac{1}{2}(\sigma'_{3} + \sigma'_{2}) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_{3} - \sigma'_{1}) + \frac{1}{2}(\sigma'_{3} + \sigma'_{1}) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_{1} - \sigma'_{3}) + \frac{1}{2}(\sigma'_{1} + \sigma'_{3}) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_{1} - \sigma'_{2}) + \frac{1}{2}(\sigma'_{1} + \sigma'_{2}) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0; \\ f_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_{2} - \sigma'_{1}) + \frac{1}{2}(\sigma'_{2} + \sigma'_{1}) \sin \varphi - c \cos \varphi \leq 0, \end{aligned} \quad (3.93)$$

де $\sigma'_{1}, \sigma'_{2}, \sigma'_{3}$ – нормальні напруження.

Умова $f_j = 0$ для всіх поверхонь плинності разом являє собою гексагональний конус в просторі головних напружень і представлена на рис. 3.6.

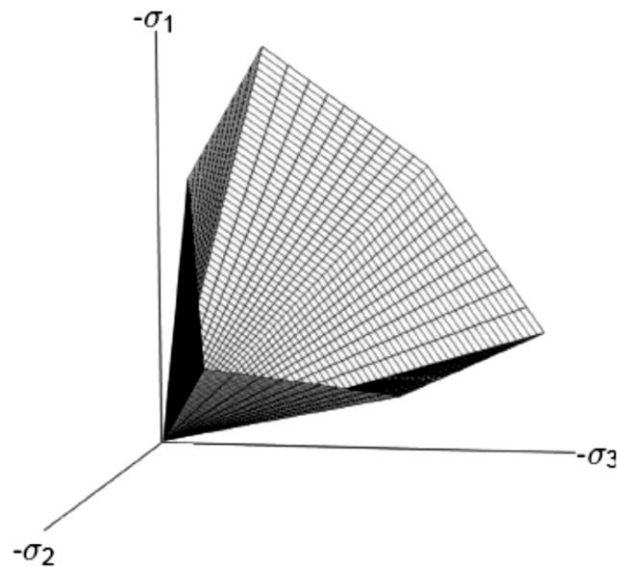


Рис. 3.6 Поверхні Кулона-Мора у просторі головних напружень

На додаток до поверхонь плинності, модель Кулона-Мора представлена шістьма пластичними потенційними функціями g :

$$\begin{aligned}
 g_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \psi; \\
 g_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin \psi; \\
 g_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \psi; \\
 g_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \psi; \\
 g_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \psi; \\
 g_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin \psi.
 \end{aligned}
 \tag{3.94}$$

Кут дилатансії ψ може знадобитися для моделювання позитивних пластичних об'ємних деформації (дилатансних), що спостерігаються у щільних ґрунтах.

Кут внутрішнього тертя φ використовується для моделювання ефективного тертя в ґрунті, в поєднанні з ефективним зчепленням c' (рис. 3.7).

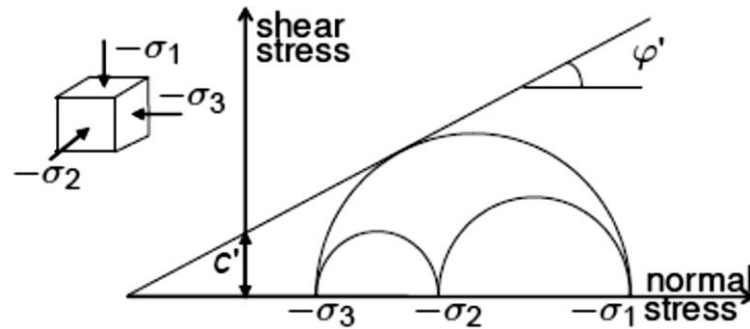


Рис. 3.7 Кола Кулона-Мора з використанням параметрів ефективних напружень

Модуль зсуву G , згідно закону Гука залежить від модулю Юнга E наступним чином:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (3.95)$$

Висновки до розділу 3

1. Проведено обґрунтування математичної моделі для розрахунку напружено-деформованого стану зв'язаної системи «полігон ТПВ – ґрунтова основа».
2. Зроблено математичну постановку задачі про напружено-деформований стан зв'язаної системи «полігон ТПВ – ґрунтова основа»
3. Наведено основні характеристики моделі SSC для моделювання полігону ТПВ із застосуванням диференційного закону для одновимірної повзучості.
4. Обґрунтовано можливість застосування узагальненого закону Кулона-Мора для моделювання напружено-деформованого стану ґрунтів в основі полігону ТПВ.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОЛІГОНУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З ВРАХУВАННЯМ НАЙБІЛЬШ СУТТЄВИХ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ

4.1 Дослідження осадки полігону твердих побутових відходів з врахуванням різних ґрунтових основ

Для прогнозування осадки закритого полігону ТПВ було проведено математичне моделювання. Покриваючий і підстилаючий шари ґрунту описувалися моделлю Кулона–Мора, тіло полігону моделювалося слабким ґрунтом з врахуванням повзучості, використовувалася модель SSC.

Гідродинамічні аспекти проблеми полягають в врахуванні фільтраційних сил, що діють на скелет ґрунтового середовища, і параметрів взаємодії рідкої і твердої фаз ґрунту (тиску, напруження і пористості) у процесі консолідації. У припущенні безвихрової течії фільтраційного потоку і розподілу сил опору рівномірно по перерізу елемента використовується узагальнений закон Дарсі і рівняння нерозривності. Приймається, що стисливість скелету і порової рідини мала, що призводить до лінійної залежності пористості ґрунту від тиску. Взаємодія скелету ґрунту і рідини характеризується об'ємною силою, пропорційною градієнту напору. Рівняння доповнюються початковими і граничними умовами.

Для чисельного розв'язку задачі використовувався метод скінченних елементів. Розрахункова область розбивалася на 265 скінчених елементів (рис. 4.1).

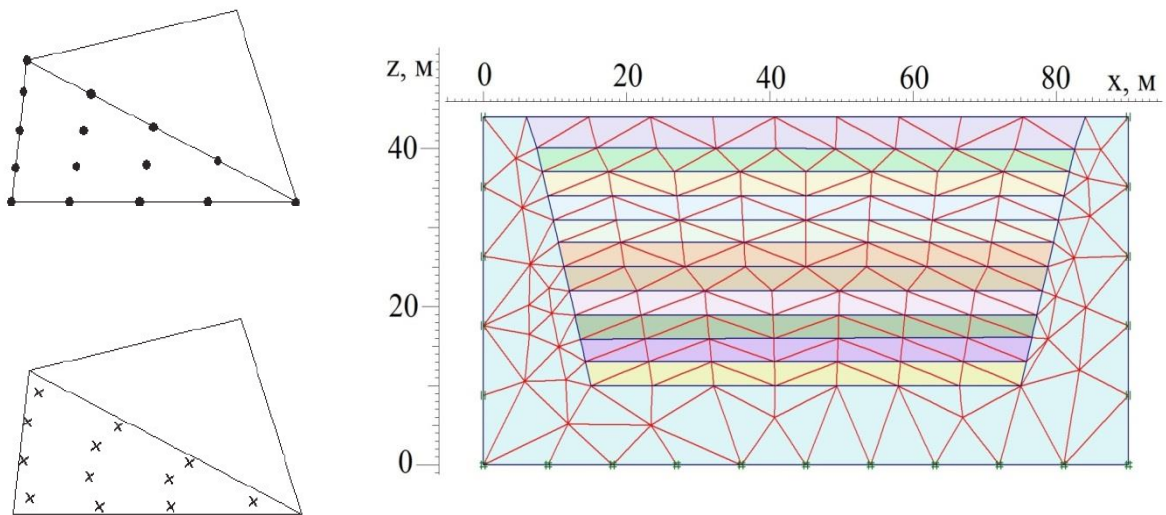


Рис. 4.1 Розрахункова область полігону і трикутні елементи

Проведено дослідження впливу підстиляючого 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° .

Осадка визначалася з урахуванням покрокового навантаження полігону через 30 років після його закриття. Параметри підстиляючих ґрунтів представлені в табл. 4.1.

Параметри відходів представлені в табл. 4.2 (шар №1 – верхній шар, шар №10 – перший, що лежить в основі полігону).

Таблиця 4.1 – Фізико–механічні параметри ґрунтів

Параметр	Ґрунт		
	Пісок	Суглинок	Глина
Модуль деформації E_{ref} , (кН/м ³)	18000	10000	9000
Коефіцієнт Пуассона ν , (од.)	0,34	0,36	0,37
Питома вага ґрунту γ_{unsat} , (кН/м ³)	18,0	13	19,0
Питома вага водонасиченого ґрунту γ_{sat} , (кН/м ³)	20,7	14,6	21,8
Коефіцієнт фільтрації в горизонтальному напрямку k_x , (од.)	0,5	0,006	0,004
Коефіцієнт фільтрації в вертикальному напрямку k_y , (од.)	0,5	0,006	0,004
Модуль деформації E , (МПа)	50	33	28
Питоме зчеплення c , (кПа)	3	34	81
Кут внутрішнього тертя φ , (град)	31	14	13

Таблиця 4.2 – Фізико–механічні параметри відходів

Параметр	Величина
Питома вага γ_{unsat} , (кН/м ³)	7,504
Питома вага водонасиченого ґрунту γ_{sat} , (кН/м ³)	10,0
Питоме зчеплення c , (кПа)	25
Кут внутрішнього тертя φ , (град)	20
Початковий коефіцієнт пористості, e_0 , (од.)	0,4268
Коефіцієнт компресії, C_c , (од.)	0,3987
Коефіцієнт набухання, C_s , (од.)	0,0394
Коефіцієнт повзучості, C_α , (од.) :	
шар №1	0,0615
шар №2	0,0474
шар №3	0,0448
шар №4	0,0429
шар №5	0,0414
шар №6	0,0402
шар №7	0,0391
шар №8	0,0382
шар №9	0,0374
шар №10	0,0367

Деформована сітка полігону з піщаним ґрунтом основи представлена на рис. 4.2.

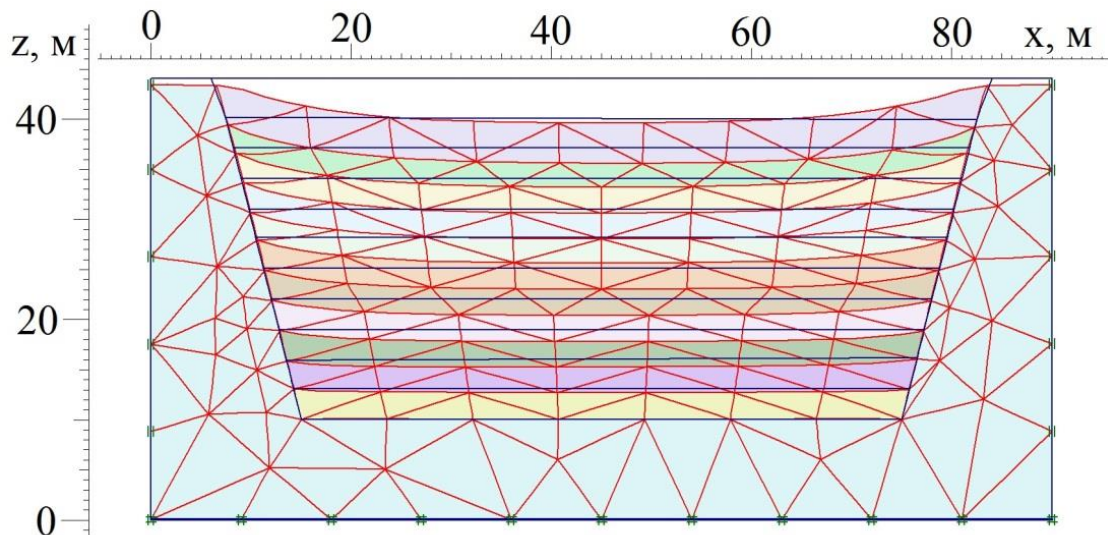


Рис. 4.2 Деформована сітка полігону з піщаним ґрунтом основи

Результати чисельних розрахунків наведено на рис. 4.3-4.6. Вертикальні деформації полігону с піщаним ґрунтом основи представлені на рис. 4.3. З

аналізу рис. Видно, що найбільша деформація спостерігається у верхніх шарах полігону і складає 4,95 м.

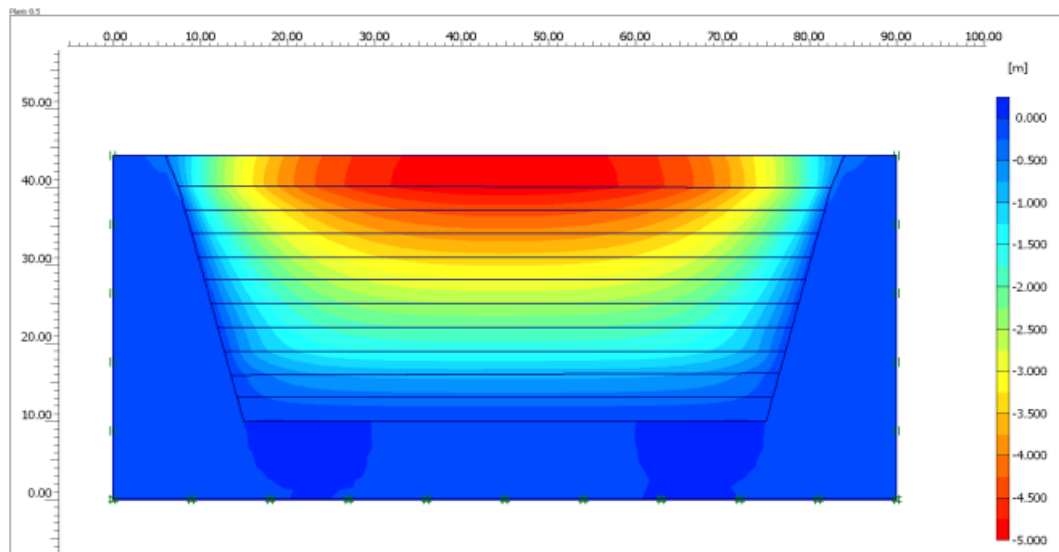


Рис. 4.3 Вертикальні деформації полігону з піщаним ґрунтом основи

Встановлено, що якщо підстиляючий ґрунт – глина (рис. 4.4), то можна спостерігати, що досягаються значно менші деформації (3,83 м). Видно, що найбільша деформація спостерігається у верхніх шарах полігону і складає 4,95 м.

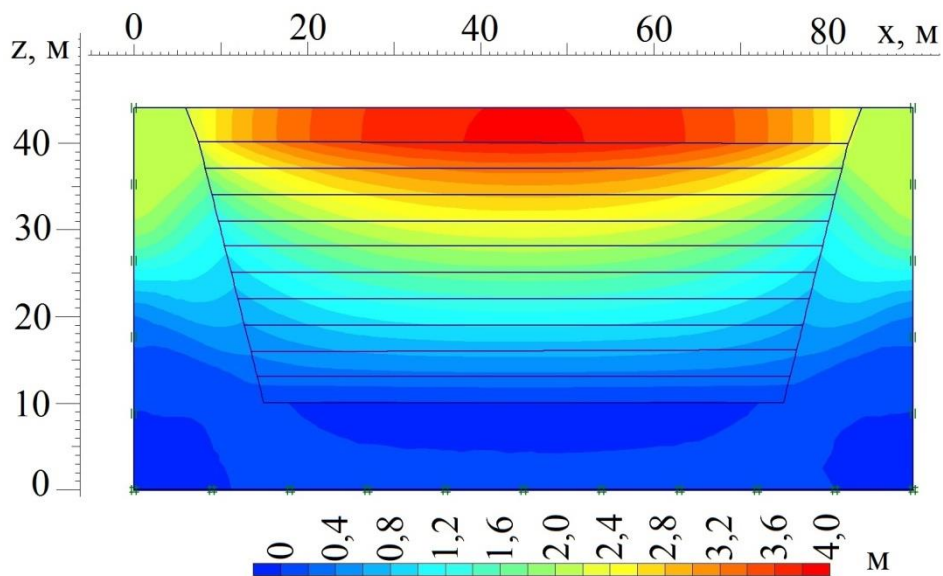


Рис. 4.4 Вертикальні деформації полігону з глинистим ґрунтом основи

Деформована сітка полігону з суглинком в якості ґрунту основи представлена на рис. 4.5. Вертикальні деформації полігону з суглинком в якості основи представлені на рис. 4.6. Максимальна вертикальна деформація склала 4,47 м.

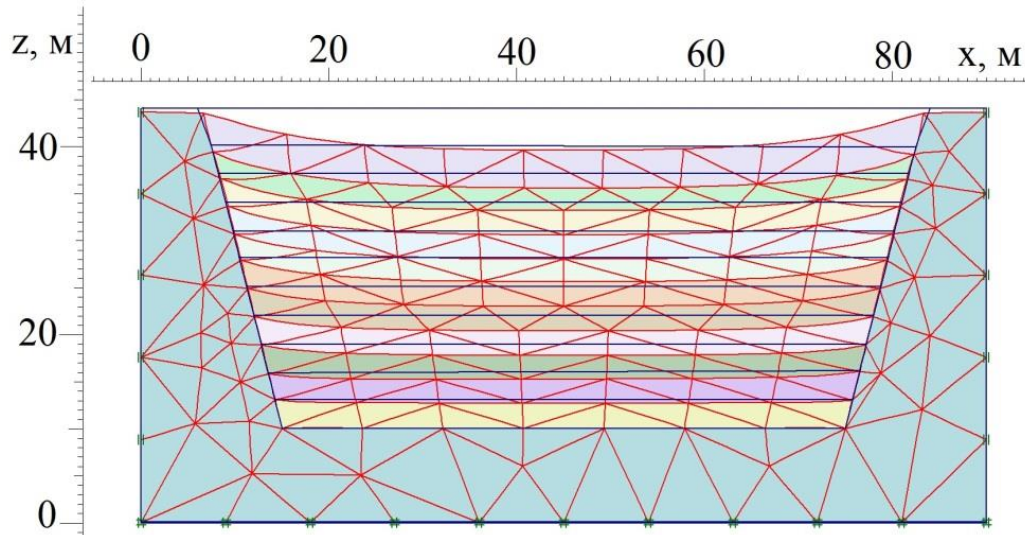


Рис. 4.5 Деформована сітка полігону з суглинковим ґрунтом основи

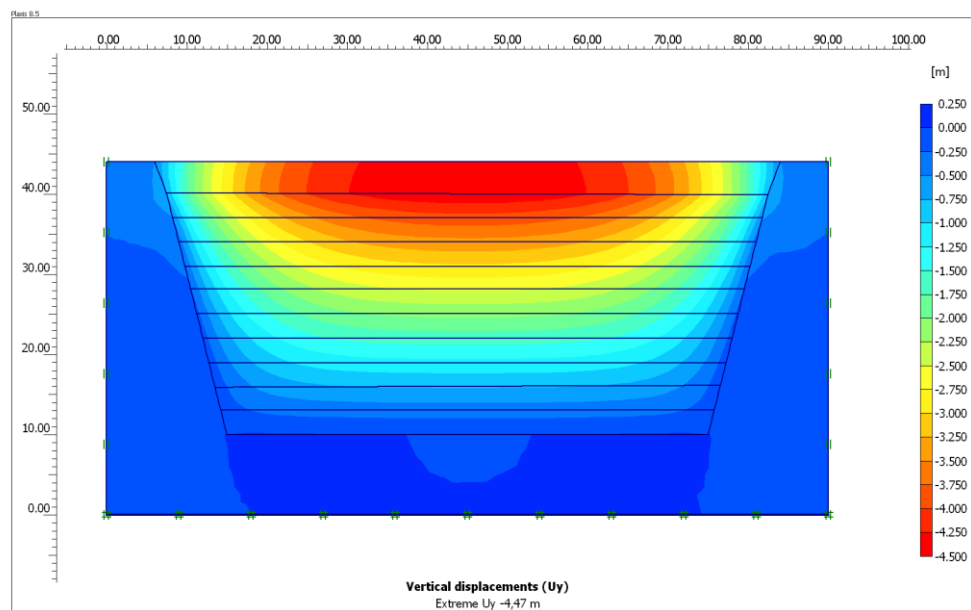


Рис. 4.6 Вертикальні деформації полігону з суглинистим ґрунтом основи

В результаті чисельного розрахунку встановлено, що максимальна вертикальна деформація для полігону з піском в якості ґрунту основи склала 4,95 м. В результаті проведених досліджень встановлено, що при однакових характеристиках відходів осадка полігону з глинистим ґрунтом основи на 23%

менше, ніж у полігону з піщаним ґрунтом основи і на 14% менше ніж з суглинком, в якості ґрунту основи полігона. Це пояснюється тим, що чим більш пористий і менш щільний ґрунт основи, тим більша його осадка і, відповідно, більша осадка полігону.

4.2. Вплив нахилу кута схилу на осадку полігону

Далі визначався вплив нахилу кута схилу полігону. Дослідження для кута 75° наведено вище, для порівняння проведено моделювання для кутів нахилу схилів полігону 30° і 60° . Лінійні розміри полігонів з різними кутами нахилу схилів обирались таким чином, щоб об'єм тіла полігона залишався постійним. Деформована розрахункова область полігону з глинистою основою і з кутом нахилу тіла полігону, рівному 60° , представлена на рис. 4.7.

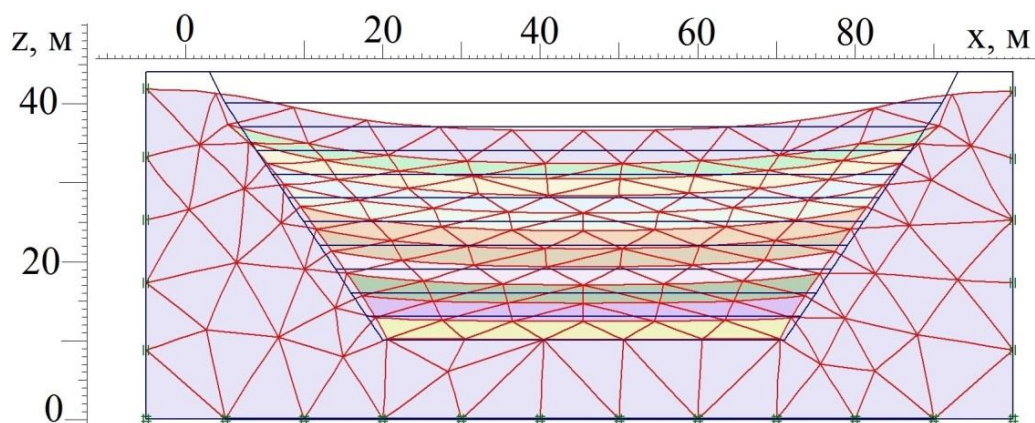


Рис. 4.7 Деформована розрахункова область полігону з глинистим підстилаючим ґрунтом (кут нахилу схилу полігону 60°)

З аналізу чисельних розрахунків випливає, що вертикальні деформації полігону склали 3,8 м.

