

УДК 69:001.89;628.8

<sup>1</sup> **П.Є. Григоровський**, д.т.н., с.н.с., перший заступник директора інституту з наукової роботи", .  
<https://orcid.org/0000-0003-0527-5890>;

<sup>2</sup> **Н.П. Чуканова**, завідувачка відділу обстеження, комплексної діагностики та експериментального проектування будівель і споруд, <https://orcid.org/0000-0003-1768-4579>;

<sup>3</sup> **В.О. Басанський**, к.т.н. Зав. сектору спеціальних споруд, <https://orcid.org/0000-0002-7850-7798>;

<sup>4</sup> **О.В. Мурасова**, к.т.н., <https://orcid.org/0000-0003-4995-3761>;

<sup>5</sup> **В.О. Іваненко**, головний інженер проекту

1.2. 3.4. 5 ДП "Науково-дослідний інститут будівельного виробництва ім. В.С. Балицького" м.Київ

## ДОСВІД ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ҐРУНТОВИХ МАСИВІВ КУПОЛУ ПОЛІГОНУ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

**Анотація.** Відомо, що просідання поверхні куполу полігонів твердих побутових відходів не є закономірним та очікуваним процесом, а динаміка осідання, що ускладнюється наявністю фільтрату, не вивчена. Рекомендовані строки рекультивациі закритих полігонів ТПВ для різних кліматичних зон, що становлять 2 роки, в умовах наявності фільтрату, не гарантують стабілізації поверхні полігону достатньої для переміщення важкої техніки при формуванні куполу полігону в процесі виконання робіт з рекультивациі.

Необхідність невідкладного виконання рекультивациі в умовах, що не забезпечують стійкості поверхні полігону потребує застосування додаткових компенсаційних заходів для безпеки виконання робіт з врахуванням динамічного стану його поверхні. Їх розробка можлива за рахунок виконання порівняльного аналізу розрахункових та фактично отриманих даних щодо динаміки деформаційних процесів куполу полігону, а саме його поверхні та тіла, з врахуванням багатокритеріального впливу внутрішніх і зовнішніх факторів техногенного та природнього характеру. Розробка компенсаційних організаційно-технологічних та технічних рішень, щодо мінімізації негативного впливу рідкої фракції (фільтрату) у складі ТПВ на стійкість поверхні куполу полігону можлива за рахунок прогнозування фізичних процесів, що виникають при рекультивациі з використанням цифрового інформаційного моделювання стійкості поверхні куполу. Загальна методика наукового обґрунтування та дослідження факторів впливу і компенсаційних організаційно-технологічних рішень рекультивациі полігону, базується на аналізі та синтезі складових умовної ідеалізованої, інформаційної моделі куполу полігону з врахуванням факторів внутрішнього та зовнішнього впливу на його стійкість, фізико-технічні та організаційно-технологічні характеристики.

Наведено досвід інформаційного моделювання динаміки деформаційних процесів ґрунтових масивів на прикладі куполу полігону побутових відходів в с. Підгірці Обухівського району Київської області з метою дослідження багатокритеріального впливу факторів техногенного та природнього характеру для порівняльного аналізу розрахункових та фактично отриманих даних деформаційних процесів, а також наукового обґрунтування організаційно-технологічних рішень рекультивациі в умовах динамічного полігону.

Наведені розрахунки носять проміжний характер. Вони призначені для апробації можливості використання розробленої моделі "Реконструкція та технічне переоснащення полігону твердих побутових відходів №5 у с. Підгірці Обухівського району Київської області. Рекультивация ділянки № 1" для прогнозування поведінки поверхні та тіла полігону умовах наявності динамічних впливів. На наступних етапах досліджень модель доцільно вдосконалювати з врахуванням додатково виявлених факторів впливу, як в ретроспективі так і станом на поточний момент, що дозволить наблизити її до рівня цифрового близнюка.

**Ключові слова:** організаційно-технологічні рішення, будівельне інформаційне моделювання, цифрові близнюки, тверді побутові відходи, фільтрат, деформаційні процеси, динамічні полігони, сміттєзвалища, фільтрат, компенсаційні заходи.

### Постановка проблеми.

В с. Підгірці Обухівського району, Київської області розпочато реалізацію проекту "Реконструкція та технічне переоснащення полігону ТПВ № 5 в с. Підгірці Обухівського району Київської області. Рекультивация ділянки № 1". Реалізація розробленого проекту рекультивациі ділянки № 1 повинна забезпечити екологічно безпечно завершення її експлуат-

ації та поліпшення санітарного стану території району розташування головного полігону м. Києва. Недостатність вихідного матеріалу та вітчизняного досвіду проектування рекультивациі полігонів твердих побутових відходів (ТПВ) перешкоджає реалізації проекту та ускладнює його реалізацію. Розробка компенсаційних організаційно-технологічних та технічних рішень, щодо мінімізації негативного вп-

ливу рідкої фракції (фільтрату) [1] у складі ТПВ на стійкість поверхні куполу полігону можлива за рахунок прогнозування фізичних процесів, що виникають в процесі будівельних робіт з рекультивациі з використанням цифрового інформаційного моделювання куполу полігону [2-5].

**Мета роботи.**

Розробка методики інформаційного моделювання динаміки деформаційних процесів ґрунтових масивів тіла полігону твердих побутових відходів (-ТВП) для дослідження багатокритеріального впливу факторів техногенного і природнього характеру та порівняльного аналізу розрахункових та фактично отриманих даних щодо динаміки таких процесів.

