

УДК 551.583

Ilia Sviatohorov, Post-Graduate of Department of Labour and Environment Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF GEOTECHNICAL STRUCTURES IN «GREEN CONSTRUCTION»

Abstract. *Green buildings are structures that are located, designed, built, renovated and operated in accordance with the main principles of energy efficiency, and that they will have a positive impact on the environment, economy and social sphere during their entire life cycle. The need to save energy and mitigate environmental problems contributed to the emergence of a wave of green innovations in construction, which continues to this day. The main goal of the concept of sustainable development in geotechnical "green construction" is to: provide it with economic competitiveness and sufficient usefulness; at the same time, reduce energy and material consumption; re-duce the area of land plots allocated for construction; to minimize risks of harm to health and life of people in case of accidents and undesirable events during geotechnical construction. The reconstruction of Postal Square is one of the largest infrastructure projects in Kyiv in recent years. Large traffic flows in the "north-south" direction pass through the square, and the absence of a modern transport hub in this area complicates car traffic. The reconstruction project provided for the construction of a two-lane road tunnel, an overhead transport overpass (the first phase of construction), as well as a two-story underground shopping complex with a total area of about 8,000 m² (the second phase of construction) and complex improvement of the territory with the arrangement park and fountain. The construction was carried out taking into account the high responsibility of the construction and the complexity of the engineering and geological conditions of the construction site. The requirements of geotechnical "green construction" in the conditions of dense urban development based on a systemic approach were met. At the same time, the following were resolved: the absence of shear deformations of the surrounding slopes during the construction of the pit, construction and operation of the structure; integrity of surrounding buildings; ensuring reliable operation of the metro line; strength and reliability of structures under construction; preservation of the original hydrogeological regime of the territory; preservation of under-ground monuments of history and architecture, other issues.*

Key words: *green construction, geotechnics, retaining wall, numerical modeling.*

І.О. Святогорів

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОТЕХНІЧНИХ КОНСТРУКЦІЙ В «ЗЕЛЕНОМУ БУДІВНИЦТВІ»

Анотація. *«Зелені» будівлі – це споруди, які розташовані, спроектовані, побудовані, відремонтовані і експлуатуються відповідно до основних принципів енергоефективності, а також чинять позитивний вплив на навколишнє середовище, економіку і соціальну сферу протягом всього їх життєвого циклу. Необхідність економії енергії і пом'якшення екологічних*

проблем сприяла появі хвилі «зелених» інновацій в будівництві, яка триває і донині. Основна мета концепції сталого розвитку в геотехнічному «зеленому будівництві» полягає в тому, щоб: надати йому економічну конкурентоспроможність та достатню корисність; в той же час знизити енерго- і матеріаломісткість; зменшити площу земельних ділянок, що відводиться під будівництво; мінімізувати ризики шкоди для здоров'я і життя людей в разі аварій і небажаних подій під час геотехнічного будівництва. Реконструкція Поштової площі є одним з найбільших інфраструктурних проєктів в Києві за останні роки. Через площу проходять великі транспортні потоки в напрямку «північ-південь», і відсутність на цій території сучасного транспортного вузла ускладнює автомобільний рух. Проєкт реконструкції передбачав будівництво автомобільного тунелю з рухом в двох напрямках по дві смуги, надземної транспортної естакади (перша черга будівництва), а також двоповерхового підземного торгового комплексу загальною площею близько 8000 м² (друга черга будівництва) та комплексний благоустрій території з влаштуванням скверу та фонтану. Будівництво виконувалось з урахуванням високої відповідальності споруди та складності інженерно-геологічних умов будівельного майданчика. Були дотримані вимоги геотехнічного «зеленого будівництва» в умовах ущільненої міської забудови на основі системного підходу. Одночасно вирішувались: відсутність протягом влаштування котловану, будівництва та експлуатації споруди зсувних деформацій оточуючих схилів; цілісність навколишніх будівель; забезпечення надійної експлуатації лінії метрополітену; міцність і надійність споруд, що будуються; збереження первісного гідрогеологічного режиму території; збереження підземних пам'яток історії та архітектури. **Ключові слова:** «зелене будівництво», геотехніка, протизсувні споруди, чисельне моделювання.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.2.36-47>

Вступ

Поштова площа забудована безліччю споруд, в числі яких Поштовий будинок (пам'ятка історії XIX століття), церква Різдва Христового, річковий вокзал, група адміністративних будівель, споруди початку і середини XX століття (рис. 1).



