

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 624.131.54

DOI 10.31649/2311-1429-2022-2-132-141

Н. В. Блашук<sup>1</sup>  
І. В. Маєвська<sup>1</sup>  
В. Є. Губашова<sup>2</sup>

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ВЛАШТУВАННЯ ГЛИБОКОГО КОТЛОВАНУ СКЛАДНОЇ ФОРМИ НА ПОРЯД РОЗТАШОВАНІ БУДИНКИ

<sup>1</sup> Вінницький національний технічний університет<sup>2</sup> ТОВ "Основа-Солсиф", Київ, Україна

Найбільш поширеним способом улаштування підземного простору в стиснених умовах існуючої забудови є попереднє виконання огороження котловану з ряду паль або способом «стіна в ґрунті» з подальшим поетапним відкопуванням ґрунту в межах огороження. При цьому потрібна розробка надійної конструкції огороження, яке гарантує як відсутність втрати стійкості саме огороженням і його помірні деформації, так і відсутність надмірних додаткових деформацій і перевантаження поряд розташованих споруд, що чинять тиск на поверхню засипки підпірної стінки, якою є огороження котловану. В умовах щільної міської забудови і складної форми конструкції огороження в плані і по висоті використання розроблених методів розрахунку підпірних стін в плоскій постановці є некоректним, оскільки не враховує ефект просторової роботи конструктивних елементів огороження. Запропоновані методи просторового моделювання напружено-деформованого стану огороження глибокого котловану з подальшою виїмкою ґрунту для влаштування підземної частини майбутньої будівлі. Розглянутий котлован нелінійної конфігурації на ділянці з складним рельєфом та неоднорідним напластуванням ґрунтів. Досліджений вплив відкопування котловану на НДС поряд розташованих недобудованих існуючих будинків, врахована етапність проведення робіт.

Моделювання виконувалося для обґрунтування ефективних конструктивних рішень щодо влаштування пальового огороження котловану і забезпечення стійкості укосу відкритої виїмки котловану.

Створення тривимірної розрахункової моделі в PLAXIS 3D CONNECT Edition V21.01 дозволило дослідити вплив виконання конструкції огороження та подальшої виїмки на існуючі будівлі, що розташовані в безпосередній близькості до котловану та отримати деформації і зусилля в самій конструкції огороження.

**Ключові слова:** система основа-споруда, підпірна стіна, паля, огороження котловану, напружено-деформований стан, ефект просторової роботи.

### Вступ

Останнім часом спостерігається тенденція до використання підземного простору в межах забудованих територій з метою будівництва підземних паркінгів, інженерних споруд та торгово-розважальних комплексів. Стиснені умови міської забудови ускладнюють улаштування глибоких котлованів як з технологічної, так і технічної точки зору і потребують обов'язкового виявлення впливу таких робіт на існуючі будівлі і споруди, а в разі потреби і розробки заходів з забезпечення їх подальшої надійної експлуатації.

В роботі розглянутий спосіб влаштування огороження стін котловану під підземний паркінг пальовою підпірною стіною. Факторами, що ускладнюють розрахунки, є: нелінійна конфігурація підпірної стінки, використання комбінованого огороження котловану – пальового огороження та влаштування відкосів, складна форма рельєфу місцевості, неоднорідність нашарувань ґрунтової основи, часткове використання конструкцій підпірної стінки для спирання конструкцій паркінгу, потреба в реконструкції існуючих будинків.

В літературі напрацьовані алгоритми розрахунку підпірних стін різного виду в плоскій постановці [1 – 4], але для розрахунків в складних геотехнічних умовах вони не можуть забезпечити коректність результатів. Єдиною альтернативою є використання просторового моделювання, що дозволяє враховувати низку факторів, що сприяють виникненню просторового ефекту роботи конструкцій та основи.

**Метою роботи** є відпрацювання на прикладі реального будівництва просторового моделювання роботи конструкцій огороження котловану з подальшим виїманням ґрунту для влаштування підземної частини майбутньої будівлі та дослідження впливу на існуючу забудову з врахуванням етапності передавання навантажень.

## Викладення основного матеріалу досліджень

Ділянка будівельного майданчику знаходиться у м. Львові (рис. 1).

