

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ФУНДАМЕНТІВ ВИСОТНОЇ БУДІВЛІ ПРИ ВЛАШТУВАННІ СТІНИ В ҐРУНТІ

Наталія КОСТИРА¹, Валентина БАКУЛІНА²

¹ Національний авіаційний університет,
просп. Гузара Любомира 1, Київ, Україна, 03037

² Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони 15, Київ, Україна, 03041

¹ nataliia.kostyra@npp.nau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5934-9563>

² bakulina88@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-0849-9697>

Анотація. У сучасній будівельній практиці при влаштуванні глибоких котлованів у складних інженерно-геологічних та гідрогеологічних умовах часто вдаються до конструкції огорож у вигляді монолітної залізобетонної стіни в ґрунті траншейного типу. Порівняно з іншими конструктивними типами огорож стіна в ґрунті має ряд переваг, таких як можливість її влаштування практично в будь-яких інженерно-геологічних та гідрогеологічних умовах будівельних майданчиків, надійний захист котловану від підтоплення при її якісному виконанні робіт та підвищена жорсткість. Однак сама конструкція стіни в ґрунті цього типу надає суттєвий вплив на напружено-деформований стан (НДС) ґрунтового масиву, що вміщує її, що негативно позначається не тільки на навколишній забудові, що проявляється у вигляді її додаткових осідань, а також призводить до нерівномірних деформацій ґрунтового масиву в основі плитних фундаментів висотних будівель, що зводяться, збільшуючи їх крен.

Але якщо вивченню впливу влаштування стіни в ґрунті на додаткові осідання будівель навколишньої забудови в останні роки було присвячено низку робіт, що дозволило встановити закономірності їх розвитку та розробити ефективні захисні заходи, то вплив стіни в ґрунті на осадки та крени, будівель що зводяться в котловані практично не вивчалось, а їх правильна оцінка особливо важлива при будівництві висотних будівель, крени яких жорстко обмежені чинними нормативними документами.



Наталія КОСТИРА

доцент кафедри комп'ютерних технологій будівництва, к.т.н., доцент



Валентина БАКУЛІНА

старший викладач кафедри будівництва

З огляду на це, а також у зв'язку з обсягом зведення висотних будівель, що постійно збільшується, виконання досліджень, спрямованих на вивчення впливу огорожі котловану у вигляді монолітної залізобетонної стіни в ґрунті траншейного типу на осадки та крени висотних будівель на плитному фундаменті з метою підвищення точності їхнього розрахунку слід вважати актуальним геотехнічним завданням.

Досліджено ступінь впливу на середні осадки та крени висотних будівель на плитних фундаментах, відстані від огорожі до краю плити, глибини занурення огорожі в ґрунт нижче дна котловану, умов контакту ґрунтового масиву з боку котловану з поверхнею огорожі (ґрунт-бетон), деформаційних характеристик основи та навантаження, що діє на неї.

Ключові слова: напружено-деформований стан; стіна в ґрунті; котлован; фундаментна плита; осадка; крен.

ВСТУП

Основними вимогами, виконання яких необхідно передбачити при проектуванні котлованів та їх влаштуванні, є забезпечення стійкості їх відкосів та зниження негативного впливу на навколишню забудову, що проявляється у вигляді розвитку додаткових осадок, здатних не тільки вивести сусідні будівлі з нормального експлуатаційного стану, а й призвести до їхнього руйнування [1, 2, 11, 21-25].

В останні роки в Україні швидко розвивається будівництво висотних будівель, що відповідає загальній світовій тенденції і пов'язано, в основному з різко збільшеною вартістю землі та відсутністю великих вільних ділянок у межах міст. Збільшені навантаження на ґрунтову основу при зведенні висотних будівель з розвиненою підземною частиною, що впливає на напружено-деформований стан ґрунтового масиву можна порівняти з гідротехнічними спорудами, це вимагає розвитку розрахункових комплексів, що дозволяють підвищити точність розрахунків та забезпечити економічну ефективність, довговічність та експлуатаційну надійність зведених висотних будівель, однією з особливостей яких є їх підвищена чутливість до кренів, перевищення яких над нормативними може призвести до збою в роботі їх систем життєзабезпечення, а саме: вивести з ладу ліфтове обладнання, викликати додаткові напруження та утворення тріщин в несучих та огорожувальних конструкціях і, у крайніх випадках, призвести до порушення їхньої стійкості [8, 18-20].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Останні наукові дослідження показали необхідність внесення змін до нормативних документів, посиливши вимоги щодо граничних кренів висотних будівель, що допускаються, що вимагає і більш точного врахування в розрахунках факторів, що впливають на них.

На крен будівлі впливають ґрунтові умови, навантаження та навколишні будівлі

та споруди. Вплив цих факторів на напружено-деформований стан (НДС) ґрунтів в основі плитних фундаментів будівель висотою до 75 м, що відносяться до багатопверхових будівель, добре вивчено, що дозволяє визначати їх осадки та крени із задовільною точністю. Щодо висотних будівель, необхідний більш точний розрахунок, зокрема, врахування додаткових факторів, що впливають на НДС ґрунтового масиву, а саме: конструкції та роботу огорож котлованів, конструктивні рішення яких залежать від інженерно-геологічних та гідрогеологічних умов будівельного майданчика, глибини котловану, навколишньої забудови та ряду інших факторів.

Для розв'язку задачі рівноваги ґрунтового масиву існують напівемпіричні методи [5], які свідчать, що початковий модуль пружності, отриманий з урахуванням навколишнього обмежувального тиску в середовищі ґрунтового масиву, помітно збільшується із збільшенням питомої ваги ґрунту і є наближено пропорційним обмежувальному – гідростатичному тиску. Окрім того, було помічено, що на величину модуля пружності з глибиною ґрунтового півпростору впливає неоднорідність шарів ґрунтового масиву, а також взаємодія окремих шарів багат шарової системи без урахування тертя між ними [3].

Розв'язок нелінійної задачі рівноваги ґрунтових масивів при взаємодії з огорожувальними конструкціями побудований з використанням рівнянь у приростах виходячи з першого принципу віртуальної роботи для статичних задач тривимірного нелінійно-деформованого тіла досліджувався в роботах Цихановського В.К. [4, 5].

Виконані в останні роки комплексні чисельні та аналітичні дослідження, результати яких опубліковані в технічній літературі, переважно більшість присвячені вивченню різних аспектів впливу улаштування стіни в ґрунті на осадки будівель навколишньої забудови Парфертьєва І.О., Зоценко М. Л., Знаменський В.В., Мангушев Р.А., Мирсаяпов І.Т., Петрухін В.П., Сапін Д.А., Улицький В.М., Кріпак В. та інші [6, 7, 15-17].

