

УДК 624.137

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДПІРНОЇ СТІНИ З ВРАХУВАННЯМ ЇЇ ПРОСТОРОВОЇ ЖОРСТКОСТІ В УМОВАХ ЩІЛЬНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

В.С. Носенко,
канд. техн. наук, доцент

А.Р. Маламан,
аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

DOI: 10.32347/2410-2547.2026.116.414-424

Досліджено вплив врахування просторової жорсткості конструкцій підпірних стін на визначення напружено-деформованого стану елементів системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі». Проведено порівняння використання плоскої (2D) та просторової (3D) постановок для числового моделювання, а також порівняння отриманих результатів моделювання з результатами натурних спостережень, які включали: геодезичний моніторинг за переміщеннями наявної забудови та підпірних стін.

Ключові слова: напружено-деформований стан, числове моделювання, підпірні стіни, геодезичний моніторинг, просторова жорсткість, плоска скінченно-елементна модель, просторова скінченно-елементна модель.

Вступ. У контексті розвитку сучасного будівництва, особливо в умовах щільності міської забудови, застосування глибоких котлованів стає невід'ємною частиною зведення споруд з багаторівневими паркінгами, бомбосховищами, висотних будівель, тощо. Котловани часто досягають глибин понад 7-10 метрів, що вимагає розробку та проведення заходів з інженерного захисту для запобігання обвалів ґрунту та зменшення впливу на наявну забудову. Серед найбільш поширених конструктивних рішень є влаштування підпірних стін з буронабивних паль. Для підбору ефективних параметрів підпірних стін та врахування впливу влаштування котловану та огорожуючих конструкцій на наявну забудову необхідно проводити комплексний аналіз напружено-деформованого стану елементів системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі» з використанням числового моделювання.

Метою даної роботи є порівняння результатів геодезичного моніторингу деформацій наявної забудови та підпірних стін з даними числового моделювання їх переміщень в плоскій (2D) та просторовій (3D) постановках. Зокрема, дослідження впливу врахування просторової жорсткості конструкцій при числовому моделюванні на визначення напружено-деформованого стану елементів системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі». Дослідження взаємодії підпірних стін з ґрунтовим середовищем в умовах щільної міської забудови висвітлено в роботах [1, 2].

Дана публікація є продовженням циклу статей, присвячених оцінці напружено-деформованого стану (НДС) огорожуючих конструкцій котловану та оточуючої забудови, на прикладі конкретного будівельного об'єкту, що включає опис фактичних даних моніторингу за деформаціями підпірної стіни та наявною забудовою [3], та ідентифікацію параметрів ґрунтової основи [4].

Аналіз вихідних даних. Ділянка будівництва розташована в межах лісового плато у м. Київ, на захід від р. Дніпро. Абсолютні позначки денної поверхні майданчика коливаються в межах 194,10-195,10. Ґрунти в межах будівельного майданчика пілувато-глинисті, з просадними властивостями у верхній частині. Гідрогеологічні умови характеризуються наявністю двох водоносних горизонтів на глибині 7,8-9,0 м (абсолютні відмітки 185,67-186,50 м.), ґрунтові води безнапірні. Для розрахунків було виконано ідентифікацію параметрів ґрунтів [4]. Перелік інженерно-геологічних елементів та їх основні фізико-механічні характеристики наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Показники фізико-механічних характеристик ґрунтів

№ ПЕ	Найменування ґрунтів	Питома вага ґрунту γ , кН/м ³	Природна вологість w , од.	Питома зчеплення C , кПа	Кут внутрішнього тертя ϕ , град	Модуль загальної деформації E , МПа
1	Супісок твердий	15,70	0,14	10	18	10
2	Супісок твердий	18,20	0,14	14	24	12
3	Супісок пластичний	19,70	0,23	10	23	10
4	Суглинок м'якопластичний	18,80	0,25	19	17	12
5	Суглинок м'якопластичний	18,30	0,23	25	21	20
6	Суглинок напівтвердий	20,30	0,18	38	17	30
7	Глина напівтверда	20,10	0,23	60	17	19
8	Суглинок м'якопластичний	19,10	0,19	25	24	12
9	Глина напівтверда	19,80	0,23	73	14	18
10	Суглинок м'якопластичний	18,90	0,24	40	19	12
11	Глина напівтверда	20,00	0,25	80	16	19

Котлован глибиною 7,5 м має трапецевидну форму в плані. Відмітка дна котловану становить 186,95 м, відмітка верху котловану становить 194,50 м. Для забезпечення стійкості укосу котловану та зменшення впливу на оточуючу забудову по периметру котловану влаштовується підпірна стіна з буронабивних паль діам. 820 мм та 1020 мм кроком 1,6 м. Палі з'єднані між собою монолітним ростверком висотою 0,8 м. Довжина паль змінна і коливається в межах 16,3-19,5 м. Для збільшення просторової жорсткості та зменшення переміщення підпірних стін в зонах наявної забудови на глибині близько 3,0 м була передбачена та встановлена розпірна система з труб 820x10 мм. Для оцінки переміщень підпірної стіни огороження котловану та додаткових осідань наявних будинків було проведено геодезичний моніторинг, додатково для оцінки переміщень підпірної стіни було проведено моніторинг з використанням інклінометрів [3]. Фотофіксація та схема підпірної стіни та оточуючої забудови з результатами геодезичного моніторингу та розташуванням наявних будинків і розрахунковими перерізами наведено на рисунку 1.

