

© О.В. Ган<sup>1,2</sup>, В.О. Броницький<sup>1</sup>, Т.В. Гребенюк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

## ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЕКОВІДНОВЛЕННЯ ТЕХНОГЕННО ЗМІНЕНИХ ҐРУНТІВ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ ДОЗВІЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ТА САД-СУПРОВОДУ

О. Gan<sup>1,2</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-0739-9600>

V. Bronytskyi<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-3092-3418>

T. Hrebenuk<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9287-2919>

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Hydromechanics of NASU, Kyiv, Ukraine

## SUBSTANTIATION OF ECO-RESTORATION TECHNOLOGIES FOR TECHNOGENICALLY ALTERED SOILS IN URBAN AREAS BASED ON PROCESS MODELLING WITH CONSIDERATION OF PERMITTING REQUIREMENTS AND CAD SUPPORT

**Мета.** Оцінювання впливу природоорієнтованих та інженерних заходів на екологічну і механічну стабільність техногенно змінених ґрунтів урбанізованих територій після воєнного впливу з урахуванням вимог дозвільної діяльності у сфері природокористування.

**Методика.** Розрахунок виконано методом чисельного моделювання у постановці плоскої деформації із застосуванням пружно-пластичної моделі Мора–Кулона та нестационарного аналізу фільтрації. Оцінювання проведено для кількох сценаріїв стабілізації верхнього шару ґрунту з визначенням максимальних осідань, коефіцієнта запасу стійкості, гідравлічного градієнта та інтегрованого показника екологічної стабільності. Результати можуть використовуватися для підготовки матеріалів дозвільних процедур і їх візуалізації у САД-середовищах під час формування інженерно-графічної документації.

**Результати.** У базовому сценарії максимальні осідання становлять до 42 мм, а коефіцієнт запасу стійкості наближається до 1,30. Застосування інженерних заходів зменшує осідання до 50 % та підвищує стійкість на 17 %. Природоорієнтовані рішення забезпечують зниження гідравлічного градієнта до 48 % і підвищення індексу екологічної стабілізації більш ніж у 4,6 раза.

**Наукова новизна.** Запропоновано інтегрований підхід до оцінювання екологічної та інженерної стабільності техногенно змінених ґрунтів після воєнного впливу. Введено індекс екологічної стабілізації ґрунту, що поєднує коефіцієнт запасу стійкості та гідравлічний градієнт і дозволяє кількісно порівнювати сценарії відновлення.

**Практична значимість.** Результати можуть застосовуватися при обґрунтуванні технологій відновлення міських територій, підготовці матеріалів оцінки впливу на довкілля, отриманні дозвільної документації та створенні інженерно-графічних матеріалів у САД-середовищах.

**Ключові слова:** техногенно змінені ґрунти, післявоєнне відновлення, чисельне моделювання, коефіцієнт фільтрації, природоорієнтовані рішення, індекс екологічної стабілізації, урбанізовані території, дозвільна діяльність, САД-середовища.

**Вступ.** Воєнний вплив на урбанізовані території супроводжується порушенням структури ґрунтового покриву, зміною його фізико-механічних характеристик та трансформацією гідрологічного режиму. Так, у дослідженні Solokha та співавт. встановлено значну деградацію ґрунтів і накопичення потенційно токсичних елементів у зонах бойових дій [1]. Техногенна деградація верхнього шару ґрунту призводить до зниження жорсткості, порушення фільтраційних властивостей і формування умов для міграції забруднювачів, що підтверджено експериментальними даними щодо динаміки руху важких металів у післявоєнних ґрунтах [2].

В умовах воєнного впливу на урбанізовані території значно зростає ризик деградації ґрунтів, порушення гідрогеологічного режиму та вторинного забруднення довкілля. Реалізація природоорієнтованих і інженерних заходів з відновлення техногенно змінених ґрунтів потребує не лише наукового обґрунтування та моделювання фільтраційно-деформаційних процесів, але й відповідності вимогам державної екологічної політики. Саме тому при розробленні технологій екологічного відновлення територій важливо враховувати нормативно-правові механізми регулювання господарської діяльності.