В результаті цих досліджень було встановлено основні закономірності впливу влаштування стіни в ґрунті на осадки сусідніх будівель та розроблені рекомендації щодо їх врахування під час проектування. Проте розвиток будівництва висотних будівель, характерною рисою яких є підвищена чутливість до кренів, не дозволяє обмежитися врахуванням впливу стіни в ґрунті траншейного типу тільки на осідання навколишньої забудови, але порушило питання необхідності врахування цього впливу і на НДС ґрунтового масиву в основі плитних фундаментів зведених висотних будівель, від чого залежить точність визначення їх кренів та оцінка додаткових зусиль у несучих конструкціях будівель, на що зараз звернено особливу увагу у зв'язку з необхідністю забезпечення нормальної експлуатації висотних будівель без регулярних ремонтних робіт інженерних систем та ліфтового обладнання [8, 14, 20].

Необхідність врахування впливу стіни в ґрунті на крен висотної будівлі, була відзначено у роботах Шулятьєва О.А., Ісаєва О.М.,

Xiangfu Chen, A.V.Skorikov та ін. Досліджено, що наявність стіни в ґрунті може викликати додатковий крен висотної будівлі за рахунок неоднорідного напруженого стану, який створюваний огорожею. Цей висновок був підтверджений на ряді об'єктів, наприклад при будівництві житлового комплексу в Києві в котловані глибиною 18 м, одна з будівель якого була розташована на відстані 1-2 м від огорожі котловану.

Моніторинг показав, що огороження вплинуло на осадку будівлі, що підтвердив і чисельний розрахунок, результати якого наведено на рис. 1. Так різниця в осадках найближчого до огорожі торця будівлі, визначених з урахуванням (крива 1) та без урахування (крива 2) роботи стіни в ґрунті, може відрізнятись в два і більше разів. Вплив поширюється на відстань 10 м – 12 м від краю плити, що приблизно дорівнює половині її ширини, яка дорівнює 20,0 м.

Аналогічна картина впливу стіни в ґрунті була отримана і при будівництві багатофункціонального центру в Києві, ряду висотних будівель та інших об'єктах.

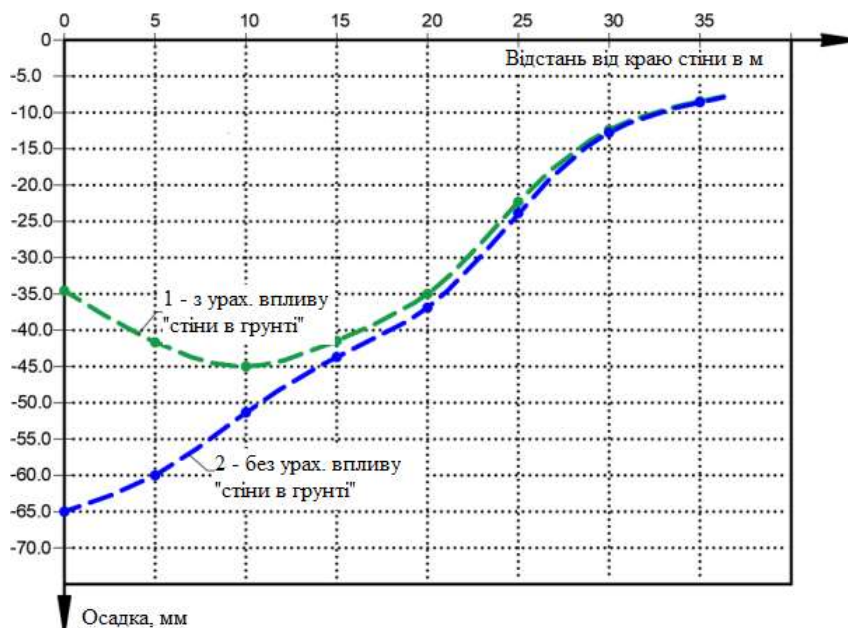


Рис.1. Осадка фундаментної плити: 1 – з урахуванням «стіни в ґрунті»; 2 – без урахування «стіни в ґрунті»

Fig. 1. Settlement of the foundation slab: 1 – taking into account the "sheet-pile wall"; 2 - without taking into account the "sheet-pile wall"

Докладно розглянуто та проаналізовано

питання впливу конструкції стіни у ґрунті на зміну НДС навколишнього масиву ґрунту Д.К. Мінаковим.

Чисельним моделюванням було досліджено вплив зміни НДС навколишнього масиву ґрунту при влаштуванні стіни в ґрунті на зусилля та деформації у конструкціях, що зводяться. В роботі розглядалися «стіна в ґрунті», розпірні конструкції котловану та фундаменти, що влаштовуються у безпосередній близькості від огорожі.

За результатами дослідження осадки плитного фундаменту, яке визначено по розробленій методиці, тобто з урахуванням зміни НДС ґрунтового масиву в основі фундаментної плити, викликаного конструкцією стіни в ґрунті, їх зменшення осадок 13-16%.

Загалом результати дослідження Мінакова Д.К. підтвердили факт впливу пристрою та роботи стіни в ґрунті на зміну НДС ґрунтового масиву в основі фундаментних плит зведених будівель, що призводить до перерозподілу напружень у фундаментній плиті, виникнення додаткових зусиль у каркасі зведеної будівлі та розпірних конструкціях огороження котловану та зменшення середнього осідання фундаменту. Питання впливу стіни у ґрунті на крен висотної будівлі не розглядалися.

Питання впливу стіни в ґрунті на середні осадки та крени зведених висотних будівель практично не вивчалися, що пояснює відсутність відповідної методики його врахування та ставить питання про необхідність проведення таких досліджень.

За даними моніторингу та чисельних розрахунків на величину крену висотної будівлі, поряд з такими причинами, як ексцентриситет прикладання навантаження, викликаний його нерівномірним розподілом по фундаментній плиті та неоднорідне залягання шарів ґрунту в її основі, впливає і огороження котловану у вигляді монолітної залізобетонної стіни в ґрунті траншейного типу. Виконаний аналіз показав, що при зведенні висотних будівель у глибоких котлованах найбільш поширеною конструкцією огорожі котлованів є монолітна залізобетонна «стіна в ґрунті» траншейного типу [10].

Вплив огорожувальної конструкції типу

«стіна в ґрунті» на НДС ґрунтової основи плитного фундаменту та крен висотної будівлі може бути суттєвим і залежати від ряду факторів, проте спеціально це питання докладно не досліджувалося.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета та завдання полягає в дослідженні впливу огорожувальних конструкцій котловану у вигляді монолітної залізобетонної стіни в ґрунті траншейного типу на осадки та крени висотних будівель на плитних фундаментах, встановлення залежності цього впливу від різних факторів.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Чисельне моделювання впливу огорожі котловану у вигляді монолітної залізобетонної стіни в ґрунті траншейного типу на осадки та крени висотних будівель на плитних фундаментах у піщаних ґрунтах виконувалося методом скінчених елементів (МСЕ), який, на відміну від аналітичних методів, дозволяє вирішувати складні завдання у більш коректній постановці з урахуванням особливостей форми та властивостей геологічного середовища та багатьох факторів, які впливають на поведінку досліджуваного об'єкта. Дослідження проводилися з застосуванням програмного комплексу ЛПРА САПР, який широко використовується для вирішення багатьох геотехнічних завдань та вивчення взаємодії фундаментних конструкцій із ґрунтовою основою [9, 12, 13].