Рис. 1. Архітектурний макет Поштової площі після реконструкції

Існуюча забудова і лінія метрополітену обумовлюють підвищені вимоги до проєктних рішень і виконання робіт по їх збереженню. Проєкт реконструкції передбачав будівництво автомобільного тунелю з рухом в двох напрямках по дві смуги, надземної транспортної естакади (перша черга будівництва), а також двоповерхового підземного торгового комплексу загальною площею близько 8000 м² (друга черга будівництва) та комплексний благоустрій території з влаштуванням скверу та фонтану. Будівництво виконувалось з урахуванням високої відповідальності споруди для м. Києва та складності інженерно-геологічних умов будівельного майданчика. Були дотримані вимоги геотехнічного «зеленого будівництва» в умовах ущільненої міської забудови. Як зазначає у своїх роботах професор Ванічек, геотехнічні конструкції являють собою дуже хороший приклад застосування принципів «зеленого будівництва» [18, 19]:

I. Збереження земельних ділянок (утідь) при проєктуванні, що розташовані поблизу крутих схилів насипів або котлованів. В таких випадках, зазвичай, використовуються геосинтетичні матеріали для зміцнення ґрунтових стінок схилів (котлованів).

II. Економія природних наповнювачів протизсувних споруд за рахунок використання альтернативних (природних) матеріалів. При використанні матеріалів у великих кількостях необхідно заздалегідь перевірити їх фізико-механічні властивості, а також їх вплив на навколишнє середовище, щоб запобігти нештатній поведінці (реагуванню) (наприклад, при збільшенні шлаку в одиниці об'єму матеріала-наповнювача) або забрудненню підстилаючого ґрунту продуктами відходів вилуговування.

III. Економія електроенергії протягом всього передбачуваного терміну експлуатації геотехнічних споруд, яка може бути пов'язана з безліччю аспектів. Наприклад, якщо застосувати концепцію сталого розвитку до більш крутих зсувонебезпечних схилів, можна не тільки зменшити розмір ділянки під майбутнє будівництво, а й знизити споживання енергії, необхідної для виїмки ґрунту та на його переміщення при будівництві.

IV. Вибір найкращої технології і контроль ущільнення ґрунту в геотехніці є також важливим аспектом з точки зору економії електроенергії. Сюди ж можна додати використання геотермальної енергії і, нарешті, економію може дати використання нових інтелектуальних геотехнічних конструкцій, при зведенні яких споживання енергії буде менше, ніж в класичних геотехнічних конструкціях.

V. Підпірні протизсувні стіни з укріпленого ґрунту в порівнянні з класичними бетонними гравітаційними підпірними протизсувними стінами.

VI. Максимальне збереження культурної спадщини в підземному просторі.

В процесі робіт на основі системного підходу вирішувались: 1) цілісність навколишніх будівель; 2) забезпечення надійної експлуатації лінії метрополітену; 3) міцність і надійність споруд, що будуються; 4) збереження гідрогеологічного режиму території; 5) збереження підземних пам'яток історії та архітектури.

Інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови території

За даними інженерно-геологічних вишукувань в геоморфологічному відношенні майданчик реконструкції Поштової площі розташований в районі примикання правобережної високої заплави Дніпра до крутого корінного схилу Київського плато. Рельєф, сформований в результаті схилових процесів і техногенної діяльності людини, характеризується абсолютними відмітками денної поверхні 97,5 ... 112,3 м, із загальним рівномірним зниженням в бік долини Дніпра. В геологічній будові майданчика, на розвіданій глибині до 40 м, беруть участь відкладення харківської, київської і бучакської світ, повсюдно перекриті верхньочетвертинними делювіальними відкладеннями і насипними ґрунтами.