У процесі післявоєнного відновлення міських територій необхідним є кількісне оцінювання змін напружено-деформованого стану та фільтраційних процесів у межах техногенно трансформованих масивів. Екологічне відновлення ґрунтів неможливе без узгодження з дозвільними процедурами (екологічні дозволи, оцінка впливу на довкілля, ліцензування діяльності). Вивчення сучасних стратегій ремедіації ґрунтів, контамінованих вибуховими речовинами, показує, що моделювання поведінки порового тиску та шляхів міграції забруднювачів є ключовим елементом для проєктування заходів відновлення [3].

Дослідження авторів [4] окреслюють мультикомпонентні екологічні наслідки воєнних дій для ґрунтів, водних ресурсів та здоров'я населення, що підсилює необхідність інтегрованого підходу до оцінювання стану ґрунтів. Аналіз літератури також виявляє, що порушення фізико-хімічних властивостей ґрунтів внаслідок техногенного навантаження змінює водопроникність і гідрофобність, що безпосередньо впливає на водний режим і потенціал транспортування забруднень [5–8]. Водночас у більшості робіт фізико-механічні та гідрологічні аспекти розглядаються ізольовано, без об'єднання у єдину математичну модель, що обмежує практичне застосування рекомендацій у геотехнічному проєктуванні.

Забезпечення екологічної стабільності ґрунтів є складовою технологій захисту навколишнього середовища та умовою сталого розвитку міст і громад. Для обґрунтування заходів відновлення необхідне застосування чисельного моделювання, що дозволяє оцінювати вплив зміни фізико-механічних параметрів на стійкість і фільтраційний режим ґрунтового масиву. Особливої уваги потребує інтеграція природоорієнтованих рішень із геотехнічними методами стабілізації. У зв'язку з цим актуальним є розроблення підходу до оцінювання стану техногенно змінених ґрунтів, який поєднує аналіз напружено-деформованого стану та гідравлічних характеристик у межах єдиної розрахункової моделі та забезпечує кількісне порівняння сценаріїв післявоєнного відновлення.

**Основна частина.** Дослідження проведено на основі чисельного моделювання поведінки техногенно змінених ґрунтів урбанізованих територій за різних сценаріїв відновлення. Об'єктом моделювання є інженерно-геологічний розріз довжиною 30 м та глибиною 8 м – ділянка міського простору з техногенно порушеним верхнім шаром. Такий формат постановки задачі відповідає логіці підготовки інженерно-екологічних обґрунтувань, що супроводжують дозвільні процедури під час виконання робіт з відновлення та рекультивації територій.

Вихідні фізико-механічні характеристики ґрунтових шарів (насип техногенний, суглинок пластичний, пісок середньої щільності) відповідають умовам урбанізованих територій. Зокрема, параметри міцності, модуля деформації та коефіцієнта фільтрації враховували можливі зміни, пов'язані з механічним руйнуванням, ущільненням та хімічним навантаженням верхніх шарів. Такі параметри є типовими вихідними даними для проєктної документації та графічних матеріалів (профілі, розрізи), що формуються у САД-середовищі.

Чисельне моделювання виконано методом скінченних елементів у двовимірній постановці плоскої деформації з використанням пружно-пластичної моделі ґрунту, що базується на критеріях міцності Мора–Кулона. У моделі враховувалися початковий напружено-деформований стан, зовнішнє навантаження (умовне експлуатаційне навантаження 25 кПа) та вплив нестационарної фільтрації атмосферних опадів. Включення фільтраційної складової є важливим для обґрунтування екологічної прийнятності проєктних рішень у межах регуляторних та дозвільних вимог щодо запобігання підтопленню й міграції забруднювачів (рис. 1).