Дослідження впливу стіни в ґрунті на осадки та крени висотних будівель на плитні фундаменти проводилися для двох варіантів розташування будівлі на будівельному майданчику:

- будівля розташована у центрі будівельного майданчика;
- будівля зміщена у бік огороження котловану.

У першому випадку розглядалися середні осадки висотної будівлі, у другому - середні осадки і крени.

Заглиблена споруда, що взаємодіє з ґрунтовим масивом, є складною геотехнічною

системою. У зв'язку з цим процес моделювання пропонується проводити у три етапи:

етап 1: створення розрахункової моделі заглибленої споруди;

етап 2: створення розрахункової моделі ґрунтового масиву;

етап 3: моделювання поверхні контакту "заглиблена споруда - ґрунт".

Для визначення основних принципів та виявлення особливостей моделювання розглядалося завдання взаємодії підпірної стіни із ґрунтовим масивом (рис. 3). При цьому ва-

рювалися геометричні розміри конструкцій, і їх жорсткісні характеристики. Розрахункові параметри ґрунту та залізобетонних конструкцій (огорожа котловану, фундаментна плита) наведено в таблиці 1. Розрахункові схеми включали огороження котловану з його двостороннім (рис. 2) та одностороннім (рис. 6) розташуванням щодо будівлі та зануренням у ґрунт на глибину $h_{\text{зад}}$ нижче дна котловану, залізобетонної фундаментної плити шириною $B_{\text{пл}}$ та ґрунтової основи.

Табл. 1. Фізико-механічні характеристики матеріалів
Table 1. Physico-mechanical characteristics of materials

Характеристики матеріалів	Плита	Стіна в ґрунті	Ґрунт
Питома вага матеріалу плити та стіни в ґрунті – γ , кН/м ³	25	25	-
Питома вага ґрунту в насиченому стані – γ_{sat} , кН/м ³	-	-	18,5
Модуль деформації залізобетонної конструкції – E , кПа	$3 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^7$	-
Модуль деформації ґрунту при первинному навантаженні – E_0 , кПа	-	-	$25 \cdot 10^3$
Січний модуль деформації ґрунту при первинному навантаженні – E_{50} , кПа	-	-	$25 \cdot 10^3$
Модуль деформації ґрунту при розвантаженні (повторне навантаження) – E_{ur} , кПа	-	-	$75 \cdot 10^3$
Одометричний модуль деформації ґрунту – E_{oed} , кПа	-	-	$25 \cdot 10^3$
Коефіцієнт Пуассона - ν	0,2	0,2	0,3
Кут внутрішнього тертя - φ	-	-	28°
Кут дилатансії ґрунту - ψ'	-	-	0°
Коефіцієнт бічного тиску ґрунту в стані спокою – $K_0 = \nu/(1 - \nu)$	-	-	0,53
Коефіцієнт пористості ґрунту – e_0	-	-	0,54

Розрахункова схема завдання для випадку розташування будівлі в центрі будівельного майданчика показано на рис. 2, розбивка скінчено-елементної сітки та граничні умови (закріплені опори з боків та знизу розрахункової області) на рис. 3.

Межі розрахункової області:

- ширина розрахункової області приймалися з умови $B \geq (5 \div 7) \cdot B_{\text{пл}}$, де: $B_{\text{пл}}$ – ширина плити;

- висота розрахункової області визначалася за формулами:

$$H = H_c + h_{\text{кот}}, \quad (1)$$

$$H_c \geq (H_0 + \psi \cdot B_{\text{пл}}) \kappa_p, \quad (2)$$

де H , H_0 , H_c – вказані на рис. 2.

Досліджувався вплив стіни в ґрунті на середнє осідання будівлі в залежності від наступних факторів та діапазонів їх зміни:

- фактор $m = B_{\text{кот}}/B_{\text{пл}} \in [1.2; 1.5; 1.8]$ – відносна ширина котловану;

- фактор $t = h_{\text{загл}}/B_{\text{пл}} \in [0.5; 0.66; 0.8]$ – відносна глибина заглиблення огороження нижче дна котловану;

- фактор E_0 , $\in [15\text{МПа}; 20\text{МПа}; 25\text{МПа}]$ - модуль деформації ґрунтового масиву;
 - фактор q , $\in [300\text{кПа}; 350\text{кПа}; 400\text{кПа}]$ - рівномірно розподілене навантаження на фундаментну плиту, де: $V_{\text{пл}}$ - ширина фундаментної плити, $V_{\text{пл}} = 10,0$ м; $h_{\text{загл}}$ - глибина заглиблення стіни в ґрунті нижче дна котловану; $V_{\text{кот}}$ - ширина котловану.

Середня осадка висотної будівлі визначалася за формулою:

$$S_{\text{ср}} = \frac{S_0 + S_1}{2}, \quad (3)$$

S_0, S_1 – осадка центральної та кугової точки фундаментної плити відповідно.

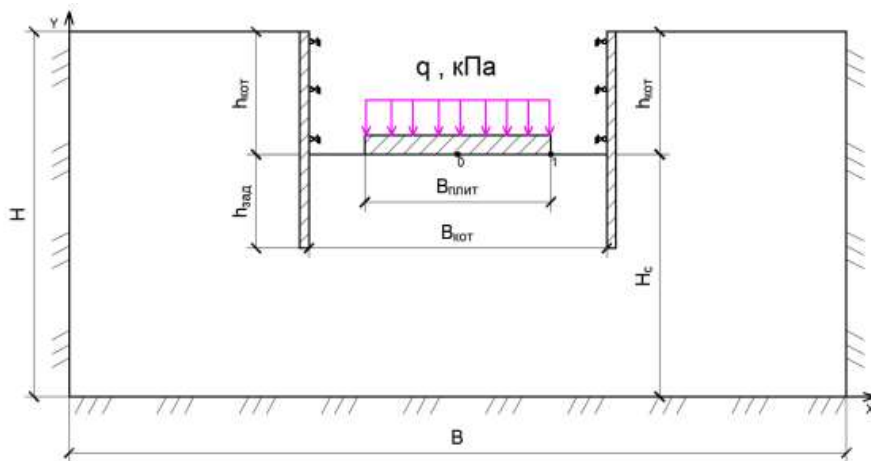


Рис. 2. Розрахункова схема при розташуванні будівлі в центрі будівельного майданчика
Fig. 2. The calculation scheme when the building is located in the center of the construction site