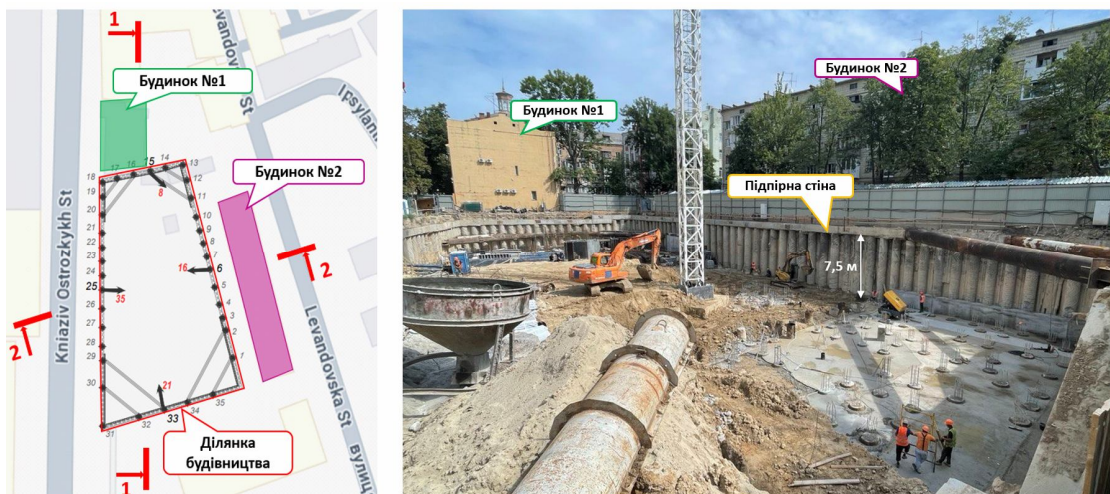


Рис. 1. Схема і фото ділянки будівництва та наявних будинків

Відомості про наявну забудову. Будівля №1. Будівля цегляна трапецієподібної в плані форми, має три поверхи і підвальний поверх (цокольний) з різними рівнями приміщень по

висоті. Висота поверхів становить близько 3,0 м. У конструктивному відношенні будівля зведена за «жорсткою» схемою: просторова жорсткість забезпечується спільною роботою несучих поздовжніх і поперечних стін та перекриттів. Фундаменти стрічкові – переважно з цегляної кладки, товщиною 270...980 мм, відповідно до товщини стін. Стіни із звичайної керамічної цегли на вапняно-піщаному розчині, завтовшки 270...980 мм. Загальний технічний стан будівлі 3 категорії – «непридатний для нормальної експлуатації».

Будівля №2. Будівля представляє собою п'ятиповерхову споруду прямокутної в плані форми. Розміри в умовних осях орієнтовно становлять 64,8×12 м. Висота поверхів становить 2,8 м. Під всією будівлею є цокольний поверх, який експлуатується. У конструктивному відношенні будівля виконана за «жорсткою» схемою з несучими поздовжніми стінами та поперечними стінами сходових кліток. Зовнішні стіни товщиною 510 мм виконані зі звичайної керамічної цегли. Внутрішня поздовжня стіна товщиною 380 мм також виконана із керамічної цегли. Просторова жорсткість будівлі забезпечується спільною роботою поздовжніх і поперечних стін та «дисків» перекриття. Загальний технічний стан будівлі можна віднести до 3 категорії – «непридатний для нормальної експлуатації».

Числове моделювання елементів системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі».

Числове моделювання виконано за допомогою сучасного програмного забезпечення у програмному комплексі Plaxis в плоскій (2D) та просторовій постановках (3D).

Для моделювання ґрунтового масиву в плоскій постановці в якості базового скінченного елемента використовується 15-вузловий скінченний елемент у вигляді трикутника. Він забезпечує проведення інтерполяції четвертого порядку для переміщень, а чисельне інтегрування включає дванадцять точок Гаусса (точок інтегрування) [6]. Для моделювання ґрунтового масиву в просторовій постановці використовуються 10-вузлові елементи у вигляді тетраедра. Цей тип елементів забезпечує інтерполяцію переміщень другого порядку, чисельне інтегрування включає чотири точки Гаусса (точки інтегрування) [7]. Принципові схеми скінченних елементів наведені на рисунку 2.

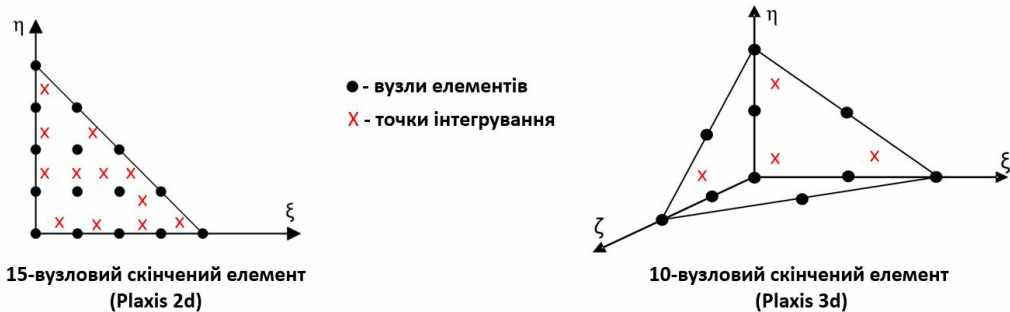


Рис. 2. Схематичний вигляд скінченних елементів ґрунтового середовища для плоскої та просторової СЕМ

Для числового моделювання використана модель пружно-пластичного деформування ґрунтів Hardening Soil Model (HSM). Дана модель є вдосконаленим варіантом опису поведінки ґрунтів у широкому діапазоні навантажень і базується на критерії міцності Кулона–Мора. Ключова перевага HSM полягає в тому, що вона враховує залежність жорсткості (модуля деформації) ґрунту від рівня діючих напружень [8]. Завдяки цьому модель дозволяє більш коректно описувати еволюцію напружено-деформованого стану (НДС) на всіх етапах: формування первинного НДС ґрунтової основи під час її седиментації, зміну напружень через навантаження від фундаментів раніше зведених споруд, враховувати ефекти розвантаження ґрунту при розробці глибоких котлованів та повторного навантаження при спорудженні нової будівлі. Такий підхід забезпечує достовірну оцінку деформацій та зусиль у всіх елементах конструкції та основи. Питання використання моделей зміцненого ґрунту в рамках метода скінченних елементів висвітлено в роботі [5].

