

Вплив захисного екрану на напружено-деформований стан оточуючої забудови в зоні розробки котловану

Віталій Ручківський¹

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітрофлотський, Київ, Україна, 03037,
¹ruchkivsky8@ukr.net, orcid.org/ 0000-0001-8982-2884

DOI: 10.32347/0475-1132.46.2023.153-160

Анотація. У даній роботі проводилось дослідження ефективності застосування захисного екрану в умовах щільної забудови. На базі числового моделювання виконувався розрахунок впливу нового будівництва на напружено-деформований стан трьохповерхового цегляного будинку. Задача моделювалась в плоскій та просторовій постановках із заданням системи «огороджувальні конструкції котловану - ґрунтовий масив - захисний екран – фундаменти існуючої будівлі». На відстані 4м від будинку відкопувався котлован глибиною 6м, в якості огороження котловану використовувались буронабивні палі. Захисний екран виконувався із паль у вигляді металеві труби діаметром 159мм, що заповнювалась бетоном, крок паль становив 0.2м.

Розв'язувались дві задачі: влаштування котловану із захисним екраном між підпірною стінкою і існуючим будинком та без захисного екрану. Поведінка ґрунтового масиву моделювалась за допомогою моделі Hardening Soil Model. Розрахунок виконувався поетапно. На першому етапі було створено початковий природний напружено-деформований стан ґрунтового масиву. На наступному етапі передавалось експлуатаційне навантаження на фундаментні конструкції будинку, після чого обнулялись отримані деформації. Далі виконувались влаштування паль та поетапна розробка котловану (частинами глибиною по 2м).

Проаналізовано нормативні документи, що декларують граничні значення додаткових деформацій основ і фундаментів в зоні ущільненої забудови та їх залежність від технічного стану будинку.

Встановлено основні причини виникнення деформацій оточуючої забудови в зоні впливу нового будівництва та заходи, що дозволяють



Віталій Ручківський
асистент кафедри
геотехніки

мінімізувати негативну дію на існуючу забудову.

Виявлено, що технологія влаштування паль котловану значно впливає на напружено-деформований стан оточуючої забудови. На етапі буріння свердловин паль спостерігається виникнення додаткових осідань фундаментів будинку. Також виявлено позитивну роль захисного екрану до набору повної міцності паль огороження котловану.

Встановлено, що захисний екран дозволяє уникнути збільшення напружень основи фундаментів існуючої будівлі та обмежити зону деформації, яка виникає в результаті будівельних робіт.

Ключові слова. Захисний екран, напружено-деформований стан, паля, деформації, взаємовплив, ущільнена забудова.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Забудова історичних центрів міст зумовлює освоєння підземного простору, що в свою чергу несе потенційно негативний вплив на оточуючу забудову, внаслідок чого виникає потреба розробки рішень, які б мінімізували вплив нового будівництва.

Оцінка впливу нового будівництва на сусідні будівлі виконується, як правило, за допомогою числового моделювання в різ-

номанітних програмних комплексах, але при цьому в більшості випадків влаштування котловану розглядається в цілому, без виділення цього процесу в окремий етап розрахунку, що призводить до вибору нерациональних конструктивних рішень.

Відсутня чітка методика підбору раціональних захисних конструкцій, які призначені для мінімізації впливу нового будівництва в щільній забудові.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проблемі впливу відкопування котловану і влаштування огорожувальних конструкцій на додаткові осідання будівель і споруд присвячено багато наукових праць українських і зарубіжних вчених. Головним чином, акцентується увага на комплексному дослідженні роботи системи «огорожувальні конструкції котловану – ґрунтовий масив – існуюча будівля».

Дослідження деформацій оточуючої забудови поблизу котлованів ведеться за двома напрямками: числові дослідження та експериментальні геодезичні спостереження за деформаціями ґрунтового масиву та існуючих будівель. Аналіз наукових джерел показав недостатність вивчення ключових чинників, що визначають осідання поблизу котлованів.

