

Дослідження напруженого стану основи палювих фундаментів

Олег МАЛИШЕВ¹, Андрій РАЩЕНКО²

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, просп. Повітряних Сил, Київ, Україна, 03037,

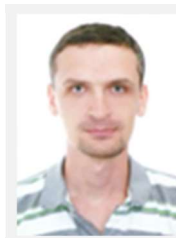
¹ malyshev.ov@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2804-6217>

² raschenko.am@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-2948-3232>

Анотація. У статті досліджено вплив схеми розміщення паль в плані на просторовий характер розподілу вертикальних напружень у ґрунтовій основі, що виникають при роботі палювих фундаментів. Показано, що наявна технічна, методична та нормативна база, зокрема положення ДБН В.2.1-10-2009 (Зміна 1) (ДБН В.2.1-10-2009) містить низку обмежень, які суттєво знижують точність розрахунків. До таких недоліків належать: застосування усереднених табличних значень опору ґрунту, ігнорування просторової неоднорідності масиву, походження ґрунтів, тиску обтиснення при зануренні палі, а також використання показників ґрунтів, отриманих переважно за результатами дорогих польових випробувань.

Додатково в процесі влаштування паль квадратного поперечного перерізу вдавлюванням чи забиванням спостерігається їх поворот в палювому куці, що пояснюється різним характером розподілу напружень в ґрунтовому середовищі в різних перпендикулярних до осі палі напрямках. Це також впливає і на розподіл напружень і як результат деформації основи в процесі взаємодії палювого фундаменту з основою під навантаженням.

У межах роботи представлено результати аналітичного дослідження розподілу вертикальних напружень у ґрунтовому масиві в зоні під нижнім кінцем вдавлюваних паль розміром 30×30 см при їх різному розміщенні в плані. Математичне моделювання виконано на основі методики, розробленої кафедрою геотехніки КНУБА, яка дозволяє визначати напружено-деформований стан основи палі з урахуванням окремого впливу навантажень, що передаються бічною поверхнею та нижнім кінцем.



Олег МАЛИШЕВ
доцент кафедри
геотехніки
к.т.н., доц.



Андрій РАЩЕНКО
ст. викладач кафедри
геотехніки

У роботі розглянуто як поведінку одиночної палі, так і палювого куца, що складається з двох паль, із різним варіантом їх взаємного розміщення. Побудовано графіки розподілу вертикальних напружень у горизонтальній площині нижче вістря паль, які відображають складну просторову структуру зон напруженого стану.

Проведено порівняльний аналіз геометричних характеристик умовних фундаментів, визначених на основі класичних теоретичних підходів і сучасних аналітичних моделей. Результати дослідження розкривають складний механізм взаємодії системи «палія–ґрунт» і можуть бути науковою базою для уточнення та вдосконалення розрахункових методик проектування палювих фундаментів із урахуванням просторових ефектів та впливу конфігурації палювого куца.

Ключові слова. Основа, палія, куц палі, поперечний переріз, напруження, несуча здатність, умовний фундамент.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Сучасне будівництво характеризується високими темпами розвитку технологій, розширенням виробничих можливостей і впровадженням нових конструктивних рішень (Цимбал та ін., 2010). Водночас оновлення та вдосконалення існуючих методів інженерних розрахунків, зокрема у сфері геотехніки відбувається набагато повільніше. Така невідповідність між розвитком практичної будівельної галузі та нормативно-методичним забезпеченням стримує інтеграцію інноваційних технологій у проєктну практику, ускладнює ефективне застосування сучасних інженерних підходів і знижує загальну якість техніко-економічного обґрунтування рішень.

Одним із прикладів вказаної проблеми є розрахунок пальових фундаментів — зокрема, визначення їх несучої здатності та прогнозування деформацій ґрунтової основи відповідно до вимог ДБН В.2.1-10-2009 (Зміна 1) (ДБН В.2.1-10-2009). Аналіз положень нормативу засвідчує, що приведена методика не враховує низки суттєвих факторів, які мають вирішальний вплив на точність результатів розрахунку. До таких обмежень належать: застосування усереднених табличних значень опору ґрунту як під нижнім торцем палі, так і вздовж її бічної поверхні; ігнорування фактичного стану ґрунту по довжині палі, його геологічного походження та реальних умов ущільнення при зануренні; неможливість використання деформаційних характеристик ґрунтів, здобутих переважно з польових випробувань, які потребують значних фінансових витрат; а також відсутність урахування просторового розподілу напружень у ґрунтовому масиві (Малишев, 2015).