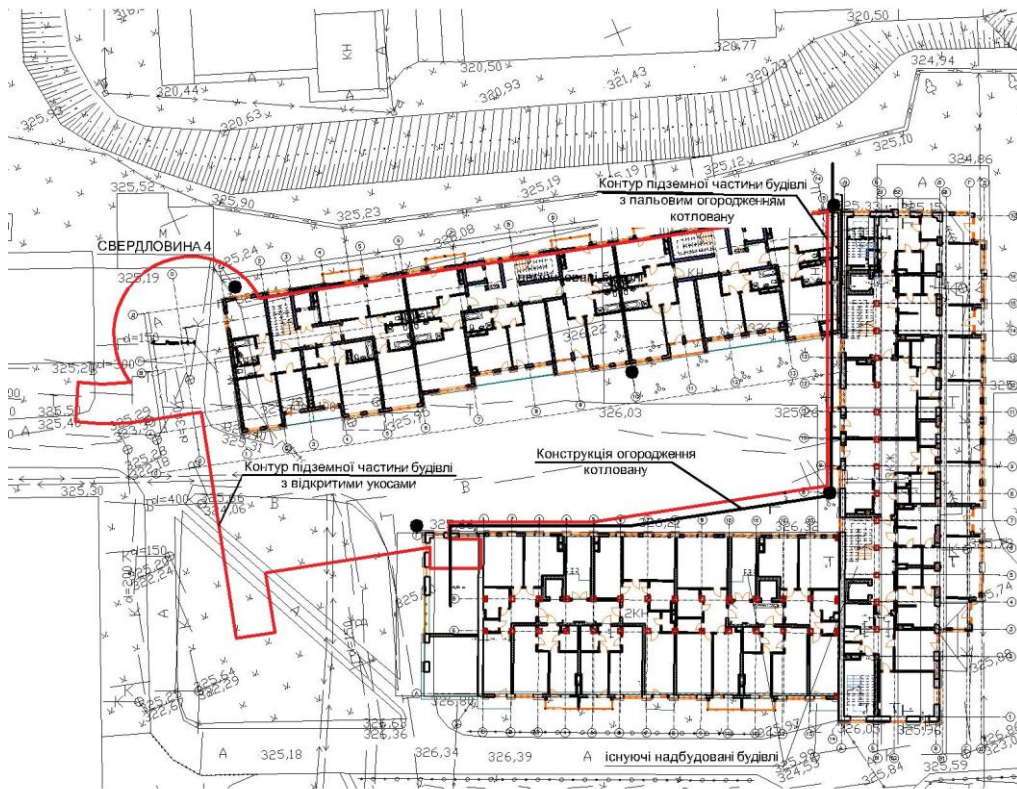


Рисунок 1 – План території забудови

На території забудови, наявними на момент початку будівельних робіт, є дві будівлі, які реконструйовані (надбудовані на 2...3 поверхи). Перша будівля – це Секція 1 і Секція 2, друга будівля – це Секція 3 і Секція 4 (див. рис. 2). В процесі реконструкції планується побудувати, вздовж межі з сусіднім землеволодінням, ще один житловий будинок з Секціями 5...7. Під площею Секцій 5...7 та дворовою частиною території, між новою та існуючою забудовами, планується будівництво дворівневого підземного паркінгу з позначкою дна котловану – 119,58 м.

Оскільки, котлован підземного паркінгу підходить безпосередньо близько до фундаментів існуючих будівель, то вздовж осі А-А (Секція 3 і Секція 4 існуючої будівлі) та вздовж осі Г (Секція 1 і Секція 2 існуючої будівлі) передбачається влаштувати огороження котловану пальною підпірною стіною з достатнім заземленням палів в ґрунтовій основі нижче дна котловану.

На решті довжини контуру котловану є можливість влаштування виїмки ґрунту з відкритими укосами із закладанням, що забезпечує їхню нормативну стійкість.

Нижче наведені фотографії, що дають уявлення про стан території забудови з наявними будівлями в стані реконструкції та умови виконання будівельних робіт (рис. 3, 4).

**Геологічна будова ділянки** на глибину буріння до 20,0 м представлена сучасними, верхньочетвертинними та неогеновими відкладами. Сучасні відклади складені насипним ґрунтом, верхньочетвертинні – супісками, неогенові – глиною, пісками та скельними ґрунтами – гіпсом і пісковиком.

На основі польових та лабораторних досліджень на території будівельного майданчику виділені наступні інженерно-геологічні елементи (**ІГЕ**):

**ІГЕ 1.** Насипний ґрунт (*tIV*), представлений відвалами глинистих ґрунтів з домішкою будівельного сміття, неоднорідний, сірий, темно-сірий.

**ІГЕ 2.** Супісок пластичний (*vdIIIbg*), тиксотропний, з прошарками супіску текучого та суглинку тугопластичного і лінзами піску пилуватого водонасиченого, жовто-сірий. Ґрунтам **ІГЕ 2** при надмірному зволоженню та динамічному навантаженні характерний прояв тиксотропних властивостей.

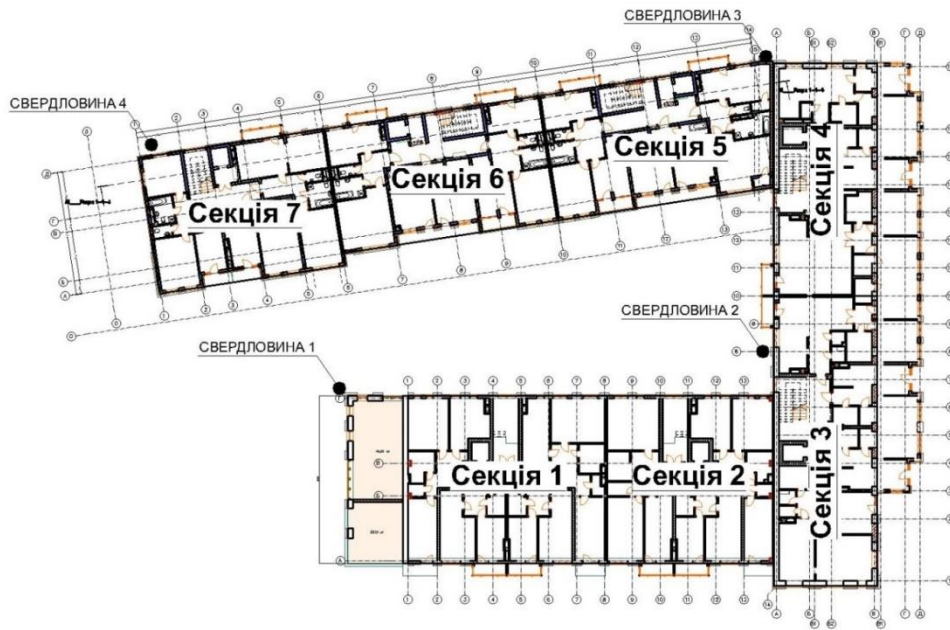


Рисунок 2 – План секцій житлових будівель



Рисунок 3 – Вид на секції 3, 4



Рисунок 4 – Вид на кут між секціями 1, 2 і секціями 3, 4

**ПЕ 3.** Глина тугопластична ( $Nlt2$ ) – з гніздами піску та включенням щебню пісковика і вапняку, зеленуватло-жовта, зеленувато-сіра.