Зважаючи на попередні дослідження, можна зробити висновок, що переміщення ґрунту залежать від низки факторів: інженерно-геологічних умов, рівня підземних вод, методів будівництва, жорсткості огорожувальних конструкцій котловану. У кожному конкретному випадку потрібно виконувати комплексний аналіз всіх факторів.

Питання впливу нового будівництва на оточуючу забудову висвітлено у працях І.П. Бойка [3, 4], В.О. Сахарова [6], Л.О. Бондарєвої [5], Cording E.J. [9].

МЕТА РОБОТИ

Основною метою даної роботи є дослідження ролі захисного екрану в формуванні

напружено-деформованого стану існуючої будівлі в зоні впливу нового будівництва.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Зведення будівель із підземними приміщеннями в щільно забудованій території завжди супроводжується ризиками завдання шкоди існуючим будівлям. Розробка глибоких котлованів призводить до істотної зміни існуючого напружено деформованого стану (НДС) ґрунтового масиву, що може призвести до появи деформацій в сусідніх будівлях. Також, крім зміни НДС ґрунту основи, виникає передача вібраційних впливів на існуючі будинки. Внаслідок вище наведених чинників, виникає необхідність прогнозу впливу нового будівництва на оточуючу забудову, завдяки якому можна передбачити заходи, які спроможні мінімізувати цей вплив.

Виникнення деформацій існуючого будинку при спорудженні поруч із ним нової будівлі може бути спричинене:

- збільшенням напружень основи фундаментів існуючої будівлі, що викликане новим будівництвом;
- зміною гідрогеологічних умов, виникнення баражного ефекту при підземному будівництві;
- спорудженням фундаментів нової будівлі на інших відмітках по відношенню до сусідніх будівель
- технологічні впливи.

На сьогодні зменшити вплив на існуючу забудову від нового будівництва можна за допомогою комбінації заходів:

- збільшення жорсткості існуючої будівлі для сприйняття додаткових деформацій (закріплення основ, підсилення фундаментів);
- захист від технологічних впливів та підтоплення;
- влаштування інженерних захисних конструкцій задля уникнення або зменшення додаткових деформацій, а також мінімізації технологічних впливів.

В даній роботі розглянута задача мінімізації впливу нового будівництва на існуючий будинок за рахунок влаштування інженер-

ного захисного екрану, який є одним із найбільш використовуваних методів зменшення негативного впливу на оточуючу забудову.

Захисний екран – конструкція, що влаштовується в ґрунті, призначенням якої є зменшення впливу влаштування котловану на напружено-деформований стан оточуючої забудови. Захисні конструкції обмежують зону деформації, яка виникає в результаті будівництва. Їх розміщують між існуючою будівлею, яка потребує захисту, та новим будівництвом.

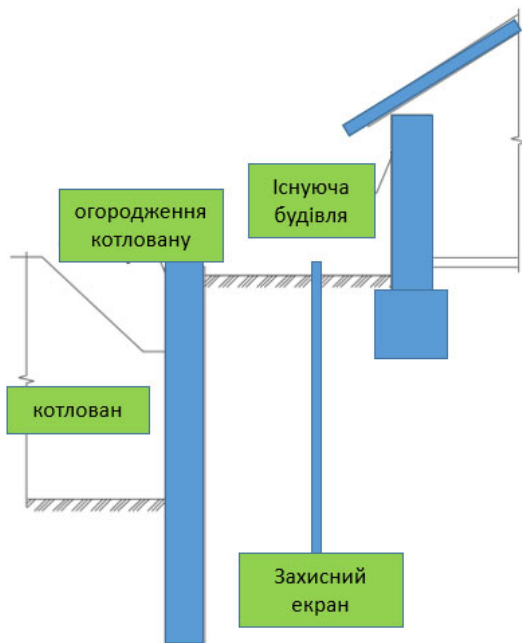


Рис.1. Схема захисту існуючої будівлі за допомогою інженерного захисного екрану.