За результатами бурових робіт і лабораторних досліджень ґрунтів в межах розвіданої глибини виділено 7 інженерно-геологічних елементів:

1) насипний ґрунт – глина, іноді суглинок з гніздами і прошарками піску і супіску, з вмістом будівельного сміття до 20%, на окремих ділянках – до 35%, твердої і напівтвердої консистенції, потужність шару від 3,2 до 5,5 м;

2) глина, в основному, легка пілувата, бура, буро-сіра, сизувато-сіра, темно-сіра, твердої, напівтвердої консистенції, потужність шару від 1,6 до 5,5 м;

3) суглинок, в основному, важкий пілуватий, зеленувато-сірий, сизувато-сірий, темно-сірий, з прошарками і лінзами піску або супіску, напівтвердої консистенції, потужність шару від 1,6 до 5,5 м;

4) пісок пілуватий, іноді невеликий, сірий з зеленуватим відтінком, темно-сірий, середньої щільності, насичений водою, залягає у вигляді прошарків і лінз незначною потужністю в середньому 0,9 м;

5) пісок пілуватий, місцями невеликий, жовтувато-сірий з зеленуватим відтінком з великою кількістю прошарків і лінз супіску та суглинку, середньої щільності, насичений водою, потужність розкритого шару від 3,3 до 10,2 м;

6) глина "Київський мергель" легка пілувата, іноді суглинок важкий пілуватий, світла зеленувато-сіра, твердої і напівтвердої консистенції, потужність витримана, в середньому 10,1 м;

7) пісок дрібний, іноді пілуватий, темно-зеленувато-сірий глауконітовий, гідрослюдястий, з рідкісними прошарками супіску, середньої щільності, насичений водою, потужність становить в середньому 13,3 м.

Інженерно-геологічні умови майданчика будівництва відносяться до III категорії (складної) в зв'язку з можливістю розвитку зсувних процесів. Гідрогеологічні умови досліджуваного майданчика характеризуються наявністю повсюдно поширеного водоносного комплексу, який складається з водоносного горизонту, приуроченого до четвертинних алювіальних відкладів, ґрунтів бучакської світи і тимчасового водоносного шару типу «верховодка».

Перший водоносний горизонт знаходиться на абсолютних позначках 99.8 ... 108.1 м. Амплітуда сезонних коливань рівня підземних вод становить 1.0 м.

Другий водоносний горизонт приурочений до бучакських пісків на абсолютних позначках 83,1 ... 83,4 м. Води напірні, п'єзометричний рівень зафіксований на абсолютних позначках 90,6 ... 90,7 м, величина напору становить 7.3 ... 7.5 м.

Об'єкти вірогідного впливу котловану будівництва на навколишню забудову

При проектуванні підземної споруди враховується взаємний вплив даного об'єкту і споруд (будівель) навколишньої забудови в межах Поштової площі, до числа яких можна віднести споруди транспортної розв'язки і перегінних тунелів метрополітену, а також Поштовий будинок, Церкву Різдва Христового і будівлю «Київпаstrансу» (рис. 2).

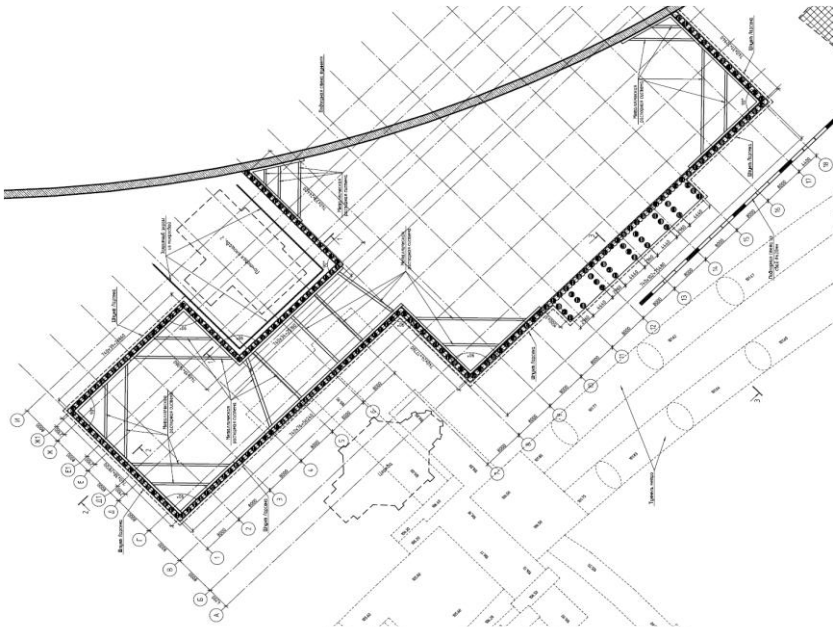


Рис. 2. План розташування конструкцій огороження котловану і ближніх будівель: церква Різдва Христового, Поштовий будинок, будівля «Київпаstrансу»

Найближче до об'єкта будівництва розташований Поштовий будинок, відстань від його торця до межі огороження котловану під проектований об'єкт становить 3.2 м; від двох інших боків будинку до межі огороження котловану – 5.6 і 9.0 м. Поштовий будинок – одноповерхова цегляна будівля з підвалом.