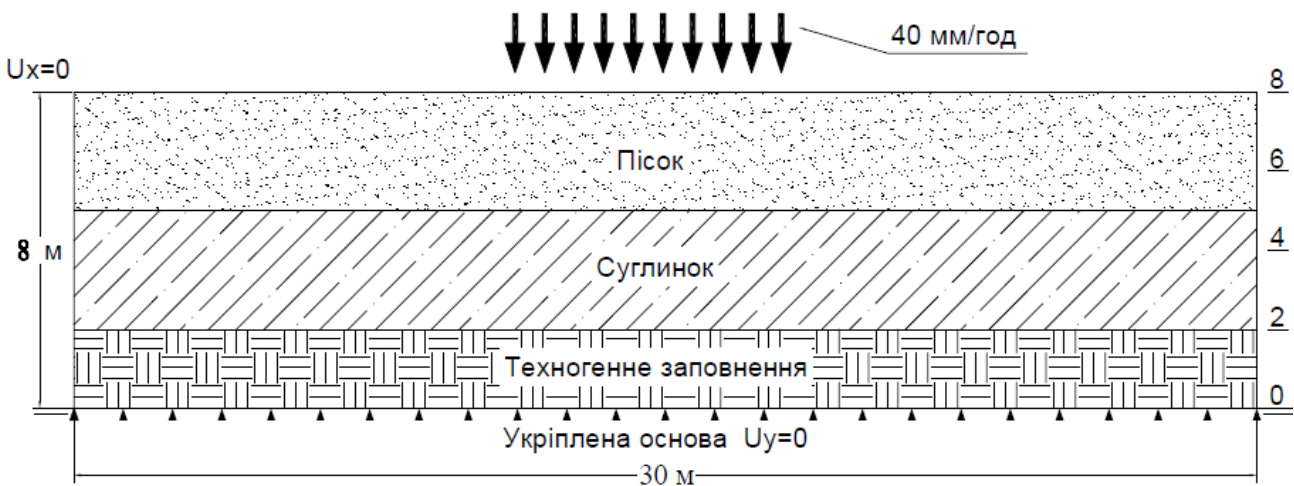


Рис. 1. Розрахункова схема 2D геотехнічного розрізу (30×8 м) з граничними умовами та впливом атмосферної інфільтрації

Механічна поведінка ґрунту описувалась пружно-пластичною моделлю з критерієм міцності Мора–Кулона:

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \varphi, \quad (1)$$

де  $\tau_f$  – граничне дотичне напруження, кПа;  $c$  – питоме зчеплення, кПа;  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя, °;  $\sigma' = \sigma - u$  – ефективне нормальне напруження, кПа;  $u$  – поровий тиск.

Вплив зволоження враховано через зміну ефективних напружень (через  $u$ ), що дає можливість оцінювати, як інфільтрація впливає на міцність і деформації. Це, зокрема, дає підстави для формування вимог до водовідведення/дренажу, які часто є предметом погоджень у дозвільній документації.

Граничні умови моделі визначено таким чином: нижня межа – фіксована по вертикалі та горизонталі, бокові межі – обмежені по горизонтальних переміщеннях, а поверхня – вільна для деформацій і нанесення граничного водного потоку. Вплив інтенсивності опадів задано як граничний водний потік з інтенсивністю 40 мм/год.

Для оцінки фільтраційних процесів застосовано нестационарну постановку фільтрації в пористому середовищі, що дозволяє аналізувати розподіл порового тиску та глибину проникнення вологи в горизонти ґрунту. Фільтраційний потік описується законом Дарсі:

$$q = -k \nabla h, \quad (2)$$

де  $q$  – фільтраційний потік, м/с;  $k$  – коефіцієнт фільтрації, м/с;  $h$  – гідравлічний напір, м;  $\nabla h$  – градієнт гідравлічного напору.

Для нестационарної оцінки зміни порового тиску в часі використовувалося рівняння збереження маси у пористому середовищі:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \nabla \cdot q = 0, \quad (3)$$

де  $\theta$  – об'ємна вологість ґрунту;  $t$  – час, с. Такий опис режиму зволоження дозволяє кількісно оцінити ризики підтоплення і пов'язані екологічні наслідки, що є аргументом у процесах погодження проєктних рішень та отримання дозволів.