**ПЕ 4.** Скельний ґрунт ( $Nlt2$ ), гіпс кристалічний, маломіцний, тріщинуватий, сірий коричнево-сірий.

**ПЕ 5.** Пісок пілуватий ( $Nlt2$ ), середньої щільності, насичений водою, з прошарками пісковиків тріщинуватих, зеленувато-сірий, сірий.

**ПЕ 6.** Скельний ґрунт ( $Nlt2$ ), пісковик маломіцний, дрібнозернистий, тріщинуватий, сірий.

Карстуючі породи – гіпси зустрінуті на глибинах від 6,8...14,0 м до 13,5...14,5 м. Їх потужність становить від 0,5 м до 7,2 м. Карстових форм рельєфу (лійок, проваль) при обстеженні ділянки на поверхні не виявлено.

Для моделювання поведінки (визначення напруженого стану) основи та вертикального пальового огороження при поетапній виїмці ґрунту в котловані для влаштування підземної частини майбутньої будівлі (підземного паркінгу) та дослідження впливу виїмки котловану на існуючі будівлі та їх основу, що знаходяться в безпосередній близькості, був використаний ліцензійний програмний комплекс **PLAXIS 3D CONNECT Edition V21.01**, люб'язно наданий для виконання даної роботи ТОВ "Softprom" (м. Київ) – провідним дистриб'ютором світових BIM - рішень, яка представлена в 33 країнах Центральної, Східної Європи та країнах СНД.

PLAXIS 3D – це спеціалізована тривимірна програма скінчених елементів, яка використовується для рішення різноманітних геотехнічних задач підземного будівництва, а саме, у нашому випадку, – для виконання розрахунків поведінки ґрунтової основи існуючих будівель (найперше, поведінки їхніх фундаментів) та аналізу деформацій, стійкості і міцності пальового огороження котловану розташованого у безпосередній близькості від фундаментів існуючих будівель.

Для дослідження ґрунтової основи була обрана Модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb Model).

Модель Мора-Кулона (Mohr-Coulomb Model) описує пружно-ідеальну пластичну поведінку і лінійний критерій міцності матеріалів, міцність яких на стиск істотно перевищує міцність на розтяг. Цю модель можна називати універсальною, тому що вона лежить в основі багатьох модифікацій різних моделей, що описують поведінку і міцність цілого ряду матеріалів: ґрунтових і скельних порід, бетонів, композитних матеріалів та ін.

Модель відображає лінійний характер руйнування і складається з двох компонент міцності:  $c$  – питоме зчеплення і  $\varphi$  – кут внутрішнього тертя і описує залежність дотичних напружень (міцності на зрушення) від діючих нормальних напружень. У загальному вигляді дана модель представлена у вигляді нахилу лінії руйнування до осі напружень (абсциси)  $\sigma$  під кутом  $\varphi$

Модель Мора-Кулона включає в себе п'ять вхідних параметрів: модуль Юнга ( $E$ ), коефіцієнт Пуассона ( $\nu$ ), зчеплення ( $c$ ), кут тертя ( $\varphi$ ) і кут ділатансії ( $\psi$ ).

Основні елементи розрахункової схеми: конструкція будівлі представлена в моделі елементами "plates" для внутрішніх і зовнішніх стін та перекриттів, фундаменти задані об'ємними елементами з використанням моделі *Linear-plastic model* та комбінуванням об'ємних елементів та елементів "beam" для колон. Існуючі будівлі для візуалізації задані тільки до відмітки 330,00.

Задані елементи конструкції огороження відповідають огороженню з буронабивних паль діаметром 620 мм з кроком 1 м, довжина – 12 м.

Навантаження задані за допомогою наступних інструментів: "point load", "line load", "surface load".

В процесі виконання моделювання були розглянуті наступні будівельні випадки:

Дослідження осідання фундаментів існуючих будівель (Секції 1...4) до їх реконструкції і надбудови з прикладанням 60% навантаження від проектного, тобто отримання значень, що дозволять дослідити приріст деформацій ґрунтової основи існуючих будівель після виконання реконструкції та надбудови додаткових поверхів.

Прикладання повних проектних значень навантаження на фундаменти існуючих будівель (Секції 1...4), що виникають після проведення повної реконструкції та надбудови додаткових поверхів.

Виконання конструкції пальового огороження котловану вздовж існуючих будівель та виїмки ґрунту до проектною позначки низу котловану з урахуванням деформацій від існуючих будівель, що відбулися після їхньої реконструкції і надбудови перед виконанням виїмки котловану.

Виконання пальового огороження котловану вздовж існуючих будівель та виїмки ґрунту до проектною позначки низу котловану з урахуванням, що осідання існуючих будівель після реконструкції та надбудови Секцій 1...4 – стабілізувалися.

