

Порівняльний аналіз результатів дослідження груп паль за допомогою різних програмних комплексів

Ірина МАЄВСЬКА¹, Наталя БЛАЩУК², Олександр ШМУНДЯК³

^{1,2,3} Вінницький національний технічний університет
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, Україна, 21000,

¹ irina.mayevskaja@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5999-6824>

² blaschuk@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-9764-0271>

³ shmund@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0005-4025-873X>

Анотація. Виконане співставлення результатів математичного моделювання роботи стовпчастих пальових фундаментів з забивних паль за допомогою різних програмних комплексів та аналіз їх відмінностей. Попередньо виконана систематизація і збір результатів досліджень за допомогою програмних комплексів Plaxis, SOFiSTiK та ЛІРА-САПР 2024. При моделюванні варіювались кількість, довжина і крок паль, площа ростверків, вид ґрунту основи. Деякі вхідні параметри повторювались при моделюванні різними шляхами, що дало можливість порівняти результати досліджень, проведених різними методами.

Характер розподілу напружень і переміщень по підшві ростверку при використанні різних програмних комплексів виявився аналогічним. Найбільше осідання спостерігається в місці прикладання зосередженого навантаження від колони посередині ростверку. Найбільші напруження під підшвою ростверку спостерігаються в зоні його периметру. Зусилля в палях розподіляються нерівномірно: найбільші зусилля сприймають кутові палі, найменші – центральні. Одержані результати з визначення напружено-деформованого стану якісно відповідають відомим результатам попередніх дослідників.

Якісні результати оцінки таких параметрів, як частка ростверку у навантаженні на фундамент, ступінь реалізації несучої здатності паль та ростверків однакові при розрахунках в різних програмних комплексах. Але кількісні діапазони зміни означених параметрів відрізняються. При наявності результатів



Ірина МАЄВСЬКА
доцент кафедри
будівництва, міського господарства
та архітектури
к.т.н., доц.



Наталя БЛАЩУК
доцент кафедри
будівництва, міського господарства
та архітектури
к.т.н., доц.



Олександр ШМУНДЯК
аспірант кафедри
будівництва, міського господарства
та архітектури

розрахунків у кількох програмних комплексах слід дотримуватись обережних оцінок на мінімальній межі. Жоден з програмних комплексів не дозволяє достовірно визначити кількісні параметри розподілу зусиль між елементами пальового фундаменту. Для підтвердження кількісних параметрів необхідне проведення численних фізичних експериментів.

Ключові слова. стовпчастий пальовий фундамент, програмний комплекс, математичне моделювання, ростверк, забивна паля, перерозподіл навантажень, ступінь реалізації несучої здатності.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ ТА АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Врахування реального вкладу елементів пильових фундаментів у їх загальну несучу здатність дозволило б використати резерви, що закладені у методику розрахунку, передбачену нормами [1], коли у роботі групи пиль враховується лише робота пиль.

Дослідженнями багатьох авторів встановлений той факт, що низький ростверк включається у роботу групи, але ступінь реалізації роботи пиль може бути знижений за рахунок переміщення ґрунту під ростверком по поверхні верхньої частини палі, що знижує або зовсім ліквідує сили тертя в цій зоні. Це негативно відбивається на значенні опору ґрунту зануренню палі. В нашій країні і за рубежом проводились як фізичні дослідження на маломасштабних моделях, так і математичне моделювання за допомогою різних програмних комплексів, але спільні висновки за результатами цих досліджень можна спостерігати лише в якісній картині розподілу зусиль між палями і ростверком. Крім того більшість досліджень розглядають проблему лише з точки зору конкретного локального фактору.

Abdolrezaei A., Khayat N. (2021) [2] наводять класифікацію чисельних методів, що напрацьовані і використовуються для аналізу пильових фундаментів. Виділені такі більш строгі комп'ютерні методи: спрощений аналіз методом скінчених елементів. Комерційна програма FLAC (Hewitt P, Gue [3]), де розглядається плоска або вісесиметрична задача; 3D-скінчено елементний і 3D-аналіз скінчених різниць в програмних продуктах PLAXIS 3D, FLAC 3D, MIDAS GTS, ABAQUS, ETABS і CSI SAFE, ANSYS, SOFISTIK з модулем WinTUB; методи граничних елементів (Butterfield and Banerji, Sinha J., Poulos H G); комбіновані методи: методи, які поєднують методи граничних елементів для пиль і методи скінчених елементів для ростверків (Hain and Lee (1978), Ta and

Small (1996), Franke et al. (1994)).