Параметричне порівняння сценаріїв здійснювалося шляхом варіювання характеристик верхнього шару (модуля деформації, коефіцієнта фільтрації, зчеплення, кута внутрішнього тертя) відповідно до обраних заходів відновлення (біоінженерні, геотехнічні, зелено-блакитні рішення). Вибір сценаріїв сформовано так, щоб їхні ефекти можна було інтерпретувати як варіанти техніко-екологічного обґрунтування для подальшого проходження дозвільних процедур.

Для кожного сценарію  $S_i$  визначались:

- максимальне осідання:

$$S_{\max}(S_i) = \max (s(x)) \quad (4)$$

- коефіцієнт запасу стійкості  $FS(S_i)$  (за методом зниження міцності, де  $c_i$  і  $\tan \varphi$  зменшуються на один і той самий множник до граничного стану):

$$FS = \frac{c}{c_i} = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_i} \quad (5)$$

- частка інфільтрованої води під час опадів тривалості  $T$ :

$$I(S_i) = \frac{\int_0^T Q_{\text{inf}}(t) dt}{P \cdot A \cdot T}, \quad (6)$$

де  $Q_{inf}(t)$  – сумарна інфільтрація (витрата) через поверхню;  $P$  – інтенсивність опадів;  $A$  – площа/умовна ширина ділянки в 2D постановці. Наведений набір індикаторів зручний для подання у вигляді стандартизованих графіків/діаграм та креслень (CAD/GIS), що полегшує експертний розгляд і порівняння альтернатив. А також можуть застосовуватись як кількісні критерії прийнятності рішень при екологічному обґрунтуванні проєктів, що подаються на погодження у межах дозвільної діяльності.

Аналіз та інтерпретація результатів базувалися на стандартних принципах механіки ґрунтів, теорії фільтрації, а також на чисельних даних, отриманих у відповідних розрахункових фазах моделювання.

#### **Зміна напружено-деформованого стану.**

У результаті чисельного моделювання отримано розподіл вертикальних переміщень та ефективних напружень для кожного зі сценаріїв відновлення (S0–S3).

У базовому сценарії (S0), що характеризує техногенно структурно порушений ґрунт після вибухового впливу, сформовано зону локальних концентрацій деформацій у верхньому шарі (табл. 1). Незважаючи на зовнішнє ущільнення, деградація структурних зв'язків та неоднорідність порового простору призвели до зниження ефективного модуля деформації та збільшення осідань.

Максимальні вертикальні переміщення в S0 становили 39–44 мм.

Порівняльні дані наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Максимальні вертикальні переміщення ґрунтів

<b>Сценарій</b>	<b>Максимальне осідання, мм</b>
S0 (техногенно структурно порушений ґрунт)	39–44
S1 (біоінженерна стабілізація)	31–35
S2 (геотехнічне армування)	19–23
S3 (зелено-блакитна інфраструктура)	26–30

У сценарії S1 (біоінженерна стабілізація) зменшення осідань пов'язане зі структурною стабілізацією ґрунтового масиву та зростанням когезійних характеристик. У S2 (геотехнічне армування) досягнуто мінімальних деформацій завдяки перерозподілу напружень. Сценарій S3 (зелено-блакитна інфраструктура) забезпечує компроміс між стабілізацією та гідрологічною адаптацією.

#### **Коефіцієнт запасу стійкості**

Результати методу зниження міцності показали:

- S0: FS  $\approx$  1,28–1,32
- S1: FS  $\approx$  1,36–1,41
- S2: FS  $\approx$  1,48–1,55
- S3: FS  $\approx$  1,42–1,47

Підвищення FS у сценаріях S1 та S3 свідчить про те, що природоорієнтовані рішення можуть розглядатися як елементи інженерної стабілізації, а не лише як екологічні заходи.

**Фільтраційна поведінка та гідравлічний режим.**

У базовому стані (S0) низький коефіцієнт фільтрації (0,30–0,38 м/добу) спричиняє накопичення поверхневої вологи та формування підвищеного порового тиску. Це створює передумови для локального підтоплення та горизонтального переносу забруднювачів.