Fig.1. Protection scheme of the existing building with protective screen

Об'єкт впливу являє собою трьохповерховий житловий цегляний будинок в історичному центрі м. Київ. Прямокутний в плані, із розмірами 25x13,3м. Конструктивна схема безкаркасна, з поздовжніми та поперечними несучими стінами, просторову жорсткість забезпечують сходові клітини та перекриття із круглопустотних залізобетонних плит. Фундаменти стрічкові, виконані зі збірних бетонних плит та блоків. Ширина фундаментів 1м, глибина закладання становить 2м. Біля будинку планується спорудження багатоповерхового житлового ком-

плексу, що складається із двох секцій 22 та 25 поверхів та має підземні приміщення. Секції являють собою монолітний залізобетонний каркас. Поздовжня та поперечна жорсткість забезпечується сумісною роботою елементів каркасу – колон, ядер жорсткості та дисків перекриття.

В геоморфологічному відношенні ділянка будівництва знаходиться в межах пологого схилу лівого борту річки Либідь правого берегу р. Дніпро.

Природний рельєф ділянки зазнав значних змін. За багаторічний період освоєння навколишньої території на ній неодноразово проводилось планування рельєфу насипними ґрунтами, здійснювалися будівництво будинків, прокладання підземних комунікацій, та інших споруд. Абсолютні відмітки території: 125,2 – 123,м

Інженерно-геологічний розріз складений наступними інженерно-геологічними елементами (зверху вниз):

ІГЕ-1 – Насипний ґрунт – супісок та пісок з включенням будівельного сміття.

ІГЕ-2 – Супісок, пластичний.

ІГЕ-3 – Пісок дрібний, середньої щільності.

ІГЕ-4 – Пісок середньої крупності, середньої щільності.

ІГЕ-4а – Пісок середньої крупності, пухкий.

ІГЕ-5 – Супісок, текучий.

ІГЕ-5а – Суглинок з домішками гравію та піску, напівтвердий.

ІГЕ-7 – Суглинок напівтвердий, з прошарками глини.

ІГЕ-8 – Глина, тверда.

ІГЕ-8а – Суглинок твердий.

ІГЕ-9 – Пісок пилюватий, з прошарками супіску, мало вологий, щільний.

Згідно будівельних норм для будинків в зоні впливу нового будівництва декларуються граничні значення додаткових деформацій основ і фундаментів. В залежності від технічного стану будинку граничні деформації не повинні перевищувати значень приведених в табл. 1. [1]

Табл.1. Граничні значення деформацій основ і фундаментів споруд.

Tabl.1. Limit values of deformations of bases and foundations.

| Споруда | Технічний стан | Граничні деформації основи | |
|---|----------------|--|---|
| | | Відносна різниця осідань ($\Delta S/L$) _ц | Максимальні додаткові деформації $S_{max,ц}$, см |
| Багатоповерхові безкаркасні будинки несучими стінами із цегляної кладки | 1 | 0,0015 | 2,5 |
| | 2 | 0,0010 | 1,5 |
| | 3 | 0,0007 | 0,7 |

Згідно результатів звіту обстеження будівлі встановлено її непридатний до нормальної експлуатації стан, що в свою чергу значно обмежує додаткові деформації і вимагає інженерних заходів, що дозволять зберегти напружено-деформований стан існуючих основи та фундаментів будинку.