Числове моделювання напружено-деформованого стану системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі» враховує основні етапи будівництва, а саме:

Етап 1 – гравітаційне навантаження від власної ваги ґрунтів;

- Етап 2 – врахування навантажень від фундаментів наявних будинків;
- Етап 3 – моделювання появи підпірних стін;
- Етап 4 – розробка котловану на глибину 4,0 м;
- Етап 5 – моделювання появи паль для нової будівлі та монтаж розпірних труб;
- Етап 6 – розробка ґрунту котловану до проектної відмітки -7,5 м.

За результатами розрахунку плоскої скінченно-елементної моделі (переріз 1-1) додаткові осідання наявного будинку №1 на етапі максимальної розробки котловану складають 12 мм, переміщення підпірної стіни складають 41 мм безпосередньо в зоні біля будинку №1 (т. №15) та 10 мм з протилежного боку котловану (т. №3). Скінченно-елементна модель системи «ґрунт – підпірні стіни – наявні будівлі» перерізу 1-1 наведена на рисунку 3. Результати розрахунку для перерізу 1-1 наведені на рисунку 4.

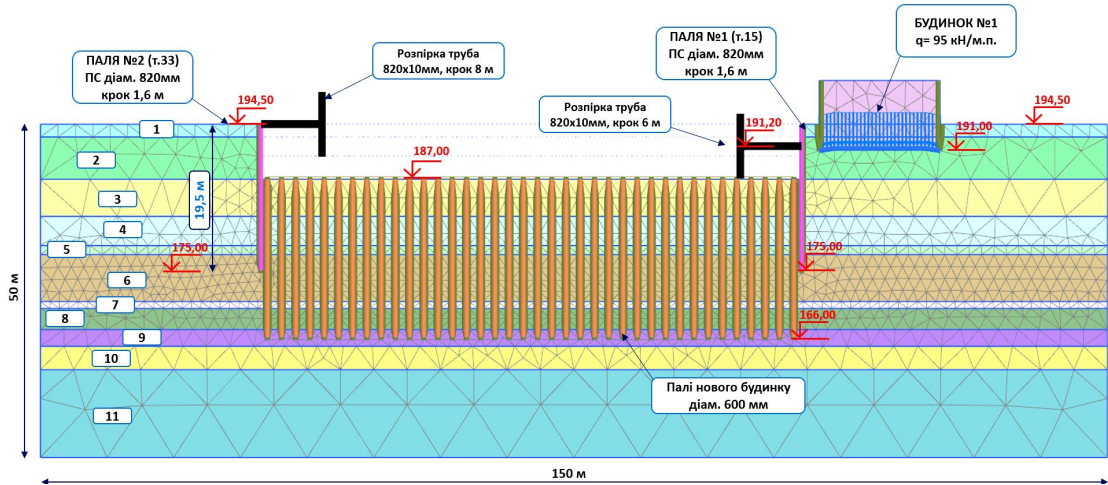


Рис. 3. Плоска скінченно-елементна модель системи «ґрунт – підпірні стіни – наявні будівлі» перерізу 1-1

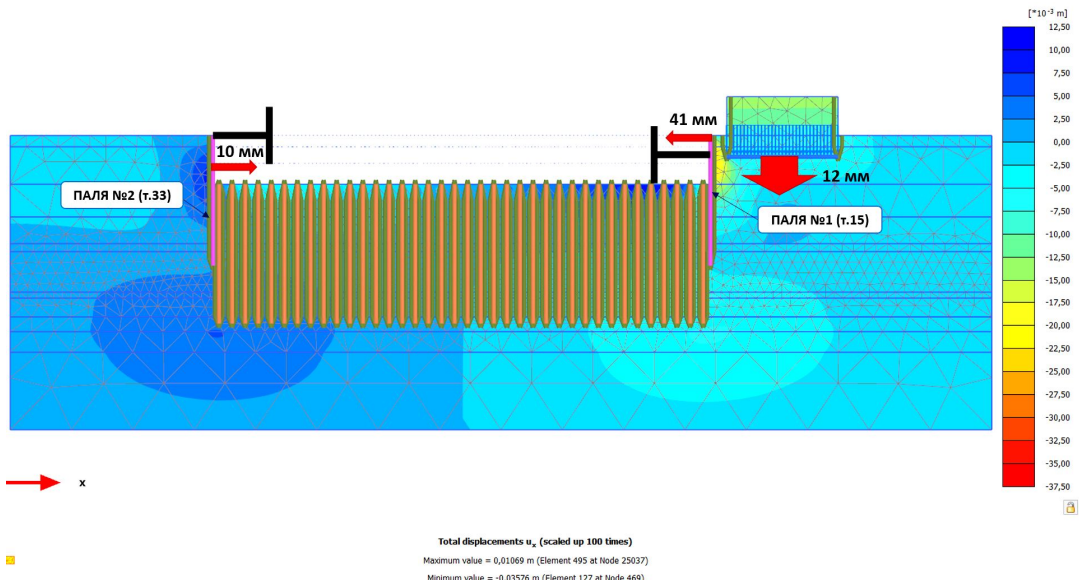


Рис. 4. Переміщення основних елементів у перерізу 1-1 на етапі максимальної розробки котловану

За результатами розрахунку плоскої скінченно-елементної моделі (переріз 2-2) додаткові осідання наявного будинку №2 на етапі максимальної розробки котловану складають 5 мм, переміщення підпірної стіни складають 53 мм безпосередньо в зоні біля будинку №2 (т. №6) та

51 мм з протилежного боку котловану (т. №25). Скінченно-елементна модель системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі» перерізу 2-2 наведена на рисунку 5. Результати розрахунку для перерізу 2-2 наведені на рисунку 6.