Сценарії S1 та S3 забезпечують зростання коефіцієнта фільтрації та більш рівномірний розподіл потоку (табл. 2).

Таблиця 2

Частка інфільтрованої води при інтенсивності опадів 40 мм/год

Сценарій	Частка інфільтрованого потоку, %
S0	10–15
S1	35–40
S2	25–30
S3	55–60

Водночас збільшення інфільтрації розглядалося з урахуванням гідравлічного градієнта, що визначає потенціал міграції поллютантів.

**Індекс екологічної стабілізації ґрунту**

У сучасних дослідженнях стану ґрунтового покриву для узагальненої оцінки екологічної якості застосовуються індексні підходи, зокрема Soil Quality Index та Environmental Quality Index, що інтегрують фізико-хімічні та гідрологічні показники у безрозмірну форму. Такі індекси дозволяють виконувати порівняльний аналіз стану територій та оцінювати ефективність заходів ремедіації.

Разом з тим у більшості робіт інтегральні показники не враховують зміну напружено-деформованого стану ґрунтового масиву, що є критично важливим для урбанізованих територій після техногенного впливу. Зокрема, не аналізується взаємозв'язок між гідравлічними градієнтами, поровим тиском та механічною стійкістю ґрунту.

З урахуванням зазначеного в роботі запропоновано індекс екологічної стабілізації ґрунту (ІЕСГ), який дозволяє інтегрувати механічні та гідрологічні параметри в єдину систему оцінювання.

Індекс екологічної стабілізації ґрунту визначається за формулою:

$$I_{es} = FS_n \cdot (1 - i_n) \quad (7)$$

де  $FS_n$  – нормоване значення коефіцієнта запасу стійкості;  $i_n$  – нормоване значення гідравлічного градієнта у верхньому шарі ґрунту.

Нормування показників виконувалося за формулами:

$$FS_n = \frac{FS - FS_{\min}}{FS_{\max} - FS_{\min}} \quad (8)$$

$$i_n = \frac{i - i_{\min}}{i_{\max} - i_{\min}}, \quad (9)$$

де  $FS$  – коефіцієнт запасу стійкості;  $i$  – середній гідравлічний градієнт;  $FS_{\min}$ ,  $FS_{\max}$ ,  $i_{\min}$ ,  $i_{\max}$  – відповідно мінімальні та максимальні значення показників серед розглянутих сценаріїв.

Таким чином, індекс  $I_{es}$  змінюється в межах від 0 до 1. Чим ближче його значення до 1, тим вищою є екологічна та інженерна стабільність ґрунтового масиву.

Фізичний зміст індексу полягає в тому, що його зростання відповідає одночасному:

- підвищенню механічної стійкості ґрунтової системи;
- зниженню небезпечних гідравлічних градієнтів;
- зменшенню потенціалу горизонтальної міграції забруднювачів.

Розрахунок ІЕСГ показав, що в базовому стані (S0) індекс набуває мінімального значення, що підтверджує низьку стабільність техногенно трансформованого ґрунту. У сценарії S1 спостерігається зростання індексу, зумовлене структурною стабілізацією та покращенням водного режиму. Найвищі значення отримано для сценарію S3, що забезпечує поєднання регульованої інфільтрації та підвищеної стійкості.

Запропонований індекс дозволяє перейти від якісної характеристики ефективності заходів до кількісного екологічно-інженерного обґрунтування сценаріїв відновлення урбанізованих територій. ІЕСГ може бути використаний як зрозумілий інтегральний показник для обґрунтування вибору сценарію відновлення у матеріалах, що готуються для екологічних погоджень та дозвільних рішень.

Для візуалізації результатів рекомендовано формувати графіки залежностей показників від сценарію та інженерно-графічні схеми розрізу з відображенням граничних умов і зон максимальних деформацій. Порівняльна оцінка сценаріїв за показниками деформацій та гідравлічного режиму (рис. 2).