Як результат, в наявних умовах, було проведено моделювання впливу розробки котловану на оточуючу забудову з використанням методу скінченних елементів. Розв'язувались дві задачі: влаштування котловану із захисним екраном між підпірною стінкою та існуючим будинком та без захисного екрану. Котлован розроблявся на глибину 6м. Палі огороження котловану діаметром 620мм, кроком 1.5м, довжиною 12м. Відстань між котлованом та існуючою триповерховою будівлею 2м. Захисний екран влаштовувався на відстані 1м між будівлею та котлованом. Палі захисного екрану діаметром 159мм виконувались із металевої труби, що заповнювалась бетоном, крок палей 0.2м. В якості основи слугував пісок дрібний, середньої щільності із наступними характеристиками: $E=25\text{МПа}$; $\varphi=32$; $c=2\text{кПа}$, $\gamma=17.8\text{кН/м}^3$.

Захисний екран заборонено використовуватись в якості несучої конструкції як в процесі будівництва, так і при постійних навантаженнях.

Задача моделювалась у просторовій постановці. Розмір скінченно-елементної моделі 40х40х40м. Об'ємні тіла суцільного середовища моделювались із застосуванням твердотілих елементів (Solid Elements)

пірамідальної чи призматичної форми. Імітація взаємодії ґрунту із конструкціями палей відбувалась за допомогою контактних елементів інтерфейсу (Interface Elements). На розрахункову схему були накладені обмеження переміщень в горизонтальному напрямку (по осях X та Y) на бічних вертикальних гранях розрахункової області, а також обмеження переміщень у всіх напрямках на нижній горизонтальній грані.



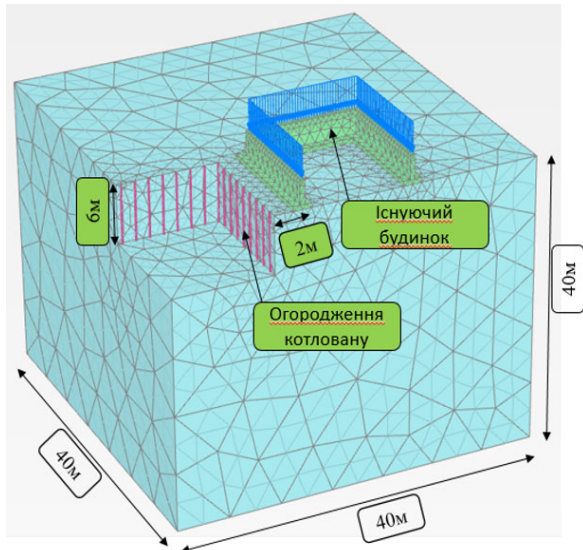
Рис.2. Влаштований захисний екран із труб
Fig.2. Protective screen made of pipes

Розрахунок виконувався поетапно. На першому етапі було створено початковий природний напружено-деформований стан ґрунтового масиву. На наступному етапі передавалось експлуатаційне навантаження на фундаментні конструкції будинку, після чого обнулялись отримані деформації. Далі виконувались влаштування палей та поетапна розробка котловану (частинами глибиною по 2м), шляхом видалення із розрахункової моделі частини об'ємних елементів котловану.

Поведінка ґрунтового масиву моделювалась за допомогою моделі Hardening Soil. Особливістю даної пружно-пластичної моделі є зміна параметрів жорсткості ґрунтів в залежності від рівня напружень в ґрунті. Критерієм міцності виступає критерій Кулона-Мора, завдяки якому описується перехід ґрунту до граничного стану. Для моделювання роботи матеріалів палей та фундаментних конструкцій будинку використовувалась лінійно-пружна модель із харак-

теристиками: $E=30\text{МПа}$; $\gamma=25\text{кН/м}^3$; $\nu=0.167$. Фундамент будинку стрічковий шириною 1м, із середнім тиском під подошвою $\sigma=250\text{кПа}$.