Особливо актуальною проблемою є те, що при проєктуванні пальових фундаментів часто нехтують впливом геометричних параметрів самих паль, зокрема — формою їх поперечного перерізу. Між тим, саме цей чинник суттєво впливає на характер розподілу напружень у зоні взаємодії палі з основою. Залежність напружено-деформованого стану ґрунту не лише від властивостей ґрунтового середовища, а й від геометрії палі вимагає більш глибокого дослідження та врахування при розрахунках.

У зв'язку з вищезазначеним, актуальним є створення нової або істотне вдосконалення наявної методики розрахунку паль і пальових фундаментів за першою та другою групою граничних станів (Карпюк, 2004), яка б враховувала просторові особливості роботи паль у ґрунтовій основі, а також вплив конфігурації поперечного перерізу та розміщення паль у плані.

МЕТА РОБОТИ

Аналіз впливу просторового розташування паль у плані на напружено-деформований стан ґрунтової основи шляхом використання результатів моделювання розподілу напружень в основі одиночної висячої палі та куців із двох паль квадратного поперечного перерізу з глибиною залежно від кута повороту паль у плані.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження просторового розподілу вертикальних напружень у ґрунтовій основі під пальовим фундаментом, сформованим із забивних висячих паль квадратного поперечного перерізу, були використані інженерно-геологічні умови одного з будівельних майданчиків Київської області

(Малишев, 2015), характеристики яких подано в таблиці 1.

У якості теоретичної основи дослідження використано підхід, викладений у роботі (Малишев, 2012), який передбачає застосування математичної моделі для опису розподілу напружень у ґрунтовому середовищі, спричинених навантаженням, що передаються як через бічну поверхню палі, так і через її нижній торець. Модель

дозволяє визначати напружений стан у будь-якій точці основи на довільній глибині. У спрощеному вигляді відповідні розрахункові залежності наведено у виразах (1) та (2).

$$\sigma_{zB} = \frac{5P_B}{\pi(r_B+k_2z_1)^2} \left[1 - \frac{x^2}{(r_B+k_2z_1)^2} \right]^4 \quad (1)$$

$$\sigma_{z0} = \frac{6P_0}{\pi(r_0+k_1(h+z_0))^2} \left[1 - \frac{x}{r_0+k_1(h+z_0)} \right]^2 \quad (2)$$

Табл. 1. Інженерно-геологічні умови дослідного майданчика

Table 1. Engineering geological conditions of the research site

Номер ІГЕ	Характеристика інженерно-геологічного елемента	Природна щільність ґрунту, ρ , т/м ³	Природна вологість, W	Коефіцієнт пористості, e	Питоме зчеплення, c_n , кПа	Кут внутрішнього тертя, ϕ_n , °	Модуль деформації, E, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
1a	Пісок мілкий, світло-сірий, середньої щільності, малого ступеню водонасичення	1,69	0,064	0,67	1	34	25
1б	Пісок мілкий, світло-сірий, середньої щільності, середнього ступеню водонасичення та насичений водою	1,9	$\frac{0,64}{0,212}$	0,68	2	33	26
1в	Пісок мілкий, світло-сірий, щільний, насичений водою	2,03	0,212	0,58	3	36	37