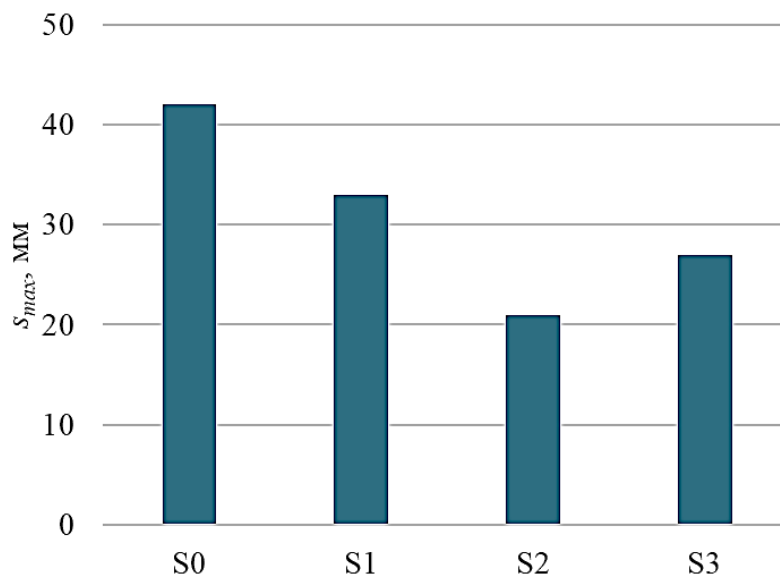


Рис. 2. Порівняння сценаріїв S0-S3 за максимальним осіданням ґрунту ( $s_{max}$ )

Для кількісного узагальнення результатів моделювання виконано порівняльний аналіз максимальних вертикальних переміщень, коефіцієнта запасу стійкості, середнього гідравлічного градієнта у верхньому шарі та індексу екологічної стабілізації ґрунту (табл. 3).

Таблиця 3

## Порівняння розрахункових показників

Сценарій	s max, мм	FS	Середній градієнт і	ІЕСГ
S0	42	1.30	0.42	0.12
S1	33	1.38	0.31	0.34
S2	21	1.52	0.34	0.41
S3	27	1.45	0.22	0.56

У результаті виконаного чисельного моделювання авторами встановлено, що максимальні вертикальні переміщення характерні для базового сценарію S0 та становлять 42 мм, що свідчить про зниження жорсткісних характеристик техногенно трансформованого верхнього шару ґрунту. Визначено, що впровадження інженерних заходів у сценарії S2 забезпечує зменшення осідань до 50 % порівняно з базовим станом. Для сценаріїв S1 та S3 зниження максимальних деформацій становить відповідно 21 % та 36 %, що підтверджує позитивний вплив структурної стабілізації та регульованої інфільтрації на деформаційну поведінку ґрунтового масиву.

Аналіз коефіцієнта запасу стійкості показав, що у базовому стані його значення ( $FoS = 1,30$ ) наближається до граничного, що характеризує знижений рівень механічної надійності системи. Встановлено, що максимальний приріст стійкості досягнуто у сценарії S2, де  $FoS$  становить 1,52, що на 17 % перевищує відповідний показник базового стану.

Дослідження гідравлічного режиму дозволило визначити, що найбільший середній гідравлічний градієнт (0,42) формується у сценарії S0, створюючи передумови для активної міграції забруднювачів у межах верхнього шару. У сценарії S3 зафіксовано зниження градієнта до 0,22, що відповідає його зменшенню на 48 % та свідчить про стабілізацію водного режиму ґрунту.