В результаті чисельного розрахунку встановлено, що при такому ж куті нахилу, максимальна вертикальна деформація складала: для полігону з піском – 4,34 м (рис. 4.8), з суглинком – 4,27 м (рис. 4.9). З порівняння цих результатів слідує, що величина кута нахилу тіла полігону істотно впливає на вертикальну

деформацію: при зменшенні кута з 75° до 60° деформація зменшилась на 1-12% в залежності від типу ґрунту основи.

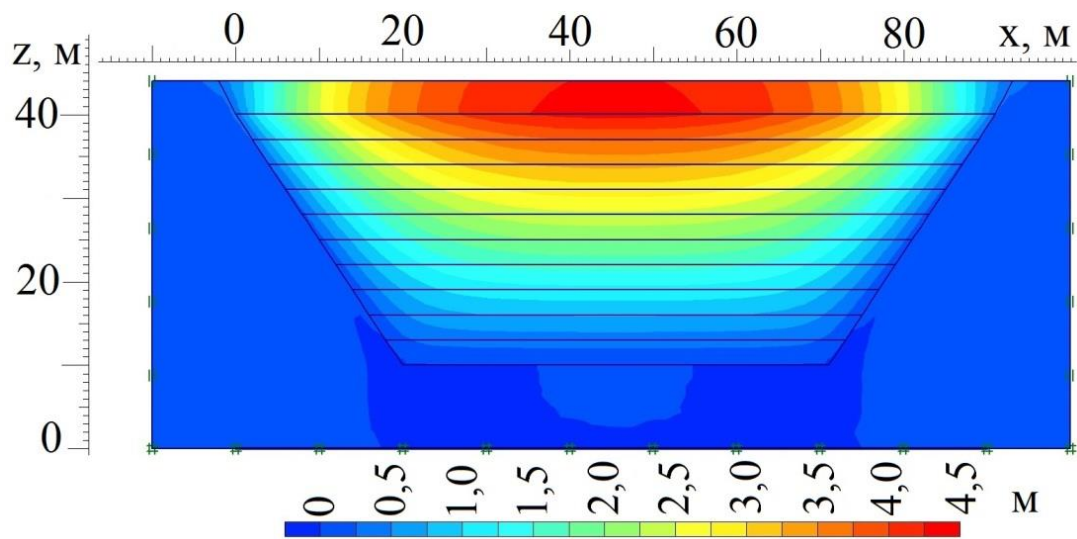


Рис. 4.8 Вертикальні деформації полігону з піщаним підстиляючим ґрунтом (кут нахилу схилу полігону 60°)

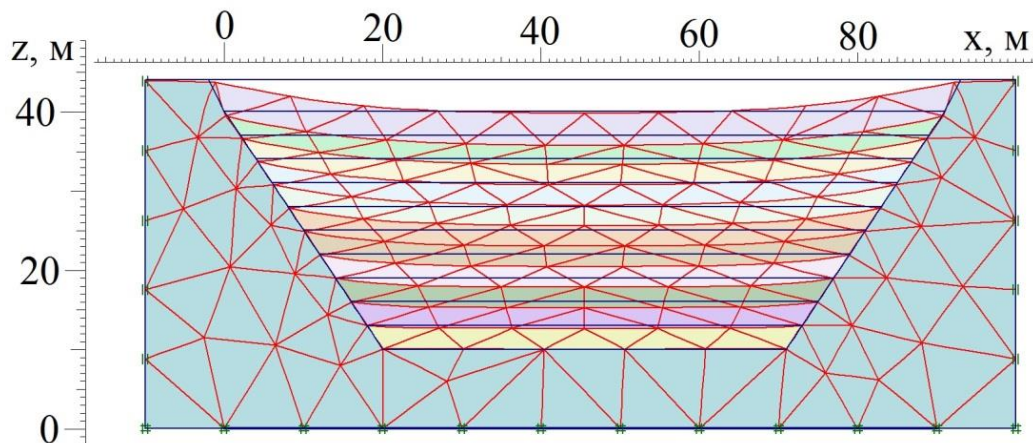


Рис. 4.9 Деформована розрахункова область полігону з суглинком в якості підстиляючого ґрунту (кут нахилу схилу полігону 60°)

Для встановлення впливу кута нахилу схилу полігону на його осадку, було проведено моделювання для полігону з кутом 30° . В результаті проведених досліджень встановлено, що різниця між величиною деформацій значно скоротилася. Так, якщо підстиляючий шар – пісок (рис. 4.10), то можна спостерігати, що досягаються вертикальні деформації (3,94 м), при суглинку –

3,89 м (рис. 4.11). При глинистому підстилаючому шарі (рис. 4.12) вертикальні деформації – найменші порівняно з двома попередніми варіантами (3,63 м).

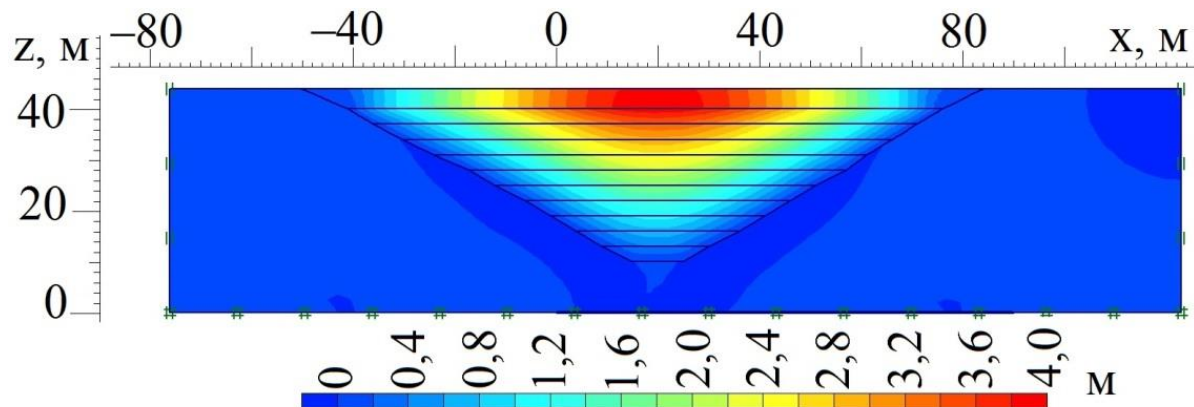


Рис. 4.10 Вертикальні деформації полігону з піщаним підстилаючим ґрунтом (кут нахилу схилу полігону 30°)

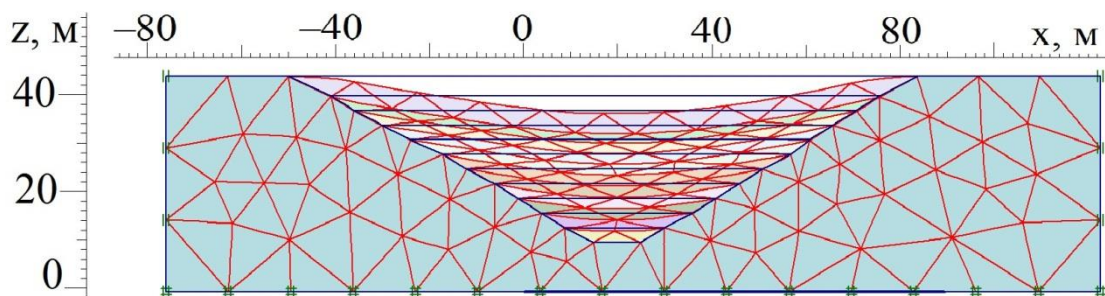


Рис. 4.11 Деформована розрахункова область полігону з суглинком, в якості підстилаючого ґрунту (кут нахилу схилу полігону 30°)

Зі зменшенням кута нахилу полігону, зменшується вплив підстилаючого ґрунту на осадку і різниця між величинами деформацій при різних ґрунтових основах знижується.

Порівняння величини осадок показує, що при зменшенні кута з 60° до 30° деформація зменшилась на 5-9% в залежності від типу ґрунту основи.

При зменшенні кута з 75° до 30° зменшення вертикальних деформацій було найбільшим для піску (20,4%), в той час, як ця величина становить 13% для суглинку і 5,22% для глини.

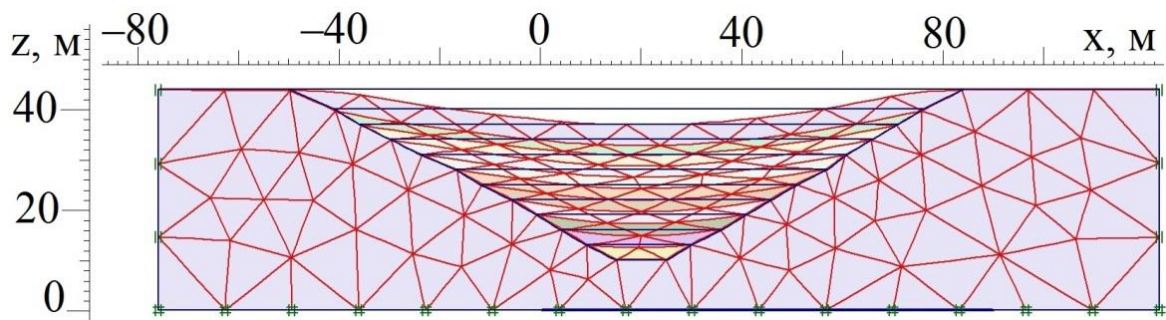


Рис. 4.12 Деформована розрахункова область полігону з глинистим підстиляючим ґрунтом (кут нахилу схилу полігону 30°)

На рис. 4.13 представлена залежність осадки полігону ТПВ від величини кута нахилу схилу полігону для трьох типів підстиляючого ґрунту.

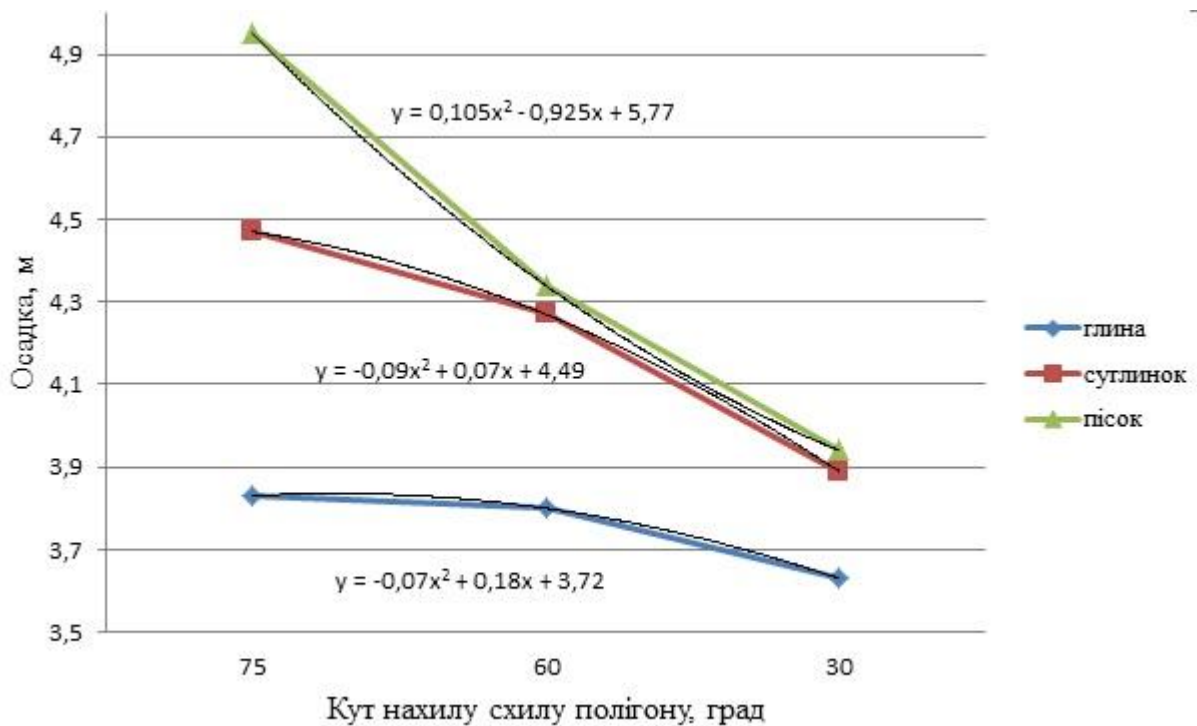


Рис. 4.13 Залежність осадки від кута нахилу схилів на полігоні ТПВ

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

для глини

$$y = -0,07x^2 + 0,18x + 3,72, \quad (4.1)$$

для суглинку

$$y = -0,09x^2 + 0,07x + 4,49; \quad (4.2)$$

для піску

$$y = 0,105x^2 - 0,925x + 5,77. \quad (4.3)$$

Ці залежності дають можливість визначити осадку полігонів ТПВ для проміжних значень кутів нахилу.

4.3 Вплив форми полігону на його осадку

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 підстиляючого ґрунту на величину деформацій. Так, якщо підстиляючий шар – пісок (рис. 4.14), то можна спостерігати, що досягаються вертикальні деформації (5,78 м), при суглинку – 5,74 м. При глинистому підстиляючому шарі (рис. 4.15), вертикальні деформації – найменші по порівнянню з двома попередніми варіантами (5,62 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.

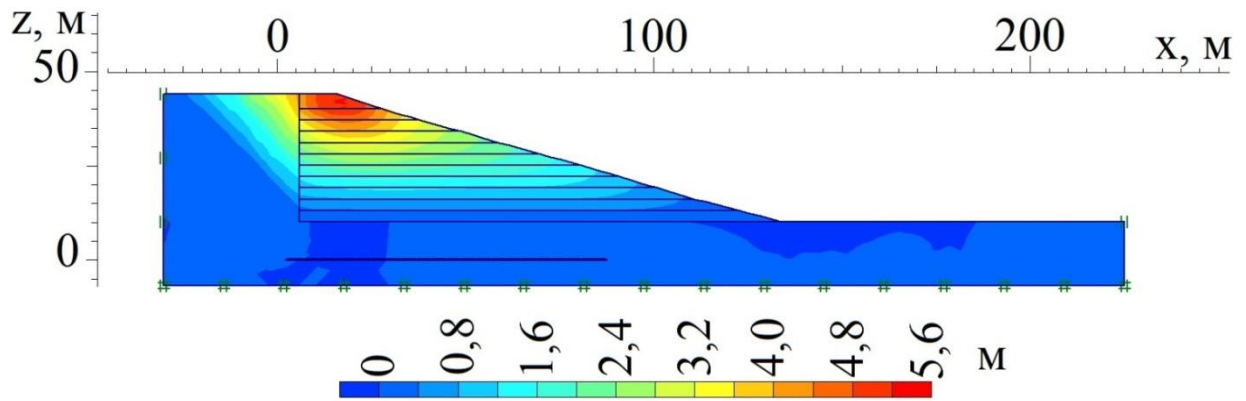


Рис. 4.14 Вертикальні деформації полігону з піщаною основою

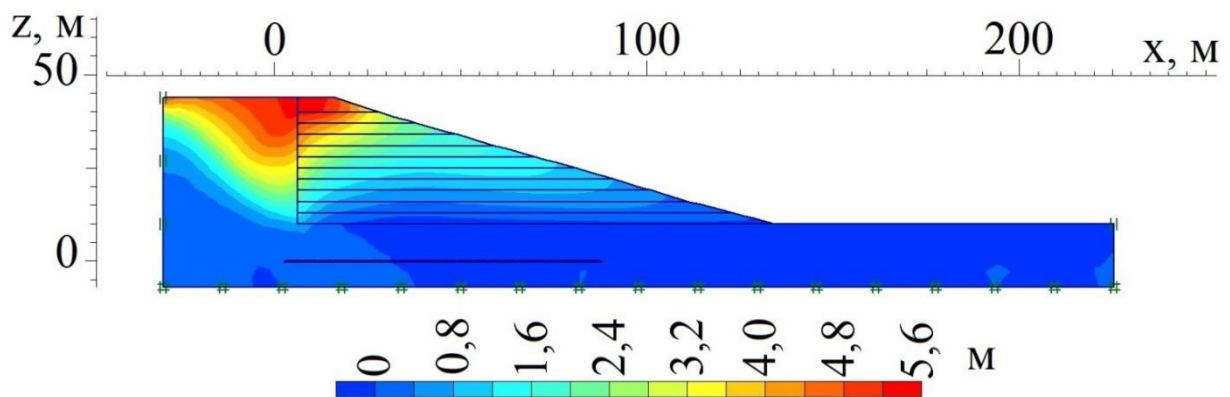


Рис. 4.15 Вертикальні деформації полігону з глинистою основою

При однакових параметрах тіла полігону, постійній товщині підстиляючого 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 суглинку 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 підстиляючого ґрунту: найбільша для глинистої основи, а найменша для піщаної.

4.4 Вплив шаруватості ґрунтів основи полігону на його осадку

Було проведено моделювання осідань полігону при шаруватих ґрунтах основи. В основі полігону, що моделюється, знаходяться глина і суглинок. Було

проведено моделювання трьох варіантів товщини глинистого шару: 2 м, 10 м і 15 м. Товщина суглинкових шару була постійною – 10 м.

Деформована розрахункова область полігону з товщиною глинистого шару основи, рівною 2 м, представлена на рис. 4.16. Вертикальні деформації полігону представлені на рис. 4.17. В результаті чисельного розрахунку встановлено, що максимальна вертикальна деформація склала 3,6 м.

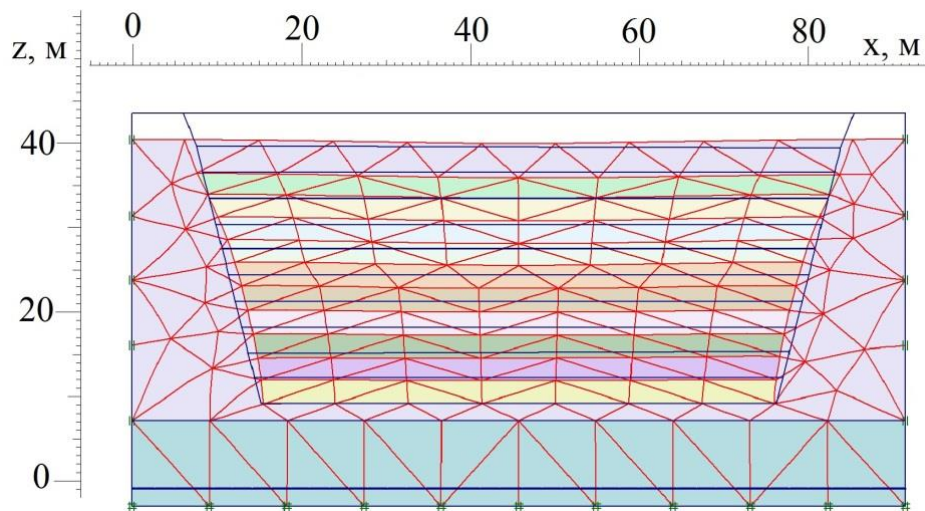


Рис. 4.16 Деформована розрахункова область полігону з товщиною глинистого шару основи 2 м

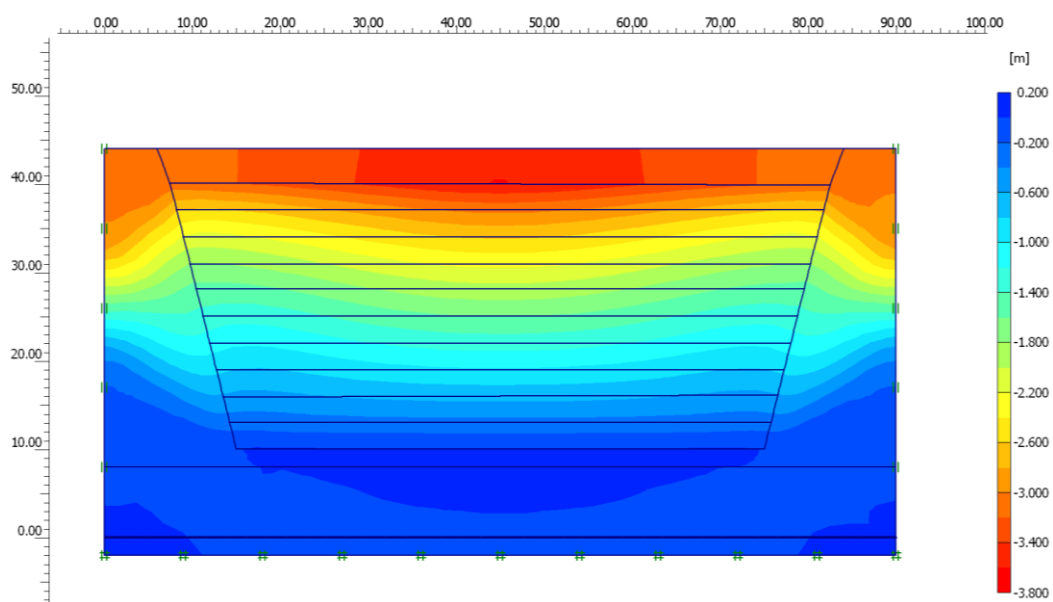


Рис. 4.17 Вертикальні деформації полігону з товщиною глинистого шару основи 2 м

Якщо товщина підстиляючого глинистого шару – 10 м (рис. 4.18), то можна спостерігати, що досягаються менші деформації (3,51 м). При збільшенні товщини підстиляючого глинистого шару до 15 м, деформації, які досягаються – найменші в порівнянні з двома попередніми варіантами (3,48 м) (рис. 4.19).