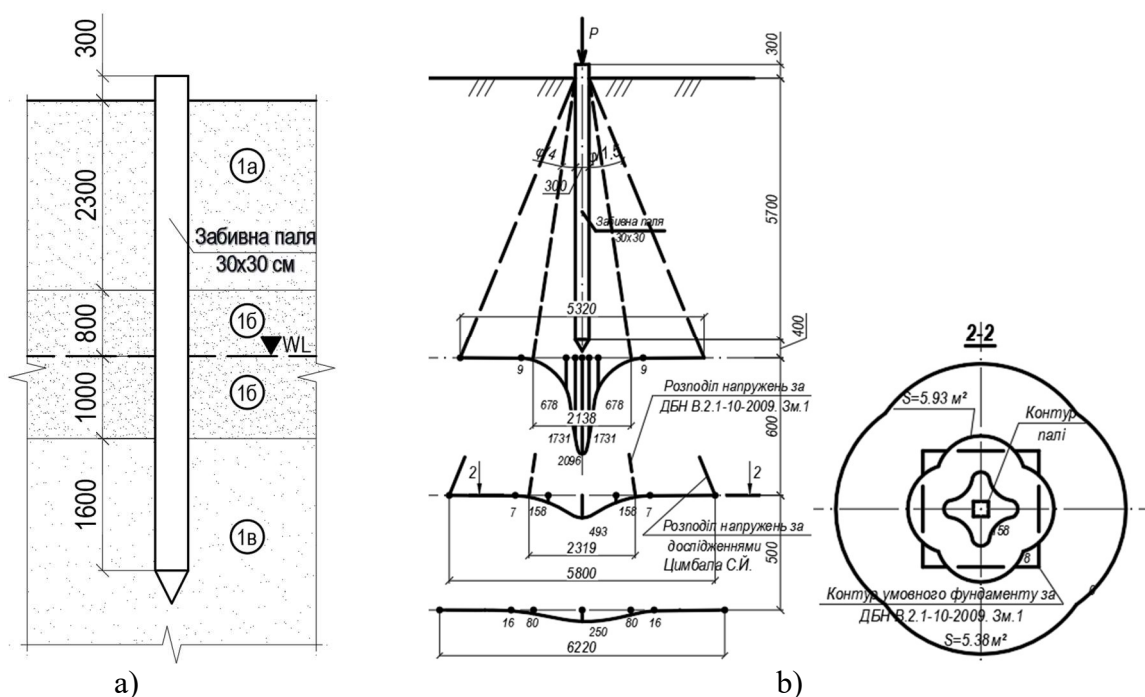


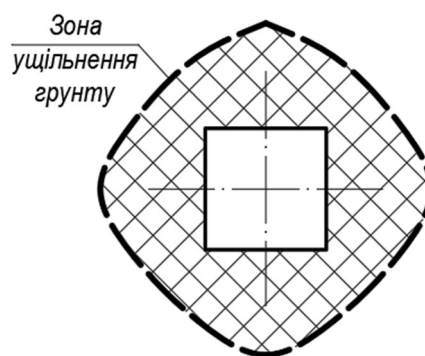
Рис.1. Посадка квадратної палі на геологічний розріз (а) та характер розподілу напружень в основі (б)
Fig.1. Square pile landing on a geological section (a) and stress distribution in the base (b)

Розглянута математична модель була розроблена для розрахунку напружень в основі палі із круглим поперечним перерізом. Результати її застосування свідчать про високу ефективність у визначенні деформацій ґрунтової основи в порівнянні з класичними літературними та нормативними методами (Цимбал та ін., 2014).

Посадка палі на геологічний розріз, а також побудова характеру розподілу напружень в основі палі приведено на рис. 1.



а)



б)

Рис.2. Зони ущільнення ґрунту навколо палі в польових умовах (а) та відображені в плані (б)
Fig.2. Soil compaction zones around a square pile in the field (a) and displayed on the plan (b)

Водночас, як показують дослідження роботи С.Й. Цимбала (Цимбал та ін., 2011), розподіл вертикальних напружень під вістря палі, експериментально досліджений у польових та лабораторних умовах, має свої особливості. Зокрема, процес ущільнення та переміщення ґрунту в зоні вістря палі характеризується не концентричними колами, властивими для круглої палі, а формою, що відповідає квадратному обрису зі скругленими кутами (див. рис. 2).

Для дослідження характеру розподілу напружень в основі пального фундаменту обрано куц із двох палі квадратного поперечного перерізу 30x30 см та два види їх розміщення в план, з різницею в повороті палі навколо своєї осі на 45 градусів при збереженні свого початкового положення.

© О. Малишев, А. Ращенко

Опубліковано Київським Національним університетом будівництва і архітектури

Для коректного відображення особливостей розподілу напружень в основі квадратної палі використовується аналітична методика, описана в роботі С.Й. Цимбала (Цимбал та ін., 2011). Запропонований алгоритм дозволяє відтворити характер просторового розподілу напружень при передачі навантаження через вістря та бічну поверхню палі з високим ступенем збіжності теоретичних розрахунків та експериментальних даних. Це сприяє більш точному моделюванню реальної взаємодії палі з ґрунтовою основою.