**Виклад основного матеріалу.**

В рамках науко-технічного супроводу з реалізації проекту рекультивациі [2] виникли питання які виходять за рамки дії нормативних документів [3], перешкоджають та ускладнюють його реалізацію. Також відсутні вітчизняні статистичні дані та досвід виконання робіт з рекультивациі на подібних об'єктах. Беручи до уваги недостатність вихідних даних, відсутність вітчизняного досвіду проектування та виконання робіт з рекультивациі полігонів побутових відходів, доцільним є використання цифрового інформаційного моделювання [4-6] куполу полігону для можливості прогнозування фізичних процесів, що виникають в процесі будівельних робіт з рекультивациі. Це дозволить впровадити попереджувальні компенсаційні організаційно-технологічні та технічні рішення, щодо мінімізаціі негативного впливу фільтрату на стійкість поверхні куполу полігону.

Для створення інформаційно-цифрової моделі куполу полігону в умовах невизначеності, тобто, недостатності інформації про його внутрішню структуру та фізико-технічні характеристики її складових, необхідно провести ретроспективне дослідження етапів його життєвого циклу з початку будівництва до теперішнього часу, а також стадій у складі відповідних етапів. Етапами життєвого циклу традиційно є вишукування, проектування, будівництво, експлуатація, ліквідація. Стадіями у складі етапів життєвого циклу вважаємо інтервали (проміжки часу) впродовж яких застосовують організаційно-технологічні рішення, що призводять до зміни (ускладнення або спрощення) інформаційної моделі, та встановлені ретроспективним аналізом на час її складання.

У зв'язку з неповнотою та недостатністю проектної документаціі стосовно полігону ТПВ №5 у с. Підгірці Обухівського району Київської області, в процесі дослідження використано доступну архівну технічну та проектну інформацію, сучасні нормативні документи та такі, що діяли протягом життєвого циклу полігону, експертну оцінку фахівців служби експлуатаціі, дані теперішніх досліджень та результати випробувань на дослідних ділянках [2,7-10].

Загальна методика наукового обґрунтування та дослідження факторів впливу і компенсаційних організаційно-технологічних рішень рекультивациі полігону базується на аналізі та синтезі складових умовної ідеалізованої, інформаційної моделі куполу полігону з врахуванням факторів внутрішнього та зовнішнього впливу на його стійкість, фізико-тех-

нічні та організаційно-технологічні характеристики. В нашому випадку, вважаємо, що тіло полігону являє собою аналог зсувонебезпечної території, що може бути обчисленим в будівельному проектуванні за допомогою програмного комплексу PLAXIS 3D.

Основою такої моделі є аналітичні, теоретичні та експериментальні дані щодо стійкості, хиткості, водонасиченості, хімічного складу, фізичних складових ТПВ, що формують купол полігону на різних етапах його життєвого циклу. Такі дані є аналогом геологічних умов, що формують зсувонебезпечні території, які у сукупності впливають на перелік факторів природнього та техногенного впливу на їх стійкість.

Рекультивациія та подальше використання території полігону, спрямовані на забезпечення безпечної, безаварійної його експлуатаціі, обумовлюють необхідність здійснення спостережень за станом ТПВ протягом його життєвого циклу. Застосування системних спостережень дасть можливість визначати параметри динамічних процесів для кожної ділянки куполу і своєчасно виявляти зміни положення його геологічних шарів та поверхні. Постановка задачі оптимізаціі організаційно-технологічних рішень [11], як виконання рекультивациі, так і подальшої експлуатаціі зсувонебезпечних та хитких ділянок полігону передбачає визначення критерію оптимальності, параметрів оптимізаціі та обмежень що сприятиме як безпеці використання території полігону так і накопиченню досвіду реконструкціі, рекультивациі та експлуатаціі аналогічних об'єктів в Україні.

Математична постановка задачі оптимізаціі:

$$\begin{aligned}
 &f(x_j) \rightarrow \text{opt} (\min, \max); \\
 &g_i(x_j) \leq b_i; \\
 &d_j \leq x_j \leq D_j; \\
 &i = \overline{1, m}; \quad j = \overline{1, n},
 \end{aligned}$$

де

$f(x_j)$  – цільова функція;  $g_i(x_j)$  – обмеження, що встановлюють залежності між змінними;  $b_i$  – змінні;  $x_j$  – змінні, які можуть набувати значень у певному діапазоні  $d_j$  і  $D_j$ ;  $m$  – кількість обмежень;  $n$  – кількість змінних.

Розрахунки стійкості тіла полігону виконують в програмному комплексі PLAXIS 3D на різних етапах формування куполу. Для цього проводять статичні розрахунки стійкості поверхні, розрахунки фільтраціі, порового тиску структури ТПВ, їх консолідаціі, коефіцієнтів надійності, що дозволить спрогнозувати геодинаміку куполу на необхідну стадію життєвого циклу. Інструментальний моніторинг динаміки руху точок на поверхні та в шарах тіла полігону, їх фізико-технічних характеристик дає можливість порівняти фактичний стан середовища з теоретично прогнозованим та дозволяє своєчасно виявити деформаціі для реалізаціі компенсаційних заходів щодо можливих небезпек та ризиків.

Розробку розрахункової моделі стійкості схилів [5,11] виконують із умови, що розрахунковий коефіцієнт стійкості динамічних ділянок більше одиниці. Методи розрахунку залежать від факторів, що впливають на розвиток динамічних процесів і визначаються: структурою тіла полігону, формою поверхні

куполу, встановленою розрахунковою схемою динамічного полігону, можливістю обліку багатфакторних впливів, що визначають ступінь сталого функціонування куполу; зручністю практичного застосування розрахункової моделі при мінімальному числі обчислень. Дослідження стійкості ділянок динамічного полігону включають: підготовчі роботи, виявлення факторів динамічних осідань поверхні та зсувної небезпеки, оцінку і управління такою небезпекою і ризиком.