При створенні *Розрахункових моделей 1 та 2* були розглянуті будівельні випадки, що відповідають прикладанню 60 % навантажень на фундаменти існуючих будівель, що дозволить

дослідити поведінку ґрунтової основи до виконання реконструкції секцій 1...4 та прикладання повних значень навантажень з наступним дослідженням осідань фундаментів після виконання надбудови поверхів (табл. 1). Для зручного описання результатів моделювання – конструкція огороження була поділена на точки повороту (рис. 5).

Таблиця 1

**Результати моделювання та дослідження зміни деформацій існуючих будівель до та після реконструкції та надбудови додаткових поверхів**

№	Номер секції	Загальні деформації фундаментів			
		До реконструкції (Розрахункова модель 1)		Після реконструкції (Розрахункова модель 2)	
		$\Delta_{max}$ мм	$\Delta_{min}$ мм	$\Delta_{max}$ мм	$\Delta_{min}$ мм
1	Секції 1 та 2	30	22	57	44
2	Секція 3	26	20	52	44
3	Секції 4	22	10	44	24

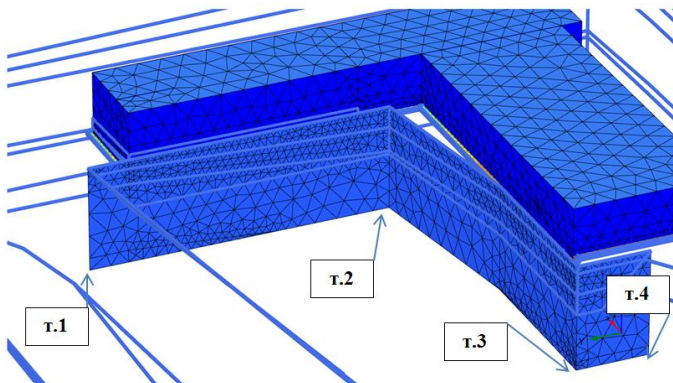


Рисунок 5 – Нумерація точок повороту конструкції огороження котловану

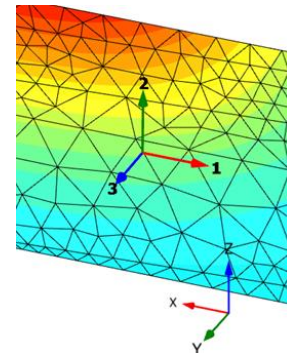


Рисунок 6 – Розташування загальної системи координат розрахункової моделі та системи координат для елементів з числовими підписами осей

Таблиця 2

**Результати моделювання виконання огороження котловану з подальшою виїмкою ґрунту для влаштування підземної частини будівлі**

№	Розрахунок	Ділянка огороження котловану								
		1-2			2-3			3-4		
		$\Delta$ , мм	$M_{11}$ , тм	$M_{22}$ , тм	$\Delta$ , мм	$M_{11}$ , тм	$M_{22}$ , тм	$\Delta$ , мм	$M_{11}$ , тм	$M_{22}$ , тм
1	Розрахункова модель 3	47,8	52,9	9,3	63,6	51,9	10,8	36	25,1	4,6
2	Розрахункова модель 4	43,7	52,9	9,3	55,2	43,7	10,8	31,4	25,1	4,6

Паралельно з дослідженням деформацій конструкції огороження котловану (табл. 2) були отримані загальні деформації фундаментів прилеглих будівель – деформації з урахуванням реконструкції з надбудовою додаткових поверхів та впливу виконання огороження з подальшою виїмкою, і розрахунок приросту деформацій фундаментів, тобто тільки ті деформації, що виникли під час відкопування котловану. Результати занесені в таблицю 3. На рисунках 7-15 представлені деякі результати моделювання. На рисунку 16 показано виконане на будівельному майданчику огороження котловану.

Таблиця 3

**Результати моделювання та дослідження зміни деформацій існуючих будівель після виконання конструкції огороження котловану з подальшою виїмкою ґрунту до проектної позначки**

№	Номер секції	Загальні деформації фундаментів з врахуванням реконструкції та виїмки		Приріст загальних деформацій фундаментів після виконання виїмки	
		$\Delta_{max}$ мм	$\Delta_{min}$ мм	$\Delta_{max}$ мм	$\Delta_{min}$ мм
		1	Секції 1 та 2	84	60
2	Секція 3	65	55	13	11
3	Секції 4	65	50	21	26