Для проведення дослідження за методикою (Малишев, 2012) визначено величину навантаження величиною в 750 кН, прикладання якого до голови кожної палі викликало осідання величиною 20 мм. Результати побудови напружень, що виникають в процесі деформації основи квадратних палі показано на рис. 3, 4.

Результати моделювання підтверджують складну просторову структуру розподілу вертикальних напружень у ґрунтовому середовищі нижче вістря палі. Встановлено, що форма зон напруженого стану в площині, перпендикулярній до осі палі, є нерівномірною та асиметричною. Така конфігурація відповідає даним, отриманим у результаті експериментальних польових досліджень, що свідчить про достовірність застосованої моделі.

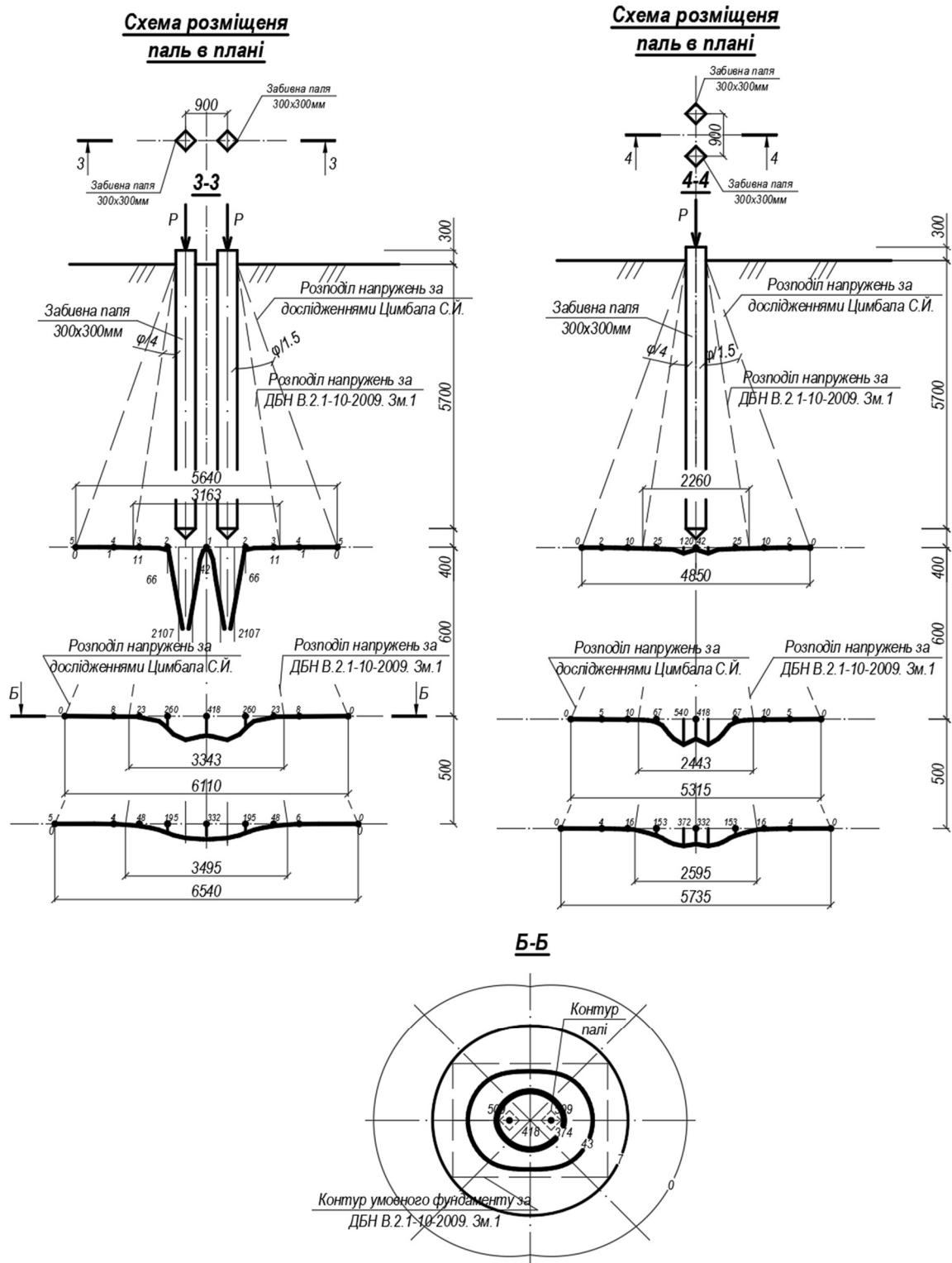


Рис.4. Характер розподілу напружень (кПа) на глибині 400, 1000 та 1500 мм від нижнього кінця квадратних палів при повороті палі навколо своєї осі на 45 градусів
 Fig.4. Character of stress distribution (kPa) at a depth of 400, 1000 and 1500 mm from the lower end of square piles when the pile is rotated around its axis by 45 degrees

У всіх представлених перерізах спостерігається зростання величини напружень у зоні, розташованій безпосередньо під нижнім кінцем палі, з досягненням пікових значень на глибині до 1 м. Подальше збільшення глибини супроводжується поступовим зменшенням напружень до рівня природного напруженого стану ґрунту.

На глибині 400 мм спостерігається різний характер розподілу вертикальних напружень по перерізах 2-2 та 4-4. У

перерізі 2-2 він має параболічну форму, тоді як у перерізі 4-4 — сідлоподібну. При цьому відзначено зменшення пікового значення напружень на 76 % у разі повороту паль на 45° у плані.

У перерізах 1-1 та 3-3 характер розподілу напружень є подібним: спостерігаються однакові максимальні значення пікових напружень. Водночас для перерізу 4-4, що проходить через центр ваги куща паль, напруження практично зникають, наближаючись до нуля.