Побудова розрахункової моделі [5,11] полігону передбачає певну послідовність розрахунку його зсувонебезпечних схилів та куполу в програмно-розрахунковому комплексі PLAXIS 3D з врахуванням гідростатичного впливу фільтрату, що розташований на різних висотних відмітках, а саме: моделювання на підставі топографічних даних геометрії рельєфу території; доповнення геометрії рельєфу геологічною будовою масиву ТПВ та ґрунту території, на підставі даних геологічних вишукувань; розбивання моделі на кінцеві (розрахункові) елементи; внесення даних про гідрологічну ситуацію території; встановлення динамічності та хиткості поверхні та тіла куполу; встановлення шляхом розрахунку ймовірної поверхні ковзання; встановлення ймовірної поверхні ковзання з використанням мережі кінцевих елементів. Таким чином, складання математичної моделі в загальному вигляді передбачає її наступне поступове, поетапне ускладнення за рахунок використання додаткової інформації про об'єкт моделювання:

**Етап 1.** Моделювання ґрунтового масиву в межах задачі за дослідженням інженерно-геологічних свердловин та іншої доступної інформації про геологічну структуру полігону, з введенням в базу даних моделі фізико-механічних показників ТПВ та ґрунтів основи (далі ґрунтів) передбачає схематичну візуалізацію ґрунтового масиву із свердловинами з введенням даних, щодо фізико-механічних показників ґрунтів.

**Етап 2.** Моделювання структур, що являють собою геометричні та фізичні характеристики об'єкту моделювання. На цьому етапі вводяться геометричні дані поверхні масиву, конфігурація будівель і споруд (за їх наявності), інженерна інфраструктура дренавання газу та фільтрату; задаються та присвоюються елементам конструкціям полігону параметри жорсткості та міцності. Для прийнятої до подальших досліджень ідеалізованої інформаційної моделі моде-

люванню підлягають: геометрія рельєфу; навантаження у вигляді впливу будівельної техніки, штучних вібрацій, розподілених та концентрованих навантажень забудови інженерних мереж та споруд; моделювання виробничих навантажень під час рекультивациі, а саме поетапне улаштування рекультивацийного шару у вигляді технологічних прошарків покриття куполу, тощо.

**Етап 3.** Формування сітки кінцевих елементів для розрахункової моделі, що за алгоритмом програми моделюється автоматично, як для ґрунтового масиву так і для структур, сформованих на етапі 2.

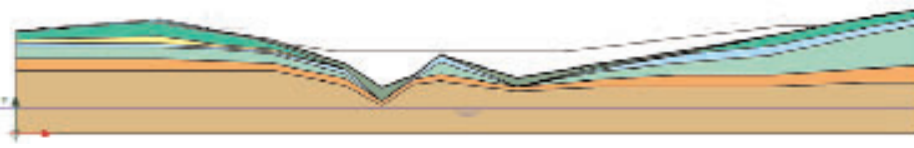
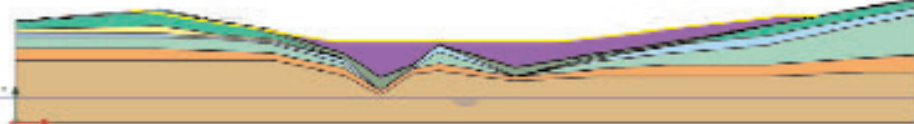
**Етап 4.** Моделювання гідрологічних умов, також, виконується автоматично, виходячи з даних про рівень ґрунтових вод, або фільтрату, визначених за даними інженерно-геологічних свердловин на етапі 1. Гідрологічні умови є чинником управління параметрами ідеалізованої інформаційної моделі. Їх характеристики у складі моделі штучно змінюють для моделювання можливого перебігу подій при рекультивациі та експлуатаціі карсто- та зсувонебезпечної території куполу полігону.

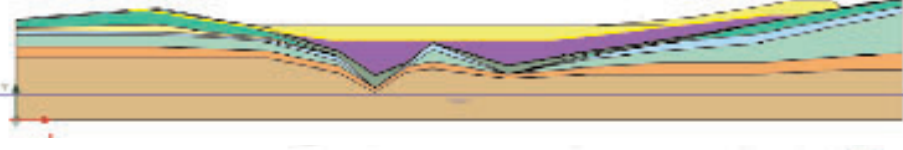
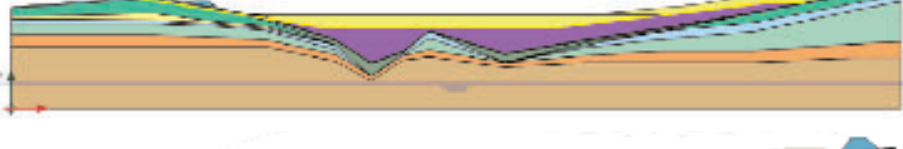
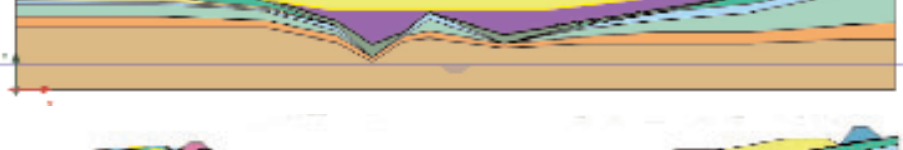