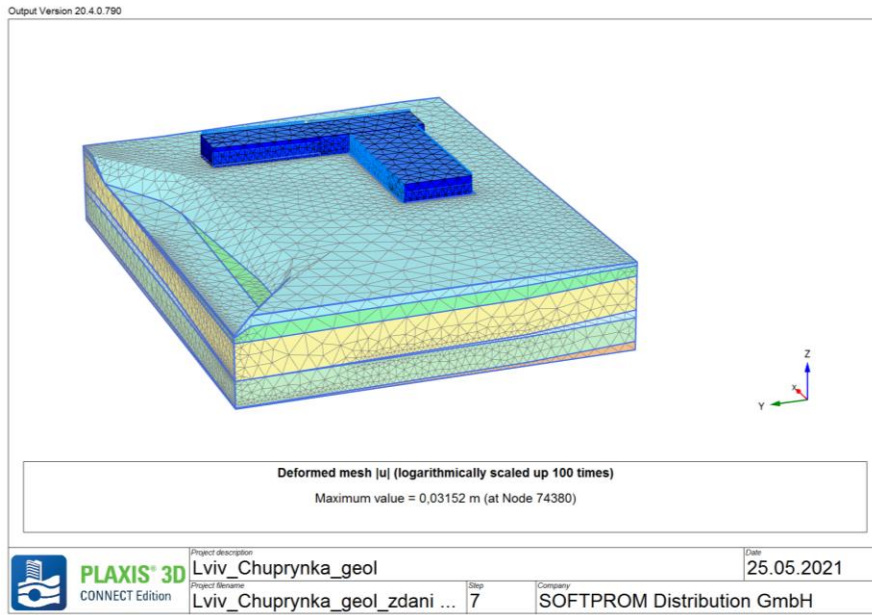


Рисунок 7 – Сітка скінчених елементів (для розрахункових випадків 1 та 2)

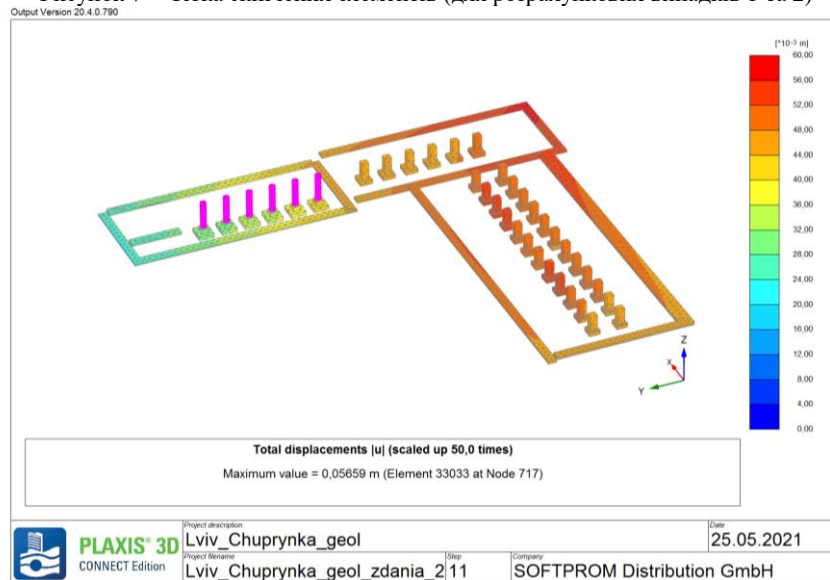


Рисунок 8 – Загальні переміщення елементів фундаментів існуючих будівель, які задані об'ємними елементами

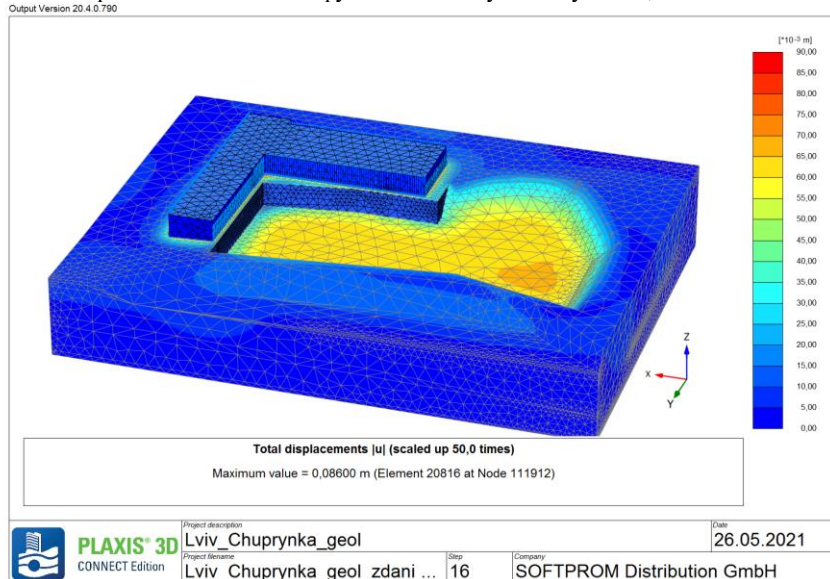


Рисунок 9 – Загальні переміщення розрахункової моделі (для розрахункових випадків 3 та 4)

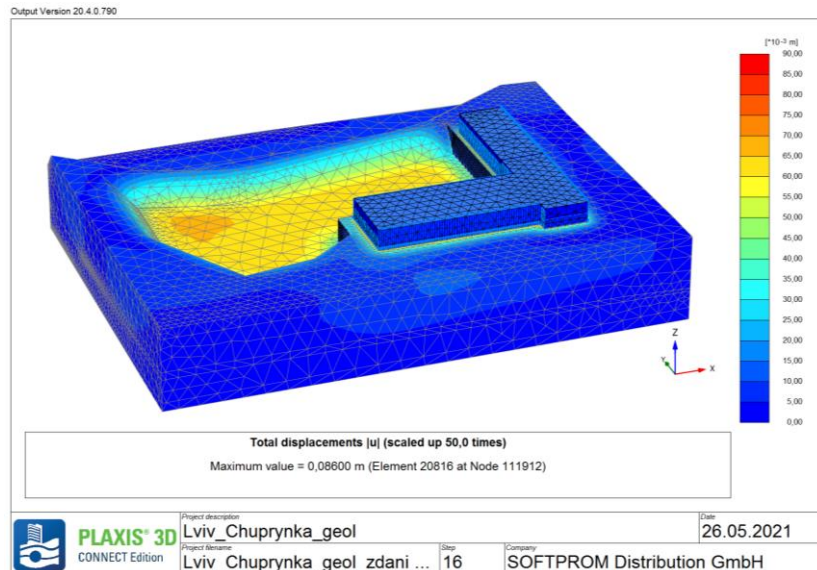


Рисунок 10 – Загальні переміщення розрахункової моделі (для розрахункових випадків 3 та 4)