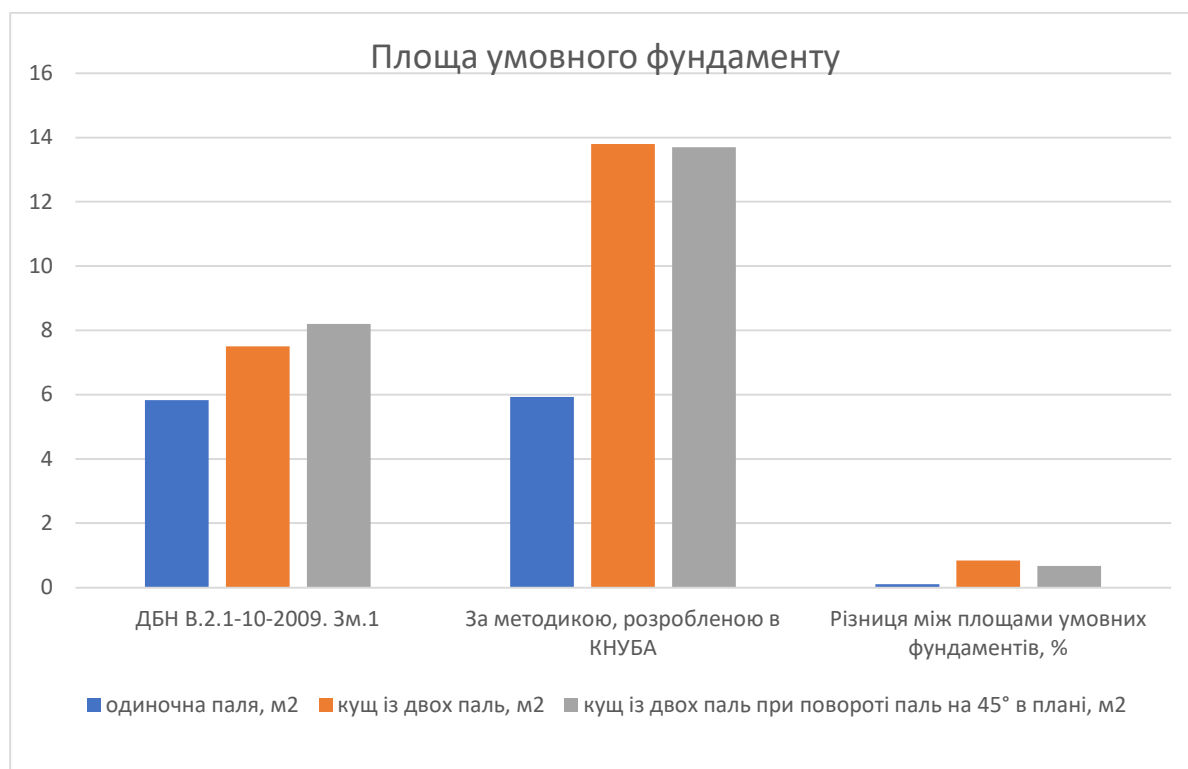


Рис.5. Порівняння площ умовних фундаментів на глибині 1000 мм. від нижнього кінця палі для одиночної палі, куща із двох паль при їх різному положенні в плані

Fig.5. Comparison of the areas of conditional foundations at a depth of 1000 mm from the lower end of the pile for a single pile, a bush of two piles with their different positions in the plan

На глибині 1000 мм (рис. 5) форма розподілу напружень змінюється залежно від положення паль у плані: при стандартному розташуванні спостерігається параболічна форма, тоді як при повороті паль на 45° формується сідлоподібна епюра. У результаті порівняння перерізів 2-2 та 4-4 виявлено зниження пікових напружень на 18 %, а для перерізів 1-1 та 3-3 — на 23 %. Крім того, у перерізі 4-4 напруження поширюються на більшу ширину в

горизонтальному напрямку порівняно з перерізом 2-2, тоді як у перерізі 3-3 зона розподілу напружень вужча, ніж у 1-1. Це свідчить про розширення області впливу напружень у напрямку, перпендикулярному до осі фундаменту, що сприяє їх більш рівномірному розподілу в горизонтальній площині.

На глибині 1500 мм параболічна форма епюри напружень зберігається у перерізі 2-2, тоді як у перерізі 4-4 вона знову набуває

сідлоподібного вигляду. Різниця між максимальними значеннями напружень у цих перерізах становить 9 %. Для перерізів 1-1 та 3-3 характер розподілу також залишається параболічним, проте фіксується різниця у значеннях на рівні 19 %. При цьому в перерізі 3-3 зона поширення напружень у горизонтальному напрямку є меншою. Загалом для всіх перерізів на глибині 1500 мм характерним є зниження величин напружень при повороті паль на 45° у плані.