У плані будівля прямокутна з тильним виступом, має розміри близько 23.60x17.60 м. До навколишньої забудови проєктованого об'єкта на Поштовій площі належить також будівля Церкви Різдва Христового, що знаходиться на відстані 9.0 м від торця і 11.0 м від головного фасаду до котловану. Як в плані, так і по висоті будівля має складну форму з розмірами в осях 29.52x19.04 м, при висоті основного приміщення храму 14.04 м.

На відстані 15 м від майданчика будівництва знаходиться будівля «Київпаstrансу» прямокутної форми в плані з максимальними розмірами 65.0x17.0 м і висотою 15.0 м. Також поблизу майданчика будівництва, на відстані близько 16.5 і 28.0 м від огороження котловану, розташовані два перегінних тунелі метрополітену. Абсолютна відмітка низу конструкцій тунелів становить 95.770 м.

Конструкція огороження котловану

Огородження котловану під будівництво багатофункціонального об'єкта на ділянці по осі А1 виконано з паль діаметром 1020 мм з бетону класу С25/0 для армованих паль і бетону класу С20/25 для неармованих паль. Крок армованих паль 1480 мм. Голови паль об'єднані балковим ростверком. Абсолютна відмітка голови паль – 104.400 м, п'яти паль – 78.500 м. Відмітка рівня дна котловану 96.000 м.

По довжині стіни огороження котловану (довжина ділянки стіни по осі А1 становить 74.7 м) влаштовуються з зовнішнього боку котловану 9 контрфорсів по три палі в кожному з них. Контрфорси об'єднані між собою і з палями основного ряду плитою ростверку товщиною 400 мм. Огородження котловану на інших ділянках стін котловану, в тому числі і навколо Поштового будинку, виконані з паль діаметром 880 мм. Армовані палі виконуються з бетону класу С25/30, неармовані палі – з бетону класу С20/25. Крок армованих паль – 1480 мм.

Голови паль об'єднані балковим ростверком перетином 980х600 мм. З метою виключення механічної суфозії частинок ґрунту внаслідок виробництва буріння свердловин під палі навколо будівлі Поштового будинку влаштований захисний екран з мікропаль, при цьому глибина занурення цих паль доходить до шару піску на позначці 86.000 м.

В системі огороження котловану присутні конструктивні елементи – розпірні конструкції, які беруть участь в сприйнятті і передачі тиску ґрунту на інші конструкції огороження котловану. Розпірні конструкції виконують тимчасові функції. В процесі екскавації ґрунту з котловану і в міру зведення конструкцій каркасу і перекриттів підземної споруди розпірні елементи були демонтовані. Схема огороження котловану показана на рис. 2.

Математичне моделювання НДС котловану

Питання математичного та експериментального моделювання механіки ґрунтів, а особливо зсувних порушень, розглядалися в багатьох роботах вітчизняних і зарубіжних дослідників [1–26]. З їх аналізу випливає перспективність застосування сучасних пакетів прикладних програм для моделювання напружено-деформованого стану зсувонебезпечних схилів та котлованів. Виходячи з цього, нами виконаний розрахунок споруди для стадії будівництва огороження котловану як просторової системи із залученням програмного комплексу «LIRA-WINDOWS». Просторова розрахункова модель для розрахунку споруди наведена на рис. 3.

У таблиці 1 наведені величини горизонтальних переміщень вузлів розрахункової моделі для створу А, в якому отримані найбільші величини переміщень на розглянутих рівнях заглиблення паль у ґрунті. На рис. 4 показаний характер деформування елементів розрахункової моделі огороження котловану.

Так як горизонтальні переміщення не перевищують граничних значень згідно із сучасними українськими будівельними нормами, зроблено висновок про те, що облаштування паль і огороження котловану до проєктної позначки 96,000 м не вплине на будівлю Церкви Різдва Христового (Поштова площа, 4) і адміністративну будівлю «Київпастрансу» (вул. Набережне шосе, 2).