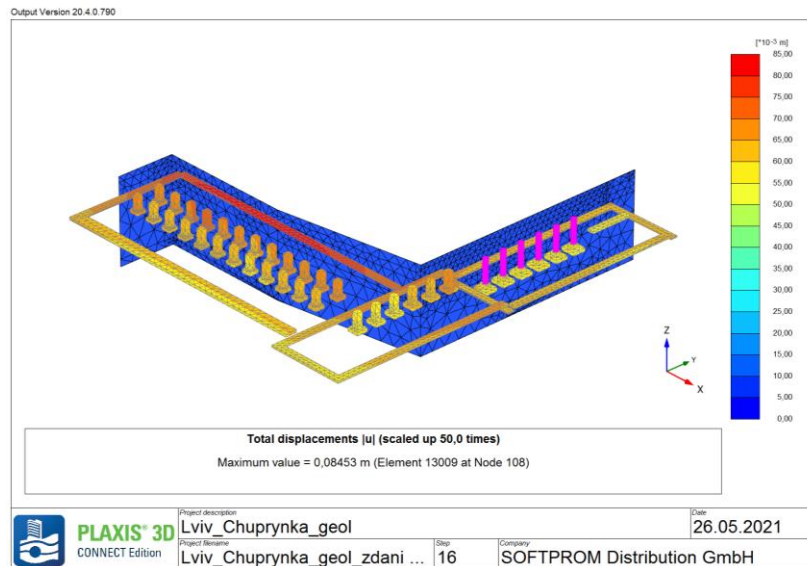


Рисунок 11 – Загальні переміщення фундаментів після виконання огороження котловану та виїмки ґрунту до проектної позначки низу котловану

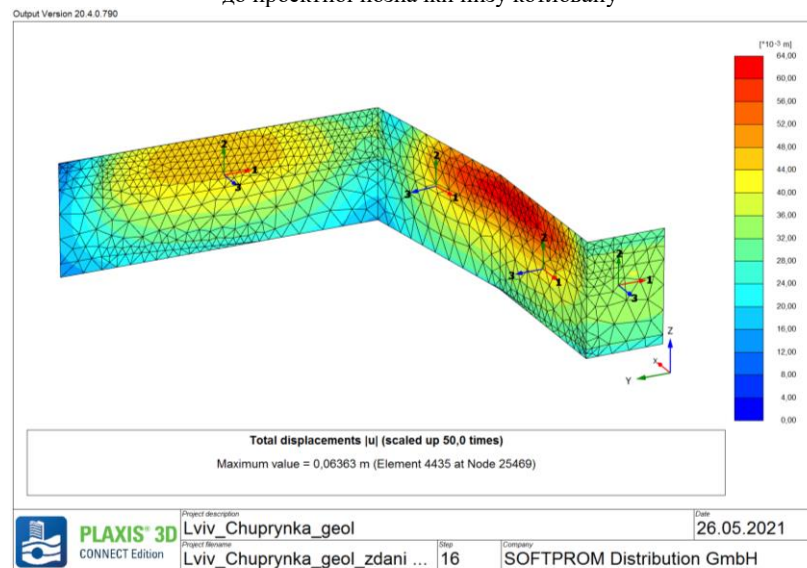


Рисунок 12 – Загальні переміщення огороження котловану

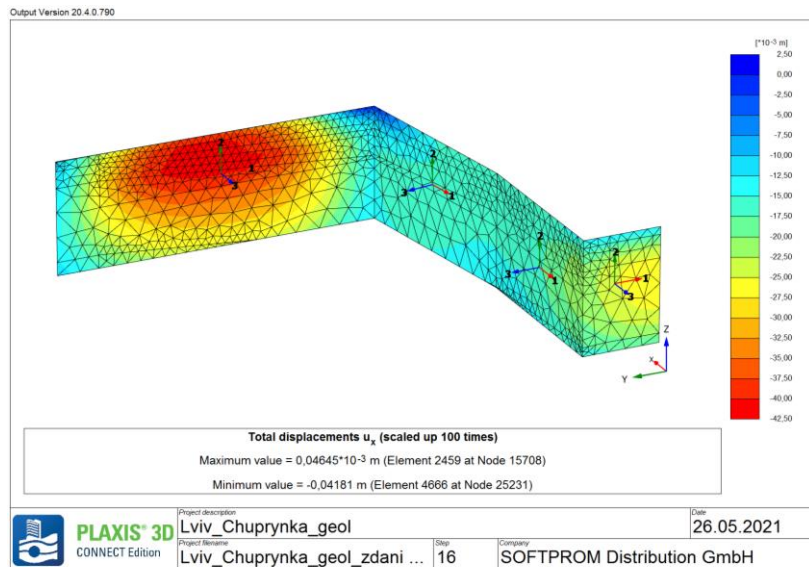


Рисунок 13 – Переміщення конструкції огородження котловану по вісі X (загальна система координат моделі)