Крім того, на глибині 1000 мм від вістря палі проведено визначення площі умовного фундаменту за двома підходами. Згідно з нормативною методикою (ДБН В.2.1-10-2009), яка базується на розподілі напружень під кутом $\varphi/4$, площа умовного фундаменту становить 7,5 м². Водночас, за удосконаленим підходом, запропонованим у роботі (Цимбал та ін., 2011) з урахуванням фактичної форми розподілу напружень (кут $\varphi/1.5$), площа умовного фундаменту збільшується до 13,8 м² для стандартного положення паль і до 13,7 м² при їх повороті на 45° (рис. 5).

Порівняльний аналіз результатів розрахунку площі умовного фундаменту засвідчив наявність суттєвих розбіжностей між значеннями, отриманими за методикою, регламентованою ДБН В.2.1-10-2009. Зміна 1 (ДБН В.2.1-10-2009), та результатами, отриманими за методом, розробленим на кафедрі геотехніки КНУБА. Зокрема, для одиночної палі площа умовного фундаменту, розрахована за нормативною методикою, виявилася на 10 % більшою, ніж за аналітичним методом. Для куца з двох паль ці розбіжності є ще більшими: при стандартному розташуванні паль площа за ДБН перевищує уточнене значення на 84%, а при повороті паль на 45° — на 67%.

Такі результати свідчать про те, що визначення площі умовного фундаменту відповідно до нормативної та технічної літератури може призводити до суттєвих відхилень від реальних значень напруженого стану ґрунтової основи. Це, у свою чергу, знижує точність розрахунків деформацій та ефективності

конструктивних рішень при проектуванні пальових фундаментів, особливо в умовах складної просторової взаємодії палі з ґрунтом.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Побудовано та проаналізовано просторовий розподіл вертикальних напружень у ґрунтовому середовищі під нижнім кінцем забивної одиночної палі квадратного поперечного перерізу, а також куца з двох паль при різному їх розташуванні в плані (зокрема при повороті на 45°), з урахуванням фізико-механічного стану навколишнього ґрунту та його походження.