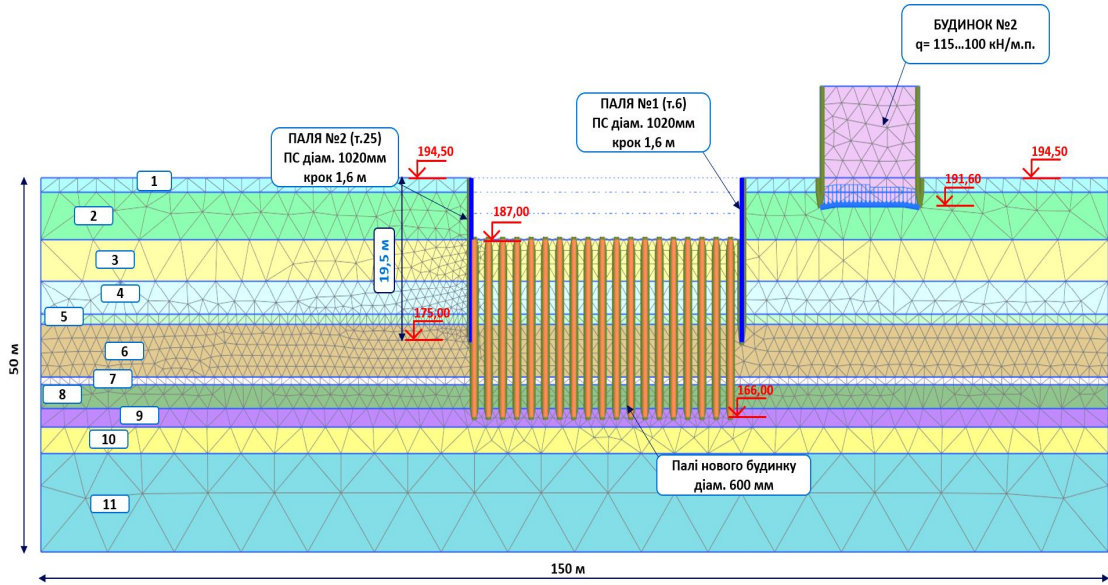


Рис. 5. Плошка скінченно-елементна модель системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі» перерізу 2-2

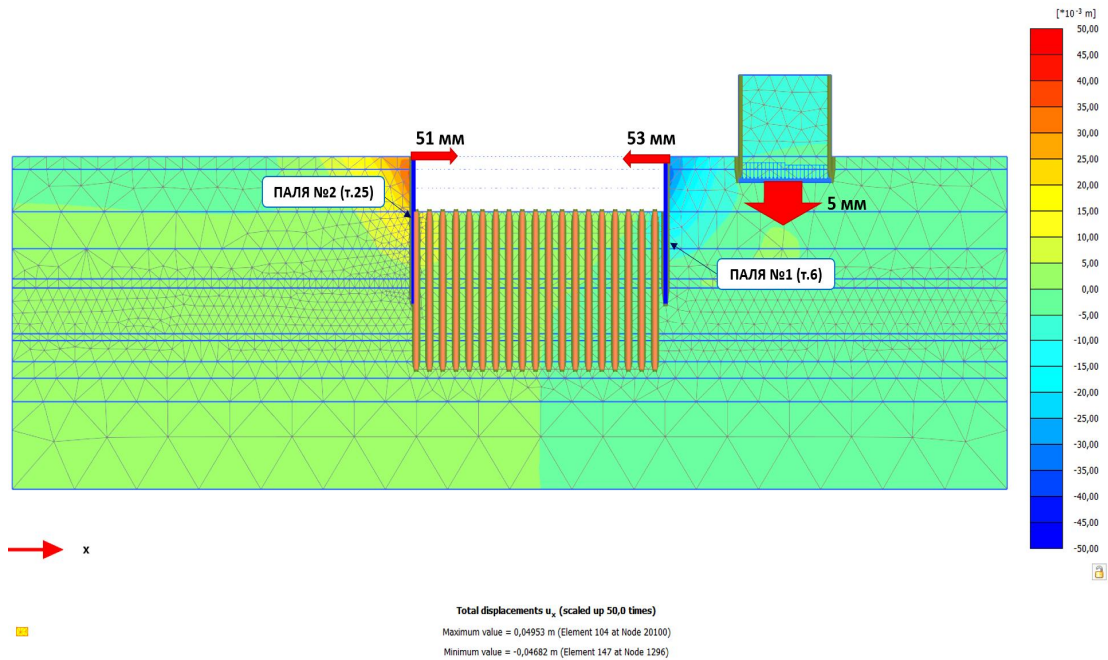


Рис. 6. Переміщення основних елементів у перерізу 2-2 на етапі максимальної розробки котловану

За результатами розрахунку просторової скінченно-елементної моделі додаткові осідання наявного будинку №1 на етапі максимальної розробки котловану складають 7 мм, переміщення підпірної стіни складають 16 мм безпосередньо в зоні біля будинку №1 (т. № 15) та 4 мм з протилежного боку котловану (т. №33). Додаткові осідання наявного будинку №2 на етапі максимальної розробки котловану складають 3 мм, переміщення підпірної стіни складають 34 мм безпосередньо в зоні біля будинку №2 (т. № 6) та 31 мм з протилежного боку котловану

(т. № 25). Просторова скінченно-елементна модель системи «ґрунт – підпірні стіни – наявні будівлі» наведена на рисунку 7. Результати розрахунку просторової СЕМ наведені на рисунку 8.