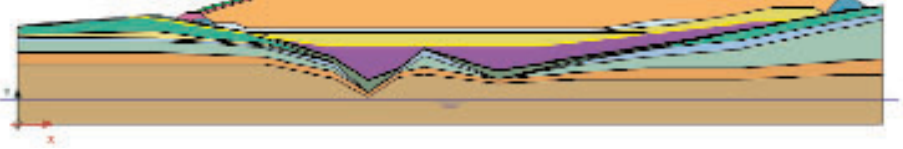
**Етап 5.** Задання всіх розрахункових стадій моделі передбачає ретроспективний, поточний та прогнозний аналіз розвитку зсувних та кастових процесів. Дана стадія передусе розрахунку і в ній моделюються всі фактичні, ретроспективні та прогнозні ситуації на ділянці для якої розробляється модель, а саме: початкова стадія існування рельєфу під майбутній полігон; розрахункова стадія з врахуванням етапів та періодів життєвого циклу полігону з врахуванням його будівництва та завантаження; розрахункова стадія із врахуванням етапу рекультивациі; розрахункова стадія експлуатаціі рекультивованого полігону з корисним навантаженням та функціонуванням систем відбору газу та дренавання фільтрату.

Кількість етапів та стадій ускладнення будівельної інформаційно-математичної моделі динамічного полігону не обмежена наведеним переліком і залежить від черговості та обсягів накопичення нової інформації, достатньої для внесення змін в розрахункову модель. Наприклад в табл.1 наведено 10 стадій визначених на даний час організаційно-технологічних змін, що призводять до ускладнення моделі. Склад і послідовність наведених стадій корегуються із складом робіт наведених в технічних джерелах та нормативних актах [3,7-9]

Таблиця 1

Стадії організаційно-технологічних змін у складі життєвого циклу, що призводять до ускладнення інформаційної моделі на прикладі полігону ТПВ № 5 в с. Підгірці

Побудова графічної моделі стадій життєвого циклу полігону ТПВ	Стадії життєвого циклу
	Початкова стадія – природний рельєф
	Стадія планування поверхні та вкладання ізолюючого матеріалу

Побудова графічної моделі стадій життєвого циклу полігону ТПВ	Стадії життєвого циклу
	Стадія нашарувань ТПВ з 1986 до 1991 року
	Стадія влаштування дамб при реконструкції в 1991 році
	Стадія нашарувань ТПВ з 1991 до 2000 року
	Етап влаштування додаткової дамби в період з 2000 року до 2016 року
	Стадія нашарувань ТПВ в період з 2000 до 2016 року
	Стадія нашарувань ТПВ в період з 2016 до 2019 року
	Стадія нашарувань ТПВ в період з 2019 до 2021 року
	Стадія рекультивації

**Розрахункова стадія 1.** Початкова стадія існуючого до початку спорудження полігону (період до 1986 р.)

**Розрахункова стадія 2.** Стадія планування поверхні основи полігону і протифільтраційного екрану з півки та скопу (1986 р.)

Згідно проекту на даній стадії виконувалось планування поверхні як зрізанням так і підсипкою ґрунтового масиву з визначеним ущільненням місцевого ґрунту. Також виконувались роботи з влаштування протифільтраційного екрану з поліетиленової

півки в два шари та локальною пересипкою скопом (гідрофобними відходами паперового виробництва).

**Розрахункова стадія 3.** Стадія експлуатації полігону з пересипкою технологічним ґрунтом в період до реконструкції (період з 1986 р. по 1992 р.)

На даній стадії виконувалось експлуатація полігону за початковим проектом. Виконувались роботи з нашаруванням масиву ТПВ з пересипкою технологічним ґрунтом.

**Розрахункова стадія 4.** Стадія реконструкції полігону з влаштуванням дамб, що давали змогу

збільшити потужність полігону (1992 р.)

На даній стадії виконувались роботи з реконструкції полігону з метою збільшення його потужності. Влаштовано додаткові дамби на бортах полігону для забезпечення стійкості масиву.

**Розрахункова стадія 5.** Стадія експлуатації полігону з пересипкою технологічним ґрунтом в період до реконструкції (період з 1992 р. по 2001 р.)

На даній стадії виконувалось експлуатація полігону після реконструкції з влаштуванням дамб. Виконувались роботи з нашаруванням масиву ТПВ з пересипкою технологічним ґрунтом.

**Розрахункова стадія 6.** Стадія реконструкції полігону з влаштуванням дамби по нижчому борту масиву полігону (2001 р.)

На даній стадії виконувались роботи з реконструкції полігону з метою збільшення його потужності. Влаштовано додаткову дамбу на нижньому борту полігону для забезпечення стійкості масиву.

**Розрахункова стадія 7.** Стадія експлуатації полігону без пересипки технологічним ґрунтом (період з 2001 р. по 2016 р.)

На даній стадії виконувалось експлуатація полігону після реконструкції з влаштуванням дамб. Виконувались роботи з інтенсивним нашаруванням масиву ТПВ без підсіпки технологічним ґрунтом.

**Розрахункова стадія 8.** Стадія експлуатації полігону з пересипкою технологічним ґрунтом в період до початку підготовки з робіт по рекультивациі по-

лігону (період з 2016 р. по 2019 р.)

На даній стадії виконувалось експлуатація полігону з відновленням пересипки прошарків ТВП технологічним ґрунтом.

**Розрахункова стадія 9.** Стадія експлуатації полігону з пересипкою технологічним ґрунтом в період до коригування комплексу робіт по рекультивациі полігону (період з 2019 р. по 2021 р.)

На даній стадії виконувалось інтенсивна експлуатація полігону з пересипкою прошарків ТВП технологічним ґрунтом.