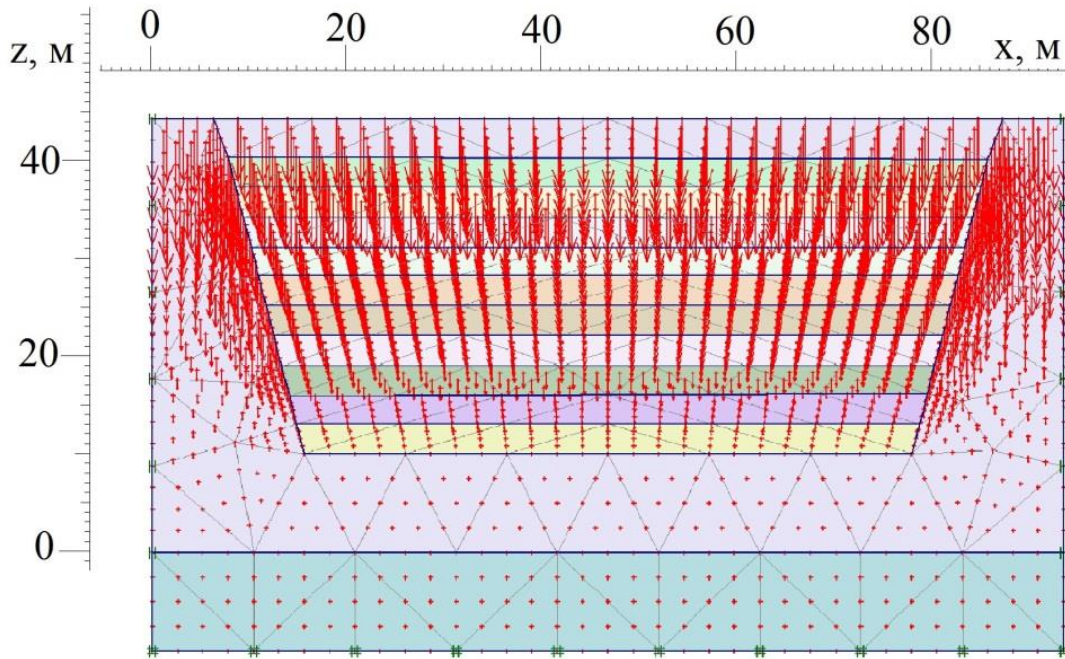


Рис. 4.18 Розподіл осідань на розрахунковій області полігону з товщиною глинистого шару основи 10 м

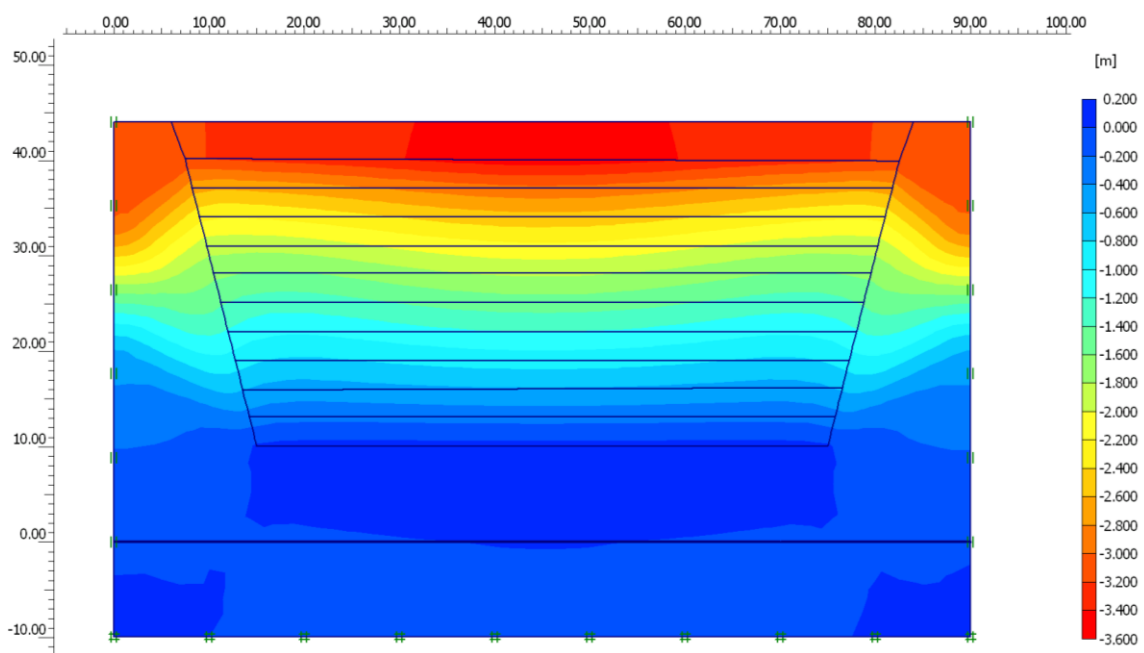


Рис. 4.19. Вертикальні деформації полігону з товщиною глинистого шару
основи 10 м

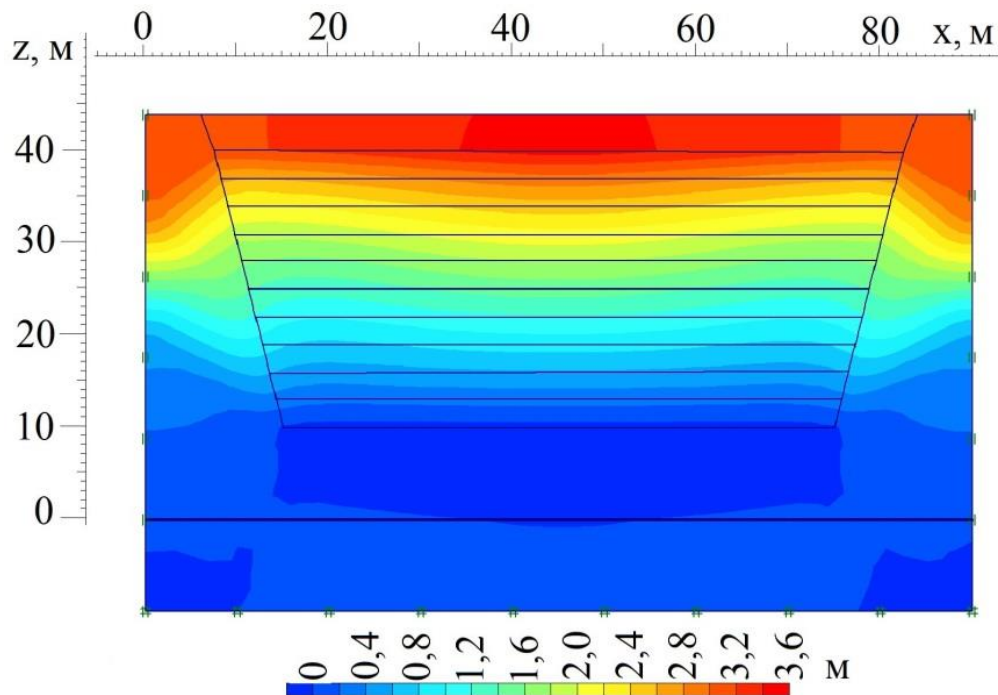


Рис. 4.20 Вертикальні деформації полігону з товщиною глинистого шару
основи 15 м

В результаті проведених досліджень встановлено, що при однакових характеристиках відходів і постійній товщині суглинистого шару збільшення товщини підстиляючого 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 3,3%).

На рис. 4.21 представлена розрахункова область з обраними точками, для яких побудована залежність осідання від часу розміщення відходів на полігоні з товщиною глинистого шару основи 15 м (рис. 4.22).

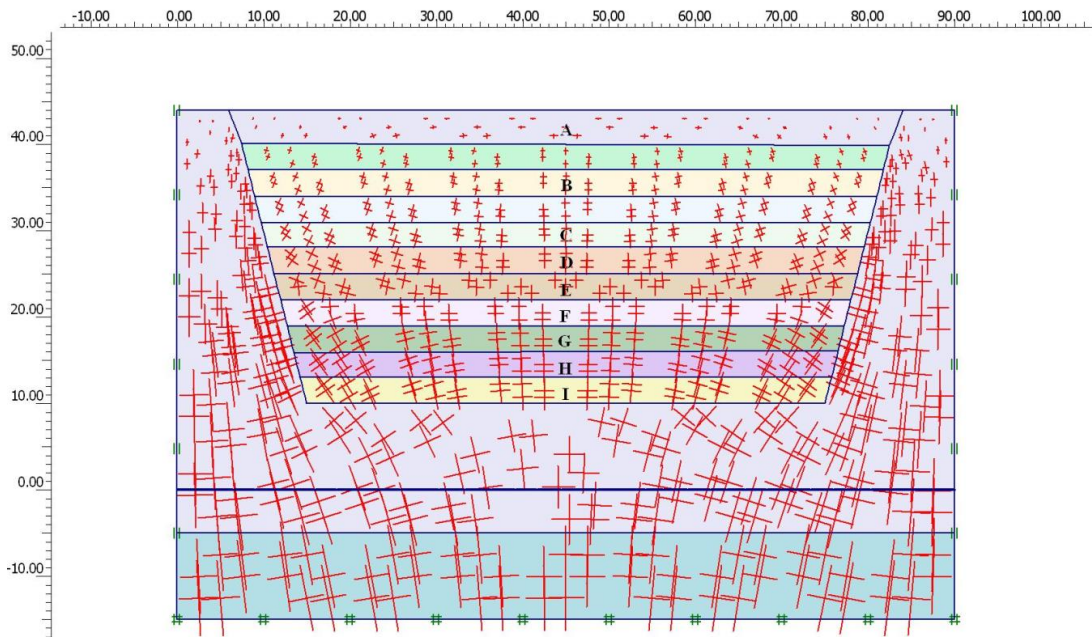


Рис. 4.21 Розрахункова область з вибраними для розрахунку точками полігону з товщиною глинистого шару основи 15 м

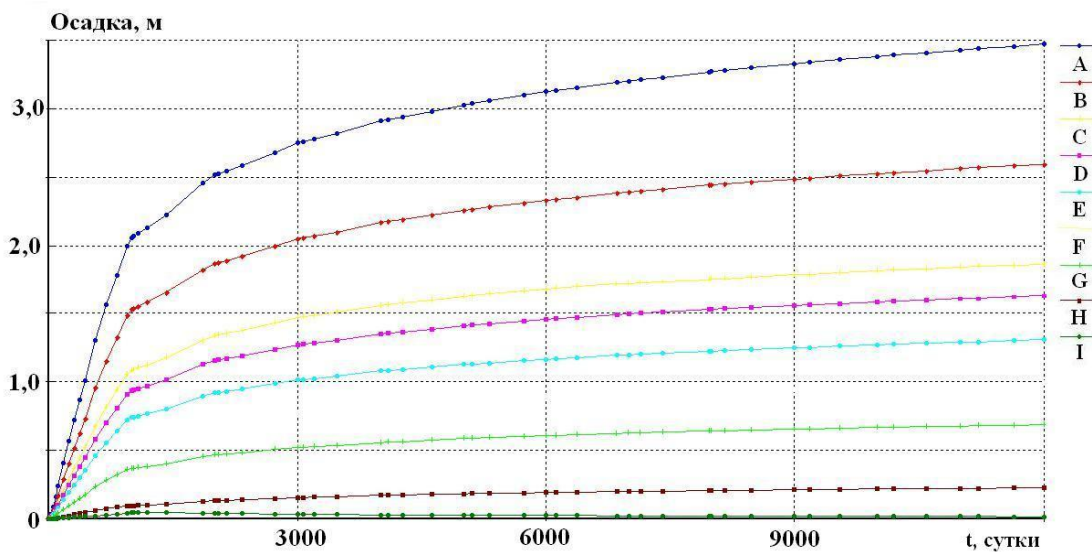


Рис. 4.22 Залежність осадки від часу розміщення відходів на полігоні з товщиною глинистого шару основи 15 м

З рисунка 4.22 випливає, що найбільших вертикальних деформацій зазнають верхні шари відходів, так як нижні шари найбільш ущільнені.

Було проведено моделювання при постійній величині глинистого шару – 10 м, і трьох варіантів товщини суглинкового шару: 2 м (рис. 4.23), 10 м (рис. 4.24) і 15 м (рис. 4.25). В результаті чисельного розрахунку встановлено, що максимальна вертикальна деформація у всіх трьох випадках склала 4,49 м.

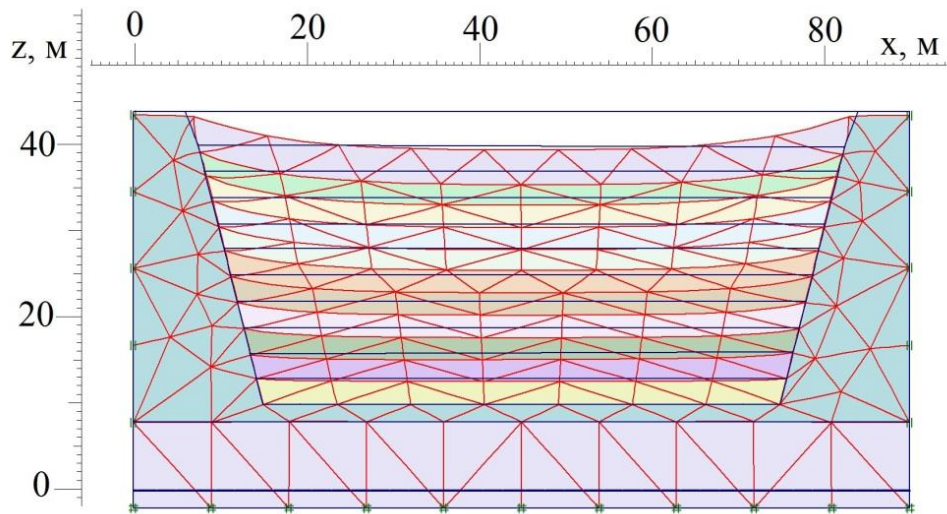


Рис. 4.23 Деформована розрахункова область полігону з товщиною суглинистого шару основи 2 м

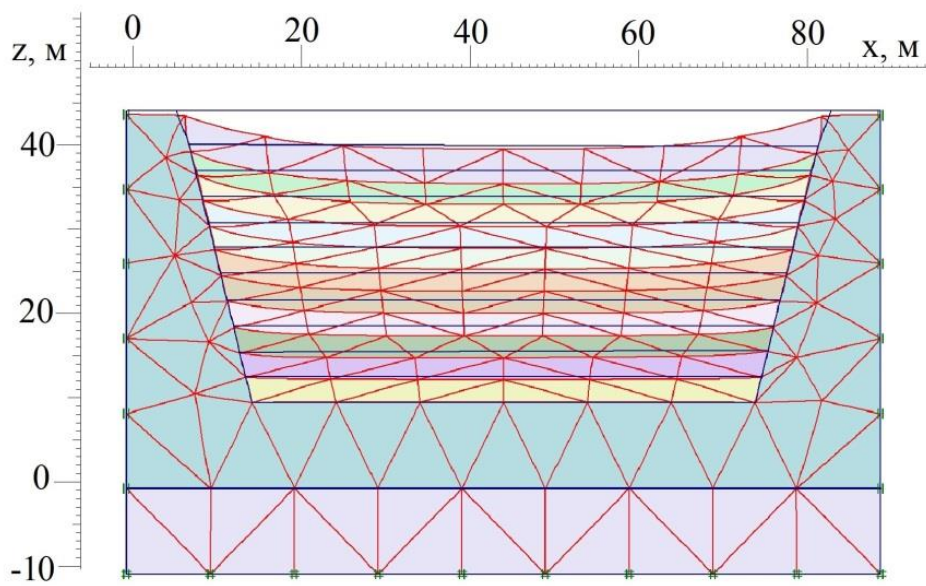


Рис. 4.24 Деформована розрахункова область полігону з товщиною суглинистого шару основи 10 м

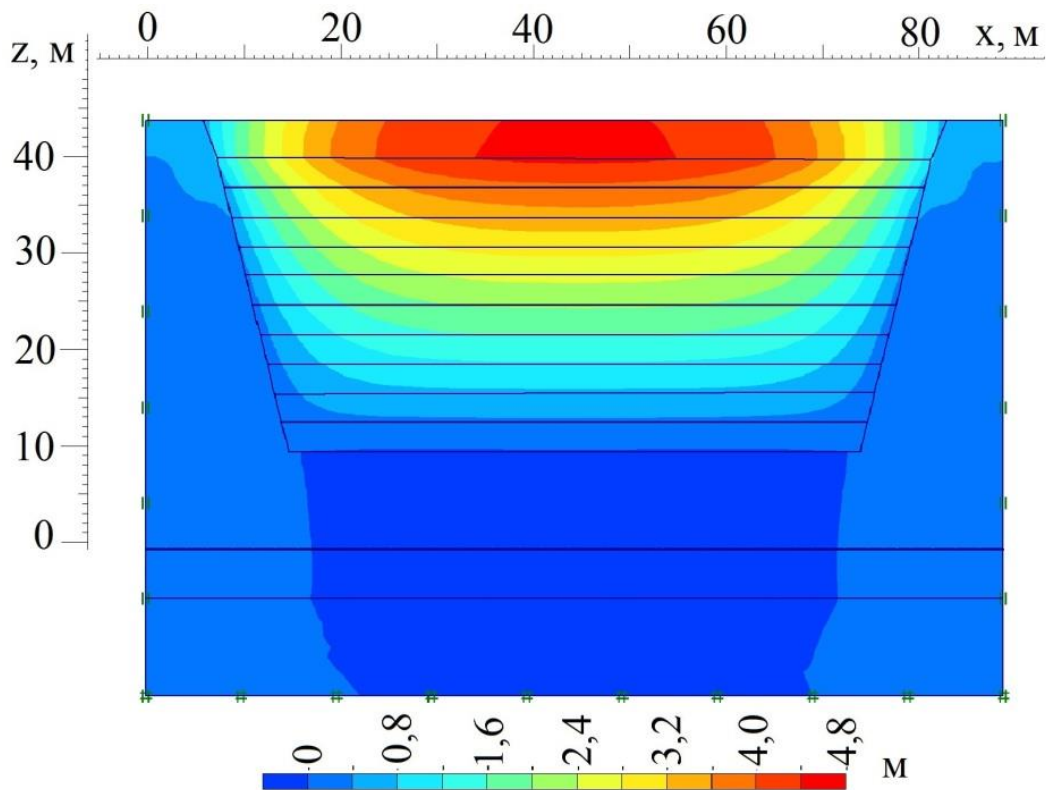


Рис. 4.25 Вертикальні деформації полігону з товщиною суглинистого шару основи 15 м

4.5 Дослідження напружено-деформованого стану полігону твердих побутових відходів з врахуванням статичного та динамічного навантаження

4.5.1 Дослідження осадки полігону ТПВ з врахуванням статичного навантаження

Було проведено дослідження впливу навантаження на осадку полігону. Деформована розрахункова область полігону з пісочною основою при вертикальному статичному розподіленому навантаженні, рівному 5 кПа, та вертикальні деформації представлені на рис. 4.26 та 4.27.

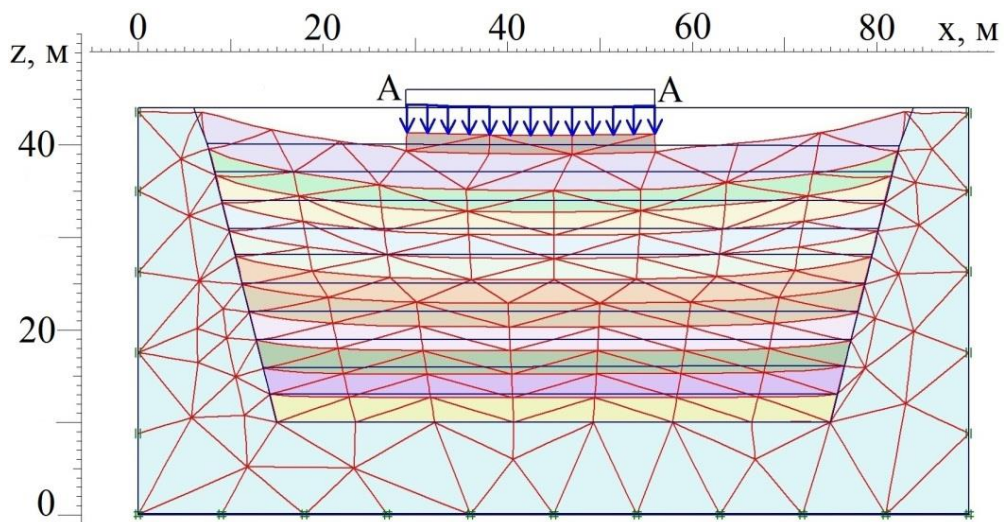


Рис. 4.26 Деформована розрахункова область полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 5 кПа

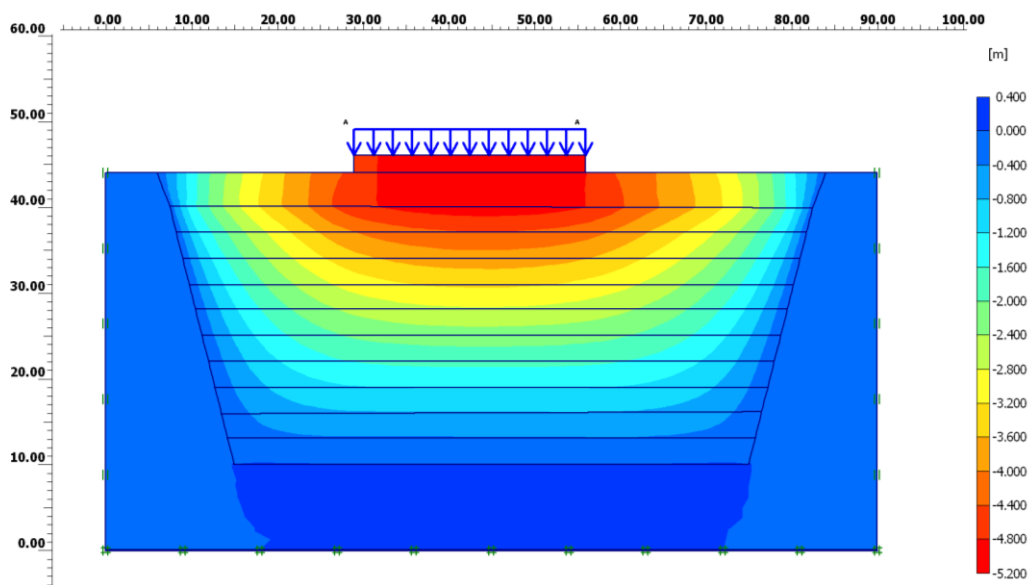


Рис. 4.27 Вертикальні деформації полігону з піском в якості ґрунту основи з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 5 кПа

У результаті чисельного розрахунку встановлено, що максимальна вертикальна деформація склала 5,06 м. Якщо величина вертикального навантаження збільшується до 50 кПа то можна спостерігати, що досягаються деформації, рівні 5,19 м (рис. 4.28).

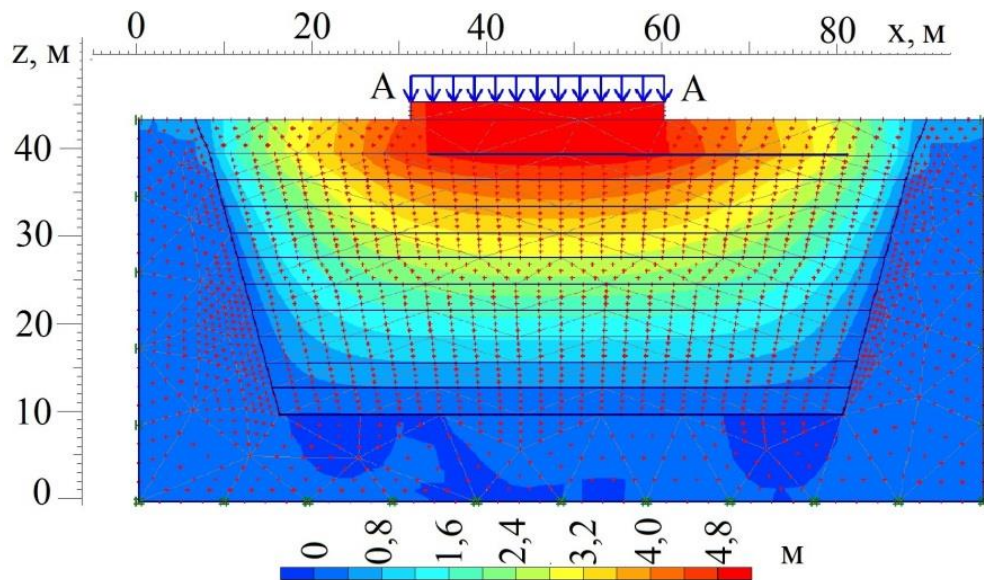


Рис. 4.28 Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 50 кПа (пісок в основі)

Встановлено, що при такій же величині навантаження (50 кПа) вертикальні деформації полігону з глинистим шаром основи зменшуються і складають 4,23 м, при суглинку – 4,95 м (рис. 4.29, 4.30).