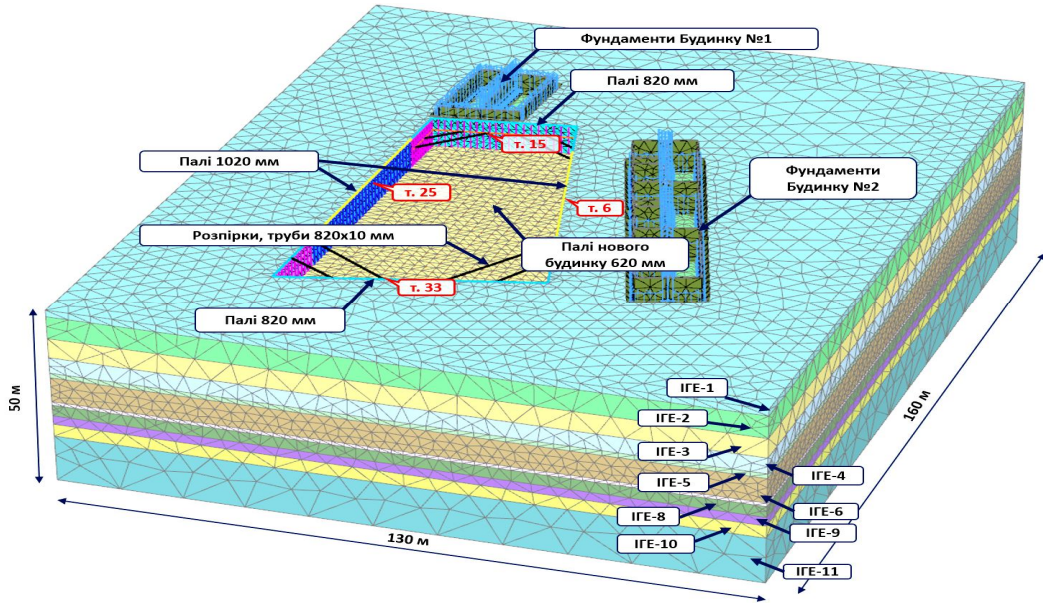


Рис. 7. Просторова скінченно-елементна модель системи «ґрунт – підпірні стіни – наявні будівлі»

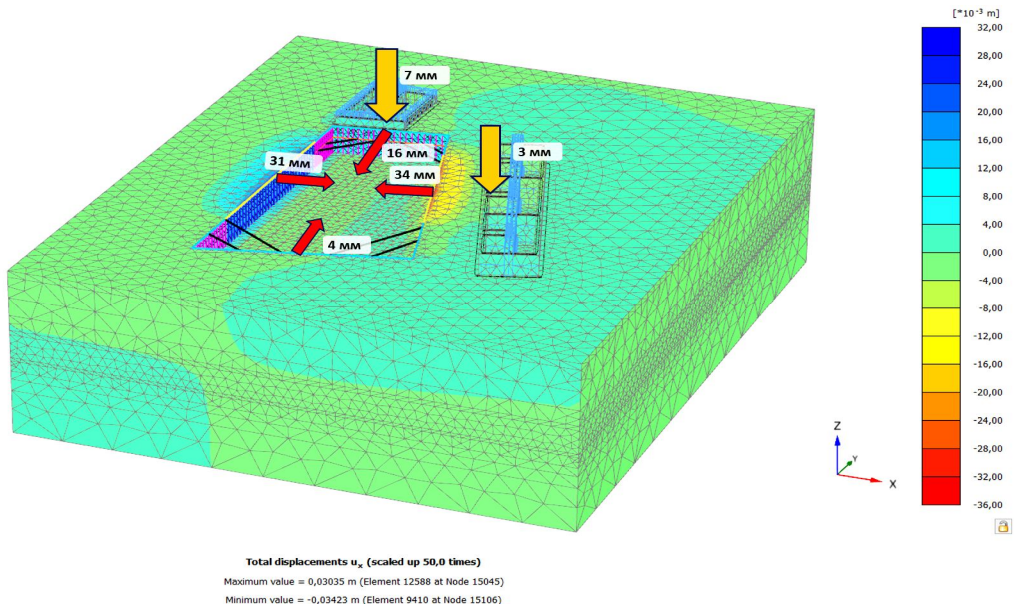


Рис. 8. Переміщення основних елементів для варіанту просторової скінченно-елементної моделі на етапі максимальної розробки котловану

Для оцінки збіжності результатів було проведено порівняння фактичних значень додаткових осідань наявних будинків і горизонтальних переміщень палей підпірної стіни отриманих за результатами геодезичного моніторингу (прийнято за абсолютні) з результатами числового моделювання НДС елементів системи «ґрунтова основа – наявні споруди - огороження котловану» в плоскій та просторовій постановках.

За результатами розрахунку в плоскій постановці додаткові осідання наявних будинків перевищують дані отримані за результатами моніторингу на 67-100% (в середньому на 84%). З використанням просторової скінченно-елементної моделі додаткові осідання наявних будинків значно наближені до даних моніторингу, проте перевищують їх на 0-17% (в середньому на 9%).

Переміщення паль підпірної стіни (визначених для точок №15, №6, №33, №25) за результатами розрахунку в плоскій постановці значно перевищують дані отримані за результатами моніторингу на 45-412% (в середньому на 185%). При використанні просторової скінченно-елементної моделі переміщення паль підпірної стіни біль наближені до даних геодезичного моніторингу, проте перевищують їх на 11-113% (в середньому на 76%).

Детальніше порівняння значень додаткових осідань наявних будинків та горизонтальних переміщень паль підпірних стін наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняння значень переміщень

Варіанти отриманих результатів	Додаткові осідання будинків, мм		Переміщення точок (паль підпірної стіни котловану), мм			
	Будинок №1	Будинок №2	№15	№6	№33	№25
Моніторинг	6	3	8	16	21	35
Просторова схема 3D	7 (+17%)	3 (0%)	16 (+100%)	34 (113%)	4 (-81%)	31 (-11%)
Плоска схема 2D	12 (+100%)	5 (+67%)	41 (+412%)	53 (+231%)	10 (-52%)	51 (+45%)

Для комплексної оцінки НДС елементів системи «грунтова основа - наявні споруди - огороження котловану» також було виконано аналіз значень згинальних моментів, що виникають в палях підпірної стіни (визначених для точок №15, №6, №33, №25). Згідно з аналізом результатів числового моделювання значення згинальних моментів, отриманих за числовим моделюванням з використанням плоскої СЕМ більші на 14-33% (в середньому на 25%) за значення отримані з використанням просторової СЕМ.