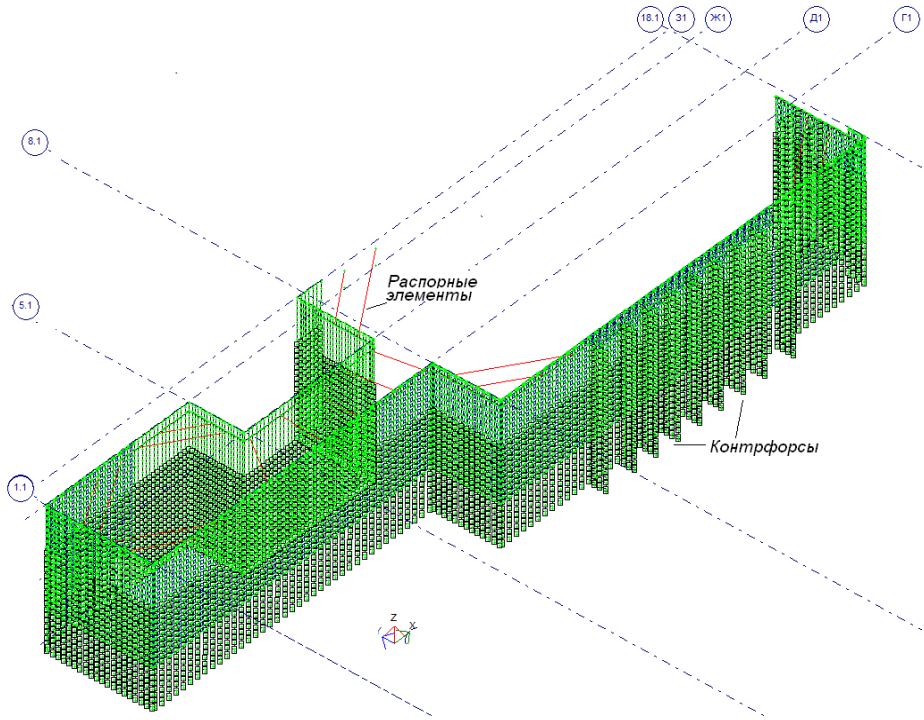


Рис. 3. Розрахункова модель огородження котловану з зовнішніми контрфорсами і розпірними конструкціями. Загальний вигляд

Таблиця 1. Величини горизонтальних переміщень (мм) вузлів розрахункової моделі для створу А

Найменування створу	Геодезичні позначки розрахункового рівня по глибині ґрунтового масиву				
	103.0	101.0	99.0	97.0	95.0
Горизонтальні переміщення (мм) вузлів розрахункової моделі для створу А	57.9	53.8	47.9	40	31.3

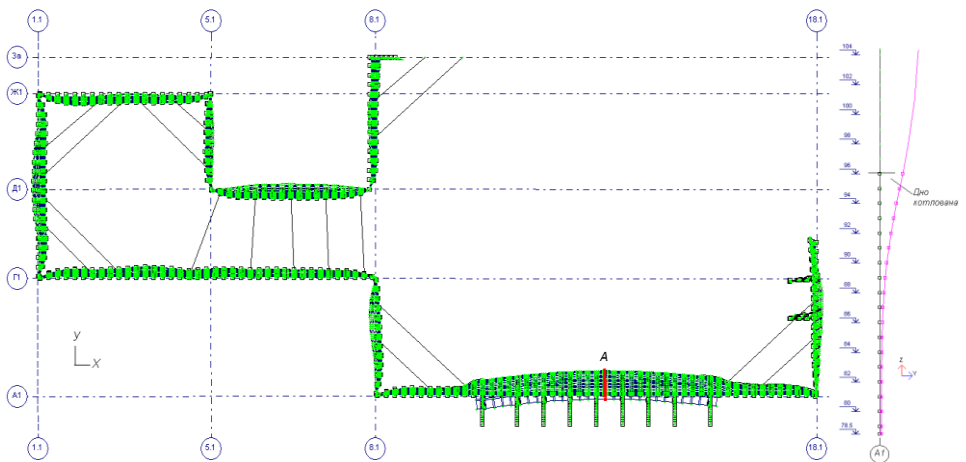


Рис. 4. Деформована схема огородження котловану

Величини додаткових осідань основи фундаментів будівлі Поштового будинку (Поштова площа, 2) внаслідок влаштування конструкцій огороження котловану і розробки його до абсолютної позначки 96,000 м складають приблизно 3,8 мм, що не перевищує допустимі 20 мм.