На теперішній час запропоновані програмні комплекси вітчизняного походження, такі як ЛІРА, SCAD, VSEM, АСНД VESNA, PRIZ-Pile. Проєктувальники України, які займаються геотехнічними розрахунками, віддають перевагу таким програмним комплексам: Plaxis; Midas GTS NX; Abaqus; Ліра-САПР, SOFiSTiK.

Дитюк О. Є. у своїй дисертації (2023) [4] відзначає, що вибір ефективних рішень пильових фундаментів залежить від численної кількості факторів, тому моделювання та розрахунок системи «основа – палі – ростверк – споруда» можливий тільки за умови використання чисельних методів, що реалізовані в потужних комп'ютерних комплексах типу SOFiSTiK, ABAQUS та ін.

У статті [«б причин використовувати PLAXIS для геотехнічного аналізу»](#), опублікованої компанією Bentley Systems [5] відзначаються такі переваги програмного комплексу PLAXIS: поєднання методів аналізу (програмне забезпечення включає широкий набір верифікованих конститутивних моделей, таких як Mohr-Coulomb, Hardening Soil, Soft Soil Creep, що забезпечує точне моделювання поведінки ґрунтів та порід); PLAXIS надає інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та логічну послідовність дій; швидко та ефективно створення моделей завдяки зручному графічному інтерфейсу; доступ до перевірених методів аналізу для реалістичної оцінки напружень, сил та переміщень у ґрунтах і конструкціях; потужні інструменти постобробки для візуалізації результатів у вигляді контурних, векторних та ізоповерхневих графіків; доступні додаткові модулі для вирішення специфічних задач; PLAXIS дозволяє виконувати аналіз у 2D та 3D форматах, а також конвертувати моделі між ними.

Л. Бондарева, Д. Нечипоренко (2022) [6] виконали дослідження розподілу зусиль в палях залежно від способу їх моделювання

у програмному комплексі Ліра–САПР та від способу моделювання ґрунтового середовища. Визначення найбільш ефективної розрахункової схеми за такими параметрами, як швидкість розрахунку та якість отриманих результатів. Розглянуто декілька способів моделювання паль і ґрунтового середовища. Аналогічні дані про способи моделювання паль у програмному комплексі Ліра наведені у дисертації Кашоїди О. О. (2023) [7].

Серед публікацій науковців і проєктувальників все більше наводяться результати роботи з ПК SOFiStiK [8, 9, 10].

У багатьох сучасних дослідженнях виконані порівняння розрахунків, виконаних за допомогою різних програмних комплексів. Такий підхід пропонується використовувати у нормах [1] з метою адекватної оцінки напружень і деформацій у різних геотехнічних системах.

У статі Носенко В., Кашоїда О. (2021) [11] відзначається, що проєктувальники застосовують багато різних програмних комплексів для геотехнічних розрахунків, які засновані на методі скінченних елементів. Застосовуються такі програмні комплекси: Plaxis; Midas GTS NX, Abaqus; Ліра – САПР. Кожний програмний комплекс володіє певними перевагами і недоліками. Щоб визначити, який із них краще підходить для моделювання взаємодії паль з ґрунтовою основою було виконано числове моделювання натурального експерименту з використанням ПК Ліра–САПР та ПК Midas GTS NX. Моделювання основи з використанням обох програмних комплексів призводить до кількісної відмінності отриманих результатів з польовим дослідженням.

У статі [12] (2021) виконаний аналіз пальових фундаментів мостових опор з високим ростверком за допомогою ЛІРА-САПР та SCAD, який довів різницю в підході до моделювання в цих комплексах.

Підлуцький В., П'ятков О., Беган В. (2023) [13] виконали дослідження напружено-деформованого стану

фундаментних конструкцій при визначенні вертикальної жорсткості паль за допомогою різних програмних комплексів. Представлено результати числового моделювання взаємодії багатоповерхової будівлі на пальовому фундаменті з ґрунтовою основою в ПК «Ліра-САПР» та ПК «Plaxis 3D». В результаті порівняння розрахунків було виявлено, що результати НДС фундаментних конструкцій 1-го варіанту відрізняються від 2-го варіанту.