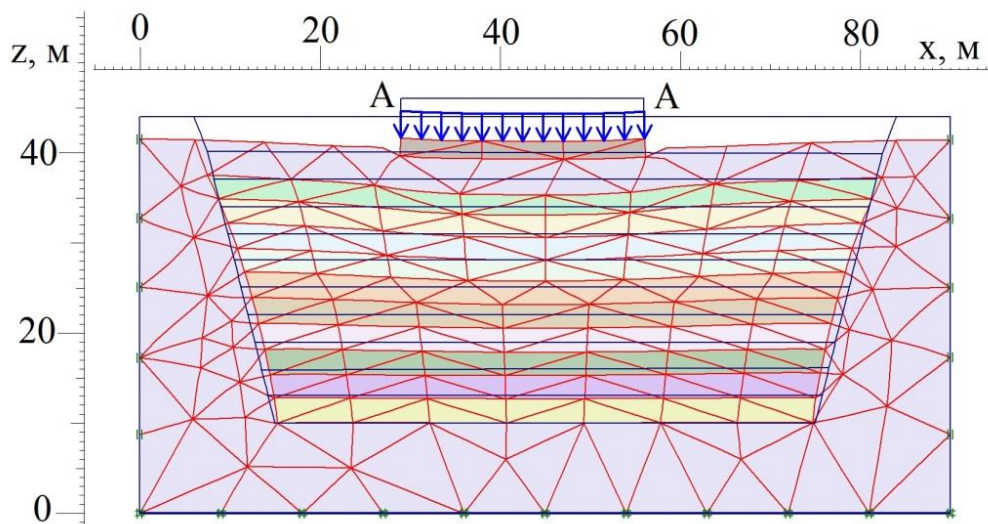


Рис. 4.29 Деформована розрахункова область полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 50 кПа (глина в основі)

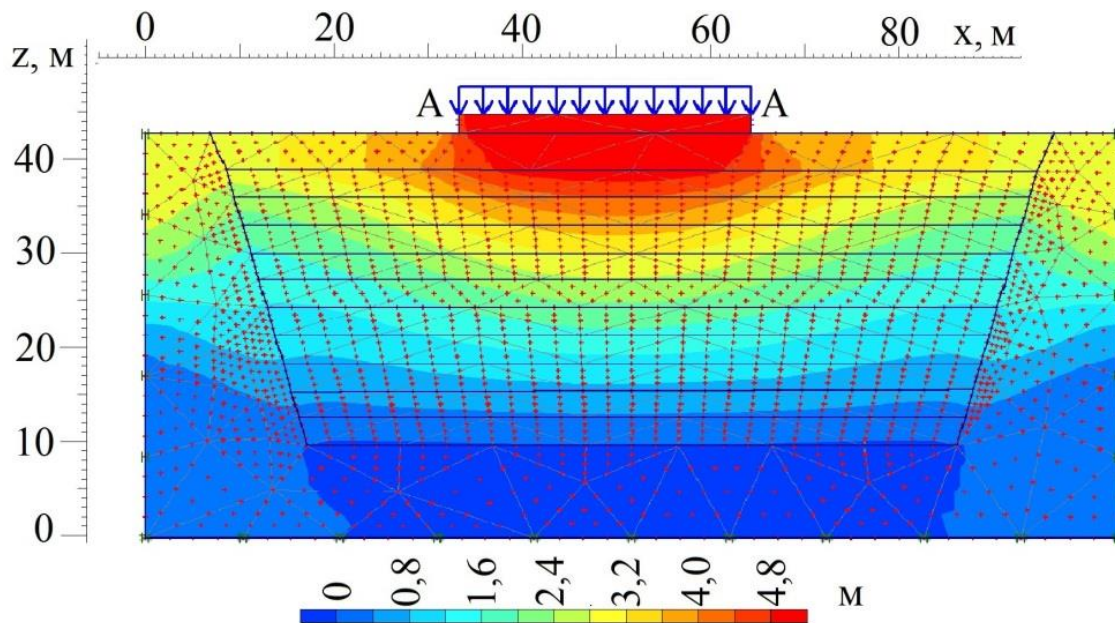


Рис. 4.30 Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 50 кПа (глина в основі)

При статичному привантаженні 5 кПа вертикальні деформації полігону з піском в якості ґрунту основи складуть 4,11 м.

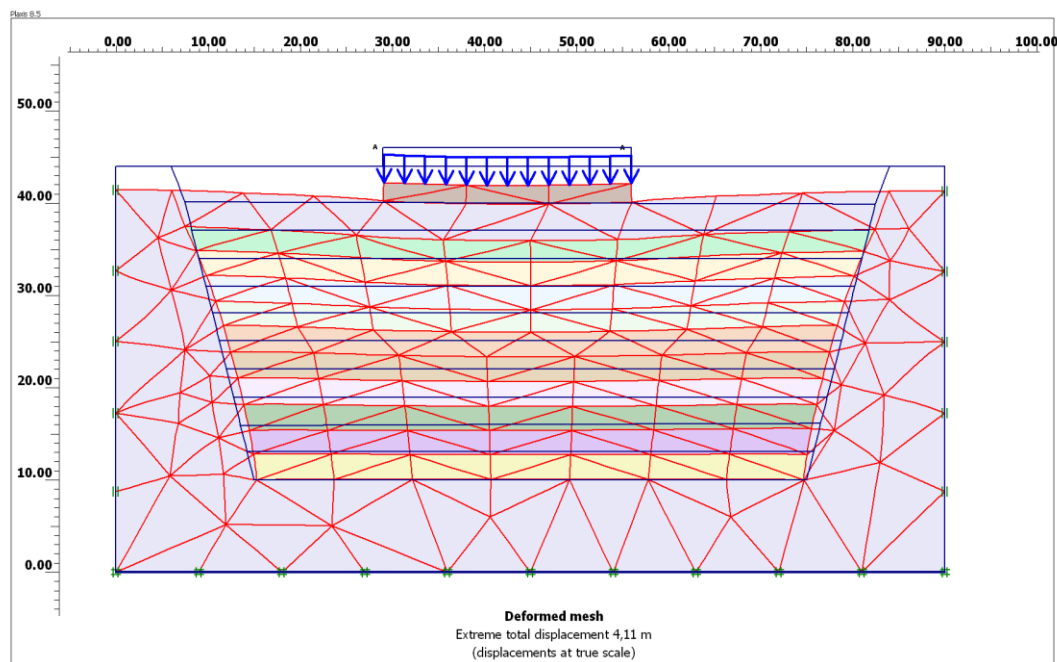


Рис. 4.31 Деформована розрахункова область полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 5 кПа (пісок в основі)

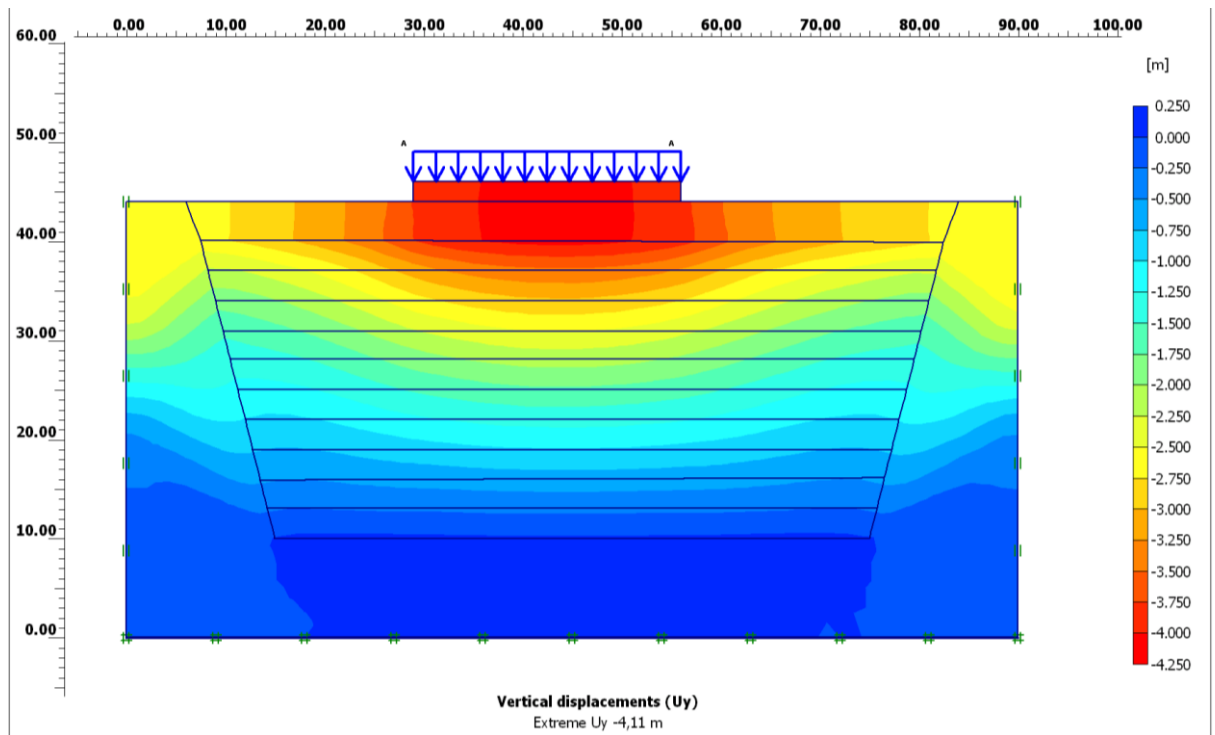


Рис. 4.32 Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 5 кПа (пісок в основі)

Аналогічні моделювання були проведені при статичному привантаженні 100 кПа вертикальні деформації полігону (рис. 4.33, 4.34).

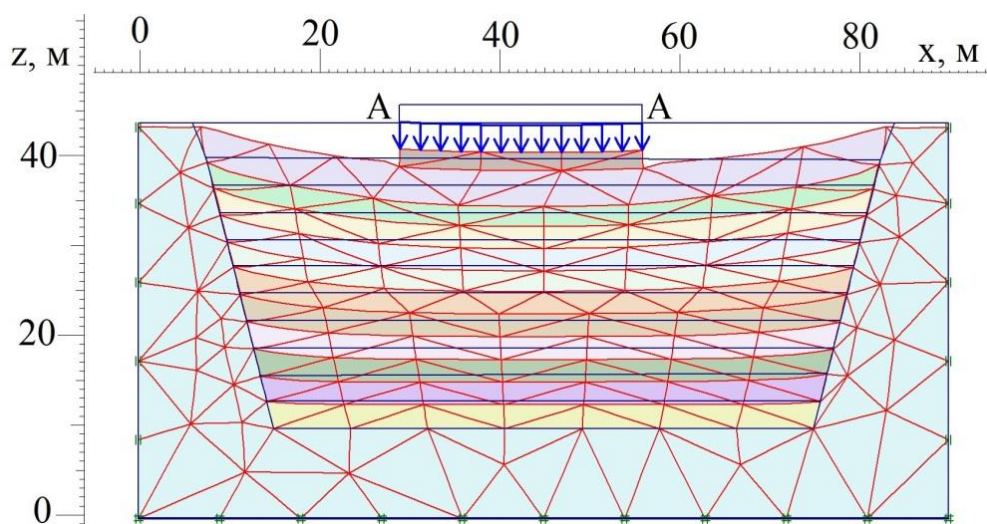


Рис. 4.33 Деформована розрахункова область полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 100 кПа (пісок в основі)

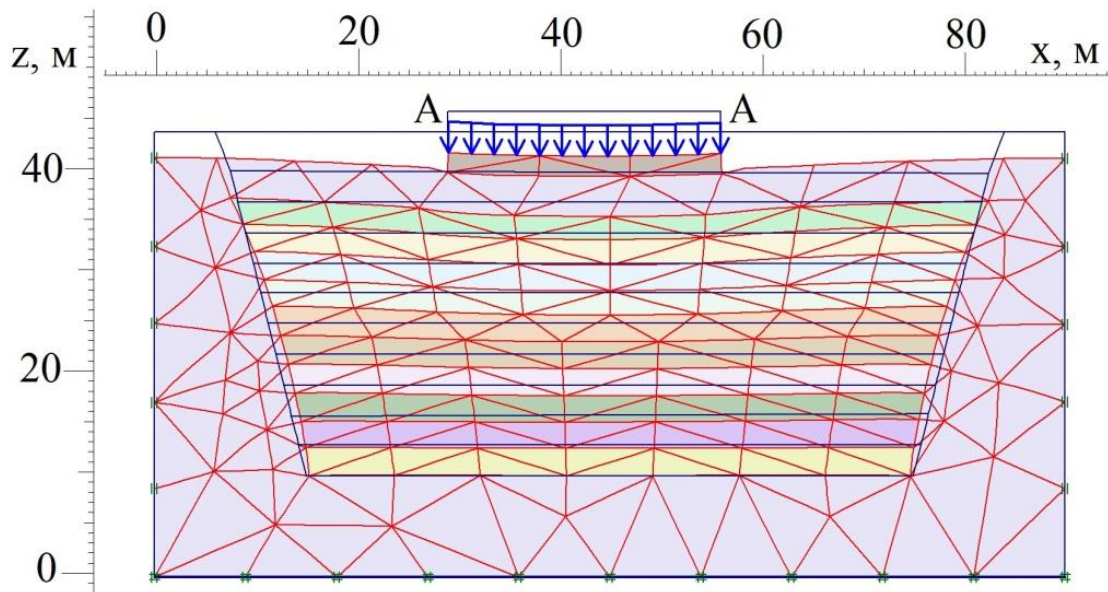


Рис. 4.34 Деформована розрахункова область полігону з вертикальним розподіленим статичним навантаженням 100 кПа (глина в основі)

4.5.2 Дослідження осадки полігону ТПВ з урахуванням динамічного навантаження

Для зменшення осадок можна використовувати методи зміцнення ґрунту. Слід визнати, що традиційні методи механічного зміцнення ґрунтів (наприклад, динамічне ущільнення) може тільки відстрочити настання довгострокових осадок, так як вони не впливають на кількість матеріалів на звалищі, що біологічно розкладаються. Однак, незважаючи на обмеження щодо скорочення масштабів довготривалої біодеградації, методи зміцнення ґрунтів були ефективно використані для поліпшення характеристик відходів до проектування фундаменту на звалищі. Старі звалища без підкладки або звалища з підкладкою на глинистій основі були успішно ущільнені трамбуванням, динамічним ущільненням і використанням стовпців відходів до будівництва на них зверху. У разі динамічного ущільнення, осадка залежить від віку звалища. Молоді звалища показують в цілому вищу осадку (примусова осадка 2,8-3,8 м, що відповідає 50% від товщини звалища, в той час як старі сміттєві звалища, як правило, досягають осадок, аналогічних тим, які зустрічаються з ґрунтами; тобто 0,2 м до 0,6 м [135].

У результаті чисельного розрахунку встановлено, що якщо величина вертикального навантаження 50 кПа то можна спостерігати, що досягаються деформації, рівні 4,19 м для глини.

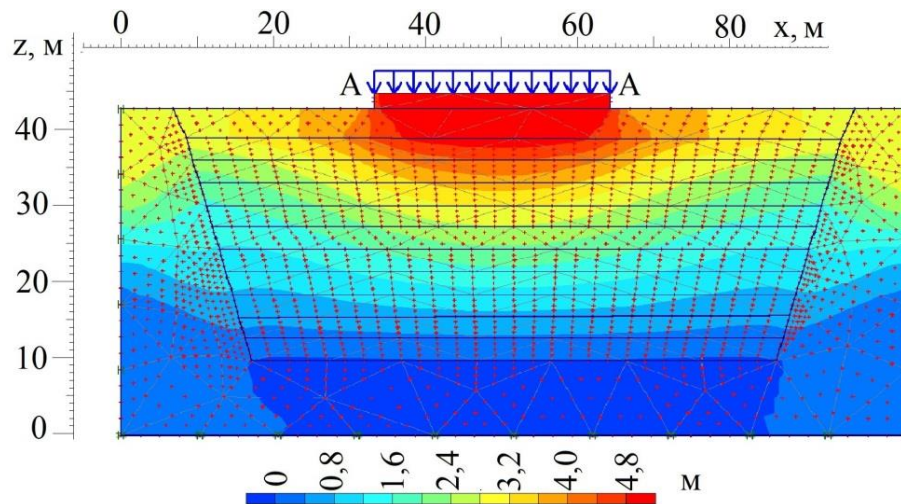


Рис. 4.35 Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленим динамічним навантаженням 50 кПа (глина в основі)

При величині динамічного привантаження 50 кПа, вертикальні деформації полігону з піском в якості ґрунту основи становитимуть 5,06 м.

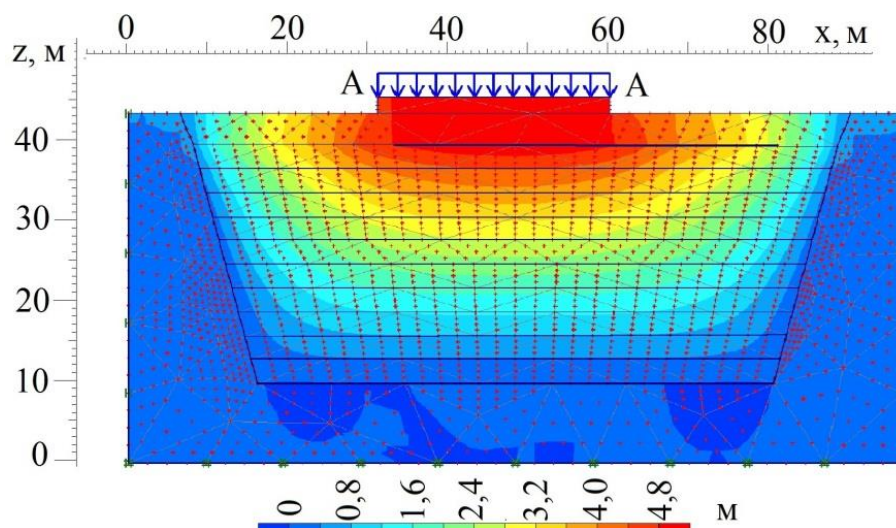


Рис. 4.36 Вертикальні деформації полігону з вертикальним розподіленим динамічним навантаженням 50 кПа (пісок в основі)

Якщо величина вертикального привантаження збільшується до 100 кПа то можна спостерігати, що досягаються деформації, рівні 5,27 м для піску, вертикальні деформації полігону з глинистим шаром основи складають – 4,39 м.

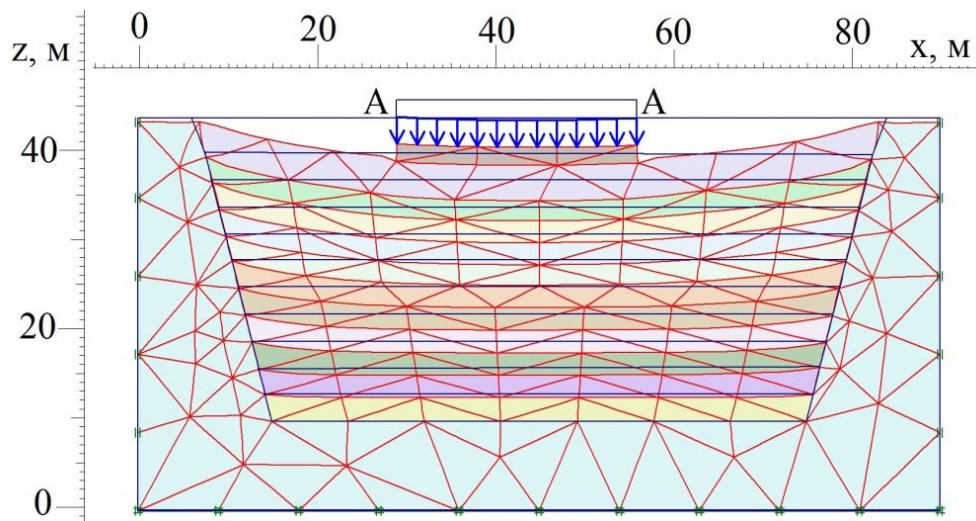


Рис. 4.37 Деформована розрахункова область полігону з вертикальним розподіленим динамічним привантаженням 100 кПа (пісок в основі)

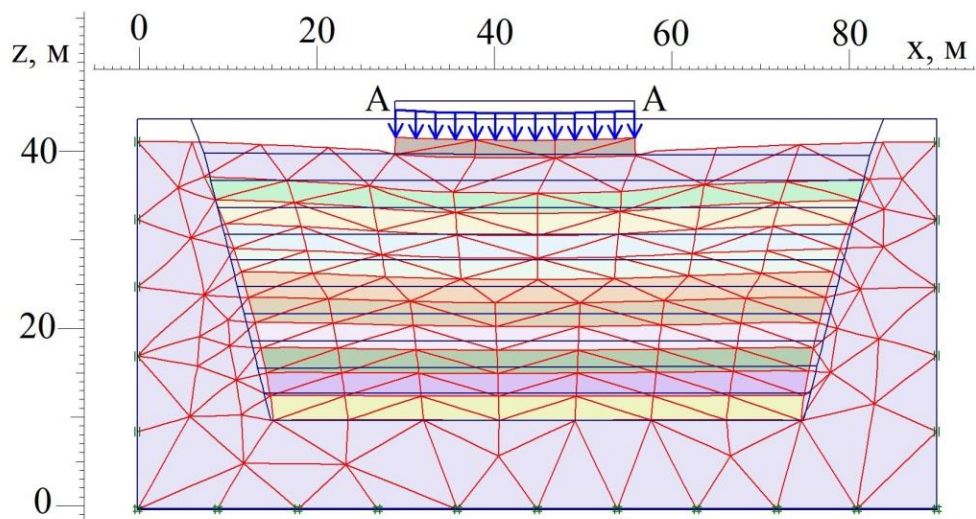


Рис. 4.38 Деформована розрахункова область полігону з вертикальним розподіленим динамічним привантаженням 100 кПа (глина в основі)

Встановлено, що вплив динамічних навантажень на осідання полігону ТПВ аналогічний до статичного навантаження, але його величина менше на 0,5...4% в залежності від підстиляючого ґрунту.

На рис. 4.39 представлено залежність осідання полігону ТПВ від величини вертикального статичного привантаження для трьох типів ґрунтів.