а)



б)

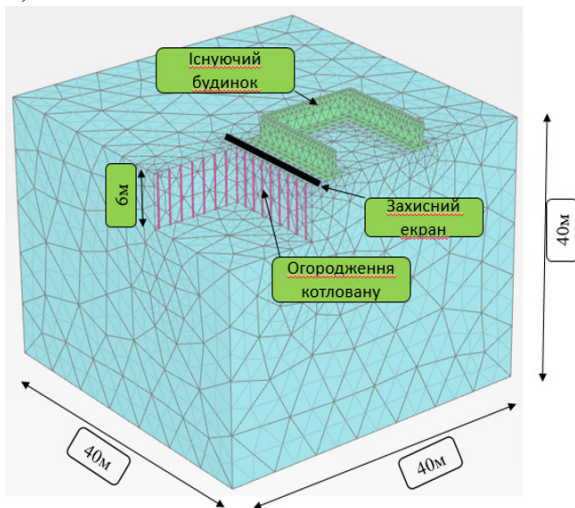


Рис. 3. Скінченно-елементна модель системи «котлован-оточуюча забудова»: а) без захисного екрану; б) із захисним екраном.

Fig.3. Finite-element model of the system «pit-surrounding buildings»: a) without a protective screen; b) with a protective screen

Результати числового моделювання показують, що відкопка глибокого котловану у безпосередній близькості до існуючої будівлі значно змінює її попередньо сформований напружено-деформований стан (НДС). Осідання фундаменту зростає. Крім вертикальних деформацій з'являються також горизонтальні, що в свою чергу приз-

водить до появи тріщин в надземних конструкціях будинку. За таких умов виникає необхідність обмежити область ґрунтового масиву, в якому виникають зміни НДС внаслідок будівництва підземних приміщень, від основи, де зосереджені фундаменти оточуючої забудови.

При порівнянні результатів зміни НДС із захисним екраном та без нього виявлено, що змінюється область розповсюдження впливу відкопування котловану. Уже при влаштуванні паль огороження, вибурюванні свердловин, фундамент будинку зазнає значного додаткового осідання, що сягає близько 30мм. Якщо до цього моменту влаштувати захисний екран, то можна уникнути цього осідання. При цьому свердловини під палі котловану варто бурити не підряд, а з певною розбіжкою, щоб уникати концентрації напружень. Також до повного набору міцності палями огороження котловану існує певна нестабільність ґрунтового масиву в зоні відкопки, що ще раз вказує на необхідність розділення деформацій та важливість влаштування захисного екрану.

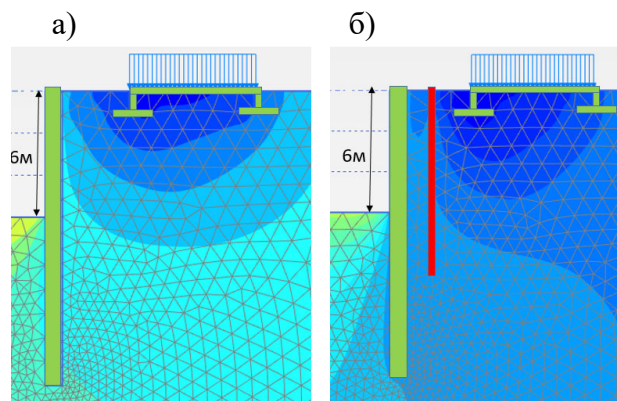


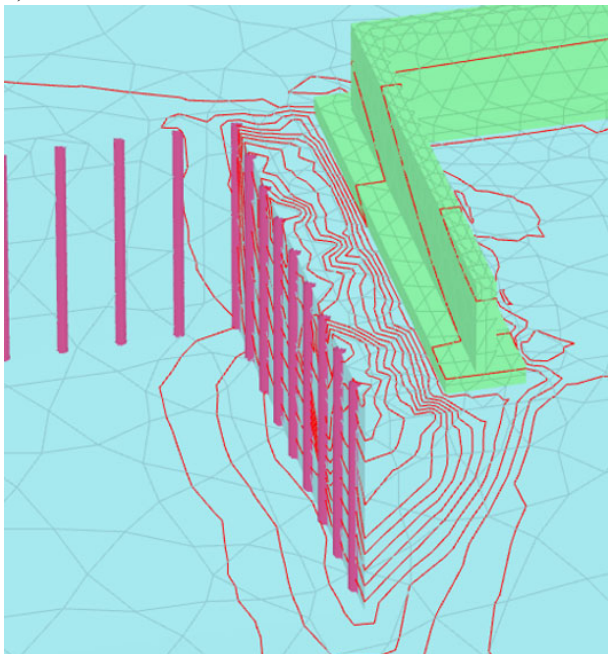
Рис. 4. Розсіювання вертикальних деформацій: а) без захисного екрану; б) із захисним екраном