2. Встановлено, що поворот паль на 45° у складі палійного куца сприяє зменшенню пікових значень вертикальних напружень до 76 % порівняно зі стандартним положенням. Окрім цього, спостерігається більш рівномірний розподіл напружень у горизонтальній площині, що позитивно впливає на роботу основи.

3. Виявлено суттєві розбіжності між площею умовного фундаменту, визначеною за методикою ДБН В.2.1-10-2009 (Зміна 1), та площею, розрахованою з урахуванням просторового розподілу напружень відповідно до аналітичної моделі кафедри. Зокрема, для одиночної палі відмінність становить 10 %, для куца з двох паль у стандартному положенні — 84 %, а при повороті паль на 45° — 67 %. Це вказує на обмеження нормативного підходу щодо адекватності відображення реальних умов роботи фундаментів.

4. Результати аналітичних досліджень демонструють добру збіжність з експериментальними даними, що підтверджує достовірність застосованої математичної моделі.

5. Отримані результати підкреслюють необхідність урахування реального характеру розподілу напружень при конструюванні та розрахунку пальових фундаментів за несучою здатністю й деформаційними характеристиками основи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. Зміна №1: ДБН В.2.1-10-2009 [Чинний від 2011-07-01]. К.: Укрархбудінформ, 2011. 55 с.
2. Малишев, О. В. (2015). Розподіл вертикальних напружень в основі забивних паль круглого поперечного перерізу. *Основи та фундаменти*, 37, 329–339.
3. Малишев, О. В. (2012). Осідання одиночних вдавлюваних паль. *Галузеве машинобудування, будівництво*, 2(4), 138–143.
4. Цимбал, С. Й., & Малишев, О. В. (2011). Особливості утворення ущільнених зон ґрунту навколо бічної поверхні вдавлюваних паль. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 87, 99–108.
5. Цимбал, С. Й., Малишев, О. В., & Бугримов, В. М. (2014). Розрахунок пальового фундаменту із таврових паль за деформаціями основи. *Основи та фундаменти*, 35, 102–114.
6. Карпюк, І. А. (2004). *Особливості взаємодії паль, заглублених вдавлюванням, з ґрунтом основи* (Автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.23.02 «Підвалини та фундаменти»).
7. Цимбал, С. Й., & Малишев, О. В. (2010). Експериментальні польові дослідження вдавлюваних паль таврового поперечного перерізу. *Техніка будівництва*, 25, 77–81.
8. Малишев, О. В. (2015). Розподіл вертикальних напружень в основі забивних паль круглого поперечного перерізу. *Основи та фундаменти*, 37, 329–339. (in Ukrainian).
9. Малишев, О. В. (2012). Осідання одиночних вдавлюваних паль. *Галузеве машинобудування, будівництво*, 2(4), 138–143. (in Ukrainian).
10. Цимбал, С. Й., & Малишев, О. В. (2011). Особливості утворення ущільнених зон ґрунту навколо бічної поверхні вдавлюваних паль. *Опір матеріалів і теорія споруд*, 87, 99–108. (in Ukrainian).
11. Цимбал, С. Й., Малишев, О. В., & Бугримов, В. М. (2014). Розрахунок пальового фундаменту із таврових паль за деформаціями основи. *Основи та фундаменти*, 35, 102–114. (in Ukrainian).
12. Карпюк, І. А. (2004). *Особливості взаємодії паль, заглублених вдавлюванням, з ґрунтом основи* (Автореф. дис. канд. техн. наук, спец. 05.23.02 «Підвалини та фундаменти»). (in Ukrainian).
13. Цимбал, С. Й., & Малишев, О. В. (2010). Експериментальні польові дослідження вдавлюваних паль таврового поперечного перерізу. *Техніка будівництва*, 25, 77–81. (in Ukrainian).
14. Tsymbal, S. Y., Malyshev, O. V., & Buhrymov, V. M. (2014). Rozrakhunok pal'ovoho fundamentu iz tavyrovykh pal za deformatsiiami osnovy [Design of pile foundation with T-shaped piles according to foundation deformations]. *Osnovy ta fundamenti*, 35, 102–114. (in Ukrainian).
15. Karpiuk, I. A. (2004). Osoblyvosti vzaiemodii pal, zahlyblyenykh vdavlyuvanniam, z gruntom osnovy [Features of interaction of piles driven into the foundation soil] (Avtoref. dys. kand. tekhn. nauk, spets. 05.23.02 «Pidvalyny ta fundamenti»). (in Ukrainian).
16. Tsymbal, S. Y., & Malyshev, O. V. (2010). Eksperymentalni pol'ovi doslidzhennia vdavlyuvanykh pal tavyrovoho poperechnoho pererizu [Experimental field research of T-shaped driven piles]. *Tekhnika budivnytstva*, 25, 77–81. (in Ukrainian).