Унікальні артефакти

Ще в 2013 р. планувалося звести підземний торговельно-розважальний об'єкт з паркінгом на 100–150 машино-місць. Згідно з українським законодавством, перед початком будівництва потрібно провести розкопки. У 2015 р. під час планових робіт на Поштовій площі археологи виявили унікальні артефакти – добре збереглися зруб та частокіл, які, на думку вчених, належать до часів Київської Русі XI–XIII століття.

Знайдені артефакти свідчать про наявність під товщею ґрунту старовинних вулиць і будівель стародавнього Києва, що відносяться до часів Київської Русі XI–XIII століття (рис. 5).

Новина викликала суспільний резонанс. Кияни, історики і просто романтики вимагали зупинити будівельні роботи на Поштовій площі і продовжити розкопки. Мер Києва Віталій Кличко погодився тимчасово відмовитися від будівництва ТРЦ – археологи отримали зелене світло.

Команда фахівців знайшла культурні верстви XV–XVI, XVII–XVIII і навіть XI–XIII століть. Земляні пласти зберегли до наших днів прикраси, кераміку, пляшки, людські кістки і рештки тварин. При цьому "археологічне Ельдорадо" на Поштовій площі зберігає в собі ще багато цінних знахідок і таємниць.



Рис. 5. Ділянка прибережного міського кварталу середньовічного Києва (XI–XIX ст.) на Поштовій площі

Кабінет Міністрів України схвалив зміну категорії пам'ятки "Ділянка прибережного міського кварталу Середньовічного Києва" на Поштовій площі в Києві на категорію національного значення, а також присвоїв їй охоронний номер 260094. Відповідне рішення прийнято на засіданні Уряду 22 травня 2019 р. Архітектурна знахідка розташовується в історичному центрі міста Києва, під сучасною Поштовою площею, яка обмежується береговою лінією Дніпра, між проїзною частиною Володимирського узвозу та вулиці Боричів узвіз.

Межі об'єкта з південно-східного боку поки не виявлені. Глибина залягання починається з 2,5–8 метрів. Щоб зберегти археологічні знахідки XI століття від руйнування, археологи засипали їх землею. У 2019 р. був розроблений проєкт, згідно з яким на музей відводиться 110 кв. м. Але археологи вимагають під музей більшої площі – як мінімум половини поверху торгового центру. Вони стверджують, що цього дуже мало (110 кв. м). Це лише одна десята необхідної площі. Для цього об'єкта необхідно хоча б 1 тис. кв. м (всього площа розкопок становить близько 2 тис. кв. м). Така площа необхідна для створення музею абсолютно нового типу [15], приклад якого наведено на рис. 6.



Рис. 6. Sevilla Metropol Parasol Antiquarium I [15]

Його відкрили на місці розкопок у м. Севілья, будували сім років, вартість близько 100 млн євро. Це – Sevilla Metropol Parasol Antiquarium I [15].

Висновки

1. «Зелені стандарти» будівництва – один з найперспективніших напрямків розвитку не тільки будівельного комплексу, а й соціального середовища суспільства. «Зелене будівництво» набуло широкого поширення в останнє десятиліття в США (LEED), у Великобританії (BREEAM), в Німеччині (NDBG) і ще більш ніж в 40 країнах (Австралія, Канада, Індія та ін.). Вже понад 100 тис. будівель в світі сертифіковано по «зелених стандартах». «Зелені стандарти» в світовій практиці розвиваються як рейтингові системи добровільного застосування.

2. Національні рейтингові системи «зеленого будівництва» вибудовані під свої нормативні бази в галузі будівництва, енергозбереження, екології та враховують свої національні традиції, ресурсні, енергетичні та економічні пріоритети. Адаптація «зелених стандартів» провідних країн в інших державах базується на прийнятті за основу нормативно-методичної бази країн-лідерів зеленого руху (наприклад, LEED – в Канаді та ін.). Однак, до теперішнього часу спроб гармонізації національних моделей-стандартів «зеленого будівництва» країн-лідерів в даній галузі (США – LEED, Великобританії – BREEAM, Німеччини – DGNB) не відзначається.

3. Україна активно долучається до міжнародних конвенцій, які зменшують забруднення навколишнього середовища, і прагне поліпшити національні стандарти відповідно до міжнародних вимог. Вже є приклади сертифікованого за стандартом BREEAM «зеленого будівництва» житлових комплексів в Києві. Розвиток «зеленого будівництва» буде важливою галуззю в Україні, і всебічні дослідження щодо «зеленого будівництва» можуть сприяти подальшому її прогресу.