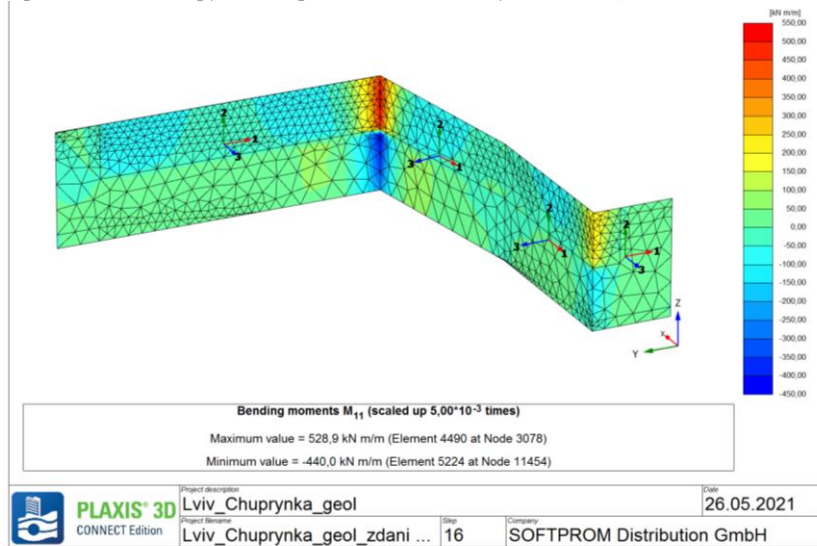


Рисунок 14 – Згинаючий момент, що виникає в конструкції огородження, по вісі 1 (місцева система координат для елементів огородження)

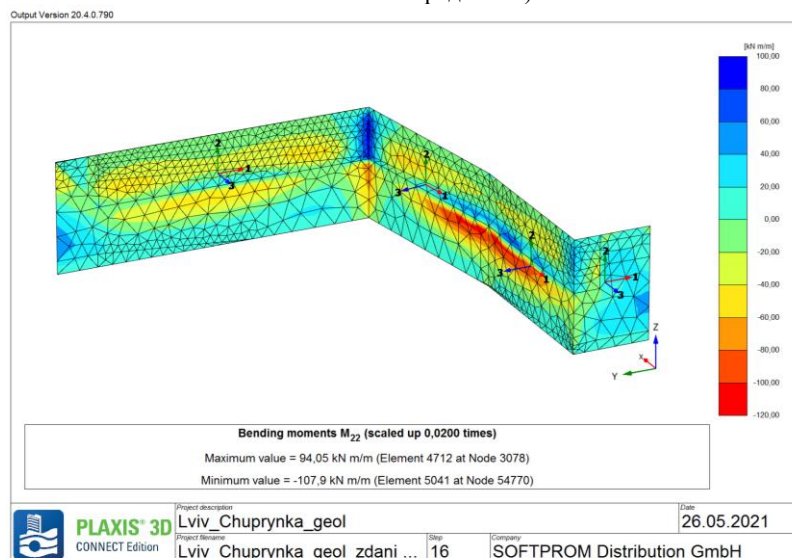


Рисунок 15 – Згинаючий момент, що виникає в конструкції огородження, по вісі 2 (місцева система координат для елементів огородження)





Рисунок 16 – Виконане огородження котловану (листопад, 2021 р.), вид на секції 3, 4

Основні особливості виконаного тривимірного моделювання:

1. Створення тривимірної розрахункової моделі в PLAXIS 3D CONNECT Edition V21.01 дозволило дослідити вплив виконання конструкції огородження та подальшої виїмки на існуючі будівлі, що розташовані в безпосередній близькості до котловану та отримати деформації і зусилля в самій конструкції огородження.
2. Тривимірна модель фундаментів дає можливість отримати різницю осідань, що в свою чергу показує виникнення крену або відсутність такого. Порівняння результатів деформації фундаментів для чотирьох будівельних випадків показало поведінку існуючих будівель до реконструкції, з надбудовою поверхів та приріст осідань при влаштуванні котловану.
3. При дослідженні зусиль, що виникають в елементах конструкції огородження, тривимірна модель дає повну картину розподілу максимальних та мінімальних значень зусиль при роботі конструкції в цілому.
4. На прикладі даної моделі показано варіант виконання комбінованого огородження котловану – пальового огородження та влаштування відкосів.
5. Відображення існуючої геологічної поверхні, а саме схилу, було виконано за допомогою введення свердловин (Create borehole) з відповідними відмітками поверхні, що дозволило змодельовати кривизну підшви схилу.
6. При моделюванні фундаменти задані об'ємними елементами з використанням моделі Linear-plastic model та комбінуванням об'ємних елементів та елементів Beam для колон.
7. Створення складної форми виїмки за допомогою відкосів було змодельоване при використанні функції Blend surface в вікні Model explorer. З наступною розбивкою сформованих масивів і створенням з необхідних поверхонь однієї складної поверхні виїмки.