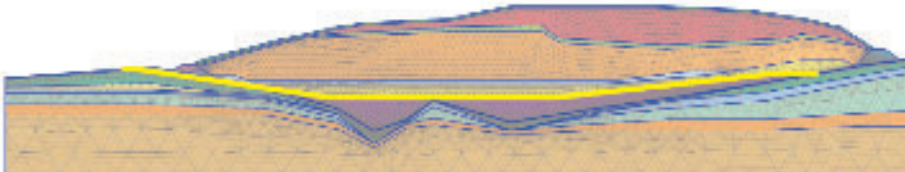
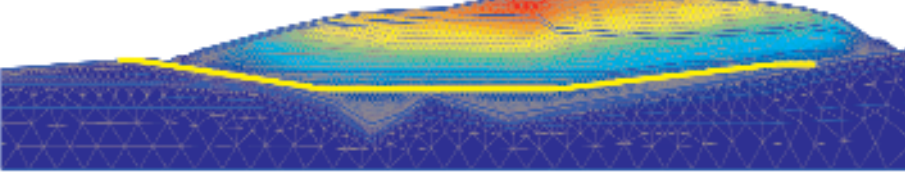

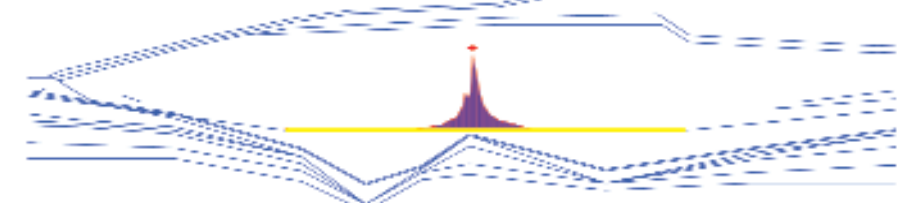
**Розрахункова стадія 10.** Прогнозна стадія з влаштуванням шарів матеріалів та ґрунтів, що передбачені проектом рекультивациі (2022 р.)

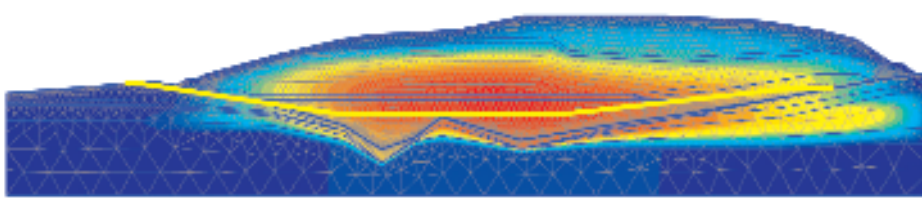
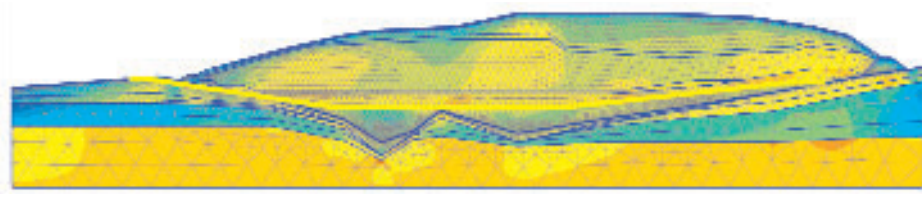
На останній розрахунковій стадії 10 змодельовано прогнозна ситуація з влаштуванням шарів матеріалів та ґрунтів, що передбачені проектом рекультивациі.

В табл. 2 наведено результати прогнозного розрахунку станом для стадії 10, тобто за умови влаштування шарів матеріалів та ґрунтів, що передбачені проектом рекультивациі (2022 р.). В таблиці наведено: розрахункову модель прогнозної стадії рекультивациі; ізополя загальних деформацій маси; ізополя фазових деформацій масиву; ешюра розтягуючих сил в плівці діафрагми на дні котловану; ізополя надлишкового порового тиску, що буде "розсіюватись" в часі.

Таблиця 2

Результати розрахунку стійкості елементів куполу полігону з врахуванням прийнятих організаційно-технологічних та технічних рішень з рекультивациі

Розрахунок графічної моделі станом на 10-ту розрахункову стадію життєвого циклу полігону ТПВ (етап рекультивациі)	Результати розрахунку
	Розрахункова модель прогнозної стадії рекультивациі
	Ізополя загальних деформацій маси
	Ізополя фазових деформацій масиву
	Ешюра розтягуючих сил в плівці діафрагми

Розрахунок графічної моделі станом на 10-ту розрахункову стадію життєвого циклу полігону ТПВ (етап рекультивації)	Результати розрахунку
	<p>Ізополя надлишкового порового тиску, що буде "розсіюватись" в часі</p>
	<p>Ізополя відношення мобілізованих дотичних напружень до максимальних (умова міцності масиву)</p>

Аналіз результатів розрахунків показав, що найбільший приріст деформацій поверхні полігону відбувся в період експлуатації полігону з нашаруванням ТВП без пересипки технологічним ґрунтом (розрахункова стадія 7).

За результатами всіх стадій максимальне розтягуюче зусилля в плівці складає — 0,107 кН/м, при максимально допустимому для товщини двох шарів по 0,2 мм — 0,118 кН/м. Міцності плівки діафрагми на стадії рекультивації достатньо.

В масиві нашарувань ТВП утворюється надлишковий поровий тиск, що утворюється при значній інтенсивності привантаження слабких ґрунтів. Значення надлишкового порового тиску на стадії рекультивації незначне і за відсутності значного додаткового привантаження з часом буде розсіюватись.