Fig.4. Dissipation of vertical deformations: a) without a protective screen; b) with a protective screen

Екран буде виступати в ролі відсічної конструкції та відділяти зони деформації котловану та існуючого НДС будинку. Картину зміни горизонтальних та вертикальних деформацій можна спострігати на рис.4; 5. У відсотковому відношенні додат-

кові осідання фундаментів існуючої будівлі при наявності відсічного екрану зменшуються на 34%, що дозволяє уникнути переходу до аварійного стану.

а)



б)

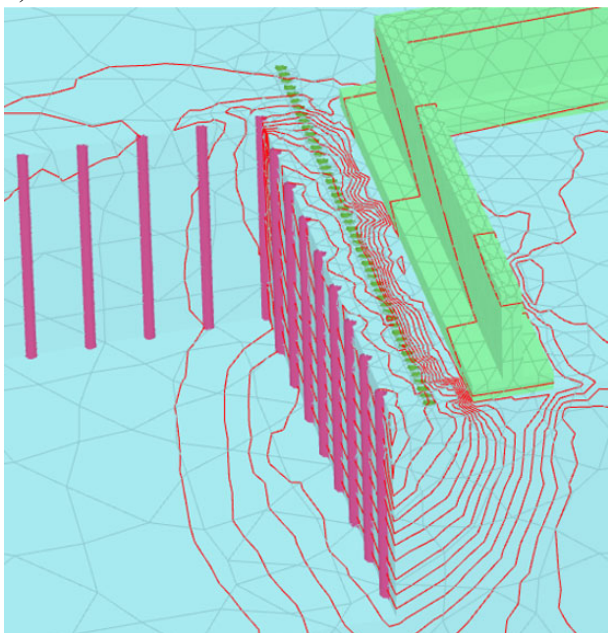


Рис. 5. Розсіювання горизонтальних деформацій: а) без захисного екрану; б) із захисним екраном.

Fig.5. Dissipation of horizontal deformations: a) without a protective screen; b) with a protective screen

При наявності екрану спостерігається збільшення жорсткості утримуючих конструкцій котловану. Так, горизонтальні переміщення паль зменшуються на 10%, у порівнянні з варіантом без захисних конструкцій між будинком і котлованом.

Додаткового дослідження потребують параметри захисного екрану, такі як його жорсткість, глибина по відношенню до стисливої зони фундаменту будинку, положення між котлованом та будинком, його ефективність застосування в різних ґрунтових умовах.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Встановлено основні причини виникнення деформацій оточуючої забудови в зоні впливу нового будівництва та заходи, що дозволяють мінімізувати негативну дію на існуючу забудову.

Виявлено, що технологія влаштування паль котловану суттєво впливає на напружено-деформований стан оточуючої забудови. На етапі буріння свердловин паль спостерігається виникнення додаткових осідань фундаментів будинку, що склали 30мм. Важливим фактором є послідовність вибурування свердловин.

Показано, зміну характеру розсіювання деформацій при наявності захисного екрану та без його влаштування.

Встановлено, що захисний екран дозволяє уникнути збільшення напружень основи фундаментів існуючої будівлі та обмежити зону деформації, яка виникає в результаті будівельних робіт.