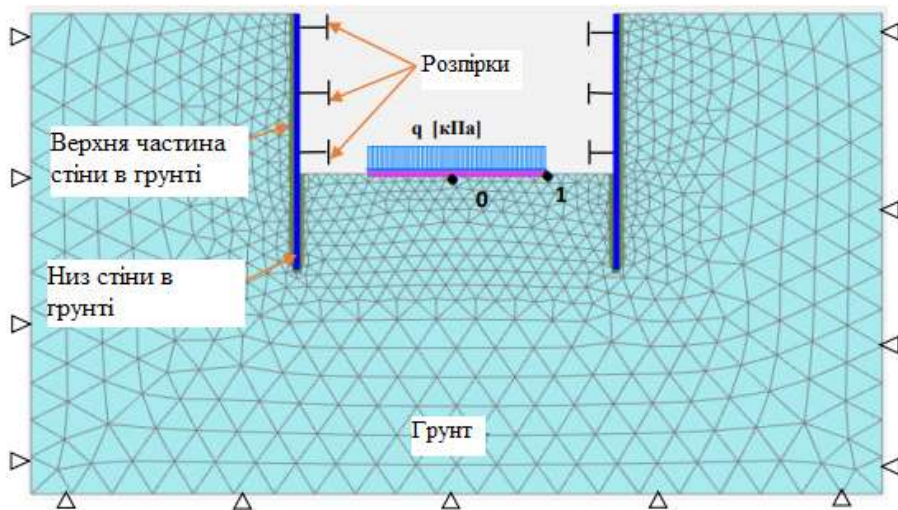


Рис. 3. Схема скінчено-елементної моделі, граничні умови
Fig. 3. Finite element model scheme, boundary conditions

Мозаїки деформацій ґрунтового масиву при значенні $E=15$ МПа та $q=300$ кПа при різній ширині котловану та глибині занурення стіни в ґрунті наведено на рис. 4.

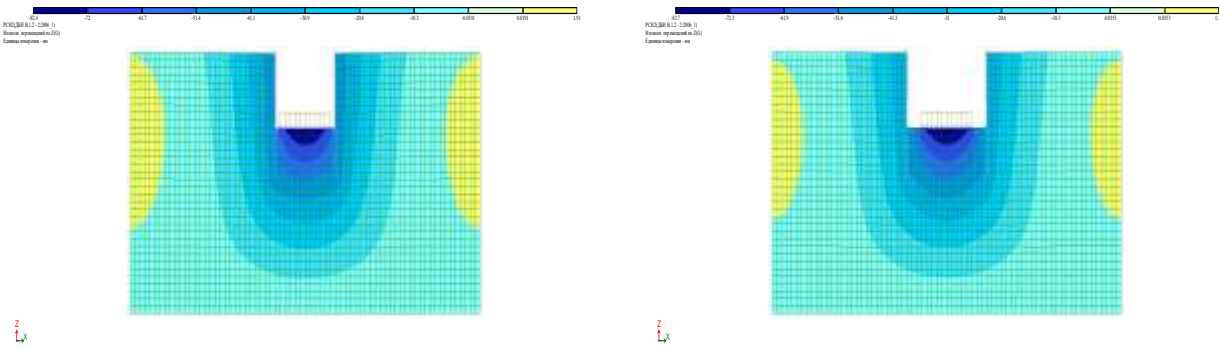


Рис. 4. Мозаїка деформацій $E=15$ МПа та $q=300$ кПа при різній ширині котловану та глибині занурення стіни в ґрунті

Fig. 4. Mosaic of deformations $E=15$ МПа and $q=300$ кПа at different pit width and embedment depth of the sheet-pile wall in the soil

Також отримані мозаїки деформацій ґрунтового масиву при значенні $E=20$ МПа, $q=350$ кПа та мозаїки деформацій ґрунтового масиву при значенні $E=25$ МПа,

$q=400$ кПа при різній ширині котловану та глибині заглиблення стіни в ґрунті.

Результати розрахунку в графічному вигляді наведені на рис. 5.

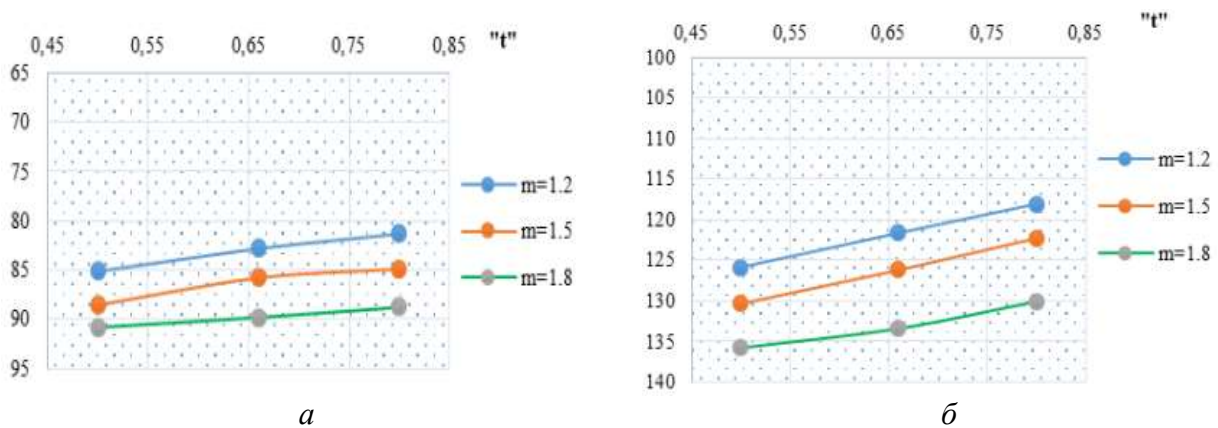


Рис. 5. Графіки залежності $S_{cp} = f(t)$:

а) – при $E=15$ МПа та $q=300$ кПа;

б) – при $E=15$ МПа та $q=400$ кПа

Fig. 5. Graphs of the dependence $S_{cp} = f(t)$:

а) – at $E=15$ МПа and $q=300$ кПа;

б) – at $E=15$ МПа and $q=400$ кПа

Графіки показують, що середнє осідання висотних будівель зменшується при збільшенні відносної глибини заглиблення стіни в ґрунті t нижче дна котловану, коефіцієнта тертя ґрунту по поверхні стіни в ґрунті R_{int} та модуля деформації ґрунту E і збільшується із зростанням відносної ширини кот-

ловану m та збільшенням інтенсивності рівномірно-розподіленого навантаження на фундаментну плиту q .

Розрахункова схема для висотної будівлі, зміщеної до огорожі котловану, показано на рис. 6, схема скінчено-елементної моделі та граничні умови – на рис. 7.