Детальніше порівняння значень згинальних моментів в палях огороження котловану наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Порівняння значень згинальних моментів

Варіанти отриманих результатів	Максимальні згинальні моменти в точках (паль підпірної стіни котловану), кНм/палью			
	№15	№6	№33	№25
Просторова схема 3D	240	531	345	549
Плоска схема 2D	320 (+33%)	659 (+24%)	448 (+30%)	624 (+14%)

Детальніше порівняння епюр горизонтальних переміщень та згинальних моментів, що виникають в палях в т. №15 (біля будинку 1) та №6 (біля будинку 2) наведено на рисунках 9-10.

Висновки. Показано, що використання тривимірної моделі системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі» дає можливість комплексно оцінити напружено-деформований стан її елементів, за рахунок врахування просторової жорсткості конструкції підпірної стіни та ґрунтового середовища.

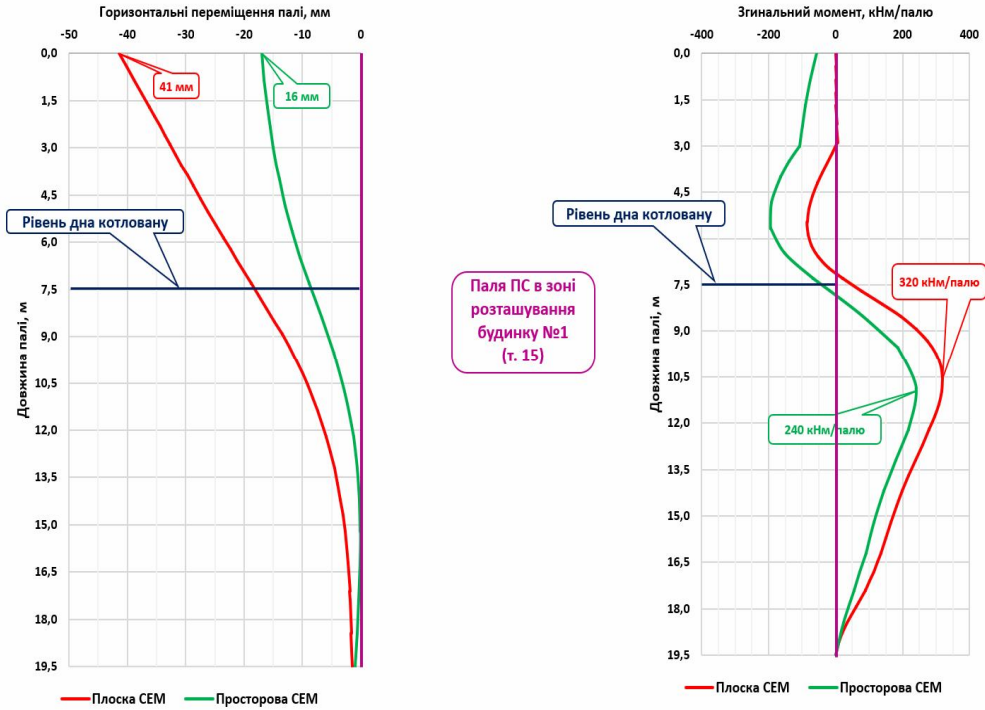


Рис. 9. Епюри горизонтальних переміщень та згинальних моментів для палі в точці №15

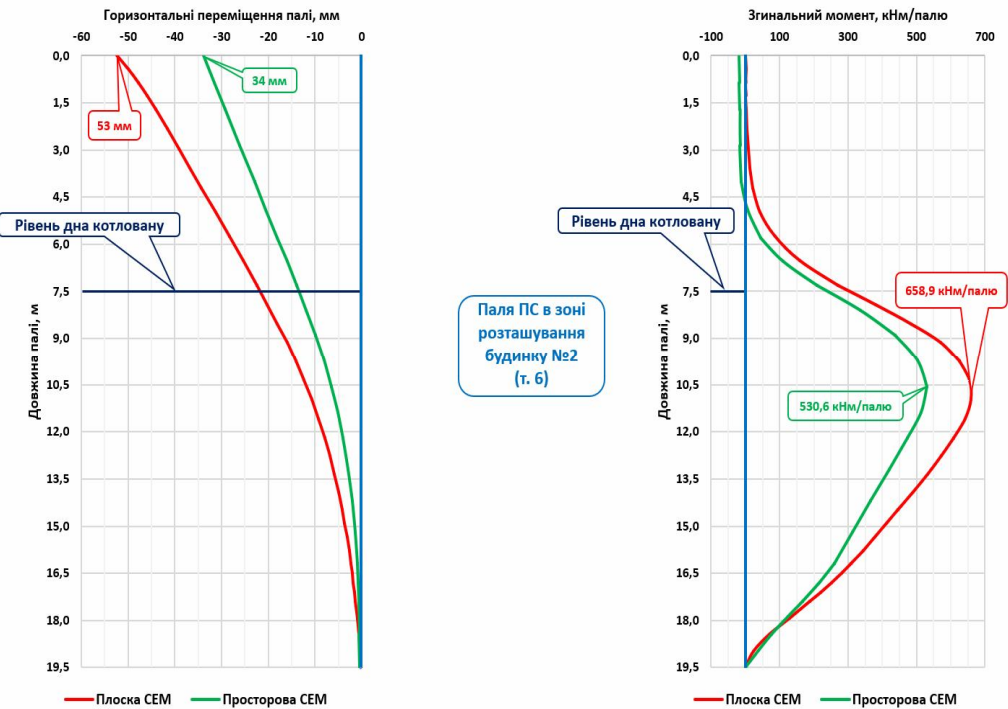


Рис. 10. Епюри горизонтальних переміщень та згинальних моментів для палі в точці №6

Розрахунки системи «грунт – підпірні стіни – наявні будівлі» з використанням плоскої розрахункової схеми характеризується систематичним завищенням розрахункових значень переміщень порівняно з результатами моніторингу. Значення додаткових осідань наявних

будівель вищі на 67–100% (середнє значення 84%), горизонтальні переміщення верху підпірних стін – на 45–412% (середнє 185%). Крім того, аналіз розподілу згинальних моментів у палях демонструє, що використання плоскої розрахункової схеми призводить до завищення їх значень на 14–33% (середнє 25%) відносно тривимірної моделі, що призводить в подальшому до перевитрат матеріалів і підвищення вартості конструкцій підпірних стін. Така різниця зумовлена ігноруванням просторових ефектів взаємодії конструкцій, зокрема роботи розпірної системи та варіабельності геометрії котловану. Проте тривалість розрахунку даної моделі значно менше ніж просторової моделі, отже для швидкого аналізу використання плоскої СЕМ є виправданим.