Аналіз відношення мобілізованих (від дії навантаження) і максимальних (опір дії дотичних зусиль) дотичних зусиль показує відносну стабільність масиву і ґрунтів основи і незначні зони розривних деформацій.

Прогноз максимальних осідань поверхні на стадії рекультивації за умови стабілізації масиву ТВП складає -169мм. По краях масиву від 55 до 85 мм, в середній зоні від 130 до 169 мм.

Встановлено, що двовимірною плоскою моделлю куполу полігону не в повній мірі відображає багатofункціональні зв'язки впливу множини факторів на несучу здатність його поверхні. Доцільним є її використання для попередньої, локальної оцінки стійкості поверхні полігону. Для комплексної оцінки багатокритеріального впливу доцільно використовувати об'ємну 3D модель. Така тривимірна інформаційна цифрова модель надає можливість враховувати поточну вимірювальну інформацію про динаміку змін тіла та куполу полігону і вносити уточнення в її алгоритм, тим самим підвищити вірогідність прогнозних розрахункових даних. Фактично, за умови наявності ефективної системи моніторингу технологічних та фізичних процесів, що відбуваються на полігоні, модель поступово наблизиться до рівня цифрового близнюка реального об'єкта [12,13,14], що забезпечує зв'язок між об'єктом реального світу та його цифровим поданням, який безперервно використовує вимірювальні дані про поточний стан

об'єкту. В подальшому, цифрове подання може використовуватися для візуалізації, моделювання, аналізу та оперативного планування організаційно-технологічних рішень відповідного етапу життєвого циклу полігону.

**Висновки**

1. Беручи до уваги недостатність вихідного матеріалу та відсутність вітчизняного досвіду проектування та виконання робіт з рекультивації полігонів побутових відходів, доцільним є використання цифрового інформаційного моделювання куполу полігону для можливості прогнозування фізичних процесів, що виникають в процесі будівельних робіт з рекультивації.

2. Для створення інформаційно-цифрової моделі куполу полігону в умовах невизначеності, тобто, недостатності інформації про його внутрішню структуру та фізико-технічні характеристики її складових необхідно провести ретроспективне дослідження етапів його життєвого циклу з початку будівництва по теперішній час. У зв'язку з неповнотою та недостатністю проектної документації по полігону твердих побутових відходів №5 у с. Підгірці Обухівського району Київської області, в процесі дослідження використано доступну архівну технічну та проектну інформацію, сучасні нормативні документи та такі, що діяли протягом існування полігону, експертну оцінку фахівців служби експлуатації полігону, дані теперішніх досліджень та результати випробувань на дослідних ділянках.

3. В результаті виконання ретроспективного аналізу визначено десять основних стадій життєвого циклу полігону зі значними змінами рельєфу чи влаштуванням додаткових заходів із забезпечення стійкості масиву ТПВ починаючи від періоду вибору ділянки під полігон до його рекультивації, а саме: стан території існуючий до початку спорудження полігону (період до 1986 р.); планування поверхні основи полігону і протифільтраційного екрану з півки та частковою пересипкою гідрофобними відходами паперового виробництва (1986 р.); заповнення полігону з пересипкою технологічним ґрунтом в період до реконструкції (період з 1986 р. по 1992 р.); реконструкція полігону з влаштуванням дамб, що давали змогу збільшити потужність полігону (1992 р.); запо-

влення полігону з пересипкою технологічним ґрунтом в період до реконструкції (період з 1992 р. по 2001 р.); реконструкція полігону з влаштуванням дамби по нижньому борту масиву полігону (2001 р.); заповнення полігону без пересипки технологічним ґрунтом (період з 2001 р. по 2016 р.); заповнення полігону з пересипкою технологічним ґрунтом в період до початку підготовки з робіт по рекультивациі полігону (період з 2016 р. по 2019 р.); заповнення полігону з пересипкою технологічним ґрунтом в період до коригування комплексу робіт по рекультивациі полігону (період з 2019 р. по 2021 р.); прогнозна стадія з влаштуванням шарів матеріалів та ґрунтів, що передбачені проектом рекультивациі (2022 р.).

4. На основі отриманих даних аналізу стадій життєвого циклу полігону ТПВ №5 розроблено математичну модель та виконано поетапні розрахунки у відповідності до кожного етапу життєвого циклу полігону. Отримані результати показують, що найбільший приріст деформацій поверхні полігону відбувся в період експлуатації полігону з нашаруванням ТВП без пересипки технологічним ґрунтом (розрахункова стадія 7).

5. За результатами всіх стадій максимальне розтягуюче зусилля в півці складає — 0,107 кН/м, при максимально допустимому для товщини двох шарів по 0,2 мм — 0,118 кН/м. Міцності півки мембрани на стадії рекультивациі достатньо. В масиві нашарувань ТВП утворюється надлишковий поровий тиск, що утворюється при значній інтенсивності привантаження слабких ґрунтів. Значення надлишкового порового тиску на стадії рекультивациі незначне і за відсутності значного додаткового привантаження

з часом буде розсіюватись. Аналіз відношення мобілізованих (від дії навантаження) і максимальних (опір дії дотичних зусиль) дотичних зусиль показує відносну стабільність масиву і ґрунтів основи, а також незначні зони розривних деформацій. Прогноз максимальних осідань поверхні на стадії рекультивациі за умови стабілізації масиву ТВП складає -169-мм. По краях масиву від 55 до 85 мм, в середній зоні від 130 до 169 мм.