Виявлено зменшення на 34% додаткових осідань фундаментів існуючої будівлі при наявності інженерного захисного екрану. У відповідності до нормативних документів [1] це дозволяє уникнути переходу будинку до аварійного стану.

Приведені числовим моделюванням дослідження показали, що влаштування захисного екрану є ефективним засобом для зниження осідання фундаментів будівель оточуючої забудови, викликаних розробкою котлованів.

ЛІТЕРАТУРА

REFERENCES

1. Основи і фундаменти будівель та споруд. ДБН В.2.1-10-2018. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 36 с. – (Державні будівельні норми).
2. ДБН В 1.2-12-2008. Будівництво в умовах ущільненої забудови. – К.: Мінрегіонбуд, 2008-43с.
3. Бойко І.П. Особливості взаємодії пальових фундаментів під висотними будівлями з їх основою // *Основи і фундаменти: міжвідомчий науково-технічний збірник.*–К: КНУБА, 2006 – Вип. 30 –С. 3-8.
4. Бойко І.П. Дослідження взаємодії багатоповерхових будівель як елементів системи «основа – фундамент - надземні конструкції» при статичних та динамічних навантаженнях / І.П. Бойко, В.О. Сахаров // *Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. Зб. Наукових праць (будівництво)* – К.: НДІБК, 2008. Вип. 71. – С.69-75.
5. Бондарева Л. Використання 2D та 3D моделювання для оцінки напружено-деформованого стану підпірних стінок складної конфігурації / Л.Бондарева, В.Носенко, А.Маламан // *Науково-технічний збірник «Основи та фундаменти»*. К.: КНУБА. – 2022. – Вип.45. – С. 9-21. DOI:10.32347/0475-1132.44.2022.67-78
6. Сахаров В.О. Оцінка взаємодії фундаментів існуючого будинку з основою при влаштуванні котловану / В.О. Сахаров // *Основи і фундаменти*, 2002. – Вип. 27 - С.113-123.
7. Цимбал С.Й. Експериментальне дослідження напруженого стану в основі моделі висячої палі / С.Й. Цимбал // *Республ. міжвідомчий науч.-техн. зб. Основи і фундаменти* – Київ: Будівельник, 1973. - Вип.6. – С.134-141.
8. Ang, E.-C. Numerical investigation of limit soil pressure for design of pile stabilized slopes / E.-C. Ang, J.E. Loehr, D.E. Smith // *Proc.11th International conf. of IACMAG*. Torino, 2005. V.2-pp.319-326.
9. Cording E.J. Modeling and analysis of excavation – induced building distortion and damage using a strain-bases damage criterion / E.J.Cording, J.H. Long // *Proc. Int. Conf. «Responce of building to excavation-induced ground movements»*, 2001, Imperial College. – London, UK.
1. Osnovy i fundamenti budivel ta sporud. DBN V.2.1-10-2018. K. : Minrehion Ukrainy, 2018. 36. (Derzhavni budivelni normy). (in Ukrainian).
2. DBN V 1.2-12-2008. Budivnytstvo v umovakh ushchilnenoї zabudovy. K.: Minrehionbud, 2008. 43 (in Ukrainian).
3. Boiko I.P. (2006) Osoblyvosti vzaiemodii palovykh fundamentiv pid vysotnymy budivliamy z yikh osnovoіu [Features of the interaction of pile foundation uder high-rise buildings with their foundation]. *Osnovy i fundamenti: mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*. K: KNUBA, Vyp. 30. 3-8 (in Ukrainian).
4. Boiko I.P., Sakharov V.O. (2008) Doslidzhennia vzaiemodii bahato-poverkhovykh budivel yak elementiv systemy «osnova–fundament-nadzemni konstruktsii» pry statychnykh ta dynamichnykh navantazhenniakh [Study of the interaction of multi-storage buildings as elements of the «soil base – foundation – above ground structures». *Budivelni kosntruktsii: mizhvid. nauk.-tekhn. Zb. Naukovykh prats (budivnytstvo)*. K.: NDIBK, Vyp. 71. 69-75 (in Ukrainian).
5. Bondarieva L., Nosenko V., Malaman A. (2022) Vykorystannia 2D ta 3D modeliuwannia dlia otsinky napruzhenodeformovanoho stanu pidpirnykh stinok skladnoi konfihuratsii [Use of 2D and 3D modeling to asses the stress-strain state of retaining walls of complex configuration]. *Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk «Osnovy ta fundamenti»*. K.: KNUBA, Vyp.45. 9-21. DOI:10.32347/0475-1132.44.2022.67-78 (in Ukrainian).
6. Sakharov V.O. (2002). Otsinka vzaiemodii fundamentiv isnuiochoho budynku z osnovoіu pry vlashtuvanni kotlovanu [Evaluation of interaction of the foundations of existing buildings with foundation during the installation of a pit]. *Osnovy i fundamenti*. Vyp. 27. 113-123 (in Ukrainian).
7. Tsymbal S.I. (1973) Eksperymentalne doslidzhennia napruzhenoho stanu v osnovi modeli vysiachoi pali [Experimental study of stress state at the base of the hanging pile model]. *Respubl. mizhvidomchyi nauch.-tekhn. zb. Osnovy i fundamenti* Kyiv: Budivelnik, Vyp.6. 134-141 (in Ukrainian).
8. Ang, E.-C., Loehr J.E., Smith D.E. (2005) Numerical investigation of limit soil pressure for design of pile stabilized slopes. *Proc.11th*