Просторова скінченно-елементна модель, що враховує повну просторову жорсткість елементів системи, забезпечує значно вищу кореляцію з даними натурних спостережень і таким чином надає можливість для комплексної оцінки напружено-деформованого стану: розбіжність в значеннях додаткових осідань наявних будинків становить до 17% (середня 9%), горизонтальних переміщеннях палей – 11–113% (середня 76%), з окремими випадками локальної недооцінки.

Отримані результати підтверджують обмежену застосовність плоских моделей для вирішення задач з вираженою просторовою неоднорідністю та взаємодією конструкцій в умовах щільної міської забудови.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Бондарева Л.О., Хоронжевський М.В.* Дослідження закономірностей деформування наявних споруд поблизу котлованів з використанням методу скінченних елементів // Опір матеріалів і теорія споруд: Науково-технічний збірник. 2025. №115. С. 192-203. DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.192-203.
2. *Носенко В.С., Маламан А.Р.* Використання плоских та просторових розрахункових моделей для числового моделювання підпірних стін в умовах щільної міської забудови // Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник. 2024. №48. С. 09-20. DOI: 10.32347/0475-1132.48.2024.09-20
3. *Носенко В.С., Маламан А.Р., Сорока П.В.* Моніторинг за деформаціями огороження глибокого котловану та оточуючих будинків в умовах щільної міської забудови // Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник. 2024. №49. С. 23-32. DOI: 10.32347/0475-1132.49.2024.23-32
4. *Носенко В.С., Маламан А.Р., Сорока П.В.* Оцінка переміщень підпірних стін та оточуючих будинків при влаштуванні глибокого котловану в умовах щільної міської забудови // Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник. 2025. №50. С. 192-199. DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.192-199
5. *Солодей І.І., Затилюк Г.А.* Дослідження достовірності та ефективності використання моделей зміцнюваного ґрунту в рамках методу скінченних елементів // Опір матеріалів і теорія споруд: Науково-технічний збірник. 2022. №109. С. 30-37. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.30-37
6. *Bentley Systems.* Plaxis Reference Manual 2D, Version 2024.2, Bentley Systems, 2024.
7. *Bentley Systems.* Plaxis Reference Manual 3D, Version 2024.2, Bentley Systems, 2024.
8. *Schanz T., Vermeer P.A., & Bonnier P.G.* The Hardening Soil Model: Formulation and Verification // International Symposium Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 Years of PLAXIS. 1999. P. 281–296.

REFERENCES

1. *Bondareva L.O., Khoronzhevskiy M.V.* Doslidzhennia zakonmirnostei deformuvannya isnuuyuchykh sporud poblyzu kotlovaniv z vykorystanniam metodu skinchenykh elementiv (Research of the deformation patterns of existing structures near excavations using the finite element method) // Opir materialiv i teoriia sporud: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2025. №115. P. 192-203 (in Ukrainian). DOI: 10.32347/2410-2547.2025.115.192-203.
2. *Nosenko V.S., Malaman A.R.* Vykorystannia ploskykh ta prostorovykh rozrakhunkovykh modelei dlia chyslo-voho modeliuвання pidpirnykh stin v umovakh shchilnoi miskoi zabudovy (The use of planar and three-dimensional calculation models for the numerical modeling of retaining walls in conditions of dense urban construction) // Osnovy ta fundamenti: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2024. №48. P. 09-20. DOI: 10.32347/0475-1132.48.2024.09-20
3. *Nosenko V.S., Malaman A.R., Soroka P.V.* Monitorynh za deformatsiamy ohorodzhennia hlybokoho kotlovanu ta otouchuyuchykh budynkiv v umovakh shchilnoi miskoi zabudovy (Monitoring of deformations of the deep pit wall and surrounding buildings in dense urban areas) // Osnovy ta fundamenti: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2024. №49. P. 23-32. DOI: 10.32347/0475-1132.49.2024.23-32
4. *Nosenko V.S., Malaman A.R., Soroka P.V.* Otsinka peremishchen pidpirnykh stin ta otouchuyuchykh budynkiv pry vlashtuvanni hlybokoho kotlovanu v umovakh shchilnoi miskoi zabudovy (Assessment of displacements of retaining walls and surrounding buildings when constructing a deep excavation in dense urban areas) // Osnovy ta fundamenti: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2025. №50. P. 192-199. DOI: 10.32347/0475-1132.50.2025.192-199
5. *Solodei I.I., Zatyliuk H.A.* Doslidzhennia dostovirnosti ta efektyvnosti vykorystannia modelei zmitsniuvanoho ґruntu v ramkakh metoda skinchenykh elementiv (Study of the reliability and efficiency of using reinforced soil models within the framework of the finite element method) // Opir materialiv i teoriia sporud: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. 2022. №109. P. 30-37. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.109.30-37

6. *Bentley Systems*. Plaxis Reference Manual 2D, Version 2024.2, Bentley Systems, 2024.
7. *Bentley Systems*. Plaxis Reference Manual 3D, Version 2024.2, Bentley Systems, 2024.
8. *Schanz T., Vermeer P.A., & Bonnier P.G.* The Hardening Soil Model: Formulation and Verification // International Symposium Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 Years of PLAXIS. 1999. P. 281–296.