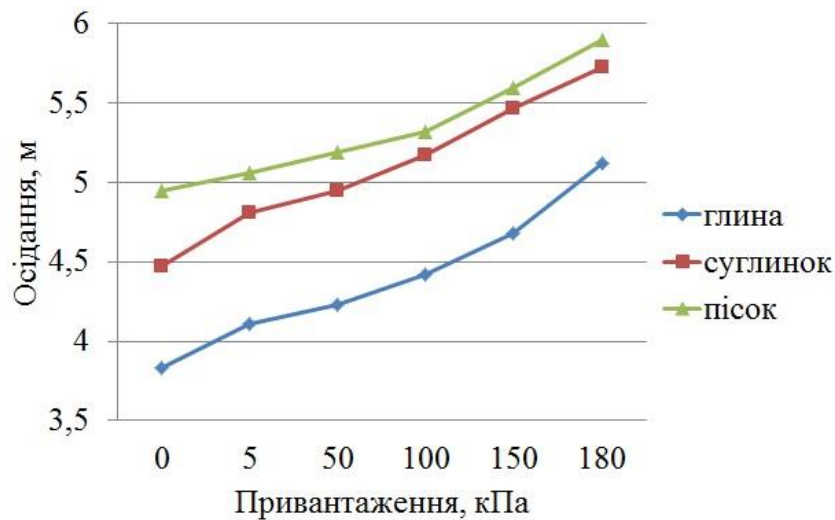


Рис. 4.39 Залежність осідання полігону від вертикального розподіленого статичного привантаження

Отримані аналітичні залежності осідання полігону ТПВ з різними підстиляючими ґрунтами від величини статичного привантаження:

для глини

$$y = 0,0243x^2 + 0,0686x + 3,79, \quad (4.4)$$

для суглину

$$y = 0,0043x^2 + 0,2129x + 4,29, \quad (4.5)$$

для піску

$$y = 0,0277x^2 - 0,008x + 4,945. \quad (4.6)$$

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

З рис. 4.39 випливає, що найбільшим вертикальним деформаціям піддається полігон з піском в якості ґрунту основи. Проте, у відсотковому

співвідношенні, величина осідання з максимальним привантаженням по відношенню до початкового осідання без привантаження найбільша у глини і становить 33,7%, цей же показник 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. Цей встановлений факт необхідно враховувати при проектуванні та експлуатації споруд різного призначення, побудованих на закритих полігонах.

На рис. 4.40 представлена залежність осадки полігону ТПВ від величини статичного та динамічного вертикального привантаження для двох типів ґрунтової основи.

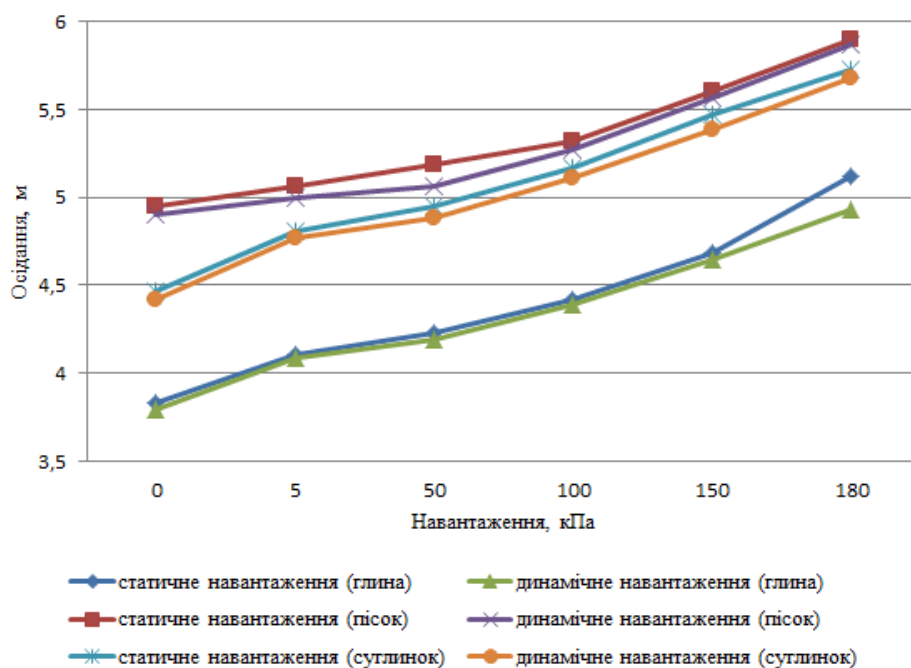


Рис. 4.40 Залежність осідання полігону з глинистим та піщаним ґрунтом основи від вертикального розподіленого статичного та динамічного навантажень

Отримані аналітичні залежності осідання полігону ТПВ з різними підстилаючими ґрунтами від величини динамічних навантажень:

$$\text{для піску} \quad y = 0,035x^2 - 0,0516x + 4,928;$$

$$\text{для суглинку} \quad y = 0,0068x^2 + 0,1922x + 4,266;$$

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

Це дає можливість здійснювати прогнозування осідання полігонів з метою оцінки їх стійкості при динамічних навантаженнях різної природи: дороги, транспортні магістралі тощо. Основні результати опубліковані у працях [157-159].

Достовірність отриманих результатів розрахунків осідання тіла полігону підтверджуються експериментальними дослідженнями таких вчених як Е. Піном and Г. Сівакумар Бабу, С. Мачадо, К. Редди [62-65] і розходження результатів становить 3-5%.

Висновки до розділу 4

1. Розроблена ефективна методика розрахунку осадки полігону, заснована на чисельному моделюванні напружено-деформованого стану полігону і підстилаючого ґрунту з використанням моделі Кулона–Мора для опису покриваючого і підстилаючого шарів ґрунту і моделі SSC для відходів. Ця методика дозволяє дослідити осадку полігону в залежності від його форми, різних типів підстилаючого ґрунту, шаруватості основи, куту нахилу схилу.

2. Встановлено, що при однакових умовах полігону підстилаючий ґрунтовий шар здійснює значний вплив на величину осадки: чим більш щільний і менш пористий ґрунт, тим менша осадка. Зокрема, якщо ґрунтова основа представлена глиною, то досягається осадка на 23% менше, ніж з піском, і на 14% менше, ніж з суглинком в якості основи.

3. Встановлено, що зі зменшенням куту нахилу схилу полігону відбувається значне зменшення осадки, причому найбільший спад спостерігається у найменш щільного ґрунту (піску). При зменшенні кута з 75° до 30° зменшення вертикальних деформацій складає 20,4% для піску, 13% для суглинку і 5,22% для глини. Зі зменшенням куту нахилу зменшується різниця між осадками полігону при різних ґрунтах основи. Отримані аналітичні

залежності осідання полігону з різними підстилаючими ґрунтами від кута нахилу схилу .

4. Встановлено, що полігон в формі прямокутної трапеції менш стійкий, ніж в формі рівносторонньої трапеції. При однакових параметрах тіла полігону для глинистої основи осадка збільшилася на 33,8%, для піщаної та суглинистої основи – 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, а найменша для піщаної.

5. При дослідженні залежності впливу шаруватого ґрунту на його осідання встановлено, що в залежності від товщини першого шару, якщо перший підстилаючий шар глинистий, то досягається осадка на 19,8-22,5% менше ніж при суглинку. Причому при суглинистій основі її товщина суттєво не впливає на величину осідання.

РОЗДІЛ 5

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОЦІНКИ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІГОНУ ТПВ В ЯКОСТІ ОНОВИ СПОРУД І КОНСТРУКЦІЙ

5.1 Методика прогнозування стійкості полігону твердих побутових відходів

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 C# для оперативного розрахунку осадки закритого полігону, який пропонує для цього вирішення трьох взаємозв'язаних і послідовних задач:

- Задача 1. Прогнозування осідання полігонів з врахуванням підстиляючого ґрунту.
- Задача 2. Прогнозування осідання полігонів з врахуванням статичних навантажень.
- Задача 3. Прогнозування осідання полігонів з врахуванням динамічних навантажень.

Вибір задачі можна здійснити в головному вікні програми, зображеному на рис. 5.1, або просто слідувати послідовності задач.

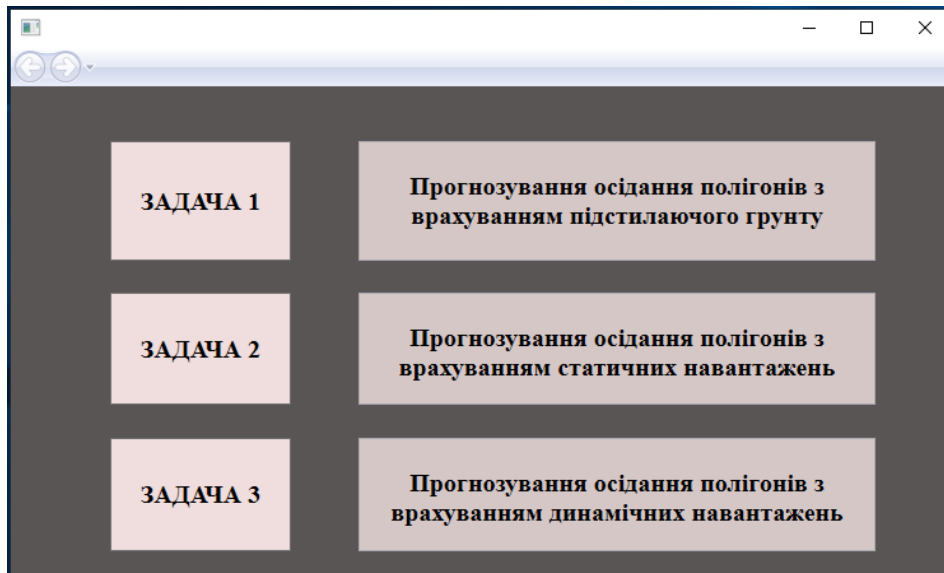


Рис. 5.1 Головне вікно робочої програми

На першому етапі вирішується задача прогнозування осідання полігону з врахуванням підстиляючого ґрунту.

При виборі «Задача 1» спочатку заповнюються початкові дані – геометричні параметри полігону і тип підстиляючого ґрунту (рис. 5.2).

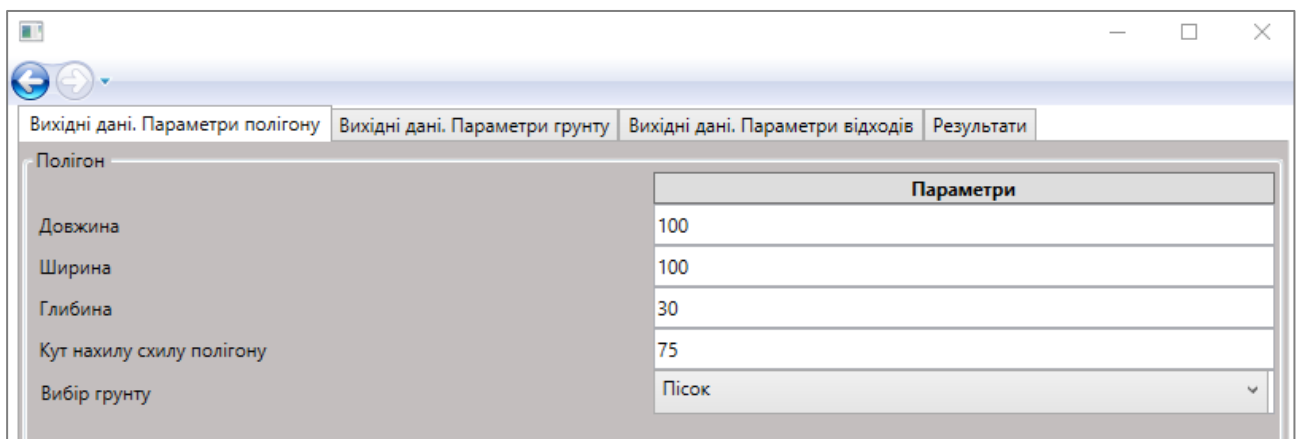


Рисунок 5.2 Вихідні дані параметрів полігону

У залежності від того, який саме підстиляючий ґрунт (пісок, суглинок, глина) буде використовуватися для прогнозування осідання заповнюються його фізико–механічні параметри (табл 4.1 розділ 4): модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, питома вага ґрунту, питома вага водонасиченого ґрунту, коефіцієнти фільтрації в горизонтальному та вертикальному напрямках, питоме зчеплення,

кут внутрішнього тертя та час, що минув після закриття полігону. Вікно підпрограми наведено на рис. 5.3.

ґрунт	Пісок	Суглинок	Глина
Модуль деформації	18000		
Коефіцієнт Пуассона	0.34		
Питома вага ґрунту	18		
Питома вага водонасиченого ґрунту	20.7		
Коефіцієнт фільтрації в горизонтальному напрямку	0.5		
Коефіцієнт фільтрації в вертикальному напрямку	0.5		
Питоме зчеплення c , (кПа)	3		
Кут внутрішнього тертя φ , (град)	31		
Час, що минув після закриття полігону	10		

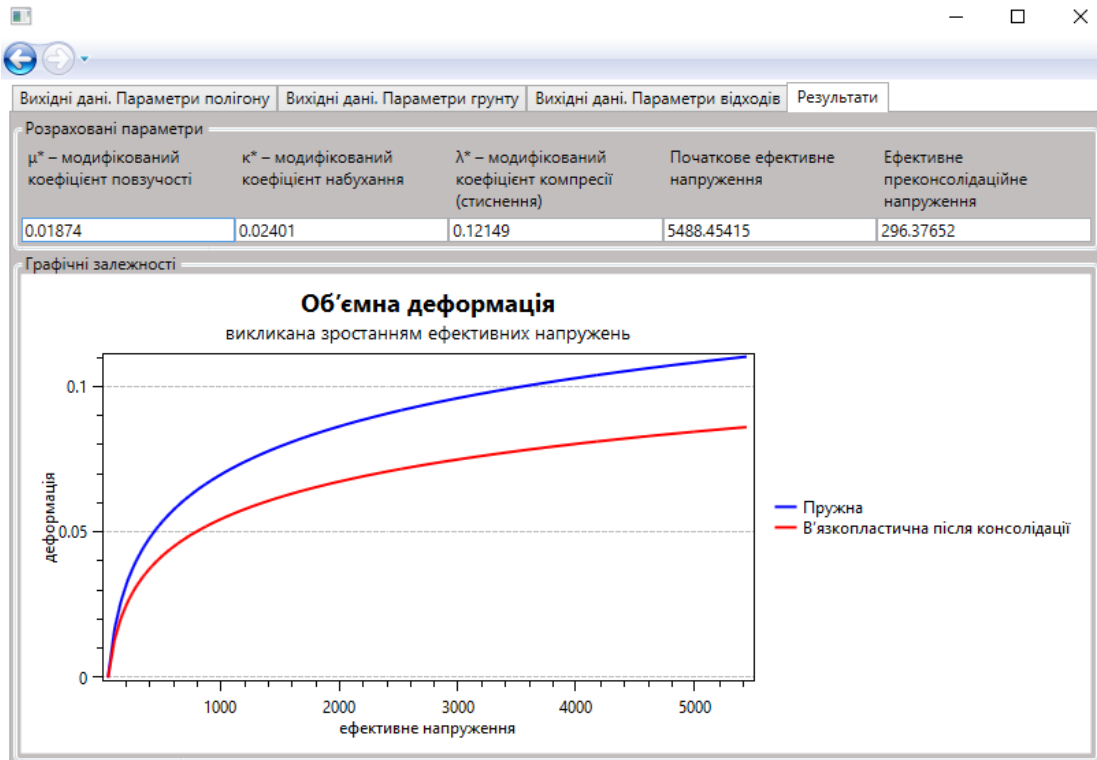
Рисунок 5.3 Вихідні дані параметрів ґрунту

Після заповнення фізико–механічних параметрів ґрунтів переходимо до наступного підвікна програми (рис 5.4) для заповнення вихідних фізико–механічних параметрів відходів (табл 4.2 розділ 4): питома вага, питома вага водонасиченого ґрунту, питоме зчеплення, кут внутрішнього тертя, початковий коефіцієнт пористості, коефіцієнт компресії, коефіцієнт набухання.

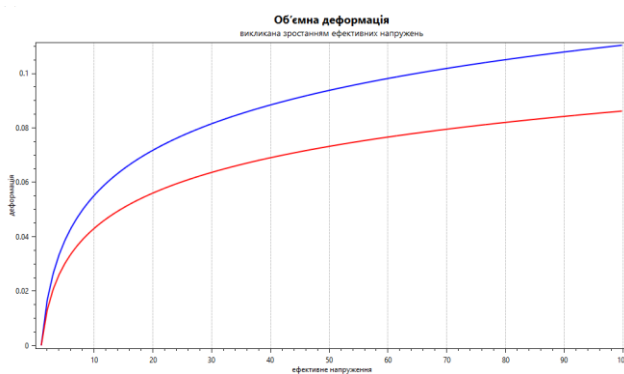
Відходи	Вихідні дані. Параметри відходів
Питома вага, (кН/м ³)	7.504
Питома вага водонасиченого ґрунту, (кН/м ³)	10
Питоме зчеплення c , (кПа)	25
Кут внутрішнього тертя φ , (град)	20
Початковий коефіцієнт пористості, e_0 , (од.)	0.4268
Коефіцієнт компресії, C_s , (од.)	0.3987
Коефіцієнт набухання, C_s , (од.)	0.0394
Коефіцієнт повзучості, C_s , (од.)	0.0615
Кількість шарів	1
Кут нахилу схилу полігону	10
Товщина шару	3

Рисунок 5.4 Вихідні дані параметрів відходів

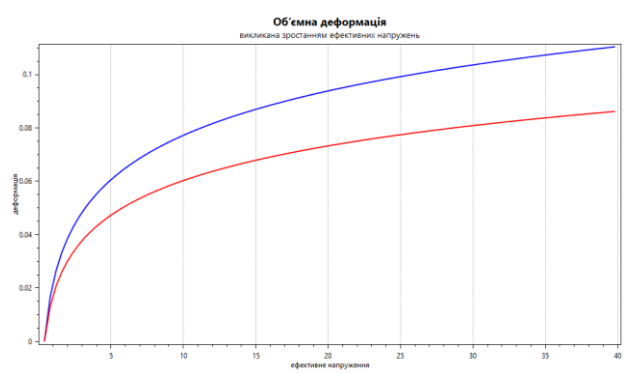
Результати розрахунку коефіцієнтів набухання, компресії, консолідації та зв'язок між деформаціями в залежності від типу ґрунту наведено на рис. 5.5 (а, б, в). Результати опубліковані у праці [160].



а)



б)



в)

Рисунок 5.5 Результат розрахунків для ґрунту:

(а) – пісок, (б) – суглинок, (в) – глина

Вибір моделі прогнозування для статичного навантаження «Задача №2» чи динамічного навантаження «Задача №3» здійснюється після завершення розрахунків «Задача №1». Вибір задач здійснюється у головному меню програми або за допомогою випадального меню головного вікна Меню -> Задача №1; -> Задача №2; -> Задача №3.

На рис. 5.6. наведено загальний алгоритм поводження з закритим полігоном ТПВ для переведення його з категорії «екологічно небезпечний об'єкт» в категорію «екологічно безпечний об'єкт».

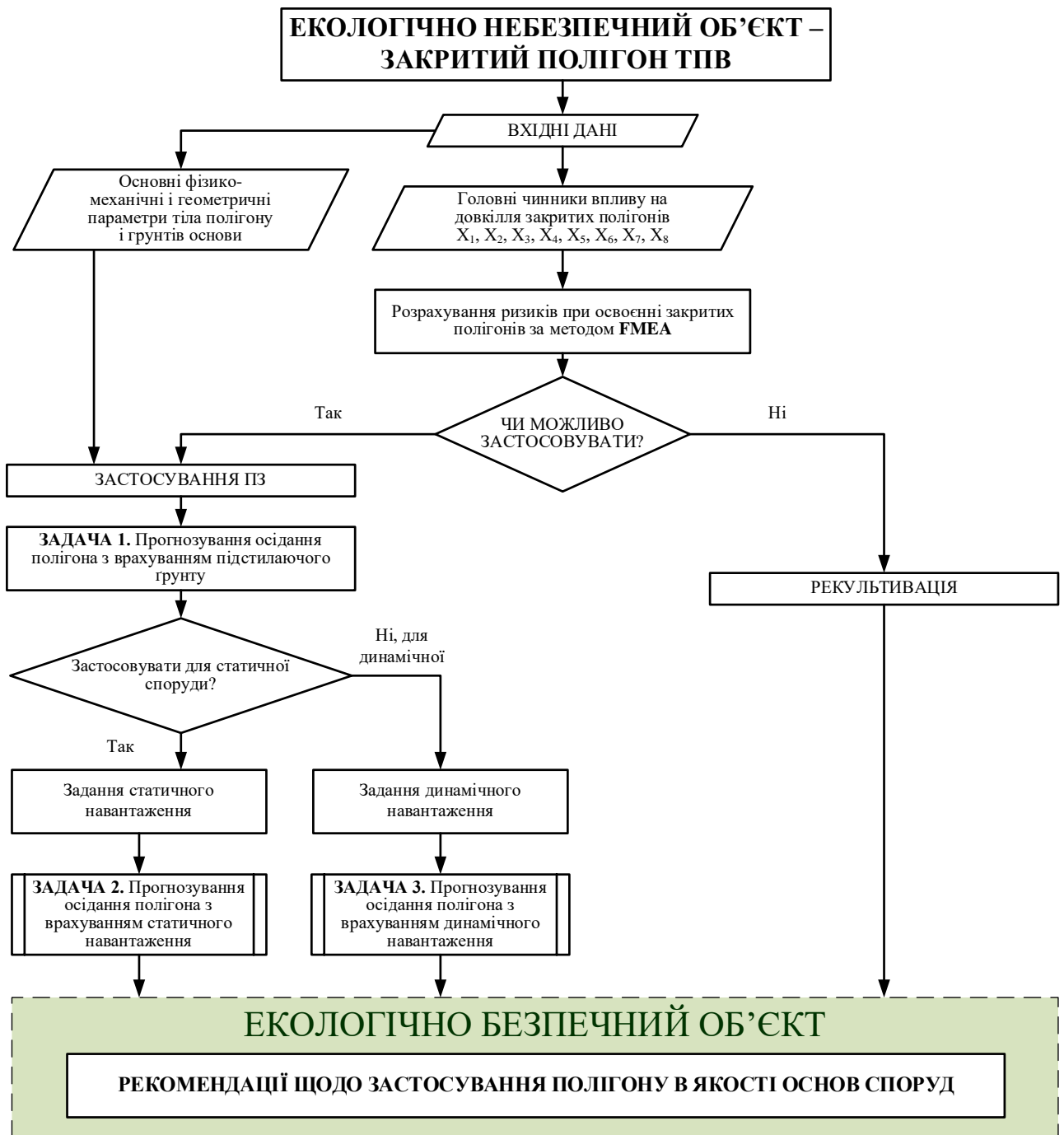


Рис 5.6 Алгоритм поводження з закритим полігоном ТПВ для переведення його з категорії «екологічно небезпечний об'єкт» в категорію «екологічно безпечний об'єкт»

5.2. Практичне застосування методики розрахунку осідання полігону

Для практичного застосування розробленої методики розрахунок осадки проводився 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.

Осадка визначалася на ділянці полігону 50x50 м з урахуванням покровового навантаження полігону відходами 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 [154].

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.

Деформована розрахункова область полігону з глинистим підстиляючим шаром представлена на рис. 5.7.