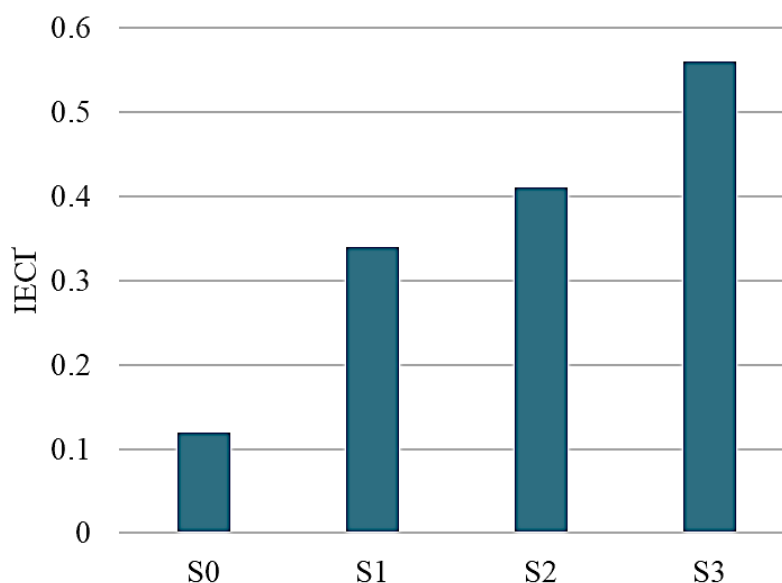


Рис. 3. Зміна індексу екологічної стабілізації ґрунту (ІЕСГ) для різних сценаріїв відновлення

Розрахунок індексу екологічної стабілізації ґрунту показав, що мінімальне його значення (0,12) характерне для базового сценарію (див. рис. 3).

Встановлено, що реалізація заходів у сценаріях S1 та S2 забезпечує зростання індексу відповідно у 2,8 та 3,4 раза. Найвище значення ІЕСГ (0,56) отримано для сценарію S3, що перевищує базовий стан більш ніж у 4,6 раза та підтверджує доцільність комплексного підходу до відновлення техногенно змінених урбанізованих територій.

### Інтегральна оцінка ефективності сценаріїв

Для узагальнення результатів виконано ранжування сценаріїв за критерієм комплексної ефективності з урахуванням механічної надійності та екологічної стабільності (табл. 4).

Таблиця 4

#### Рангова оцінка сценаріїв

Сценарій	Механічна надійність	Гідрологічна стабільність	Загальна оцінка
S0	низька	низька	IV
S1	середня	середня	III
S2	висока	середня	II
S3	висока	висока	I

Отримані результати свідчать, що сценарій S3 забезпечує оптимальний баланс між зниженням деформацій, підвищенням стійкості та стабілізацією гідравлічного режиму. Сценарій S2 є найбільш ефективним з позиції мінімізації осідань, однак поступається за показниками гідравлічної адаптивності.

Впровадження природоорієнтованих рішень у поєднанні зі структурною стабілізацією ґрунту дозволяє суттєво підвищити екологічну та інженерну надійність техногенно змінених урбанізованих територій.

**Висновки.** У результаті виконаного чисельного моделювання встановлено, що техногенно трансформований верхній шар ґрунту урбанізованих територій після воєнного впливу характеризується зниженими жорсткісними параметрами та підвищеною деформаційною чутливістю, що проявляється у формуванні максимальних осідань до 42 мм у базовому сценарії. Визначено, що реалізація інженерних заходів дозволяє зменшити осідання до 50 % та підвищити коефіцієнт запасу стійкості до 1,52, що на 17 % перевищує показники базового стану. Доведено, що застосування природоорієнтованих рішень сприяє стабілізації гідравлічного режиму та зниженню середнього гідравлічного градієнта до 48 %, що зменшує потенціал міграції забруднювачів у межах техногенно зміненого шару. Запропоновано індекс екологічної стабілізації ґрунту, який інтегрує механічні та фільтраційні показники та забезпечує кількісне порівняння сценаріїв відновлення; максимальне його значення (0,56) отримано для комплексного природоорієнтованого сценарію, що перевищує базовий стан більш ніж у 4,6 раза. Отримані кількісні результати та індексний підхід можуть слугувати розрахунковою

основою для формування проектних матеріалів і супровідної документації в рамках дозвільної діяльності при виконанні післявоєнних робіт з відновлення урбанізованих територій. Крім того, результати моделювання можуть бути використані для створення інженерно-графічних матеріалів у CAD-середовищах (AutoCAD, Civil 3D та ін.), що забезпечує візуалізацію геологічних розрізів, розрахункових схем і графіків порівняння сценаріїв стабілізації ґрунтового масиву. Отримані результати підтверджують ефективність інтегрованого підходу до післявоєнного відновлення урбанізованих територій та можуть бути використані при обґрунтуванні технологій захисту навколишнього середовища в умовах відновлення міської інфраструктури.