### Висновки за результатами досліджень

8. Використання просторового моделювання в складних геотехнічних умовах дозволяє одержати коректні результати з визначення напружено-деформованого стану складних будівельних систем.
9. Адекватність проведеного моделювання підтверджена результатами будівництва огородження котловану, при якому переміщення елементів системи не перевищували допустимих значень.
10. Проведене моделювання дозволило врахувати етапність робіт за результатами чотирьох будівельних випадків: поведінку існуючих будівель до реконструкції, з надбудовою поверхів та приріст осідань при влаштуванні котловану.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основания, фундаменты и подземные сооружения [М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов и др.]; под общ. ред. Е. А. Сорочана и Ю. Г. Трофименкова. М.: Стройиздат, 1985. 480 с. (Справочник проектировщика).
2. ДСТУ-Н Б В.2.1-31:2014. Настанова з проектування підпірних стін. [Чинний від 2015-10-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2015. 83 с. (Національні стандарти України).
3. Улицкий В. М., Шашкин А. Г., Шашкин К. Г. Геотехническое сопровождение развития городов. Практическое пособие по проектированию зданий и подземных сооружений в условиях плотной городской застройки. Санкт-Петербург : Георекострукция, 2010. 552 с.

4. Никитенко М. И. Буруинъекционные анкеры и сваи при строительстве и реконструкции зданий и сооружений: монография. Минск : БНТУ, 2007. 580 с.

## REFERENCES

1. Osnovaniya, fundamenty u podzemnye sooruzheniya [M. Y. Horbunov-Posadov, V. A. Il'yuchev, V. Y. Krutov i dr.]; pid obshch. red. E. A. Sorochana i YU. H. Trofymenkova. M.: Stroyizdat, 1985. 480 s. (Spravochnik proektyrovshchika).
2. DSTU-N B V.2.1-31:2014. Nastanova z proektuvannya pidpirnykh stin. [Chynny vid 2015-10-01]. Vyd. ofits. Kyiv : Minrehion Ukrainy, 2015. 83 s. (Natsional'ni standarty Ukrainy).
3. Ulytskyy V. M., Shashkyn A. H., Shashkyn K. H. Neotekhnichne soprovozhdenye razvytyya horodov. Praktychne posobyе po proektyrovanyu zdanyu y podzemnykh sooruzheny v uslovyakh plotnoy horodskoy zastroyky. Sankt-Peterburh : Heorekonstruktsiya, 2010. 552 s.
4. Nykytenko M. Y. Buroyn"ektsyonnye ankery y svay pry stroytel'stve y rekonstruktsyy zdanyu y sooruzheny: monohrafiya. Mins'k : BNTU, 2007. 580 s.

**Ірина Вікторівна Масвська**, канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. ORCID: 0000-0001-5999-6824, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com.

**Наталія Вікторівна Блашчук**, канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. ORCID:0000-0001-9764-0271, e-mail: blaschuk@vntu.edu.ua.

**Валентина Євгенівна Губашова**, ТОВ "Основа-Солсиф", Київ, Україна, к.т.н., провідний інженер Департаменту спеціальних та гідротехнічних робіт. ORCID:0000-0003-4235-4440, e-mail: v.gubashova@gmail.com.

**N. Blashchuk<sup>1</sup>**  
**I. Maevska<sup>1</sup>**  
**V. Gubashova<sup>2</sup>**

## SIMULATION OF THE INFLUENCE OF THE DEVICE OF A DEEP PIT OF COMPLEX SHAPES ON NEARBY LOCATED HOUSES

<sup>1</sup> Vinnitsa National Technical University

<sup>2</sup> Osнова-Solsif LLC, Kyiv, Ukraine

*The most common method of constructing an underground space in the tight working space of an existing building is the construction of a foundation pit fence carried out of piles or the diaphragm wall with a gradual excavation of the soil within the fence. At the same time, it is necessary to develop a reliable design of the fence, which guarantees both the absence of loss of stability by the fence and its limited deformations, and the absence of excessive additional deformations and overloading of adjacent structures that put pressure on the surface of the backfill of the retaining wall, the fence of the excavation. In conditions of the tight working space and a complex shape of the fence structure in terms of plan and height, the use of the developed methods for calculating retaining walls in two-dimensional formulation is incorrect, since it does not take into account the effect of the spatial work of the structural elements of the fence.*

*Methods for spatial modeling of the stress-strain state of a deep excavation fencing with subsequent excavation of soil for the arrangement of the underground part of the future building are proposed. A pit of a non-linear configuration is considered in a site with a complex topography and inhomogeneous layering of soils. The influence of excavation of a foundation pit on the SSS of a number of unfinished existing buildings located nearby has been studied; the phasing of the work has been taken into account.*

*Modeling was carried out to substantiate effective design solutions for the installation of pile fencing of the excavation and ensuring the stability of the slopes of the open excavation.*

*The creation of a three-dimensional calculation model in PLAXIS 3D CONNECT Edition V21.01 made it possible to investigate the impact of the construction of the fence and subsequent excavation on existing buildings located in the close proximity of the pit and to obtain deformations and forces in the structure of the fence itself.*

**Key words:** foundation-structure system, retaining wall, pile, retaining structures, stress-strain state, effect of spatial work.

**Irina V. Majewska**, candidate. Sc., assistant professor of department of construction, architecture and municipal economy, Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa. ORCID: 0000-0001-5999-6824, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com.

**Natalia V. Blashchuk**, candidate. Sc., assistant professor of department of construction, architecture and municipal economy, Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa. ORCID:0000-0001-9764-0271, e-mail: blaschuk@vntu.edu.ua.

**Valentina Gubashova**, candidate. Sc., leading Engineer of Design Department of Special and Hydrotechnical Works Department, JV Osнова-Solsif LLC, Kiev, Ukraine, ORCID:0000-0003-4235-4440, e-mail: v.gubashova@gmail.com.