6. Наведені розрахунки носять проміжний характер. Вони призначені для апробації можливості використання розробленої моделі "Реконструкція та технічне переоснащення полігону твердих побутових відходів №5 у с. Підгірці Обухівського району Київської області. Рекультивациія ділянки № 1" для прогнозування поведінки поверхні та тіла полігону в умовах наявності динамічних впливів. На наступних етапах досліджень модель доцільно вдосконалювати з врахуванням додатково виявлених факторів впливу, як в ретроспективі так і станом на поточний момент.

7. Слід підкреслити невизначеність певних чинників роботи моделі в умовах відсутності інформації, яка має бути встановлена на подальших етапах наукового супроводу. Наявність моделі дозволить сформулювати загальну концепцію проектування рекультивациі полігонів ТПВ в умовах наявності фільтрату з відхиленням від існуючих нормативних документів, а також розповсюдити її на інші полігони у тому числі другу ділянку складування полігону №5 в Підгірцях. На підставі наведених досліджень буде запропоновано внести зміни до нормативних документів, щодо проектування та експлуатації полігонів ТПВ.

#### Література

1. Рекомендации по сбору, очистке и отвердению сточных вод полигона захоронения твердых бытовых отходов.: Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу. ФГУП Федеральный центр благоустройства и обращения с отходами., Москва 2003.
2. Проект "Реконструкція та технічне переоснащення полігону ТПВ № 5 в с. Підгірці Обухівського району Київської області. Рекультивациія ділянки № 1". ДП НДІБВ, 2018р.
3. ДБН В.2.4-2-2005 "Проектування. Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування" (в редакції зміни № 1)
4. BIM Технології інформаційного моделювання в будівництві (timb.org.ua)
5. Григоровський П.Є., Чуканова Н.П., Басанський В.О., Наріжний В.В. Передумови інформаційного моделювання динаміки деформаційних процесів ґрунтових масивів на прикладі куполу полігону побутових відходів в с. Підгірці Обухівського району Київської області. Нові технології в будівництві: наук.-техн. зб. 2021. №40. С. 3?14.
6. Григоровський П.Є., Червяков Ю.М., Басанський В.О., Крошка Ю.В., Мурашова О.В., Чуканова Н.П. Інформаційне моделювання організаційно-технологічних рішень інструментальних вимірювань при створенні та утриманні будівельних об'єктів. Будівельне виробництво : наук.-техн. зб. Київ: Вид-во "Ліра-К". 2019. № 67. С. 7-16.
7. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов, министерство строительства российской федерации академия коммунального хозяйства (МЖКФ РСФСР) Ордена Трудового Красного Знамени им. Памфилова, Москва Стройиздат, 1983 г.
8. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов, министерство строительства российской федерации академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, Москва 1996 г.
9. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов, министерство строительства российской федерации академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, Москва 1998 г.
10. Григоровський П.Є., Тривого І.В., Чуканова Н.П. Застосування моніторингу технічного стану будівель і споруд для вивчення геодинамічних та техногенних процесів їх будівництва і експлуатації. Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища : GNSS і GIS-технології : матеріали XXVIII Міжнародний науково-технічний симпозиум 10?15

вересня 2013 р. Алушта, 2013. С. 136-143.

11. Басанський В. О., Удосконалення організаційно-технологічних рішень інструментального моніторингу забудови зсувонебезпечних територій, Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.08 — "Технологія та організація промислового та цивільного будівництва" (19 — Архітектура та будівництво) — ДП "Науково-дослідний інститут будівельного виробництва ім. В.С. Балицького", Харківський національний університет будівництва та архітектури, Харків, 2021.

12. Григоровський П.Є., Чуканова Н.П. Загальні принципи вибору системи інструментальних спостережень за зсувами при експлуатації будівель і споруд з урахуванням критерію уразливості. Ефективні організаційно-технологічні рішення та енергозберігаючі технології в будівництві : матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. 23-24 березня 2016 р., Харків : Вид-во "Точка", 2016. С. 27-28.

13. Григоровський П.Є., Чуканова Н.П. Загальні принципи вибору системи інструментального моніторингу за підтопленням при експлуатації будівель старої забудови з використанням критерію уразливості. Нові технології в будівництві : наук.-техн. зб. Київ : Вид-во "Ліра-К", 2017. Вип. 33/1. С. 18-22.

14. . Навіщо використовувати цифрових близнюків у будівництві — Geofumadas

15. Прохоров А., Лысачев М. Научный редактор Боровиков А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое, исправленное и дополненное.-М.: ООО "АльянсПринт", 2020. — 401стр.,

### References

1. Recommendations for the collection, treatment and solidification of wastewater from the landfill for solid waste .: State Committee of the Russian Federation for Construction and Housing. Federal State Unitary Enterprise Federal Center for Landscaping and Waste Management, Moscow 2003.

2. Project "Reconstruction and technical re-equipment of the landfill № 5 in the village. Pidhirtsi, Obukhiv district, Kyiv region. Reclamation of the site № 1 ". DP NDIBV, 2018

3. DBN B.2.4-2-2005 "Design. Landfills for solid household waste. Basic design provisions "(as amended змiну 1)

4. BIM Technologies of information modeling in construction (timb.org.ua)

5. Grigorovsky PE, Chukanova NP, Basansky VO, Narizhny VV Prerequisites for information modeling of the dynamics of deformation processes of soil massifs on the example of the dome of the landfill in the village. Pidhirtsi, Obukhiv district, Kyiv region. New technologies in construction: scientific and technical. coll. 2021. №40. Pp. 3?14.

6. Grigorovsky PE, Chervyakov YM, Basansky VO, Kroshka YV, Murasyova OV, Chukanova NP Information modeling of organizational and technological solutions of instrumental measurements in the creation and maintenance of construction projects. Construction production: scientific and technical. coll. Kyiv: Lira-K Publishing House. 2019. № 67. S. 7-16.