#### Перелік посилань

1. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. <https://doi.org/10.3390/land13101614>
2. Petrushka, K., Petrushka, I., & Holdrych, A., (2024) Dynamics of heavy metals migration in the soil as a consequence of military actions. *Environmental Problems*, 9(2), 109–116. <https://doi.org/10.23939/ep2024.02.109>
3. Mystrioti, C., & Papassiopi, N. (2024). A Comprehensive Review of Remediation Strategies for Soil and Groundwater Contaminated with Explosives. *Sustainability*, 16(3), 961. <https://doi.org/10.3390/su16030961>
4. Hryhorczuk, D., Levy, B. S., Prodanchuk, M., Kravchuk, O., Bubalo, N., Hryhorczuk, A., & Erickson, T. B. (2024). The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>
5. Nie, X., Huang, X., Li, M., Lu, Z., & Ling, X. (2024). Advances in Soil Amendments for Remediation of Heavy Metal-Contaminated Soils: Mechanisms, Impact, and Future Prospects. *Toxics*, 12(12), 872. <https://doi.org/10.3390/toxics12120872>
6. Asadi, T., Najafi, P., Chavoshi, E., & Hoodaji, M. (2025). The Impact of oil contamination on soil hydrophobicity and physico-chemical properties around Bandar Abbas oil refinery, Hormozgan Province, Iran. *Environmental Health Engineering and Management*, 12, 1420. <https://doi.org/10.34172/ehem.1420>
7. Boiko, V., Kravets, V., Han, O., Han, A., & Zakusylo, R. (2023). Efficiency of Using Explosive Foam Compositions for Compacting Structurally Unstable Soil. *Central European Journal of Energetic Materials*, 20(4), 442–454. <https://doi.org/10.22211/cejem/176913>
8. Heidari, S. A., Amiri, M., Harifi, A., & Wu, W. (2025). Effect of thermal treatment on stabilization and solidification of heavy metal contaminated clayey soil. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01155-3>

#### ABSTRACT

**Purpose.** To assess the impact of nature-based and engineering measures on the ecological and mechanical stability of technogenically altered soils of urbanized territories affected by military activities, taking into account the requirements of environmental permitting procedures

**The methods.** The study is based on numerical modelling performed in a plane strain formulation using the elastic–plastic Mohr–Coulomb model combined with transient seepage analysis. Several scenarios of stabilization of the upper soil layer were analysed. The assessment included determination of maximum settlements, the factor of safety, the hydraulic gradient, and an integrated environ-

mental stability index. The obtained results may be used for preparing materials required for environmental permitting procedures and for their visualization in CAD environments during the development of engineering documentation.

**Findings.** In the baseline scenario, maximum settlements reach up to 42 mm, while the factor of safety approaches the limit value of 1.30. The application of engineering stabilization measures reduces settlements by up to 50% and increases stability by approximately 17%. Nature-based solutions ensure a reduction of the hydraulic gradient by up to 48% and increase the environmental soil stability index by more than 4.6 times.

**The originality.** Correlations found .. An integrated approach to the assessment of ecological and engineering stability of technogenically altered soils affected by military impacts is proposed. A soil environmental stabilization index is introduced, combining the factor of safety and the hydraulic gradient, which enables quantitative comparison of different restoration scenarios.

**Practical implementation.** The obtained results can be applied for substantiation of technologies for the restoration of urban territories, preparation of environmental impact assessment documentation, obtaining environmental permits, and development of engineering and graphical materials within CAD environments.

**Keywords:** *technogenically altered soils, post-war restoration, numerical modelling, hydraulic conductivity, nature-based solutions, environmental soil stability index, urbanized territories, environmental permitting, CAD environments.*

дата першого надходження статті до видання	10.01.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	21.02.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.03.2026