International conf. of IACMAG. Torino. V.2., 319-326.

9. Cording E.J., Long J.H. (2001) Modeling and analysis of excavation – induced building distortion and damage using a strain-bases damage criterion. *Proc. Int. Conf. «Responce of building to excavation-induced ground movements»*, Imperial College. London, UK.

The influence of the protective screen on stress-strain state of surrounding buildings in zone of new constuction

Vitalii Ruchkivskyi

Summary. In this article, a study of the effectiveness of the use of a protective screen in densely built-up conditions was carried out. Based on numerical modeling, the impact of new construction on the stress-strain state of a three-story brick building was calculated. The problem was modeled in 2D and 3D settings with the input of the system "excavation structures of the pit - soil massif - protective screen - foundations of the existing building" At a distance of 4 m from the building, a pit with a depth of 6 m was excavated, as a fence of the pit, bored piles were used. The protective screen is made of piles of a metal pipe with a diameter of 159 mm, which was filled with concrete, the pitch of the piles was 0.2 m.

Two tasks were solved: the installation of a pit with a protective screen between the retaining wall and the existing building and without a protective screen. The behavior of the soil mass was modeled using the Hardening Soil Model. The calculation was carried out in stages. At the first stage, the initial natural stress-deformed state of the soil massif was created. At the next stage, the operating load was transferred to the foundation structures of the building, after which the resulting deformations were zeroed. Next, piles were installed and the pit was developed step by step (in parts with a depth of 2 m).

Regulatory documents declaring the limit values of additional deformations of bases and foundations in the area of compacted buildings and their dependence on the technical condition of the building were analyzed.

The main causes of the deformation of the surrounding buildings in zone of influence of the new construction and measures to minimize the negative impact on the existing buildings have been established.

It was found that the technology of piling the pit has a significant effect on the stress-strain state of the surrounding buildings. At the stage of drilling pile wells, additional subsidence of the foundations of the house is observed. The positive role of the protective screen in increasing the strength of the pit fence piles was also revealed.

It was established that the protective screen allows to avoid an increase in the stresses of the foundations of the existing building and to limit the zone of deformation that occurs as a result of construction works.

Key words. Protective screen, stress-strain state, pile, deformations, mutual influence, densely built-up territory.