МЕТА РОБОТИ

При кафедрі БМГА ВНТУ були проведені як фізичні експерименти на маломасштабних моделях пальових фундаментів, так і математичне моделювання за допомогою програмних комплексів PLAXIS 3D, SOFiStiK, ЛІРА-САПР 2024.

При моделюванні варіювались кількість, довжина і крок паль, площа ростверків, вид ґрунту основи. Деякі вхідні параметри повторювались при моделювання різними шляхами, отже можна порівняти результати досліджень, проведених різними методами.

В даній роботі передбачається:

- систематизація і збір результатів досліджень за допомогою програмних комплексів Plaxis, SOFiStiK та ЛІРА-САПР 2024;
- порівняльний аналіз результатів, одержаних різними методами.

ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для можливості порівняння результатів досліджень різними методами з цих досліджень були вибрані пальові фундаменти з аналогічними параметрами варіювання.

Були використані результати математичного моделювання за допомогою програмного комплексу Plaxis, виконані у магістерських роботах Малишева О. М. [14], Кримняка Я. М. [15], Кременської Ю. О. [16], Ткачук А. А. [17]. Моделювання стовпчастих пальових фундаментів за

допомогою програмного комплексу SOFiSTiK було виконане Шмундяком О. Ю. та Ганущаком Ю. В. [18], моделювання за допомогою програмного комплексу ЛПА-САПР 2024 виконане Шмундяком О. Ю. та Грисюком В. М. [19]. У всіх випадках варіювались крок паль, розміри ростверку, довжина паль, вид ґрунту. Для можливості порівняння результатів у всіх випадках розглядалися два види ґрунту:

пісок дрібний з характеристиками $\gamma=18,6\text{кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 32^\circ$, $E=28 \text{ МПа}$;

суглинок з характеристиками $\gamma=18,5\text{кН/м}^3$, $e = 0,75$, $I_L = 0,25-0,5$,

$c=23\text{кПа}$, $\varphi = 21^\circ$, $E = 14 \text{ МПа}$.

Оскільки розрахунки в програмному комплексі Plaxis виконувались кількома різними авторами, то була виконана систематизація результатів досліджень з метою акцентування на тих параметрах, які будуть використовуватись при порівнянні.

У таблиці 1 наведені схеми розміщення паль в ростверках, обрані для порівняння результатів розрахунку за допомогою різних програмних комплексів. В цих дослідженнях розглядалися палі двох типорозмірів по довжині: 3 м і 10 м з поперечним перерізом 0,3x0,3 м.

Табл. 1. Розміщення паль в ростверках, обрані для порівняння результатів розрахунку за допомогою різних програмних комплексів

Tabl. 1. The placement of piles in pile caps, selected for the purpose of comparing calculation results obtained using different software packages

PLAXIS 3D	SOFiSTiK	ЛПА-САПР 2024
розміри ростверку в плані 2,4x2,4 м, 9 паль, крок паль 3d	розміри ростверку в плані 3,2x3,2 м, 4 палі, крок паль 9d	розміри ростверку в плані 3,2x3,2 м, 4 палі, крок паль 9d
розміри ростверку в плані 2,4x2,4 м, 5 паль, крок між кутовими палями 6d і 1 палія в центрі ростверку		розміри ростверку в плані 4,7x4,7 м, 4 палі, крок паль 14d
розміри ростверку в плані 2,4x2,4 м, 4 палі, крок паль 6d	розміри ростверку в плані 1,8x1,8 м, 4 палі, крок паль 1,3м	розміри ростверку в плані 1,8x1,8 м, 4 палі, крок паль 1,3м
розміри ростверку в плані 3,6x3,6 м, 9 паль, крок паль 5d		розміри ростверку в плані 3,6x3,6 м, 9 паль, крок паль 4,5d
розміри ростверку в плані 4,8x4,8 м, 9 паль, крок паль 7d		розміри ростверку в плані 4,7x4,7 м, 9 паль, крок паль 7d
розміри ростверку в плані 1,5x1,5 м, 4 палі, крок паль 3d	розміри ростверку в плані 1,4x1,4 м, 4 палі, крок паль 3d	розміри ростверку в плані 1,4x1,4 м, 4 палі, крок паль 3d
розміри ростверку в плані 1,8x1,8 м, 5 паль, крок між кутовими палями 4,5d і 1 палія в центрі ростверку	розміри ростверку в плані 1,8x1,8 м, 5 паль, крок між кутовими палями 4,5d і 1 палія в центрі ростверку	розміри ростверку в плані 1,8x1,8 м, 5 паль, крок між кутовими палями 4,5d і 1 палія в центрі ростверку
розміри ростверку в плані 3,3x3,3 м, 16 паль, крок між палями 3d	розміри ростверку в плані 3,2x3,2 м, 16 паль, крок між палями 3d	розміри ростверку в плані 3,2x3,2 м, 16 паль, крок між палями 3d