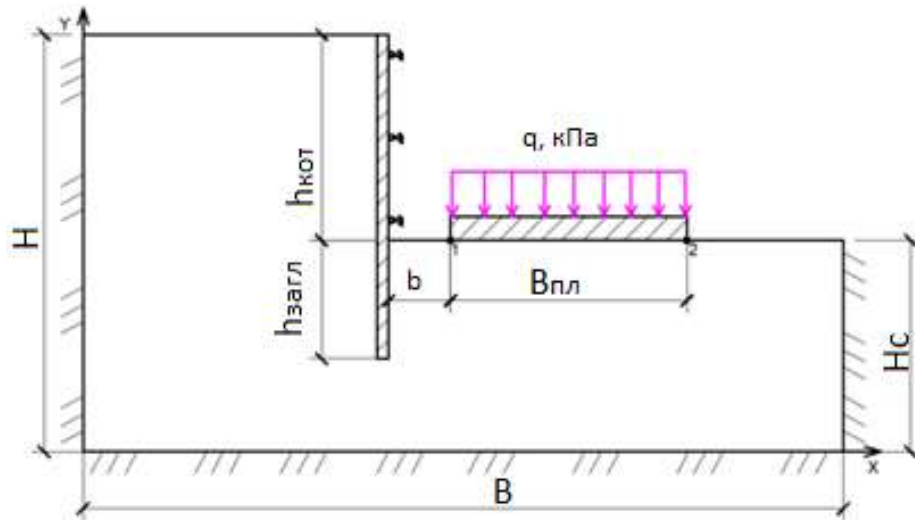


Рис. 6. Розрахункова схема розташування будівлі, яка зміщена щодо огороження котловану
Fig. 6. Rating scheme of the building, which is shifted relative to the sheet-pile wall

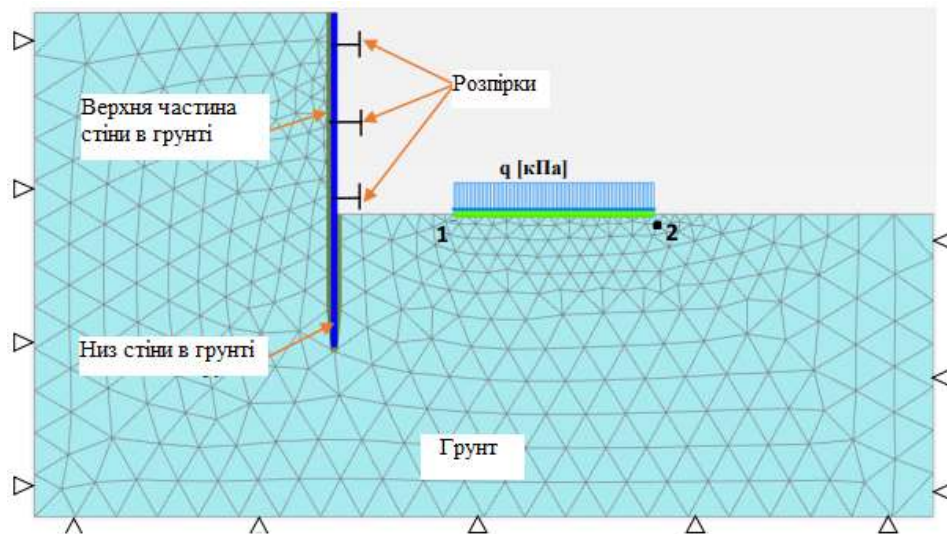


Рис. 7. Схема скінчено-елементної моделі та граничні умови
Fig. 7. Finite element model scheme, boundary conditions

Досліджувався вплив стіни в ґрунті на крен висотної будівлі на плитному фундаменті в залежності від наступних факторів та діапазону їх зміни:

- фактор $m = b/V_{пл}$, $\in [0.1; 0.3; 0.5]$ - відносна відстань від огороження до найближчого краю фундаментної плити;
- фактор $t = h_{загл}/V_{пл}$, $\in [0.5; 0.66; 0.8]$ - відносна глибина заглиблення огороження нижче дна котловану;
- фактор E_0 , $\in [15\text{МПа}; 20\text{МПа}; 25\text{МПа}]$ - модуль деформації ґрунтового масиву;

- фактор q , $\in [300\text{кПа}; 350\text{кПа}; 400\text{кПа}]$ - рівномірно розподілене навантаження на фундаментну плиту, де: b - відстань від огороження котловану до краю фундаментної плити; $V_{пл}$ - ширина фундаментної плити, $V_{пл} = 10,0$ м; $h_{загл}$ - глибина заглиблення стіни в ґрунті нижче дна котловану; $V_{кот}$ - ширина котловану.

Крен висотної будівлі визначалося за формулою:

$$i = \frac{|S_1 + S_2|}{B_{пл}} \leq 0,002, \quad (4)$$

де S_1, S_2 – осадки крайніх точок фундаментної плити.

Приклади мозаїки розподілу деформацій ґрунтової основи показані на рис.8 (при значенні $E=25$ МПа та $q=350$ кПа).

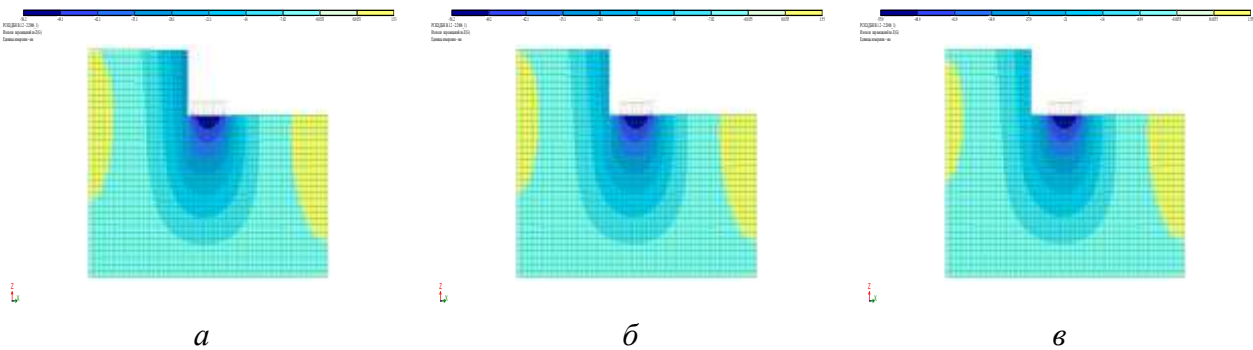


Рис. 8. Мозаїка деформацій ґрунту основи фундаментної плити $E=25$ МПа, $q=350$ кПа та $m = b/B_{пл}$, $\in [0.1; 0.3; 0.5]$:

- a) – значення фактору $m=0,1$;
- б) – значення фактору $m=0,3$;
- в) – значення фактору $m=0,5$

Fig. 8. Mosaic of soil deformations of the foundation slab base $E=25$ МПа, $q=350$ кПа and $m = b/B_{пл}$, $\in [0.1; 0.3; 0.5]$:

- a) – value of the factor $m=0,1$;
- b) – value of the factor $m=0,3$;
- c) – value of the factor $m=0,5$;

Результати виконаних розрахунків в графічному вигляді представлені на рис. 9:

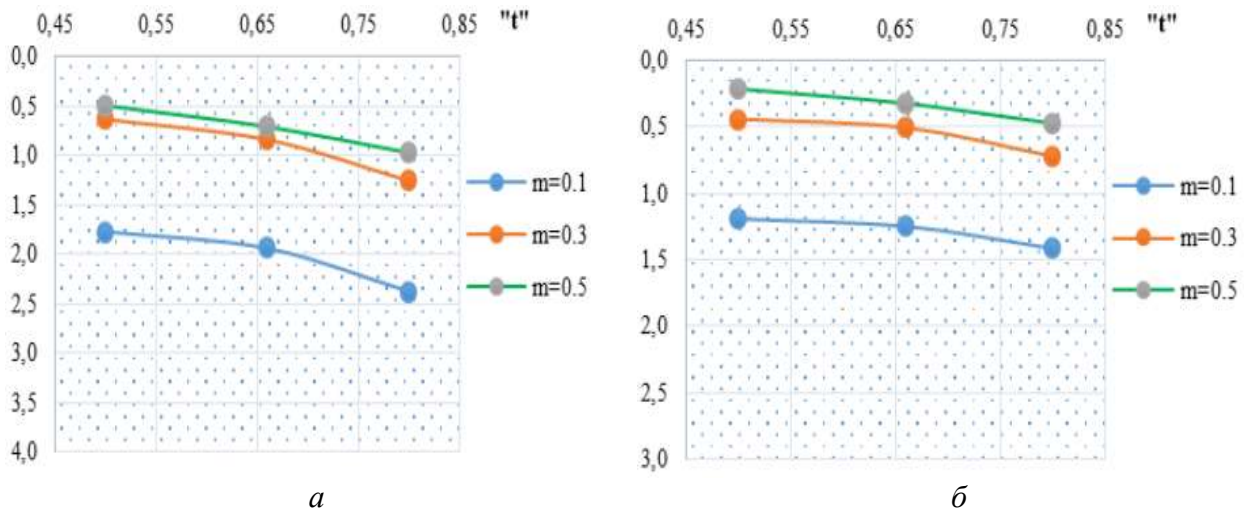


Рис. 9. Графіки залежності:

- a) – $i = f(t)$ для різних значень фактору m при $E=15$ МПа;
- б) – $i = f(t)$ для різних значень фактору m при $q=400$ кПа

Fig. 9. Graphs of the dependence:

- a) – $i = f(t)$ for different values of the factor m at $E=15$ МПа;
- b) – $i = f(t)$ for different values of the factor m at $q=400$ кПа

Графіки показують, що крен висотних будівель зменшується зі збільшенням відстані від стіни в ґрунті до краю плитного фундаменту та модуля деформації ґрунту E , а також збільшується зі збільшенням відносної глибини стіни в ґрунті t нижче дна котловану, коефіцієнта тертя ґрунту на поверхні стіни в ґрунті R_{int} та інтенсивності рівномірно розподіленого навантаження на фундамент q .

Згідно з розрахунками, вплив фактору m на крен будівлі збільшується зі збільшенням глибини заглиблення огорожі в ґрунт нижче дна котловану та коефіцієнта тертя між ґрунтом та бетоном огороження. У виконаних розрахунках максимальне значення крену будівлі отримано при відстані фундаменту від огорожі, що дорівнює 1.0 м ($m = 0.1$) при коефіцієнті тертя між ґрунтом і бетоном, що дорівнює коефіцієнту тертя ґрунту ($R_{int} = 1.0$) і глибині заглиблення огорожі в ґрунт нижче дна котловану, що становить 8.0 м, тобто 0,8 від ширини фундаментної плити ($t = 0,8$). Крен будівлі у цьому випадку склав $i = 0.00272$ при навантаженні $q = 400$ кПа та модулі деформації ґрунту $E = 20$ МПа, що перевищило значення граничного, згідно з рекомендаціями ДБН В.2.1-10:2018 «Основи і фундаменти будівель та споруд».

Зменшенням сил тертя між бетоном і ґрунтом до $R_{int} = 0.2$ при решті факторів m і t без зміни, крен можна знизити до $i = 0.00182$ (зменшення на 49.5%). Зі зменшенням глибини заглиблення огорожі в ґрунт з 8 м до 5 м ($t=0.5$) крен також можна знизити до $i=0.00216$ (на 25.9%).

Представлені дані говорять про те, що змінюючи фактори m , t та R_{int} крен висотної будівлі можна знижувати до нормативних меж.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведене дослідження надало оцінку впливу огорожі котловану у вигляді монолітної залізобетонної стіни в ґрунті траншейного типу на напружено-деформований стан

ґрунтового масиву в основі плитного фундаменту і, як наслідок, на середню осадку та крен висотної будівлі.

Основним фактором, що визначає ступінь впливу стіни в ґрунті на осадку та крен висотної будівлі на плитному фундаменті є його розташування щодо огорожі. У випадку, якщо будівля розташована симетрично щодо огорожі (у центрі котловану), «стіна в ґрунті» впливає тільки на його середню осадку, практично не позначаючись на крені. Якщо будівля зміщена до однієї із сторін огорожі, стіна в ґрунті впливає як на його середню осадку, так і, на крен.

Середня осадка будівлі, що розташована симетрично щодо огороження котловану, зменшується із зменшенням відстані від краю фундаментної плити до огорожі, збільшенням глибини заглиблення огорожі в ґрунт нижче дна котловану та тертя на контакті бетон-ґрунт. Цей вплив залежить від інтенсивності навантаження на фундаментну плиту та модуля деформації ґрунту в її основі. В цілому вплив стіни в ґрунті на крен висотної будівлі при його симетричному розташуванні щодо огороження котловану несуттєвий і може не враховуватися у практичних розрахунках.

При несиметричному розташуванні будівлі біля огорожі її середня осадка збільшується зі збільшенням відстані від краю плитного фундаменту до огорожі та інтенсивності рівномірно-розподіленого навантаження на фундаментну плиту та зменшується зі збільшенням глибини заглиблення огорожі в ґрунт, тертя на контакті бетон-ґрунт та модуля деформації ґрунту основи.

Крен будівлі буде зменшуватися із зменшенням глибини загортання огорожі в ґрунт нижче дна котловану, інтенсивності рівномірно-розподіленого навантаження на фундамент та тертя на контакті бетон-ґрунт.

Найбільший вплив на осадки та крен висотної будівлі має відносна відстань від плитного фундаменту до огороження котловану m .

Цей вплив є суттєвим до $m = 0,5$ (половина ширини фундаментної плити), меншою мірою осадки та крен висотної будівлі

залежать від тертя на контактi «грунт-бетон» та відносноi глибини заглиблення ого-рожі в ґрунт нижче дна котловану.