4. Основна мета концепції сталого розвитку в геотехнічному «зеленому будівництві» полягає в тому, щоб:

- надати йому економічну конкурентоспроможність та достатню корисність;
- в той же час знизити енерго- і матеріаломісткість;
- зменшити площу земельних ділянок, що відводиться під будівництво;
- мінімізувати ризики шкоди для здоров'я і життя людей в разі аварій і небажаних подій під час геотехнічного будівництва.

5. На основі математичного моделювання (розрахунків) проєктованого комплексу і ґрунтових масивів майданчика забудови обґрунтовані і розроблені проєктні рішення нових споруд з урахуванням заходів щодо забезпечення збереженості метрополітену, існуючих будівель і регулювання підземних водних потоків на стадіях будівництва і експлуатації. Розрахунками перевірена стійкість схилу при його підрізці котлованом новобудови. Таким чином, завдяки проведеному комплексу геотехнічних розрахунків проєктованого комплексу спільно з ґрунтовими масивами майданчика забудови розроблені проєктні рішення конструкцій і методи ведення будівництва нових споруд з урахуванням вимог «зеленого будівництва», щільної міської забудови, наявності тунелів метрополітену, існуючих будівель навколишньої забудови і підземних водних потоків на стадіях будівництва і експлуатації.

6. Для будівництва нових і захисту існуючих споруд використані передові методи; огороження котловану виконуються палями з використанням захисних екранів, палями малого діаметру і бентонітовими розчинами; стабілізація рівня підземних вод досягається тимчасовим вертикальним дренажем з механічним відведенням і постійним пластовим дренажем; для забезпечення стійкості і мінімальних деформацій огороження котловану при екскавації ґрунту використовуються розпірні конструкції.

7. Моніторинг деформацій тунелів метрополітену здійснюється з використанням інклінометрів, спостереження за рівнем підземних вод виконується за допомогою п'єзосвердловин, спостереження за оточуючими будівництво спорудами виконується інструментальними геодезичними методами. Моніторинг деформацій тунелів метрополітену, будівель навколишньої забудови і моніторинг рівня підземних вод в процесі будівництва показав величини, які знаходяться в межах, допустимих будівельними нормами України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Voloshkina, E., Efimenko, V., Zhukova, O., Chernyshev, D., Korduba, I., & Shovkivska, V. (2021). Visual Modeling of the Landslide Slopes Stress-Strain State for the Computer-Aided Design of Retaining Wall Structures. In *IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, 2021. 10.1109/CADSM52681.2021.9385211
2. Kaliukh, I., Voloshkina, O., Efimenko, V., Sipakov, R., Zhukova, O., & Kaliukh, T. (2022). Modern Technologies of Internet of Things in the Restrained Urban Development for Complicated Ground Conditions. In *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2022. (pp. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580086>
3. Kaliukh, I., & Berchun, Y. (2020). Four-Mode Model of Dynamics of Distributed Systems. *J. of Automation and Information Sciences*, 52 (2), 1–12.
4. Trofymchuk, O., Lebid, O., Berchun, V., Berchun, Y., & Kaliukh, I. (2022). Ukraine's Cultural Heritage Objects Within Landslide Hazardous Sites. In: Vayas, I., Mazzolani, F.M. (eds) Protection of Historical Constructions. PROHITECH 2021. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 209. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90788-4_73
5. Kaliukh, I., Trofymchuk, O. & Lebid, O. (2023). Peculiarities of Applying the Finite-Difference Method for Solving Nonlinear Problems of the Dynamics of Distributed Systems in a Flow. *Cybern Syst Anal* 59, 120–133. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00548-4>
6. Kaliukh, I., & Lebid, O. (2021). Constructing the Adaptive Algorithms for Solving Multi-Wave Problems. *Cybern Syst Anal*, 57, 938–949. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00419-w>
8. Capparelli, G., Picarelli, L., & Versace, P. (2018). TXT-tool 4.039-4.1 landslide investigations and risk mitigation: The Sarno, Italy, case (Book Chapter). In book: Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools, pp. 771–784. https://10.1007/978-3-319-57777-7_50
9. Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular.
10. Intrieri, E., Gigli, G., Gracch, T., Nocentini, M., Lombardi, L., Mugnai, F, Frodella, W., Bertolini, G., Carnevale, E., Favalli, M., Fornaciai, A., Alavedra, J. M., Mucchi, L., Nannipieri, L., Rodriguez-Lloveras, X., Pizziolo, M., Schina, R., Trippi, F., & Casagli, N. (2018). Application of an ultra-wide band sensor-free wireless network for ground monitoring. *Engineering Geology*, 238, 1–14.
11. Kaliukh, I., Dunin, V., & Berchun, Y. (2018). Decreasing Service Life of Buildings Under Regular Explosion Loads. *Cybern Syst Anal*, 54, 948–956. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0098-9>
12. Lacasse, S. (2013). Terzaghi Oration Protecting society from landslides – the role of the geotechnical engineer. In *Proc. 18th intern. conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2-6 September 2013, (pp. 15–34).
13. Lollino, G., Chiara, A. (2006). UNESCO World Heritage sites in Italy affected by geological problems, specifically landslide and flood hazard. *Landslides*, 3(4), 311–321.
14. Matveev, I.V., Milavskiy, V.G., Kasil, A.I., & Ishchenko, Yu.I. (2009). Buildings serviceability restoration and reconstruction in the Kyiv urban conditions. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (Vol. 1, 2, 3 and 4, pp. 1197–1200). <https://doi.org/10.3233/978-1-60750-031-5-1197>
15. Sevilla Metropol Parasol Antiquarium I, Homepage. (2019). Retrieved from <https://www.360cities.net/image/sevilla-metropol-parasol-antiquarium-i>
16. Slyusarenko, Y., Matveyev, I., Kasil, A., Ischenko, Y., Romanov, O., & Kosheleva, N. (2015). Solution of the geotechnical problems of the Poshtova Square reconstruction in Kiev. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. In *Proceedings of the XVI European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ECSMGE 2015*, (pp. 693–698).