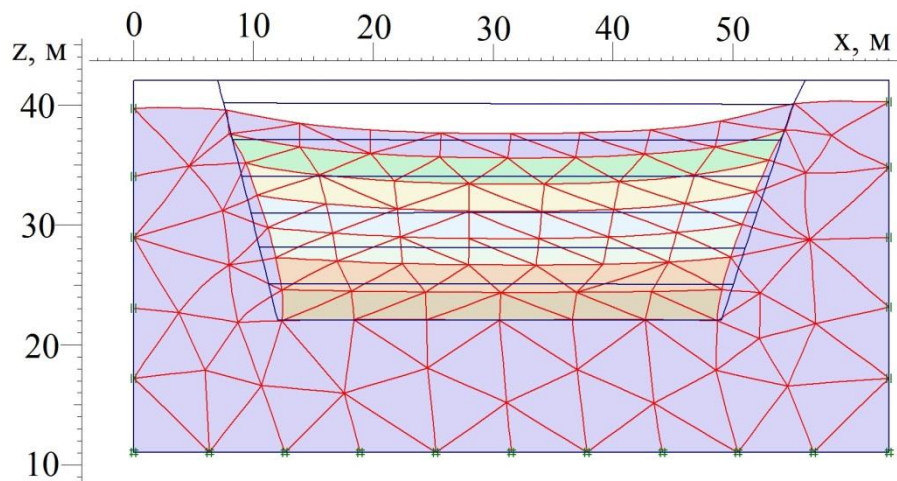


Рис. 5.7 Деформована розрахункова область полігону з глинистим підстиляючим шаром

З аналізу чисельних розрахунків слід, що максимальна вертикальна деформація становить 2,27 м. Якщо підстиляючий шар пісок, то деформація значно збільшується і становить 2,61 м.

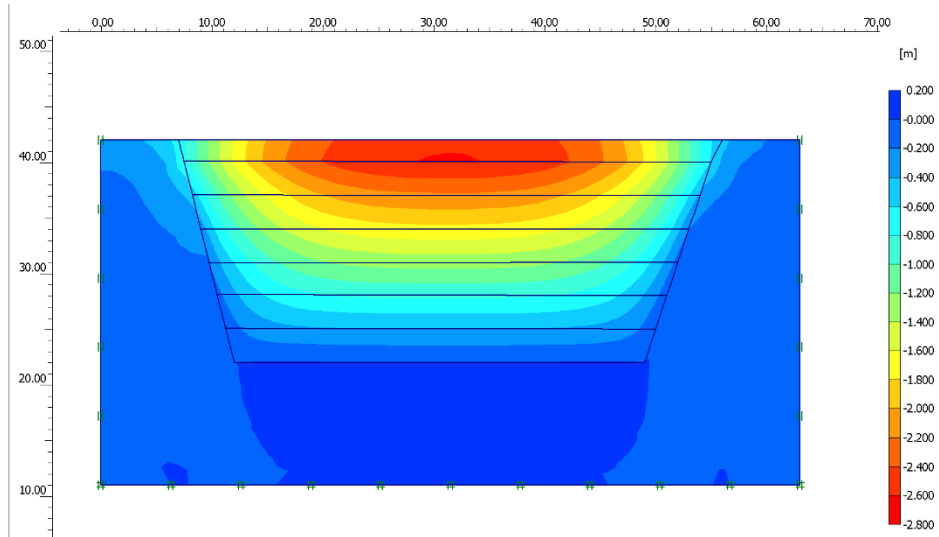


Рис. 5.8 Вертикальні деформації полігону з піщаним підстиляючим шаром

Для дослідження впливу пересипання на осадку полігону проводилося моделювання його деформованого стану при пересипанні шарів відходів, висотою 3 м, шарами піску. 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 підстиляючий шар - глина (рис. 5.9), то досягаються вертикальні деформації 1,55 м, якщо в основі пісок (рис. 5.10) – 1,82 м. У процентному співвідношенні осадка до висоти полігону становить 14,2% і 15,26% відповідно.

Встановлено, що при однакових параметрах тіла полігону, полігон з піщаною основою піддається більшій осадці, ніж полігон з глинистою основою (на 13%). Спостерігається значний вплив пересипання на величину деформацій. Так, для глинистої основи осадка збільшилася на 32%, для піщаної основи – на 30%.

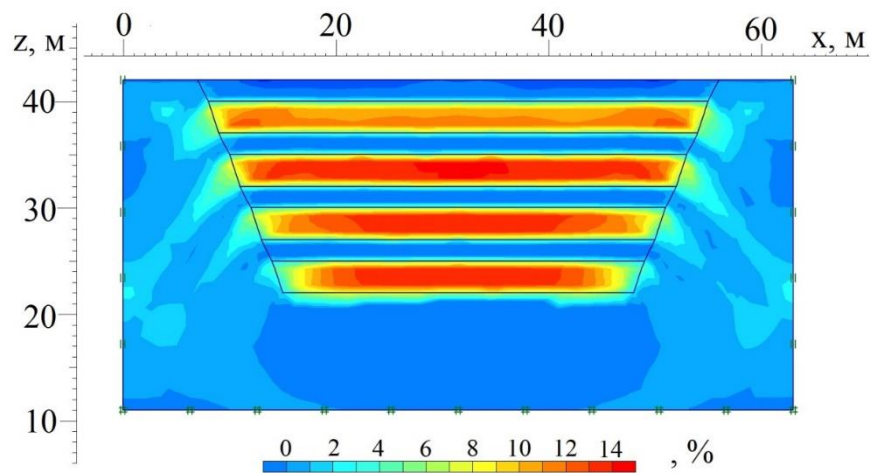


Рис. 5.9 Вертикальні зміщення полігону з пересипанням і з глинистим підстиляючим шаром (у відсотках)

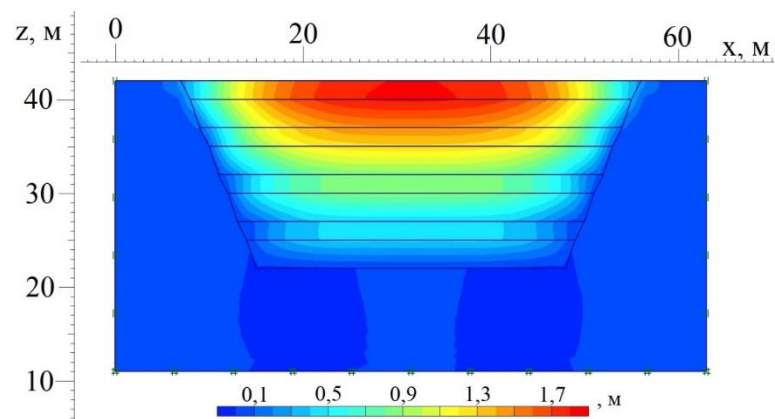


Рис. 5.10 Вертикальні деформації полігону з пересипанням і з піщаним підстиляючим шаром

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).

5.3. Попереднє планування та процедури закриття звалища для спорудження будівель та конструкцій

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, гірка для катання на лижах чи санного спорту або для побудови комерційних або промислових будівель.

Планування особливо важливо там, де передбачається будівництво будівлі на території або поблизу полігону. Під час експлуатації полігону необхідно враховувати місця конструкцій, що вимагають додаткової підтримки, рекреаційні об'єкти, які потребують специфічної топографії, а також системи газового контролю для захисту майбутніх будівель. Також слід виділити райони для моніторингу підземних вод. Планування потенційної проблеми забруднення ґрунтових вод шляхом виділення місця для установки рекультиваційного обладнання або конструкцій також є необхідним.

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

При плануванні використання звалища слід враховувати також осадку, характеристики підстилаючого ґрунту, наявність та контроль за системами збору інфільтрату і звалищного газу та рослинність.

Осадка і консолідація є основними факторами при будівництві об'єктів на основі закритого звалища. Приблизно 90% осадок відбуватиметься протягом перших п'яти років, і може тривати протягом 25 або більше років і більш повільними темпами. Осадка також залежить від матеріалу покриття. Звалище зі співвідношенням покриваючого шару до відходів – 1:4 буде осідати більше ніж звалище зі співвідношенням 1:3. Чим вищий вміст органічних речовин, тим швидше осідатиме звалище.

При закритті звалища повинні бути здійсненні наступні кроки:

- Попереднє планування:

- визначити остаточний топографічний план звалища;
- підготувати план дренажу звалища;
- обрати матеріали покриваючого шару;
- підготувати рослинний покрив і план озеленення;
- визначити послідовність закриття для поетапних операцій на основі звалища;
- вказати технічні процедури для встановлення тих чи інших конструкцій на основі звалища.

-За три місяці перед закриттям:

- остаточний огляд плану закриття;
- розробка графіку закриття звалища;
- підготовка остаточного розклад процедур закриття;
- повідомлення відповідного регулюючого органу;
- повідомлення користувачів звалища про його закриття.

-При закритті:

- монтаж огорож або відповідних структур для обмеження доступу;
- монтаж знаків, що вказують на закриття звалища і повідомляють про альтернативні місця поховання відходів;

- збір усього сміття, що залишилося в останній відсік для покриття;
- розміщення покриваючого.

-Через три місяці після закриття:

- завершення монтування споруд чи пристроїв управління інфільтратом;
- завершення монтування систем збору газу або вентиляції системи, систем, що утримують інфільтрат, та пристроїв моніторингу підземних вод чи газу;
- встановлення пристроїв для виявлення осідання;
- розміщення ґрунтового покриваючого шару необхідної товщини над звалищем;
- створення рослинного покриву.

Рекомендується поетапне закриття. При проектуванні звалища, необхідно обмежити проникнення води для зниження обсягів утворення фільтрату. Правильне розташування покриваючого шару являє собою важливий метод управління. Використання геомембран використовується для обмеження попадання води в ґрунт. Після розміщення покриваючого шару, область повинна бути негайно озеленена для запобігання ерозії. Основні чинники, що повинні бути перевірені після закриття звалища:

- осадка, цілісність покриваючого ґрунтового шару;
- буфери і рослинність;
- контроль за осадом і ерозією;
- огороження;
- контроль газу та фільтрату;
- цілісність об'єкта кінцевого використання звалища.

Інженерні методи доступні для побудови багатьох типів об'єктів на закритому звалищі. Залежно від типу об'єкта, що встановлюється, може бути необхідно розширити шпунтовий ряд на звалищі і в ґрунтовій основі звалища. У деяких випадках може бути можливим використовувати спеціальні підвалини або фундаменти, щоб підтримувати навантаження, що буде утворюватися на звалищі.

Основні конструктивні міркування для будівництва на звалищі включають співвідношення «консолідація-час-осадка» і несучі здібності, розроблені на основі польових і лабораторних даних.

Несуча спроможність це здатність підтримувати фундаменти і важке устаткування. Хоча несуча спроможність полігону буде залежати від конкретних операцій, її типові значення знаходяться в діапазоні від 500 до 800 фунтів на квадратний фут. Низька несуча здатність може бути подолана 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 в 1,5 рази більше ширини структурних фундаментів.

Розміщення і ущільнення спеціальних відходів під площ, запланованих на будівлях теж варіант. Наприклад, летюча зола може бути ущільнена в шар товщиною один фут у відповідних областях, а інші тверді відходи розподіляються в інших місцях в прилеглих районах. Включення стабілізаторів в ґрунт під час розміщення покриваючого шару може підвищити несучу здатність полігону. Хімічні речовини, такі як вапно, портландцемент, та ін.. змішуються з ґрунтом. Бажаний ефект може бути посилення цементациєю, гідроізоляцією, або дисперсії для більшої щільності і більш низької проникності.

Уприскування вапняного шламу для закріплення ґрунту також дає можливість для підвищення несучої здатності. Будівля площею 20,000 квадратних футів була побудована в Форт-Уорт, штат Техас у 1968 році на території, яка раніше була звалищем. Полігон розширюється на 10 футів нижче будівлі. Стабілізація будівлі була здійснена в 1977 р. за допомогою вприскування розчину шламу наступної пропорції: два фунта вапна і чотири фунта летючого попелу на один галон води.

Там, де інші способи досягнення високої несучої здатності основи невдалі, для підтримки можуть бути використані система дамб або паль.

При проектуванні споруд на звалищі, необхідно також знати про способи 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.

Часто, проблеми дренажу можуть привести до прискореного руйнування тієї чи іншої області в межах полігону. Осадка дренажних систем може зменшувати їх ефективність і може привести до нездатності правильно направляти зливі води за межами майданчика. Нездатність підтримувати фізичну цілісність покриття звалища сприяє додатковій інфільтрації в полігон і в кінцевому підсумку призводить до збільшення виробництва інфільтрату. [148]

Офіційне закриття звалища часто включає в себе план після закриття для забезпечення екологічного моніторингу та технічного обслуговування, необхідного для охорони здоров'я населення і навколишнього середовища.

Дійсно, однією з переваг полігону є те, що, як тільки полігон закривають, значні площі земель стають доступними для інших цілей. Проте, використання закритого звалища вимагає ретельного розгляду потенційних інженерних та екологічних проблем. Основні інженерні обмеження, пов'язані з перебудовою закритих звалищ пов'язані з осадкою, що може привести до структурних пошкоджень будівель на звалищі і низької несучої здатності, яка або дозволяє розміщувати лише малоповерхові конструкції легкої ваги або вимагає застосування глибоких фундаментів. Якщо використовуються глибокі основи, є додаткові технічні складності, пов'язані з осадкою відходів. Екологічні проблеми, пов'язані в першу чергу з небезпеками звалищного газу. Іншою екологічною проблемою є ризик міграції побічних продуктів відходів в ґрунт, ґрунтові води або атмосферу.

Міграція біогазу є серйозною проблемою через ризик виникнення пожежі та вибуху і ризику для здоров'я, пов'язані з іншими органічними компонентами ЗГ. Методи контролю газу в сучасних полігонах включають в себе створення фізичних та пневматичних бар'єрів, пасивних систем вентилявання та активних систем збору і очищення газу, як всередині відходів, так і під структурами, побудованими на закритому полігоні. Наявність систем збору газу і інженерних покриттів може до деякої міри знизити небезпеку, викликану звалищним газом. Проте можуть знадобитися інші додаткові захисні заходи, навіть для сучасного полігону з геомембранним покриваючим шаром і активною системою контролю ЗГ.

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 безперервно 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 ЗГ. М'яке використання часто асоціюється з введенням додаткової вологи на звалищі (наприклад, за допомогою іригаційних систем). Додавання вологи може значно збільшити обсяг генерації газу з органічних відходів і викликати осадку, спричинити "реактивацію" деградації на зрілих звалищах, особливо в посушливих кліматичних умовах. Проте м'яке і тверде використання (тобто, інфраструктури, будівель, опорах мостів і т.д.) звалищ здійснюється за умови, що було зібрано досить довідкової інформація про звалище, було зроблено належну оцінку потенційних проблеми, і що перепланування управляється належним чином.

Закриті полігони ТПВ використовувалися для різних цілей. Проекти варіювалися від парків, рекреаційних, комерційних або промислових розробок, таких як склади і контейнери, офісні приміщення, торгові центри, автомагістралі, надземні дороги і автомагістралі, дороги на палях або швидкісні дороги, до висотних будівель (рис. 5.11).



а)



б)

Рис. 5.11 Приклади побудови на закритих звалищах:

а) магазин роздрібної торгівлі Сан-Франциско, Каліфорнія; б) поле для гольфу Фуллертон, Каліфорнія

Для вищевказаних проектів були розроблені технічні інженерні рішення для будівництва глибоких і поверхневих фундаментів, систем контролю міграції

звалищного газу і систем захисту. Є також приклади побудови на середньовічних полігонах [135].

На даний час поширене використання закритих звалищ під сонячні батареї (рис. 5.12, 5.13). Це зумовлено зазвичай великими площами звалищ, а також відносно легкою вагою таких конструкцій.[155]



Рис.5.12 Сонячні батареї на колишньому санітарному звалищі району Грейтер Лоуренс (США) [156]



Рис. 5.13 Спорудження сонячних батарей на колишньому санітарному звалищі штат Массачусетс (США) [156]

Кіностудії, складські та адміністративні будівлі були побудовані на полігоні, який працював з 1870-х до 1960-х років в Монреалі, Канада. Полігон стабілізувалася, були виявлені дуже низькі концентрації звалищного газу в 41 свердловинах: CH_4 (від 0 до $> 50,000$ ppm); SO_2 і H_2S ($< 0,25$ - $3,0$ ppm); і CO ($< 0,25$ - 111 ppm). П'ять будівель, що займають загальну площу $10,312$ м² були побудовані на палях і була змонтована геомембрана, що складається з дренажних труб діаметром 150 мм, занурених у шар матеріалу товщиною 500 мм і діаметром 20-40 мм. Було встановлено вакуумний насос (100 кубічних футів в хвилину) на дахах кожного будинку для безперервної вентиляції повітря, що забруднено біогазом (рис. 5.14). Бітумна геомембрана була обрана в якості газового бар'єру, в зв'язку з тим, що її було легко встановити (велика кількість виступаючих елементів, 367 палів, 187 труб, 838 структурних сталевих стрижнів, а також багато піддонів ям, які необхідно надійно запечатати), і прикріпити до бетонних структур (геомембрана механічно прикріплена до 1032 метрів периферійних бетонних стінок). З метою безпеки, 37 детекторів метану були також встановлені в різних місцях будівель. Після закінчення одного року моніторингу, не було виявлено метану в жодному з п'яти будівель.

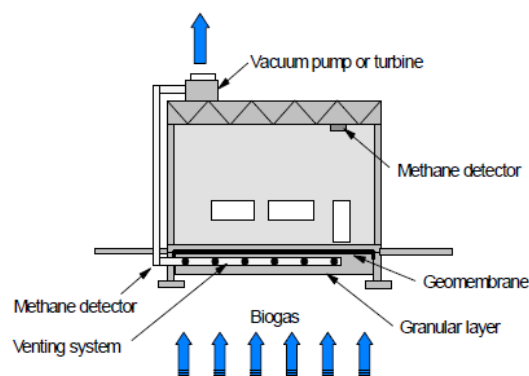


Рис.5.14 Система відводу біогазу під будівлею

Основним елементом проектування Редвуд-Сіті офіс парк (Каліфорнія) була установка палів для підтримки 20-поверхового будівельного комплексу. Бетонні палі сорокаметрової довжини вмонтовані через старий полігон в ґрунт

основи полігону протягом одного року. 110 паль були встановлені для кожного фундаменту будівлі, в цілому для всього комплексу були встановлені 2200 паль.

На закритому звалищі в районі Вілмінгтон міста Лос-Анджелес, США побудовано спортивні майданчики. Однією з головних проблем було те, що зрошення, пов'язане з використанням звалища може призвести до значного збільшення інфільтрації в відходи, що призводить до збільшення виробки біогазу, осадок, і може забруднити підземні води. Комбіноване зрошення і опади необхідні для підтримки здорового дерну трави в напівзасушливому кліматі Лос-Анджелеса і становить приблизно 140 см на рік у порівнянні із середньою річною кількістю опадів близько 32 см. Було проведено детальний аналіз водного балансу з використанням моделі ненасиченого потоку для розробки відповідного ґрунтового покриву для звалища. Результати аналізу водного балансу показали, що монолітне покриття з інтенсивним випаровуванням і проходженням у вигляді газу через пори і пустоти та не може забезпечити достатню стійкість до інфільтрації.

Проте, покриття з капілярним розривом може забезпечити достатній опір інфільтрації за умови, що система зрошення належним чином контролюється (тобто відсутній надмірний полив). Крім інгібування інфільтрації, капілярний розрив також надав засоби для збору і видалення (в разі необхідності) звалищного газу. Щоб виключити надмірний полив, на звалищі встановлено "розумну" систему зрошення, в якій контролер зрошення був підключений до витратоміра. Щоденні значення зрошення автоматично розраховуються з врахуванням атмосферних опадів і випаровування за попередні 24 години. Регулятор потоку також має можливість зондування розривів ліній в іригаційній системі. Моніторинг після закриття звалища також включає в себе датчики вологості ґрунту (нейтронний зонд) всередині і під покриваючим шаром ґрунту, щоб оцінити ефективність інтелектуальної системи зрошення.

Ділянки без рослинного покриву (наприклад, дороги, автостоянки, баскетбольні майданчики) вкриті асфальтобетонним бар'єрним шаром низької проникності. Асфальтобетон має просочений смолою тканинний проміжний шар

для пригнічення утворення тріщин. План технічного обслуговування після закриття включає в себе щорічну герметизацію тріщин в асфальтобетоні та щоквартальну оцінку даних зонда вологості ґрунту.

Звалище Макколл Суперфонд в штаті Каліфорнія являє собою приклад звалища небезпечних відходів, яке було перероблено для продуктивного використання (рис 5.15). Це звалище площею 8,8 га містило 12 безпрокладочних западин, що містять надзвичайно кислий шлам нафтових відходів (рН менше 1,0). Деякі частини закритого звалища використовувалися як озеленений відкритий простір, деякі - як поля для гольфу. Покриваючий шар включав в себе композитний геомембранний / геосинтетичний глинистий бар'єр інфільтрації. Через низьку несучу здатність відходів, шар фундаменту під покриваючим шаром на ділянці поля для гольфу включає в себе два шари зміцненої георешітки. Шар фундаменту також включає труби вилучення газу, з'єднані з вентилятором і активованим блоком обробки вуглецю. Покриваючий шар прикріплений до стінки з ґрунтово -бентонітової суспензії, яка повністю оточувала звалище.



Рис. 5.15 Звалище небезпечних відходів Макколл Суперфонд в штаті Каліфорнія.

До недавнього часу, в ході проектування звалища дуже мало уваги було надано потенційному використанню в майбутньому землі після закриття полігону. Проте, близько 20 років тому, правила захоронення відходів почали

вимагати від власників звалища підготувати обслуговування після закриття звалища і виробити плани моніторингу. Спочатку, для простоти в розробці цих планів, багато власників просто позначали ділянку для використання в якості безпечного відкритого простору після закриття. Оскільки фінансові вигоди від використання закритого полігону стають все більш очевидними, і тиск з боку спільноти збільшується, альтернативні сценарії використання звалища стають все більш поширеними. В Японії, де доступного простору дуже мало, 67% закритих звалищ були повторно використані для різних проектів, в той час як в Фінляндії, де є більше вільного простору, 80% закритих не використовуються.

Таблиця 5.1 – Резюме еволюції муніципальних звалищ [155].