Результатами досліджень для всіх груп дослідів є залежності навантаження-осідання для пального кушів, ростверків без паль та одиночних паль, величини зусиль у палях, розподіл напружень і осідань по підшві ростверку.

Для детального аналізу напружено-деформованого стану пального фундаменту з низьким ростверком визначались такі параметри:

- осереднене навантаження на палю у складі фундаменту;
- сума зусиль, які сприймають палі в групі;

- навантаження, що сприймається ростверком у складі пального фундаменту;
- частка навантаження, яка сприймається ростверком;
- ступінь реалізації несучої здатності паль (відношення осередженого навантаження на палю фундаменту до несучої здатності одиночної палі);
- ступінь реалізації несучої здатності ростверку (відношення навантаження, яке сприймає ростверк у складі фундаменту, до навантаження, яке сприймає ростверк як фундамент мілкового закладання при такому ж значенні осідання);

- величина кущового ефекту (відношення навантаження на куц до суми несучих здатностей одиночних паль).

На рис. 1, 2 наведено порівняння розвитку деформацій окремих пальових фундаментів, визначених в різних програмних комплексах.

Бачимо, що і для пальових груп моделювання в Лірі дає менші значення деформацій, а моделювання в Plaxis – більші. Відповідно для визначення несучої здатності паль і пальових фундаментів (навантаження на куц при певному значенні деформацій) були обрані різні критерії.

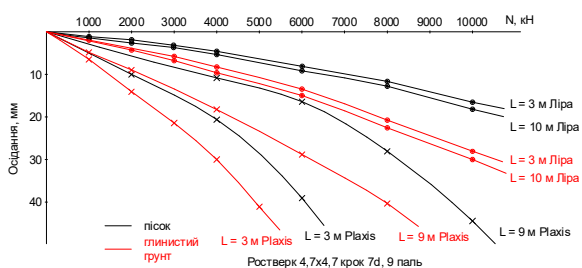


Рис. 1. Залежність осідання-навантаження для пальового фундаменту з 9 паль, розміщених з кроком 3d (розміри ростверка 4,7x4,7 м)

Fig. 1. Load-settlement relationship for a pile foundation comprising 9 piles spaced at 3d intervals (grillage dimensions 4.7 × 4.7 m)

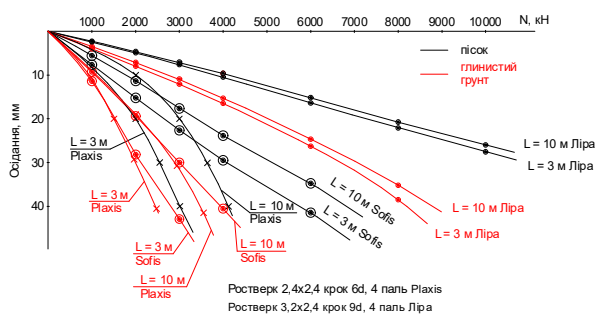


Рис. 2. Залежність осідання-навантаження для пальового фундаменту з 4 паль, розміщених з кроком 6d (розміри ростверку 2,4x2,4 м) при моделюванні в Plaxis, з кроком 9d (розміри ростверку 3,2x3,2 м) при моделюванні в SOFiSTiK та Лірі

Fig. 2. The relationship between settlement and load for a pile foundation comprising 4 piles, spaced at 6d intervals (grillage dimensions 2.4 × 2.4 m) when modelled in

Plaxis, and at 9d intervals (grillage dimensions 3.2 × 3.2 m) when modelled in SOFiSTiK and Lira

Для порівняння навантаження на куц, визначеного за різними методиками, на рис. 3 – 5 наведені графіки залежності цих навантажень від кількості паль в групі при сталих розмірах ростверку і від площі ростверку при сталій кількості паль в групі.