17. Trofymchuk, O., Kaliukh, Y., Dunin, V., & Berchun, Y. (2018). On the Possibility of Multi-Wavelength Identification of Defects in Piles. *Cybernetics and Systems Analysis*, 54, 600–609. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0061-9>
18. Vanicek, I., Jirasko, D., & Vanicek, M. (2013). Geotechnical engineering and protection of environment and sustainable development. In *Proc. of the 18th IC SMGE Challenges and Innovations in Geotechnics*. Paris: Presses de l'école national des ponts et chaussees.
19. Vanicek, I. (2016). Application of Eurocode 7 to soil structures. *World of Geotechnics*, 4, 4–8 [in Russian].
20. Trofymchuk, O., Kaliukh, I., & Berchun, V. (2017). Landslide stabilization in building practice: methodology and case study from Autonomous Republic of Crimea. In *Proceedings of the WLF4*, (pp. 587–595). Springer-Verlag, Berlin, Germany.
21. Trofymchuk, O., & Kaliukh, I. (2013). Activation of landslides in the south of Ukraine under the action of natural seismic impacts (experimental and analytical studies). *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2(2), 68–76.
22. Ishchenko, Yu.I., Slyusarenko, Yu.S., Melashenko, Yu.B., Yakovenko, M.S., & Ben, I.V. (2020). Geotechnical monitoring in conditions of dense urban development. *Science and construction*, 3, 13–25 [in Ukrainian].
23. Kaliukh, I., Vasylenko, V., Berchun, Y., Vapnichna, V., Sedin, V., & Tytarenko, O. (2023). The Computational Intelligence application for assessing the technical state of a multi-storey building damaged by an explosion. In *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2023, (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312914>
24. Kaliukh, I., Dunin, V., Marienkov, M. et al. (2023). Peculiarities of Applying the Risk Theory and Numerical Modeling to Determine the Resource of Buildings in a Zone of Influence of Military Actions. *Cybern Syst Anal*, 59, 612–623. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00596>
25. Slyusarenko, Y. et al. (2023). Experimental Solving the Problem of the Shelter Object Reinforced Concrete Structures Thermal Expansion. In: Ilki, A., Çavunt, D., Çavunt, Y.S. (Eds.). *Building for the Future: Durable, Sustainable, Resilient*. fib Symposium 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 350. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32511-3_173
26. Trofymchuk, O.M., Dunin, V.A., & Kyrash, S.Y. (2022). Dynamic certification and assessment of the buildings life cycle under regular explosive impacts. *System research and information technologies*, 4, 100–118. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2022.4.09>

Стаття надійшла до редакції 22.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 07.06.2024

The article was received 22.03.2024 and was accepted after revision 07.06.2024

Святогоров Ілля Олегович

аспірант кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com