Період	Тип звалища	Проблеми	Способи розв'язку проблем
Сімдесяті	Санітарне звалище	Неприємний запах, пожежі та загальне забруднення	Щоденне перекриття відходів, доцільне розміщення та інженерний підхід
Кінець 80-х – початок 90-х	Інженерні звалища та рециклінг	Забруднення ґрунту і ґрунтових вод	Інженерні системи збору та відводу інфільтрату і ЗГ, використання покриваючого та підстилаючого шарів, підвищення регулювання, фінансові гарантії
Дев'яності	Поліпшення розміщення відходів, вивезення відходів і їх повторне використання	Міграція газу та стійкість	Включення технічних та соціально-політичних чинників в процесі вибору майданчика, розвиток нових підстилаючих матеріалів, нових концепцій покриваючого шару, використання території звалища після закриття
Двохтисячні	Вдосконалена схема поводження з відходами	–	Особливий наголос робиться на механіко-біологічній попередній обробці відходів, рециркуляції фільтрату і біореактори

Перебудова старих полігонів для жорсткого використання вимагає проектування і будівництва фундаментів або вбудованих в/через тіло відходів або розташованих на поверхні полігону. Отже, існує необхідність кількісної

оцінки осадок і несучої здатності звалища і переконатися в тому, що утворення газу належним чином контролюється і не представляє значного ризику вибуху або небезпеки для здоров'я і безпеки людини. Зрештою, старе звалище досягне біохімічної і структурної стабільності. Проте, значна тривалість може знадобитися для досягнення ступеня стабільності, який необхідний, щоб істотно знизити інженерні проблеми і проблеми зі здоров'ям і безпекою людини, пов'язані з біодеградацією відходів. Деякі дослідники пропонують відкласти використання звалища, поки маса відходів не стабілізується. Слід зазначити, запропоновано 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 вмістом вологи;
- звалище не повинні містити токсичних або небезпечних матеріалів, зокрема рідких відходів;
- розвиток повинен відповідати умовам полігону.

Таким чином, дорогі заходи щодо запобігання потрапляння звалищного газу не можуть бути економічно вигідними для розвитку низької вартості.

Хоча наведені вище критерії можуть бути бажаними атрибутами перепланування звалища, досвід показав, що вони не обов'язкові. Досвід показує, дуже мало полігонів ТПВ не можуть бути перепрофільовані, якщо належна увага приділяється техніці і ризикам для здоров'я і безпеці.

Інженерні питання, пов'язані з переплануванням для м'якого використання в деякій мірі менш складні, ніж ті, які пов'язані з жорстким використанням. М'які застосування (наприклад, парки, поля для гольфу) зазвичай включають в себе відкритий простір. Отже, потенціал для накопичення вибухонебезпечних рівнів сміттєвих газів менше для м'яких застосувань, ніж для жорстких застосувань. Однак, якщо газ не контролюється належним чином, він може все ще спричиняти ризики вибухів і ризик для здоров'я і може негативно вплинути

на рослинність. Тому контроль міграції газу як і раніше є важливим питанням для м'якого використання.

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 полігону 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 звалище.

Необхідним також є щорічний моніторинг закритого звалища для виявлення і усунення пошкодження у покриваючому шарі звалища, в тому числі бар'єрного шару, систем газового контролю, систем контролю поверхневих вод, а також моніторинг для своєчасного ремонту інженерних комунікацій, на які впливає осадка.

5.4 Спорудження та конструкція фундаментів будівель на закритому полігоні ТПВ

Спорудження фундаментів на закритих звалища є складним завданням, так як воно вимагає проведення аналізу незвичайних аспектів, пов'язаних з механікою відходів. Великі повні і диференціальні осадки, як правило, основні чинники у виборі типів фундаменту. Поверхневі системи фундаменту, як

правило, обирають при будівництві відносно легких конструкцій. Більш важкі структури потребують глибоких фундаментів. Проте, глибокі фундаменти, як правило, використовуються на старих звалищах без сконструйованих донних систем підстилаючого шару.

При оцінці несучої здатності звалища, необхідно мати на увазі, що товщина і міцність покриваючого шару відіграють дуже важливу роль в підтримці фундаменту. Якщо покриваючий шар відносно товстий, то він може забезпечити суттєву несучу здатність для фундаментів поверхневого закладення. Проте, ґрунтовий покрив часто може бути тонким в порівнянні з розміром фундаменту. В цьому випадку навантаження на фундамент буде передаватися через покриваючий шар і буде розвивати його опір в відходах. Таким чином, аналіз несучої здатності потребує оцінки міцності відходів. Проте, досвід показав, що, через пластичні характеристики ТПВ, необхідні великі деформації для активації несучої здатності відходів, і складно розробити структуру, яка дозволить такі великі деформації. Таким чином, в той час як загальна осадка має розглядатися з урахуванням інженерних мереж і зростання будівель, диференціальна осадка визначає структурну конструкцію неглибоких фундаментів на відходах. З цієї причини, зазвичай використовують суцільні фундаменти, а не ізольовані фундаменти на відходах. У багатьох випадках, якщо покриваючий шар тонкий, під фундаментом забезпечується інженерні насипи для подолання неоднорідних осідань. Крім того, як показано на рис. 5.16, наповнювач може бути об'єднаний з георешітками або високоміцним геотекстилем для створення композитного матеріалу з більш високою жорсткістю, щоб підтримувати великі навантаження на фундаменти.

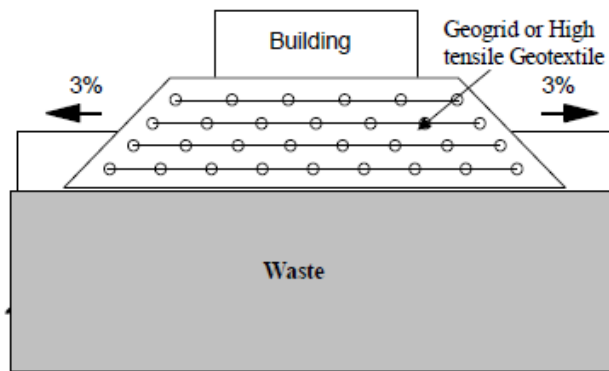


Рис. 5.16 Інженерні конструкції у вигляді геосітки чи високоміцного геотекстилю під фундаментом

Забивні палі це тип глибоких фундаментів, що найбільш часто використовуються для підтримки великих структур, побудованих на старих звалищах. Самі по собі відходи, як правило, не мають достатню міцність і стійкість до осадок, щоб забезпечити здатність (ємність) палі. Найбільш часто використовуються збірні, попередньо напружені залізобетонні палі. Використовуються сталеві палі Н-типу і сталеві трубоподібні палі, але серйозна увага має бути приділена потенційній корозії сталевих елементів. Покриття палей Н-типу і заповнення трубоподібних палей бетоном здійснюється для зменшення корозії. Одним з недоліків забивних палей є те, що вони можуть виводити відходи під дно полігону, можливо, в ґрунтові води. З цієї причини, часто використовуються конічні або клиновидні наконечники на палі.

Часто можна очікувати значну довгострокову осадку відходів протягом терміну служби конструкції, побудованої на основі полігону, навіть якщо структура підтримується палями. Осадка відходів може також викликати навантаження та тертя на палі (при глибоких фундаментах). Воно відбувається, коли осадка матеріалу, що оточує палю перевищує рух вниз вала палі. Відомо, що малі (<5 мм) руху ґрунту навколо палі може в повній мірі мобілізувати негативне тертя.

Є кілька способів, щоб зменшити проблему негативного поверхневого тертя. Зокрема застосування покриттів палей, що зменшують тертя, застосування

подвійної системи паль або попереднє свердлення отворів більшого діаметру, які заповнюють бентонітовим розчином. У матеріалах, таких як ТПВ, негативне поверхнєве тертя для вкритих бітумом збірних попередньо напружених залізобетонних паль скоротилося від 30% до 40%. Важливим питанням, яке не слід випускати з уваги, коли використовується бітум є діапазон температур існуючих на звалищі. Високі температури (50° до 70° С) часто спостерігаються на звалищах. Проте, температура на звалищах має тенденцію до зниження з плином часу і, як правило, знаходиться в діапазоні від 20° до 40° С, в залежності від відходів. Якщо розглядають бітумне покриття, температура відходів повинна бути ретельно досліджена, тому що продуктивність бітумного покриття може мати низький ефект при високих температурах.

5.5 Заходи, направлені на захист будівель, що споруджені на основі закритого полігону ТПВ від звалищного газу

Такі гази, як метан (CH_4) та діоксиду вуглецю (CO_2) виробляються на звалищах. Ці гази можуть мігрувати і накопичуватися до вибухонебезпечної концентрації. Метан вибухонебезпечний при концентрації 5-15% за обсягом в повітрі. Гази також мають низькі концентрації неметанових летких органічних сполук (НМЛОС). Деякі з цих НМЛОС мають канцерогенні властивості. Рух газів в пористих середовищах відбувається двома основними транспортними механізмами: адвективним потоком і дифузним потоком. У дифузійному потоці газ рухається у відповідь на градієнт концентрацій. У адвективному потоці газ рухається у відповідь на градієнт загального тиску. Для вирівнювання тиску, маса газу переміщається з області більш високого тиску до більш низького. У контексті звалищ, основною рушійною силою для міграції газу, особливо через системи покриття, є адвективний потік. Він розвивається від перепадів тиску як за рахунок внутрішнього виробництва газу так і природних коливань атмосферного тиску (барометричного накачування). Дійсно, падіння барометричного тиску, як правило, збільшує концентрацію звалищного газу поблизу поверхневих шарів.

Найбільш відомі інциденти, які призвели до великого матеріального збитку і загибелі людей це Лоско (Англія), Скеллінгстед, (Данія) і Массерано (Італія). Вибух Лоско в Сполученому Королівстві відбувся після того, як атмосферний тиск знизився на 29 мбар приблизно за 7 годин.

Існує широкий спектр доступних методів захисту від звалищного газу, в залежності від рівня ризику. В Австралії не існує ніяких керівних принципів із зазначенням заходів, щодо захисту будівельних конструкцій всередині або навколо звалища. Проте, в Каліфорнії, правила вимагають встановлення систем захисту будівлі, які включають в себе мембранний бар'єр під структурою і обладнані системою сигналізації всередині структури для об'єктів, побудованих в межах 300 м від полігону. У таблиці 5.2 наводиться приклад захисних заходів, які можуть бути прийняті для зменшення проблеми звалищного газу на полігоні.

Таблиця 5.2 – Захисні заходи, які можуть бути прийняті для зменшення проблеми звалищного газу на полігоні

Гранична концентрація СН4 (% за об'ємом)	Гранична концентрація СО2 (% за об'ємом)	Граничний об'єм СО2 або СН4 у свердловинному газі; 1/h)	Житлові будинки	Нежитлові будинки (офісні, промислові і т.д.)
<0,1	<0,1	<0,07	Жодний спеціальних запобіжних заходів	Жодних спеціальних запобіжних заходів
<1	<1,5	<0,7	Наземні або підвісні плити, геомембрани, запечатані навколо отворів	Укріплені литі плити основи. Всі з'єднання і проникнення запечатані. Можливо встановлення геомембран. Зернистий шар під плитами з пасивною вентиляцією в атмосферу, що перемежується смугами або трубами з геокмпозиту

Продовження Табл. 5.2

<5	<5	<3,5	Наземні або підвісні плити. Газостійка геомембрана і підземний підпростір з пасивною вентиляцією.	Укріплені литі бетонні плити основи. Всі з'єднання і проникнення запечатані. Газостійка і водонепроникна геомембрана та підземний підпростір з пасивною вентиляцією.
<20	<20	<15	Наземні або підвісні плити. Газостійка геомембрана і підземний підпростір з пасивною вентиляцією, а також шар вентиляції у ґрунті.	Укріплені литі бетонні плити основи. Всі з'єднання і проникнення запечатані. Газостійка геомембрана та підземний підпростір з пасивною вентиляцією.
<20	<20	<70	Особлива газостійка геомембрана і підземний вентиляований простір, підземний шар вентиляції і наземні свердловини вентиляції	Укріплені литі бетонні плити основи. Всі з'єднання і проникнення запечатані. Газостійка геомембрана та підземний підпростір з пасивною вентиляцією. Наземні свердловини вентиляції
<20	<20	<70	Підходить у випадку, якщо газовий режим знижується і проводиться кількісна оцінка необхідних захисних заходів в поєднанні з конструкцією фундаменту	Укріплені литі бетонні плити основи. Всі з'єднання і проникнення запечатані. Газостійка геомембрана та підземний підпростір з активною (примусовою) вентиляцією, яка підлягає постійному моніторингу. Наземні свердловини вентиляції

Важливо підкреслити, що моніторинг ділянки слід проводити протягом періоду часу і при різних погодних умовах. У більшості випадків, вентиляція підпільного простору є основним методом забезпечення захисту від газу зі вторинним захистом, що забезпечується бар'єром на шляху міграції газу над підпросторі. Система сигналізації також може бути розміщена в структурі, щоб попередити мешканців про скупчення газу. Рис. 5.17 ілюструє передову систему захисту будівлі від звалищного газу.

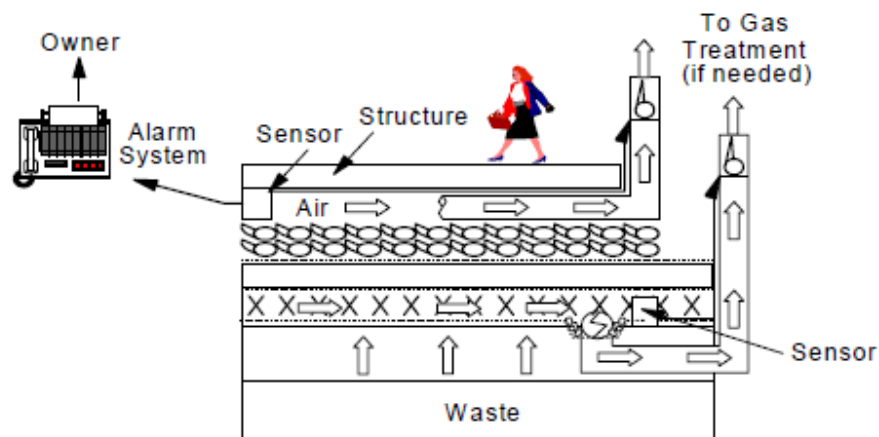


Рис. 5.17 Передова система захисту будівлі від звалищного газу

Найбільш важливим аспектом в цьому типі будівельних заходів є довгостроковий план стратегії обслуговування, щоб гарантувати їх роботу протягом тривалого періоду часу (тобто, до тих пір поки не звалище припиняє виробництво газу). Обраний захід повинен бути в змозі захистити конструкцію для корисного використання об'єкта.

Висновки до розділу 5

1. 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 підстиляючого 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.

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

3. Наведено практичне застосування методики розрахунку осідання звалища на прикладі полігону ТПВ в м. Бориспіль Київської області.

4. Розглянуто попереднє планування та процедури закриття звалища для спорудження будівель та конструкцій, спорудження та конструкція фундаментів будівель на закритому полігоні ТПВ та заходи, направлені на захист будівель, що споруджені на основі закритого полігону ТПВ від звалищного газу для забезпечення екологічної безпеки об'єкту, збудованому на закритому полігоні, та збереження здоров'я людей.

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 спалюванням 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 пісочній, 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° до 30° 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° – через 20 років, при куті 45° – через 13 років.

9. Отримані аналітичні залежності осідання полігону ТПВ з різними підстилаючими ґрунтами від величини статичних та динамічних навантажень 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 підстиляючого 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р. № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80>
2. Статистичний збірник «Довкілля України за 2018 рік» / За ред. О. М. Прокопенко. Державна служба статистики України. К., 2019. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/11/Zb_dovk_2018.pdf
3. Звітність 1-ТПВ розділ 1 за 2019 рік. Веб-сайт Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2019/03/TPV-1-2018.pdf>
4. Звітність 2-ТПВ розділ 2 за 2019 рік. Веб-сайт Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2019/03/TPV-1-2018.pdf>
5. Звітність 3-ТПВ розділ 3 за 2019 рік. Веб-сайт Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2019/03/TPV-1-2018.pdf>
6. Звітність 4-ТПВ розділ 4 за 2019 рік. Веб-сайт Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2019/03/TPV-1-2018.pdf>
7. Із третього світу в перший. Реформа управління відходами в Україні. URL: <https://www.pwc.com/ua/en/survey/2020/waste-management.pdf>
8. Національного плану управління відходами до 2030 року URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/117-2019-p#Text>
9. 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>.
10. 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>.
11. 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>.

12. 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>.

13. ДБН в.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування» <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/03/DBN-V.2.4-2-2005.pdf>

14. Управління та поводження з відходами. Частина 3. Полігони твердих побутових відходів: навчальний посібник / Петрук В. Г., Васильківський І. В., Іщенко В. А. Петрук Р.В. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 139 с. https://www.researchgate.net/publication/276830967_Upravlinna_ta_povodzenna_z_vidhodami_C3_Poligoni_tverdih_pobutovih_vidhodiv

15. Di Palma, P. Ferrantelli, C. Merli, E. Petrucci, Treatment of industrial landfill leachate by means of evaporation and reverse osmosis, *Waste Manage.* 22 (2002) 951–955.

16. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S. A. 1993. *Integrated solid waste management*, McGraw-Hill, New York.

17. Goldstein, N., and Madtes, C. 2001. “The state of garbage in America.” *BioCycle*, 42_12_, 42–54.

18. Gordon, D. L., Lord, J. A., and Twine, D. 1986. “The Stockley Park project.” *Proc., Institution of Civil Engineers Conf.: Building on Marginal and Derelict Land*, Thomas Telford, London, 359–379.

19. Magnuson, A. 1999. “Landfill closure: End uses.” *MSW Manage.*, 95, 1–8.

20. Conrad, L. G. 2000. “A Canadian prospective—Use of the Britannia sanitary landfill site as a golf course.” *Proc., 5th Annual Landfill Symp.*, Solid Waste Association of North America, Austin, Tex., 73–79.

21. Eliassen, R. 1947. “Housing construction on refuse landfills.” *Eng. News-Rec.*, 138, 756–760.

22. Eid, H. T., Stark, T. D., Evans, W. D., and Sherry, P. E. 2000. “Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties.” *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126 5, 397–407.

23. Kelly, W. E. 1976. “Ground-water pollution near a landfill.” *J. Environ. Eng. Div. (Am. Soc. Civ. Eng.)*, 102 6, 1189–1199.

24. Campbell, D. J. 1996. "Explosion and fire hazards associated with landfill gas." *Landfilling of waste: Biogas*, T. H. Christensen et al., eds., E&FN Spon, London, 133–142.
25. Merry, S.M., Kavazanjian Jr., E., et al., 2005. Reconnaissance of the 10 July 2000 Payatas landfill failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE /MAY 2005,19 (2), 100–107.
26. Stark, T.D., Eid, H.T., Evans, W.D., Sherry, P.E., 2000. Municipal solid waste slope failure. II: stability analyses. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5).
27. Zekkos, D.P., 2005. Evaluation of Static and Dynamic Properties of Municipal Solid Waste. A Dissertation Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering, University of California, Berkeley.
28. Zekkos, D.P., Bray, J.D., Kavazanjian Jr., E., Matasovic, N., Rathje, E.M., Riemer, M.F., 2006. Unit weight of municipal solid waste. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132 (10), 1250–1261.
29. Caicedo, B., Yamin, L., Giraldo, E., Coronado, O., 2002a. Geomechanical properties of municipal solid waste in Dona Juana sanitary landfill. In: *Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil*, vol. 1, pp. 177–182.
30. Caicedo, B., Giraldo, E., Yamin, L., Soler, N., 2002b. The landslide of Dona Juana landfill in Bogota, a case study. In: *Proceeding of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Brazil*, vol. 1, pp. 171–175.
31. Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C., Damanhuri, E., 2005. Stability of landfills – the Bandung dumpsite disaster. In: *CISA (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Landfill Symposium, Cagliari, Italy*.
32. Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills S. L. Machado, M. Karimpour-Fard, N. Shariatmadari, M. F. Carvalho, Julio C.F. do Nascimento (2010) *Waste management* (30), p.2579-2591.
33. Ertan Durmusoglu; M. Yavuz Corapcioglu and Kagan Tuncay (2005) *Landfill Settlement with Decomposition and Gas Generation Journal of Environmental Engineering*, Vol. 131, No. 9, p.1311-1321.
34. Landva, A.O., Clark, J.I., 1986. Geotechnical testing of wastefill. In: *Proceedings of the 39th Canadian Geotechnical Conference Ottawa, Ontario*, pp. 371–385.
35. Landva, A.O., Clark, J.I., 1990. Geotechnics of waste fill. In: *Landva and Knowles (Eds.), Theory and Practice, STP 1070. ASTM*, pp. 86–103.

36. Jessberger, H.L., Kockel, R., 1993. Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste. In: Sarsby, R.W. (Ed.), *Waste Disposal by Landfill*. Green '93, pp. 313–322.
37. Jessberger, H.L., 1994. Geotechnical aspects of landfill design and construction. Part 2: material parameters and test methods. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering* 107, 105–113.
38. Gabr, M.A., Valero, S.N., 1995. Geotechnical properties of municipal solid waste. *Geotechnical Testing Journal* 18, 241–254.
39. Grisolia, M., Napoleoni, Q., Tangredi, G., 1995. The use of triaxial tests for the mechanical characterization of municipal solid waste. In: *Proceedings of the Fifth International Landfill Symposium, Sardinia '95*, pp. 761–767.
40. Grisolia, M., Napoleoni, Q., 1996. Geotechnical characterization of municipal solid waste: choice of design parameters. In: *Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan*, pp. 641–646.
41. Kolsch, F., 1995. Material values for some mechanical properties of domestic waste. In: *Proceedings of the Fifth International Landfill Symposium in Sardinia*, pp. 711–729.
42. Kavazanjian Jr., E., Matasovic, N., Bonaparte, R., Schmertmann, G.R., 1995. Evaluation of MSW properties for seismic analysis. *Geoenvironment 2000, Geotechnical Special Publication No. 46*, pp. 1126–1141.
43. Kavazanjian Jr., E., 1999. Seismic design of solid waste containment facilities. In: *Proceedings of the Eight Canadian Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, BC, June 1999*, pp. 51–89.
44. Manassero, M., Van Impe, W.F., Bouazza, A., 1996. Waste disposal and containment. In: *Proceedings of the Second International Congress on Environmental Geotechnics, Osaka, Japan, vol. 2*, pp. 1425–1474.
45. Mahler, C.F., Burin, E., Oliveira, F.J.P., 1998. Reflections on the stability of a municipal sanitary landfill. In: Seco e Pinto (Ed.), *Proceedings of the Third International Congress on Environmental Geotechnics. Lisbon, Portugal*, pp. 83–88.
46. Mahler, C.F., De Lamare Netto, A., 2003. Shear resistance of mechanical biological pre-treated domestic urban waste. In: *Proceedings of the Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, 6–10 October 2003*.
47. Mazzucato, N., Simonini, P., Colombo, S., 1999. Analysis of block slide in a MSW landfill. In: *Proceedings of the Sardinia 1999, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Italy*.
48. Carvalho, M.F., 1999. Mechanical Behavior of Municipal Solid Waste. Ph.D thesis, University of Sao Paulo, Sao Carlos, SP, Brazil (in Portuguese).