7. Instruction on the design, operation and reclamation of landfills for solid waste, the Ministry of Construction of the Russian Federation Academy of Public Utilities (MZhKF RSFSR) Order of the Red Banner of Labor. Pamfilova, Moscow Stroyizdat, 1983

8. Instruction on the design, operation and reclamation of landfills for solid waste, Ministry of Construction of the Russian Federation Academy of Public Utilities. K.D. Pamfilova, Moscow 1996

9. Instruction on the design, operation and reclamation of landfills for solid waste, the Ministry of Construction of the Russian Federation, the Academy of Public Utilities. K.D. Pamfilova, Moscow 1998

10. Grigorovsky PE, Alarm IV, Chukanova NP Application of monitoring the technical condition of buildings and structures to study the geodynamic and man-made processes of their construction and operation. Geoinformation monitoring of the environment: GNSS and GIS-technologies: materials of the XXVIII International Scientific and Technical Symposium September 10-15, 2013. Alushta, 2013. P. 136-143.

11. Basansky VO, Improving organizational and technological solutions for instrumental monitoring of landslide-hazardous areas, Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.23.08 — "Technology and organization of industrial and civil construction" (19 — Architecture and Construction) — SE "Research Institute of Construction Production. V.S. Balytsky ", Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, 2021.

12. Grigorovsky PE, Chukanova NP General principles of choosing a system of instrumental monitoring of landslides in the operation of buildings and structures, taking into account the criterion of vulnerability. Effective organizational and technological solutions and energy-saving technologies in construction: materials VI International. scientific-practical conf. March 23-24, 2016, Kharkiv: Tochka Publishing House, 2016. pp. 27-28.

13. Grigorovsky PE, Chukanova NP General principles of choosing the system of instrumental monitoring of flooding during the operation of old buildings using the criterion of vulnerability. New technologies in construction: scientific and technical. coll. Kyiv: Lira-K Publishing House, 2017. Issue. 33/1. Pp. 18?22.

14.. Why use digital twins in construction — Geofumadas

15. Prokhorov A., Lysachev M. Scientific editor Bоровиков А. Digital double. Analysis, trends, world experience. The first edition, corrected and supplemented.-M.: LLC "AlliancePrint", 2020. — 401 pages,



<sup>1</sup>Hryhorovskiy P.E., Doct. of Science, pgrig@ukr.net

<https://orcid.org/0000-0003-0527-5890>;

<sup>2</sup>Chukanova N.P., Head of the Department of Observation, Comprehensive Diagnostics and Experimental Design of Construction and Structures <https://orcid.org/0000-0003-1768-4579>;

<sup>3</sup>Basanskyi V.O., Head of the Sector of State Enterprise "NDIBV" <https://orcid.org/0000-0002-7850-7798>;

<sup>4</sup>Murasova O.V., Deputy Head of Department, <https://orcid.org/0000-0003-4995-3761>;

<sup>5</sup>Ivanenko V.O., Chief engineer of the project

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> The State "Research institute of building production named V.S. Balitsky", Kyiv

### **EXPERIENCE OF INFORMATION MODELING OF THE DYNAMICS OF THE DEFORMATION PROCESSES OF THE SOIL MASSES OF THE DOME OF THE DOMESTIC WASTE LANDFILL**

**Abstract.** *It is known that subsidence of the dome surface of solid waste landfills is not a natural and expected process, and the dynamics of sedimentation, complicated by the presence of filtrate, has not been studied. The recommended terms of reclamation of closed landfills for different climatic zones, which are 2 years, in the presence of leachate, do not guarantee stabilization of the landfill surface sufficient to move heavy equipment during the formation of the landfill dome during reclamation works.*

*The need for immediate reclamation in conditions that do not ensure the stability of the landfill surface requires the application of additional compensatory measures for the safety of work, taking into account the dynamic state of its surface. Their development is possible by performing a comparative analysis of calculated and actually obtained data on the dynamics of deformation processes of the dome of the landfill, namely its surface and body, taking into account the multicriteria influence of internal and external factors of man-made and natural nature. Development of compensatory organizational-technological and technical solutions to minimize the negative impact of liquid fraction (leachate) in the solid waste on the stability of the landfill dome is possible by predicting physical processes that occur during reclamation using digital information modeling of dome surface stability.*

*The general method of scientific substantiation and research of factors of influence and compensatory organizational-technological decisions of landfill reclamation is based on analysis and synthesis of components of conditional idealized, information model of landfill dome taking into account factors of internal and external influence on its stability, physical-technical and organizational-technological characteristics.*

*The experience of information modeling of the dynamics of deformation processes of soil massifs on the example of the dome of the landfill in the village. Pidhirtsi, Obukhiv district, Kyiv region, in order to study the multicriteria influence of man-made and natural factors for comparative analysis of calculated and actually obtained data of deformation processes, as well as scientific substantiation of organizational and technological solutions of reclamation in dynamic landfill conditions.*

*These calculations are intermediate. They are designed to test the possibility of using the developed model "Reconstruction and technical re-equipment of the solid waste landfill №5 in the village. Pidhirtsi, Obukhiv district, Kyiv region. Reclamation of site № 1" to predict the behavior of the surface and the body of the landfill in the presence of dynamic influences. In the next stages of research, it is advisable to improve the model taking into account the additional identified factors of influence, both in retrospect and at the moment, which will bring it closer to the level of the digital twin.*

**Key words:** *organizational and technological solutions, construction information modeling, digital twins, solid waste, filtrate, deformation processes, dynamic landfills, landfills, filtrate, compensatory measures.*