Study of the stress state of the pile foundation base

Oleg MALYSHEV
Andriy RASCHENKO

Summary. The article investigates the influence of the pile placement scheme in the plan on the spatial nature of the distribution of vertical stresses in the soil base that arise during the operation of pile foundations. It is shown that the existing technical, methodological and regulatory framework, in particular the provisions of DBN V.2.1-10-2009, contains a number of limitations that significantly reduce the accuracy of calculations. Such shortcomings include: the use of averaged tabular values of soil resistance, ignoring the spatial heterogeneity of the massif, the origin of soils, the compression pressure during pile immersion, as well as the use of soil indicators obtained mainly from the results of expensive field tests.

Additionally, in the process of installing square cross-section piles by pressing or driving, their rotation in the pile bush is observed, which is explained by the different nature of the distribution of stresses in the soil environment in different directions perpendicular to the pile axis. This also affects the distribution of stresses and as a result of the deformation of the base in the process of interaction of the pile foundation with the base under load.

The work presents the results of an analytical study of the distribution of vertical stresses in the soil mass in the area under the lower end of the

REFERENCES

1. *Osnovy ta fundamenti sporud. Osnovni polozhennya proektuvannya. Zmina №1: DBN V.2.1-10-2009. - [Chynnyu vid 2011-07-01]. - K.: Ukrarkhbudinform, 2011. – 55 p. (in Ukrainian).*
2. Malyshev, O. V. (2015). Rozpodil vertykalnykh napruzhen v osnovi zabivnykh pal krugloho poperechnoho pererizu [Distribution of vertical stresses in the foundation of driven piles with circular cross-section]. *Osnovy ta fundamenti*, 37, 329–339. (in Ukrainian).
3. Malyshev, O. V. (2012). Osidannia ody-nochnykh vdavlyuvanykh pal [Settlement of single driven piles]. *Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo*, 2(4), 138–143. (in Ukrainian).
4. Tsymbal, S. Y., & Malyshev, O. V. (2011). Osoblyvosti utvorennia ushchilnennykh zon gruntu navkolo bichnoi poverkhni vdavlyuvanykh pal [Features of formation of compacted soil zones around the lateral surface

pressed piles measuring 30×30 cm with their different placement in the plan. Mathematical modeling was performed based on the methodology developed by the Department of Geotechnics of the KNUBA, which allows determining the stress-strain state of the pile base taking into account the separate influence of loads transmitted by the lateral surface and the lower end. This technique confirms its effectiveness in comparison with experimental results obtained during field and laboratory tests of different types of soils - sandy and clayey.

The work considers both the behavior of a single pile and a pile bush consisting of two piles, with different options for their mutual placement. Graphs of the distribution of vertical stresses in the horizontal plane below the pile tip are constructed, which reflect the complex spatial structure of the stress state zones.

A comparative analysis of the geometric characteristics of conditional foundations, determined on the basis of classical theoretical approaches and modern analytical models, is carried out. The results of the study reveal the complex mechanism of interaction of the "pile-soil" system and can serve as a scientific basis for specifying and improving the calculation methods for designing pile foundations, taking into account spatial effects and the influence of the pile bush configuration.

Keywords. Foundation, pile, pile cluster, cross-section, stress, bearing capacity, conditional foundation.

Стаття надійшла до видання:

09.02.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування:

04.04.2026.

Стаття опублікована:

30.05.2026.