ЛІТЕРАТУРА

- Kaliukh I., Kosheleva N., Yakovenko I., Dzhalalov M., Kotlyar M. and Bashkirov G.** Monitoring and mathematical modelling of the pit construction impact on the subway tunnels during reconstruction of the Postal Square. *15th Int. Conf. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. Nov. 2021, Vol. 2021. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2064>
- Yakovenko I.A., Bakulin Ye.A., Bakulina V.M.** Classification methods of civil buildings reconstruction. *Theoretical and scientific foundations of engineering: coll. mon. Boston: Primedia eLaunch, 2020. 180 p., pp. 70–96.* URL: <http://isg-konf.com>
- Харр М. Е.** Основи теоретичної механіки ґрунтів. – К.: Вид-во буд., 1971. 320 с.
- Баженов В.А., Цихановский В.К., Кислюк В.М.** Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонки. – К.: КНУБА, 2000. 386 с.
- Цихановський В. К., Костира Н. О., Талах С. М., Жук А. В.** Нелінійна задача граничної рівноваги ґрунтових масивів при взаємодії з огорожувальними конструкціями. *Проблеми розвитку міського середовища: зб. наук. праць.* – К.: НАУ, 2011. – Вип. 5-6. – С. 244-252.
- Зоценко М.Л.** Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: підручник / Зоценко М.Л., Коваленко В.І. та ін. – Полтава: ПНТУБіП, 2003. – 446с.
- Парфентьева І.О.** Основи та фундаменти: навчальний посібник / Парфентьева І.О., Верешко О.В., Гусачук Д.А. – Луцьк: ЛНТУ, 2017. – 296с.
- Барашиков А.Я., Малишев О.М.** Оцінювання технічного стану будівельних та інженерних споруд: навч. посіб. для студ. ВНЗ. Київ, Основа, 2008. 320 с.
- Barabash M. S., Kostyra N. O., Pysarevskiy V. Y.** Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 708.* URL: <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012044>
- Бакулін Є.А., Яковенко І.А., Бакуліна В.М.** Інженерний захист та підготовка територій : навч. посіб. Київ: НУБіП України, 2020. 212 с.
- Костира Н.О., Малишев О.М., Бакуліна В.М.** Особливості технічного обстеження та паспортизації прийнятих в експлуатацію об'єктів будівництва. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research.* 2019. Vol. 10. № 1. P. 165–169. URL: <http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.01.165>
- Barabash M.S.** Some aspects of modelling nonlinear behaviour of reinforced concrete. *Strength of Materials and Theory of Structures.* 2018. Vol. 100. P. 164–171. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omts_2018_100_15
- Барабаш М.С., Костира Н.О., Томашевський А.В.** Визначення напружено-деформованого стану та міцності пошкоджених несучих конструкцій інструментами ПК «ЛІРА-САПР». *Український журнал будівництва та архітектури. Дніпро.* – № 1(007). –2022. –С. 7-14. URL: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.22022.7.827>
- Бакулін Є.А.** Об'ємно-просторові рішення будівель і споруд: навчальний посібник / Бакулін Є.А., Бакуліна В.М., Костира Н.О. – К.: НУБіП України, 2024. – 264с. <https://nubip.edu.ua/node/148110>
- Кріпак, В., Колякова, В., & Шпакова, Г.** (2024). Забезпечення стійкості глибоких котлованів висотних споруд. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (14), 41–56. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.41-56>
- Кріпак, В.** (2023). Комплексний плитно-пальовий фундамент. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (13), 30–40. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.30-40>
- Кріпак, В. & Колякова, В.** (2021). Взаємозалежність конструктивних і розрахункових схем будівлі. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, 1(8), 17–24. <https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.17-24>
- Кір'язев, П., Барабаш, М., & Ромашкіна, М.** (2013). Спосіб чисельного моделювання конструкцій висотної споруди в нелінійній постановці. *Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві.* (25-26), 67–70.
- Барабаш, М., Гензерський, Ю., Покотило, Я.** (2011) Методи мінімізації ймовірності

прогресуючого руйнування висотної будівлі при дії сейсмічних навантажень. *Науково-технічний журнал: Нові технології в будівництві*. (1 21), 17–23.

20. **Bakulin Ye.A.** Calculation methods of retaining walls / Ye.A. Bakulin, V.M. Bakulina, N.O. Kostyra // *Machinery & Energetics*. – 2017. – Vol. 262. – P. 72–87.
<https://technicalscience.com.ua/uk/archive>
 21. **Костира, Н. ., & Бакуліна, В. .** (2022). Особливості технічного обстеження об'єктів прилеглих до існуючої забудови. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*, (12), 105–114.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.105-114>
 22. **Kolchunov V.I., Yakovenko I.A.** About the violation solid effect of reinforced concrete in reconstruction design of textile industry enterprises / V.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti* – 2016 – №3(363). – P. 258–263.
<https://www.researchgate.net/publication/316687268>
 23. **Dem'yanov A., Kolchunov V.I., Iakovenko I. & Kozarez A.** (2019) Load Bearing Capacity Calculation of the System “Reinforced Concrete Beam – Deformable Base” under Torsion with Bending // *E3S Web Conf. Vol. 97, 2019, XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019)*
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704059>
 24. **Бакулін Є.А.** Визначення параметрів напружено-деформованого стану споруди башти силосу та її конструктивних елементів за наслідками руйнування / Є.А. Бакулін, І.А. Яковенко, В.М. Бакуліна // *Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention : collective monograph*. – Riga : Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2022. – P. 1–43.
<https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-1>
 25. **Pershakov V.** Structural systems of high-rise buildings / V.Pershakov, Y. Bakulin, S. Bilyk, O. Pylypenko // *Proceedings of the National Aviation University*. – 2020. – №2. – P. 54-62.
<https://doi.org/10.18372/2306-1472.83.14644>
- the subway tunnels during reconstruction of the Postal Square. In *15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). EAGE Publications BV.
<https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K2064>
2. **Yakovenko, I.A., Bakulin, Ye.A. & Bakulina, V.M.** (2020). Classification methods of civil buildings reconstruction/Theoretical and scientific foundations of engineering: collective monograph / Apostolova R. *Shembel E., Aurbach D., Markovsky B., – etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 180, 70-96.*
<http://isg-konf.com>
 3. **Kharr M. E.** *Osnovy teoretychnoi mekhaniky gruntiv*. – K.: Vyd-vo bud., 1971. 320 s.
 4. **Bazhenov V.A., Tsykhanovskiy V.K., Kyslokyi V.M.** *Metod skinchennykh elementiv u zadachakh nelineinoho deformuvannya tonkykh ta miakykh obolonok*. – K.: *KNUBA, 2000. 386 s.*
 5. **Tsykhanovskiy V.K., Kostyra N.O., Talakh S. M., Zhuk A.V.** *Nelineinina zadacha hranych-noi rivnovahy gruntovykh masyviv pry vzaiemodii z ohorodzhuvalnymy konstruktsi-iamy. Problemy rozvytku miskoho seredovyscha: zb. nauk. prats. – K.: NAU, 2011. – Vyp. 5-6. – S. 244-252.*
 6. **Zotsenko M.L.** *Inzhenerna heolohiia. Mekhanika gruntiv, osnovy i fundamenty: pidruchnyk / Zotsenko M.L., Kovalenko V.I. ta in. – Poltava: PNTUBiP, 2003. – 446s.*
 7. **Parfentieva I.O.** *Osnovy ta fundamenty: navchalnyi posibnyk / Parfentieva I.O., Vereshko O.V., Husachuk D.A. – Lutsk: LNTU, 2017. – 296s.*
 8. **Barashykov A.Ia., Malyshev O.M.** *Otsiniuvannya tekhnichnoho stanu budivelnykh ta inzhenernykh sporud: navch. posib. dlia stud. VNZ. Kyiv, Osnova, 2008. 320 s.*
 9. **Barabash M. S., Kostyra N. O., Pysarevskiy B. Y.** *Strength-strain state of the structures with consideration of the technical condition and changes in intensity of seismic loads IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 708.- URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012044 http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PolNTU/5380*
 10. **Bakulin Ye.A., Yakovenko I.A., Bakulina V.M.** *Inzhenernyi zakhyst ta pidhotovka terytorii : navch. posib. Kyiv: NUBiP Ukrainy, 2020. 212 s.*
 11. **Kostyra N.O., Malyshev O.M., Bakulina V.M.** *Osoblyvosti tekhnichnoho obstezhennia ta pasportyzatsii pryiniatykh v ekspluatatsiiu obiektiv*