49. Pelkey, S.A., Valsangkar, A.J., Landva, A., 2001. Shear displacement dependent strength of municipal solid waste and its major constituents. *Geotechnical Testing Journal* 381, 390.
50. Machado, S.L., Carvalho, M.F., Vilar, O.M., 2002. Constitutive model for municipal solid waste. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 128 (11), 940–951.
51. Machado, S.L., Vilar, O.M., Carvalho, M.F., 2008. Constitutive model for long term municipal solid waste mechanical behavior. *Computers and Geotechnics* 35 (5), 775–790.
52. Machado, S.L., Carvalho, M.F., Vilar, O.M., 2009. Modeling the influence of biodegradation on sanitary landfill settlements. *Soils and Rocks, Sao Paulo* 32 (3), 123–134.
53. Xiang-rong, Zhu, Jian-min, Jin, Peng-fei, Fang, 2003. Geotechnical behavior of the MSW in Tianziling landfill. *Journal of Zhejiang University Science* 4 (3), 324–330.
54. Vilar, O.M., Carvalho, M.F., 2004. Mechanical properties of municipal solid waste. *Journal of Testing and Evaluation* 32, 1–12.
55. Towhata, I., Kawano, Y., Yonai, Y., Koelsh, F., 2004. Laboratory tests on dynamic properties of municipal wastes. In: *Proceedings of the 11th Conference in Soil Dynamics and Earthquake Engineering and Third International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, vol. 1, pp. 688–693.
56. Dixon, N., Jones, D.R.V., 2005. Engineering properties of municipal solid waste. *Geotextiles and Geomembranes Journal* 23 (3), 205–233.
57. Nascimento, J.C.F., 2007. Mechanical behavior of municipal solid waste. Ms.C. thesis, University of Sao Paulo, Sao Carlos, SP, Brazil (in Portuguese).
58. Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Parakalla, N.S., Gangathulasi, J., Bogner, J.E., 2009a. Geotechnical properties of fresh municipal solid waste at Orchard Hills Landfill, USA. *Waste Management* 29 (2), 952–959.
59. Reddy, K.R., Gangathulasi, J., Parakalla, N.S., Hettiarachchi, H., Bogner, J.E., Lagier, T., 2009b. Compressibility and shear strength of municipal solid waste under short-term leachate recirculation operations. *Waste Management and Research* 27 (6), 578–587.
60. Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Parakalla, N., Gangathulasi, J., Bogner, J., Lagier, T., 2009c. Hydraulic conductivity of MSW in landfills. *Journal of Environmental Engineering* 135 (8), 677–683.
61. Karimpour-Fard, M., 2009. Mechanical Behavior of MSW Materials with Different Initial State under Static Loading. A Dissertation Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering, Iran University of Science and Technology (in Persian).

62. Shariatmadari, N., Machado, S.L., Noorzad, A., Karimpour-Fard, M., 2009. Municipal solid waste effective stress analysis. *Waste Management* 29 (12), 2918–2930.
63. Sivakumar Babu G.L., Reddy K.R., Chouskey S.K., Kulkarni H.S. Prediction of Long-term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management*. New York, ASCE, 2010, vol. 14, no. 2, pp. 139—150. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.1944-8376.0000024](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000024).
64. G.L. Sivakumar and Babui Pinom Eringi Stress deformation analysis of MSW landfills https://www.researchgate.net/publication/292212933_Stress_deformation_analysis_of_MSW_landfills
65. Sivakumar Babu G.L. Evaluation of Municipal Solid Waste Characteristics of a Typical Landfill in Bangalore. Bangalore, India, India Institute of Science, 2012. Available at: <http://cistup.iisc.ernet.in/presentations/Research%20project/CIST038.pdf/>. Date of access: 02.04.2014.
66. Sowers, G. F. 1973. “Settlement of waste disposal fills.” *Proc., 8th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Russia, Vol. 2, 207–210.
67. Wall, D. K., and Zeiss, C. 1995. “Municipal landfill biodegradation and settlement.” *J. Environ. Eng.*, 121 3, 214–224.
68. Edil, Tuncer B; Ranguette, Valeri J.; Wuellner, William W., Settlement of municipal refuse, ASTM Special Technical Publication, n 1070, 1990, p 225–239.
69. Houston WN, Houston SL, Liu JW, Elsayed A, Sanders CO (1995) In-situ testing methods for dynamic properties of MSW Landfills. In: Proceedings of specialty conference on earthquake design and performance of solid waste landfills, Geotechnical Special Publication 54, ASCE, San Diego, CA, October, 1995, pp 73–82.
70. Edincliler A, Benson CH, Edil TB (1996) Shear strength of municipal solid waste: interim report—year 1. Environmental geotechnics research report 96-2, prepared for WMX Technologies, Inc., February, 65 pp.
71. Van Impe, W.F., Bouazza, A., 1998. Large shear tests on compacted bales of municipal solid waste. *Soils and Foundations* 38 (3), 199–200.
72. Thomas S, Aboura AA, Gourc JP, Gotteland P, Billard H, Delineau T, Gisbert T, Ouvry JF, Vuillemin M (1999) An in situ waste mechanical experimentation on a French Landfill. In: Proceedings Sardinia 99, seventh international waste management and landfill symposium, Cagliari, Italy.
73. Vilar OM, Carvalho MF (2004) Mechanical properties of municipal solid waste. *Geotech Test ASTM* 32(6):1-12.

74. C. Gomes, M. L. Lopes, M. G. Lopes. A Study of MSW properties of a Portuguese landfill Hydro-Physico-Mechanics of Landfills, LIRIGM, Grenoble 1 University, France, 2005, 21-22.
75. Itoh T, Towhata I, Kawano Y (2005) Mechanical properties of municipal waste deposits and ground improvement. In: Proceedings of the 16th international conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Osaka, Japan, September, pp 2273–2276.
76. Feng, Shi-jin, 2005. Static and dynamic strength properties of municipal solid waste and stability analyses of landfill. PhD thesis of Zhejiang University, Hangzhou. (in Chinese).
77. Zhan.T.L.T, Chen.Y.M, Lin.W.A 2008, Shear strength characterization of municipal solid waste at the Suzhou Landfill, China, Journal of Engineering Geology, ASCE 126 (5), 97-11.
78. Dixon, N., Russell, D., Jones, V., 2005. Engineering properties of municipal solid waste. Geotextiles and Geomembranes 23, 205–233.
79. Reddy, K.R., Hettiarachchi, H., Gangathulasi, J. & Bogner, J.E. (2011) Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation. [J]. Waste Management, 31(X), 952–959.
80. Zehnder AJB (1978) Ecology of methane formation. Water pollution Microbiol 2: 349-376.
81. Tan, T.S., Inoue, T., and Lee, S.L. (1991). Hyperbolic method for consolidation analysis. J.Geotech.Engrg., ASCE, 117(11), 1723–1737.
82. Gabr, M.A., Hossain, M.S., Barlaz, M.A., 2000. Solid waste settlement in landfills with leachate recirculation. Geotechnical News 28(2), 50–55.
83. Hossain, S.M., and Gabr, M.A. (2005). “Prediction of municipal solid waste landfill settlement with leachate recirculation.” Proc., Geo-Frontiers, Austin, Tex., Vol. 168, ASCE, 50.
84. Hettiarachchi, C.H., Meegoda, J.N., Hettiarachchi, J.P., (2003) Settlement of Bioreactor Landfill .Modeling of Settlement Behavior of Bioreactor Landfills: interim Report .Department of civil Engineering, University of Calgary, Alberta, Canada.
85. Hettiarachchi, C.H., Meegoda, J.N., Hettiarachchi, J.P., (2005). Toward a Fundamental Model to Predict the Settlement in Bioreactor Landfills. Geofrontiers Conference, Austin, TX.
86. Hettiarachchi, C.H., Meegoda, J.N., Hettiarachchi, J.P., (2009) “Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement ” Waste Manage., 29(3), 1018-1025.
87. Marques, A.C.M. (2001) “Compaction and compressibility of municipal solid waste” ph.D. thesis, Sao Carlos, Brazil.

88. Marques, A.C.M, and Vilar, O.M. (2003):“Composite comopressibility model for municipal solide waste.”*J.Geotech.Geoenviron.eng.*,129(4),372-378.
89. Bareither, C.A., Breitmeyer, R.J., Erses, A.S., Benson, C.H., Edil, T.B., Barlaz, M.A., 2008. Relative contributions of moisture and biological activity on compression of municipal solid waste in bioreactor landfills. In: *Proc. Glob. Waste Symp. 2008*, Copper Mountain, Colorado, USA.
90. Sherien A.Elagroudy,Mohamed H. Abdel-Razikb,Mostafa A.Warith.,et al., (2008)“Waste settlement in bioreactor landfill models.”28.2366-2374.
91. Rao and Oweis (1977) reference from (ZHAO Yanru 2010).
92. Cuduto, D.P., Huitric, R., 1990.Monitoring landfill movements using precised instruments. In:Landva, A., Knowels, G.D.(Eds.), *Geotechnics of Waste Fill–Theory and Practice*. ASTM STP 1070: American Society for Testing and Materials, Philadelphia,PA,pp.358-370.
93. Pump W. (1998) Rational design of landfills to account for settlement. 10th Ann. Conf. Waste MINZ, New Zealand.
94. Swati, M. and K. Joseph . Settlement analysis of fresh and partially stabilised municipal solid waste in simulated controlled dumps and bioreactor landfills [J].*Waste Manag*,2008,28(8): 1355-1363.
95. Zhao Yanru. Shear strength and creep settlement properties of municipal solid waste at the Chong Qing Landfill, China.
96. Timothy D. Stark, Nejan Huvaj-Sarihan, Guocheng Li (2008) Shear strength of municipal solid waste for stability analyses, *Environmental Geology*, 57, p. 1911–1923. DOI 10.1007/s00254-008-1480-0.
97. Gerber R (1991) CWS slide investigation report. (reference from Edincliler et al. 1996).
98. Bouzza A, Wojnarowicz M (2000) Stability assessment of an old domestic waste slope in Warsaw Poland. In: *Proceedings of slope stability 2000*, sessions of Geo-Denver 2000, ASCE Geotech. Special publication no.101, p 48–57.
99. Grisolia M, Napoleoni Q, Sirini P, Tancedi G (1991) Geotechnical behaviour of sanitary landfill based on laboratory and in-situ tests. In: *Proceedings of 15th conference of geotechnics of Torino*, Societa` Ingegneri e Architetti in Torino (in Italian).
100. Jones R, Taylor D, Dixon N (1997) Shear strength of waste and its use in landfill stability analysis. In: *Proceedings of the conference on geoenviromental engineering*, University of Wales, Cardiff, pp 343–350.
101. Gabr MA, Hossain MS, Barlaz MA (2002) Review of shear strength parameters of municipal solid waste with Leachate recirculation. In: *Proceedings of 2nd intercontinental landfill research symposia*, October 13–16, 2002 in Asheville, NC.

102. Singh S, Murphy BJ (1990) Evaluation of the stability of sanitary landfills. *Geotechnics of waste fills—theory and practice*, ASTM STP 1070. In: Arvid L, David K (eds) American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, pp 240–258.
103. Stark TD, Choi H (2004) Peak v. Residual interface strengths for landfill liner and cover design. *Geosyn Int J Ind Fabrics Assoc Int (IFAI)* 11(6):491–498.
104. Harris JM, Shafer AL, DeGroof W, Hater GR, Gabr M, Barlaz MA (2006) Shear strength of degraded reconstituted municipal solid waste. *Geotech Test J ASTM* 29(2):1–8.
105. Isenberg RH (2003) Landfill and waste geotechnical stability. Presentation at US EPA Bioreactor Workshop, February 27–28, 2003, Arlington-VA.
106. Milanov V, Corade JM, Bruyat-Korda F, Falkenreck G (1997) Waste slope failure analysis at the Rabastens landfill site. Sardinia 97. In: *Proceedings 6th international landfill symposium*, vol 3, pp. 551–557. Cagliari, Italy.
107. Stark TD, Eid HT (1994) Drained residual strength of cohesive soils. *J Geotechn Eng ASCE* 120(5):856–871.
108. Del Greco O, Oggeri C (1994) Shear resistance tests on municipal solid wastes. In: *Proceedings of 1st ICEG*. BiTech Publishers, Edmonton.
109. Haandel Van A.C and Lettinga G. (1994) *Anaerobic sewage treatment* John Wiley and Sons, ISBN 0-471-95121-8.
110. Rigo, J. M. and Cazzuffi, D. A. (1991). “Test Standards and their Classification,” *Geomembranes: Identification and Performance Testing*, Eds. Rollin, A. L. and Rigo, J. M., Chapman and Hall, New York, pp. 22-58.
111. Huvaj-Sarihan N, Stark TD (2008) Back analyses of landfill slope failures. In: *Proceedings of 6th international case histories conference*, 11–16 August 2008, Arlington, VA (accepted).
112. Kocasoy G, Curi K (1995) The Umraniye-Hekimbasi open dump accident. *Waste Manage Res* 13:305–314.
113. Kockel R., Jessberger H.L. *Stability Evaluation of Municipal Solid Waste Slopes*. *Proceedings of 11th European Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Copenhagen, Denmark, Danish Geotechnical Society, 1995, vol. 2, pp. 73–78.
114. Manassero M., Van Impe W.F, Bouazza A. *Waste Disposal and Containment*. *Proceedings of 2nd International Congress on Environmental Geotechnics*. Rotterdam, A.A. Balkema, 1996, vol. 3, pp. 1425—1474.
115. Vermeer P.A., Neher H.P. (1999): A Soft Soil Model that Accounts for Creep. *Proc. Int. Symp. “Beyond 2000 in Computational Geotechnics”*, Amsterdam, pp. 249-261, Balkema, Rotterdam.

116. Bjarngard, A., and Edgers, L. (1990). "Settlement of municipal solid waste landfills." *Proc., 13th Annual Madison Waste Conf.*, Univ. of Wisconsin, Madison, Wis., 192–205.
117. Yen, B. C., and Scanlon, B. S. (1975). "Sanitary landfill settlement rates." *J. Geotech. Eng.*, 101(5), 475–487.
118. El-Fadel, M., Shazbak, S., Saliby, E., and Leckie, J. (1999). "Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications." *Waste Manage. Res.*, 17(5), 347–368.
119. Ling, H. I., Leschchinsky, D., Mohri, I., and Kawabata, T. (1998). "Estimation of municipal solid waste landfill settlement." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 124(1), 21–28.
120. Coumoulos, D. G., and Koryalos, T. P. (1997). "Prediction of attenuation of landfill settlement rates with time." *Proc., 14th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, ISSMFE, Hamburg, Germany, 1807–1811.
121. Gibson, R. E., and Lo, K. Y. (1961). "A theory of soils exhibiting secondary compression." *Acta Polytech. Scand.*, C(10), 1–15.
122. Park, H. I., and Lee, S. R. (1997). "Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition." *J. Resour. Manage. Technol.*, 24(4), 159–165.
123. Oweis, I. S. (2006). "Estimate of landfill settlements due to mechanical and decompositional process." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132, 644–650.
124. Liu, C. N., Chen, R. H., and Chen, K. S. (2006). "Unsaturated consolidation theory for the prediction of long term municipal solid waste landfill settlement." *Waste Manage. Res.*, 24(1), 80–91.
125. Zimmerman, R.E., Wilkey, M.L. Methane from landfills. In annual Conference of Applied Research and Practice on Municipal and Industrial Waste. Madison, WI, 1979, p.13.
126. Rao S.K ., Moulton L.K. and Seals R.K. (1977) Settlement of waste landfills, in Proceedings of the Conference on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials, ASCE.
127. Deutsch (1994) reference from (Waste Management Research Trends by Toma Golush, 2008).
128. Tang, B., Hwang, S. J., Hwang, S. (1995) Dynamics of Toluene Degradation in Biofilters. *Hazardous Waste & Hazardous Materials* 12: pp. 207-207.
129. Zamiskiee M., Kabir M. G. and Haddad A.(1994) Settlement evaluation for cap closure performance, in Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Yeung, A. T. and Felio, G. Y., Eds., Geotechnical Special Publication 40, ASCE, 1994.

130. Bleiker D.E., Farquahr G. and McBean E. (1995) Landfill settlement and the impact on site capacity and waste hydraulic conductivity. *Waste Management and Research*, Vol. 13.

131. Warith, M. A., Smolkin, P. A. and Caldwell, J.G. (1995). "Examination of Performance of a Geomembrane Landfill Cover", *Geoenvironment 2000*, Louisiana State University, Vol. 2, pp 899-913.

132. Boutwell, G.P. & Fiore, V.A. (1995) Settlement of clay cover on saturated garbage . In: *Proc. of Geoenvironment 2000*, pp. 966-979 . ASCE, Reston, VA, USA.

133. Morris, D. V. and Woods, C. E. (1990). Settlement and Engineering considerations in Landfill and final cover design. *Geotechniques of Waste Fills – Theory and Practice*, ASTM, STP 1070, A. Landva and G.D. Knowles, Eds., Philadelphia, P.A., 9-21.

134. Oweis, I.S., Khera, R., "Criteria for Geotechnical Construction on Sanitary Landfills", *International Symposium on Environmental Technology*, April 21 23, 1986, Allentown, Pennsylvania.

135. Stulgis, R.P, Soydemir, C. and Telgener, R.J. (1995). Predicting landfill settlement. *Geoenvironment 2000, Geotech. Spec. Publ. No 46*, ASCE, Vol.2, pp.980-991.

136. Olivier,F.,Gourc,J.P.,Coquant,C.,(2005) "Predicting the storage capacity of deep landfill:Ferques bioreactor case study" Sardinia 2005, 10th International Landfill Symposium, Cagliari, Italie, CISA publisher [Ferques Gourc Sardinia 05](#).

137. Punyamurthula, S. (1995) Finite element analysis of landfill settlement . In: *Proc. of Geosynthetics '95*, Nashville, TN, USA, pp. 1149-1156 .

138. Zhao Y. , Chen Z. , Shi Q. & Huang R. (2001) Monitoring and long-term prediction of refuse compositions and settlement in large-scale landfill . *Waste Management & Research*, 19, 160-168 .

139. Pierucci S. Numerical Simulation of Combustion Process of Fuel Gas Mixtures at Refining Industry / S. Pierucci. *Chemical engineering transactions*. 2015. №43. C. 1351–1356.

140. 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>.

141. 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>.

142. 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>.
143. Hrebenuk 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>
144. 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-nbuv.gov.ua/article>.
145. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. Изд. 2-е. М., Наука, 1977.
146. Rangeard, D. Influence of soil model on the analysis of pressuremeter test [Text] / D. Rangeard, R. Zentar, N-E. Abriak // In proceedings of Int. Conf. on Numer. Models in Geomech., NUMOG IX, 2004. – P. 699—705.
147. Buisman, K. (1936). Results of long duration settlement tests. Proceedings 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mass. Vol. 1, 103–107.
148. Garlanger, J.E. (1972). The consolidation of soils exhibiting creep under constant effective stress. *Geotechnique*, 22, 71–78.
149. Butterfield, R. (1979). A natural compression law for soils (an advance on e-log p'). *Geotechnique*, 29, 469–480.
150. Hill, R. (1950). *The Mathematical Theory of Plasticity*. Oxford University Press, London, U.K.
151. Smith, I.M., Griffith, D.V. (1982). *Programming the Finite Method*. John Wiley & Sons, Chisester, U.K., second edition.
152. Vermeer, P.A., Borst, R. (1984). Non-associated plasticity for soils, concrete and rock. *Heron*, 29 (3).
153. Koiter, W.T. (1960). General theorems for elastic-plastic solids. In I.N. Sneddon, R.Hill (eds.), *Progress in Solid Mechanics*. North-Holland, Amsterdam, volume 1, 165–221.
154. O'Leary, Philip, and Patrick Walsh. (2003). Landfill Closure and Long-Term Care. *Waste Age* 34, no. 1, 7–44.

155. Bouazza, A. & Kavazanjian, E. (2001) Construction on former landfills. *Proceedings 2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics, Newcastle*, 467–482.

156. The Guide to Developing Solar Photovoltaics at Massachusetts Landfills. Massachusetts Department of Energy Resources. Available at <http://www.mass.gov/eea/docs/doer/green-communities/pubs-reports/pvlandfillguide.pdf>.

157. 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-Хмельницкий*, 2018. Вип. 4(36), ч. 10. Url: <https://journals.indexcopernicus.com/search/journal>.

158. 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>.

159. 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>.

160. 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>.

ДОДАТОК А

Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дослідження

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>.
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>.
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>.
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>.
5. Hrebenuk 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»)
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-nbuv.gov.ua/article>.
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>. Р. 37-44. Url: <https://www.scopus.com/article>. (**Scopus**)
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>.
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>.

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>

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>.

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>.

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>.

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).

ДОДАТОК Б

Акт №1 впровадження результатів дисертаційного дослідження

УКРАЇНА
ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«П'ЯТИЙ ГІДРОТЕХНІЧНИЙ ПІДВОДНИЙ ЗАГІН»

Р/р № UA 71 320478 0000000026007227274
в ПАТ АБ «Укргазбанк»
МФО № 320478, код ЄДРПОУ 39145889,
Платник єдиного податку 3 групи юр.
особа
(5%, неплательник ПДВ)



04071
м. Київ, 71,
вул. Електриків, 4,
Тел/факс 425-71-68
Тел.бухгалтерії 482-59-80

№ _____
На № _____ від _____

АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
па тему «Прогнозування використання закритих полігонів твердих
побутових відходів в якості основ споруд»
Броницького Вадима Олеговича


При виконанні гідротехнічних робіт ТОВ «П'ятий гідротехнічний підводний загін» (м. Київ) прийнято до впровадження результати наукових досліджень Броницького Вадима Олеговича з оцінки стійкості природно-техногенного середовища під дією навантажень різного типу, які використано при розрахунках стійкості берегоукріплення водних об'єктів на етапі проектування та початку будівництва берегозахисних та гідротехнічних споруд.

Директор  

В.В.Шаров

ДОДАТОК В

Акт №2 впровадження результатів дисертаційного дослідження



УКРАЇНА

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37; тел. (+38 044) 204-82-82 тел./факс (+38 044) 204-97-88
<http://www.kpi.ua> e-mail: mail@kpi.ua СДРПОУ 02070921

на № 02.04.2021 від № 2440/114



ЗАТВЕРДЖУЮ:
Перший проректор
КПІ ім. Ігоря Сікорського
Юрій ЯКИМЕНКО
2021 р.

АКТ


впровадження результатів дисертаційного дослідження **Броницького Вадима Олеговича** у навчальний процес Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»


Ми, які нижче підписалися, даним актом засвідчуємо, що результати наукових розробок, а також теоретичні та практичні положення дисертаційної роботи Броницького Вадима Олеговича, присвячена підвищенню екологічної безпеки шляхом відновлення навколишнього середовища при застосуванні закритих полігонів твердих побутових відходів в якості основ споруд, впроваджені у навчальний процес кафедри геоінженерії Інституту енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Результати роботи використовуються у лекційних курсах, практичних та лабораторних заняттях та відображені у навчальних програмах дисциплін: «Основи екології та наноекологія», «Екологізація виробництва та «зелені технології», «Стратегія охорони навколишнього середовища».

Використання результатів наукової роботи в навчальному процесі сприяє більш широкому розумінню студентами перспективних напрямків розвитку сучасної науки і техніки.

Акт складено для надання у спеціалізовану вчену раду за місцем захисту кандидатської дисертації Броницького В.О.,

Д.т.н., професор, директор ІЕЕ  Сергій ДЕНИСІЮК

К.т.н., доцент, завідувач кафедри геоінженерії  Анатолій КРЮЧКОВ