Стаття надійшла 26.03.2026

Носенко В.С., Маламан А.Р.

ОЦІНКА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПІДПІРНОЇ СТІНИ З ВРАХУВАННЯМ ЇЇ ПРОСТОРОВОЇ ЖОРСТКОСТІ В УМОВАХ ЩІЛЬНОЇ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ

У контексті розвитку сучасного будівництва, особливо в умовах щільності міської забудови, застосування глибоких котлованів стає невід'ємною частиною зведення споруд з багаторівневими паркінгами, бомбосховищами, висотних будівель, тощо. Котловани часто досягають глибин понад 7-10 метрів, що вимагає розробку та проведення заходів з інженерного захисту для запобігання обвалів ґрунту та зменшення впливу на наявну забудову. Серед найбільш поширених конструктивних рішень є влаштування підпірних стін з буронабивних паль. Для підбору ефективних параметрів підпірних стін та врахування впливу влаштування котловану та огорожуючих конструкцій на наявну забудову необхідно проводити комплексний аналіз напружено-деформованого стану елементів системи «ґрунт – підпірні стіни – наявні будівлі» з використанням числового моделювання.

У дослідженні оцінено вплив методології числового моделювання на визначення напружено-деформованого стану (НДС) елементів системи «ґрунт – підпірні стіни – наявні будівлі» для влаштування глибокого котловану в умовах щільної міської забудови м. Києва. Порівняно результати просторової (3D) та плоскої (2D) скінченно-елементних моделей (СЕМ) з емпіричними даними геодезичного моніторингу (додаткових осідань наявних будівель та горизонтальних переміщень паль підпірної стіни).

Моделювання реалізовано в програмному комплексі Plaxis з використанням пружно-пластичної моделі Hardening Soil Model (HSM), з критерієм міцності Кулона-Мора, що враховує нелінійну залежність деформативних характеристик ґрунту від рівня напружень. Моделювання враховує послідовні етапи: формування первинного НДС ґрунтової основи під час її седиментації, зміну напружень через навантаження від фундаментів раніше зведених споруд, ефекти розвантаження ґрунту при розробці глибоких котлованів.

Отримані результати моделювання дозволяють зробити висновок, що використання просторової СЕМ дає можливість більш комплексно оцінити НДС елементів системи «ґрунт – підпірні стіни – наявні будівлі» з врахуванням фактору просторової жорсткості.

Ключові слова: напружено-деформований стан, числове моделювання, підпірні стіни, геодезичний моніторинг, просторова жорсткість, плоска скінченно-елементна модель, просторова скінченно-елементна модель.

Nosenko V.S., Malaman A.R.

ASSESSMENT OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A RETAINING WALL, TAKING INTO ACCOUNT ITS SPATIAL RIGIDITY IN DENSE URBAN DEVELOPMENT CONDITIONS

In the context of modern construction development, especially in densely populated urban areas, the use of deep excavations has become an integral part of the construction of multi-level car parks, bomb shelters, high-rise buildings, etc. Excavations often reach depths of more than 7-10 metres, which requires the development and implementation of engineering protection measures to prevent soil collapse and reduce the impact on existing buildings. One of the most common structural solutions is the construction of retaining walls from bored piles. In order to select effective parameters for retaining walls and take into account the impact of excavation and enclosing structures on existing buildings, it is necessary to conduct a comprehensive analysis of the stress-strain state of the elements of the 'soil - retaining walls - existing buildings' system using numerical modelling.

The study evaluates the impact of numerical modelling methodology on determining the stress-strain state (SSS) of the elements of the 'soil – retaining walls – existing buildings' system for the construction of a deep excavation in the dense urban development of Kyiv. The results of flat (2D) and spatial (3D) finite element models (FEM) are compared with empirical data from geodetic monitoring (additional settlements of existing buildings and horizontal displacements of retaining wall piles).

The modelling was implemented in the Plaxis software package using the Hardening Soil Model (HSM) elastic-plastic model with the Coulomb-Mohr strength criterion, which takes into account the nonlinear dependence of soil deformation characteristics on stress levels. The modelling takes into account the following sequential stages: formation of the initial stress-strain state of the soil base during its sedimentation, change in stresses due to loading from the foundations of previously constructed structures, and the effects of soil unloading during the development of deep excavations.

The results of the modelling allow us to conclude that the use of spatial FEM makes it possible to more comprehensively assess the stress-strain state of the elements of the 'soil – retaining walls – existing buildings' system, taking into account the factor of spatial rigidity.

Keywords: stress-strain state, numerical modelling, retaining walls, geodetic monitoring, spatial rigidity, 2D finite element model, 3D finite element model.

УДК 624.137

Носенко В.С., Маламан А.Р. Оцінка напружено-деформованого стану підпірної стіни з врахуванням її просторової жорсткості в умовах щільної міської забудови // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА – 2026. – Вип. 116. – С. 414-424.

Виконано числове моделювання напружено-деформованого стану елементів системи «грунт – підпірні стіни - наявні будівлі». Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів з даними геодезичного моніторингу.

Табл. 3. Іл. 10. Бібліогр. 8 назв.

UDC 624.137

Nosenko V.S., Malaman A.R. Assessment of the stress-strain state of a retaining wall taking into account its spatial rigidity in dense urban development conditions // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-&Technical collected articles. – Kyiv.: KNUBA, 2026. – Issue 116. – P. 414-424.

Numerical modelling of the stress-strain state of the elements of the 'soil – retaining walls – existing buildings' system was performed. A comparative analysis of the results obtained with geodetic monitoring data was carried out.

Tabl. 3. Figs. 10. Refs. 8.

Автор: кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геотехніки НОСЕНКО Віктор Сергійович

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

E-mail: nosenko.vs@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-1846>

Автор: аспірант кафедри геотехніки МАЛАМАН Артур Русланович

Адреса: 03680 Україна, м. Київ, проспект Повітряних Сил, 31, Київський національний університет будівництва і архітектури

E-mail: malaman_ar@knuba.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0715-3291>