REFERENCES

1. **Kaliukh, I., Kosheleva, N., Yakovenko, I., Dzhahalov, M., Kotlyar, M., & Bashkirov, G.** (2021, November). Monitoring and mathematical modelling of the pit construction impact on

- budivnytstva. *Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research*. 2019. Vol. 10. № 1. P. 165–169.
<http://dx.doi.org/10.31548/machenergy2019.01.165>
12. **Barabash, M.** (2018). Some aspects of modeling nonlinear behavior of reinforced concrete. *Resistance of materials and theory of structures*, (100), 164-171.
http://nbuv.gov.ua/UJRN/omts_2018_100_15
13. **Barabash M.S., Kostyra N.O., Tomashevskiy A.V.** Vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu ta mitsnosti poshkodzhenykh nesuchykh konstruksii instrumentamy PK «LIRA-SAPR». *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury. Dnipro*. – № 1(007). – 2022. –S. 7-14.
<https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.22022.7.827>
14. **Bakulin Ye.A.** Obiemo-prostorovi rishennia budivel i sporud: *navchalnyi posibnyk* / Bakulin Ye.A., Bakulina V.M., Kostyra N.O. – K.: NUBiP Ukrainy, 2024. – 264s.
<https://nubip.edu.ua/node/148110>
15. **Kripak, V., Koliakova, V., & Shpakova, H.** (2024). Zabezpechennia stiikosti hlybokyykh kotlovaniv vysotnykh sporud. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (14), 41–56.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.14.2024.41-56>
16. **Kripak, V.** (2023). Kompleksnyi plytno-palovyi fundament. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, (13), 30–40.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.13.2023.30-40>
17. **Kripak, V. & Koliakova, V.** (2021). Vzaiemozalezhnist konstruktivnykh i rozrakhunkovykh skhem budivli. *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*, 1(8), 17–24.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.8.2021.17-24>
18. **Kiriazev, P., Barabash, M., & Romashkina, M.** (2013). Sposib chyselnoho modeliuвання konstruksii vysotnoi sporudy v neliniinii postanovtsi. *Naukovo-tekhnichnyi zhurnal: Novi tekhnologii v budivnytstvi*. (25-26), 67–70.
19. **Barabash, M., Henzerskyi, Yu., Pokotylo, Ya.** (2011) Metody minimizatsii imovirnosti prohresuiuchoho ruinovannia vysotnoi budivli pry dii seismichnykh navantazhen. *Naukovo-tekhnichnyi zhurnal: Novi tekhnologii v budivnytstvi*. (1 21), 17–23.
20. **Bakulin Ye.A.** Calculation methods of retaining walls / Ye.A. Bakulin, V.M. Bakulina, N.O. Kostyra // *Machinery & Energetics*. – 2017. – Vol. 262. – P. 72–87.
<https://technicalscience.com.ua/uk/archive>
21. **Kostyra N. & Bakulina V.** (2022) Osoblyvosti tekhnichnoho obstezhennia ob'ektiv prylehlykh do isnuiuchoi zabudovy *Budivelni konstruksii. Teoriia i praktyka*. (12). – S. 105–114.
<https://doi.org/10.32347/2522-4182.12.2023.105-114>
22. **Kolchunov V.I., Yakovenko I.A.** About the violation solid effect of reinforced concrete in reconstruction design of textile industry enterprises / V.I. Kolchunov, I.A. Yakovenko // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti – 2016 – №3(363)*. – P. 258–263.
<https://www.researchgate.net/publication/316687268>
23. **Dem'yanov A., Kolchunov V.I., Iakovenko I. & A. Kozarez** (2019) Load Bearing Capacity Calculation of the System “Reinforced Concrete Beam – Deformable Base” under Torsion with Bending // *E3S Web Conf. Vol. 97, 2019, XXII International Scientific Conference “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2019)*
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704059>
24. **Bakulin Ye.A.** Vyznachennia parametriv napruzhenno-deformovanoho stanu sporudy bashty sylosu ta yii konstruktivnykh elementiv za naslidkamy ruinovannia / Ye.A. Bakulin, I.A. Yakovenko, V.M. Bakulina // *Achievements of Ukraine and EU countries in technological innovations and invention : collective monograph*. – Riga : Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2022. – R. 1–43.
<https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-1>
25. **Pershakov V.** Structural systems of high-rise buildings / V.Pershakov, Y. Bakulin, S. Bilyk, O. Pylypenko // *Proceedings of the National Aviation University*. – 2020. – №2. –P. 54-62.
<https://doi.org/10.18372/2306-1472.83.14644>

STRESS-STRAIN STATE OF HIGH-RISE BUILDING FOUNDATION WHEN CONSTRUCTING A SHEET-PILE WALL

*Nataliia KOSTYRA
Valentina BAKULINA*

Abstract. In modern construction practice, when constructing deep pits in complex engineering-geological and hydrogeological conditions, sheet-pile walls are often used in the form of a monolithic reinforced concrete wall in soil. Compared to other structural types of fences, the sheet-pile wall in the soil has a number of advantages, such as the possibility of its installation in almost any engineering-geological and hydrogeological conditions of construction sites, reliable protection of the pit from flooding during its high-quality performance of works, and increased rigidity. However, the construction of the sheet-pile wall in the soil of this type has a significant impact on the stress-strain state of the soil massif containing it, which negatively affects not only the surrounding buildings, which manifests itself in the form of its additional settlement, but also leads to uneven deformations of the soil massif at the base of slab foundations of high-rise buildings, which are erected, increasing their tilt.

But if in recent years a number of works have been devoted to the study of the impact of the installation of a wall in the soil on the additional subsidence of buildings in the surrounding development,

which made it possible to establish the regularities of their development and develop effective protective measures, then the effect of the wall in the soil on settlement and tilting, buildings that erected in pits has practically not been studied, and their correct assessment is especially important during the construction of high-rise buildings, the tilts of which are strictly limited by current regulatory documents.

In view of this, as well as in connection with the volume of construction of high-rise buildings, which is constantly increasing, the implementation of studies aimed at studying the influence of a pit sheet-pile wall in the form of a monolithic reinforced concrete wall in a soil on the settlements and tilts of high-rise buildings on a slab foundation with the aim of increasing the accuracy of their calculation should be considered an actual geotechnical task.

The degree of influence of the distance from the sheet-pile wall to the edge of the slab, the depth of the wall into the soil below the bottom of the pit, the contact conditions of the soil massif from the side of the pit with the surface of the fence (soil-concrete), the deformation characteristics of the base and the load on the average settlements and tilts of high-rise buildings on slab foundations were studied.

Keywords: stress-strain state; sheet-pile wall; pit; foundation slab; settlement; tilt.

Стаття надійшла до редакції 29.07.2024