Як видно з графіків рис. 3 – 5 Навантаження на групу паль за різними програмними комплексами знаходиться в одному діапазоні.

Аналіз результатів розрахунків показує, що збільшення кількості паль у 3-4 рази у межах постійної площі ростверку призводить до незначного збільшення навантаження, яке сприймає фундамент, а саме у 1,0 -1,3 разів для триметрових паль і у 1,3-1,7 разів для десятиметрових. Це свідчить про більш ефективне використання паль при застосуванні комбінованого варіанта пальового фундаменту, коли можна зменшити кількість паль в межах сталого розміру ростверку без значної втрати несучої здатності. Більший ефект виникає для коротких паль. З графіків також можна зробити висновок, що для глинистого, більш піддатливого ґрунту, ефективність зменшення кількості паль дещо менша. Вказані закономірності є однаковими при моделюванні в різних програмних комплексах.

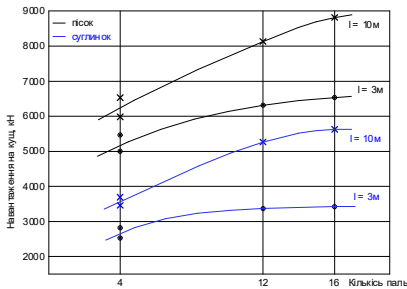
На рис. 6 - 8 наведені графіки залежності частки ростверку у несучій здатності фундаменту в залежності від кількості паль при сталих розмірах ростверку та від площі ростверку при сталій кількості паль. Як бачимо частка ростверку у несучій здатності фундаменту тим менше, чим більше кількість паль при постійному розмірі ростверку. Довжина паль впливає на частку ростверку несуттєво.

Ці якісні результати однакові при розрахунках в різних програмних комплексах. Відмінність полягає у впливі виду ґрунту на частку ростверку. Для

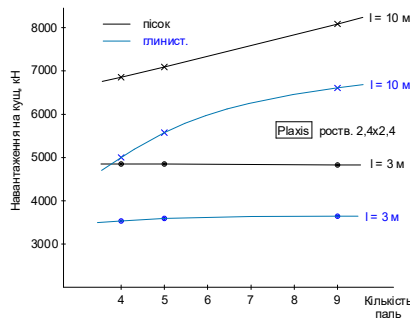
SOFiSTiK і Plaxis у піщаних ґрунтах частка ростверку дещо більша, ніж для глинистих, за результатами розрахунку у Лірі – навпаки.

При фіксованій кількості паль збільшення площі ростверку призводить до

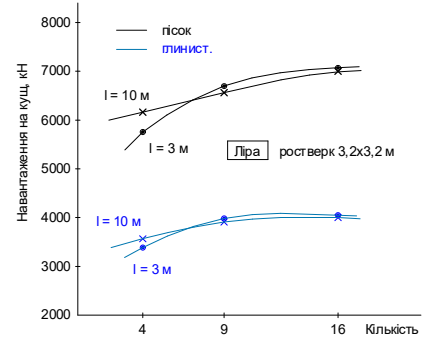
суттєвого збільшення його частки у навантаженні на куц. Тут якісна картина залежностей також однакова для різних програмних комплексів.



SOFiSTiK, ростверк 3,2×3,2 м



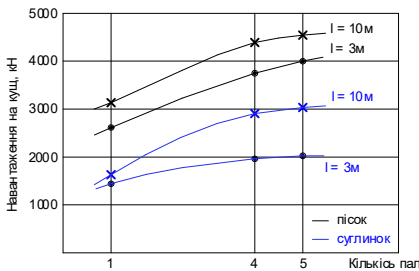
Plaxis, ростверк 2,4х2,4 м



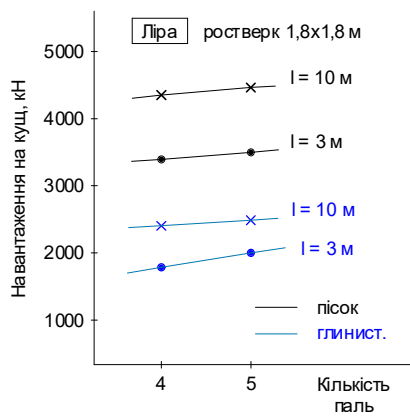
Ліра, ростверк 3,2×3,2 м

Рис. 3. Графіки залежності навантаження на куц від кількості паль в групі та виду ґрунту при різній довжині паль.

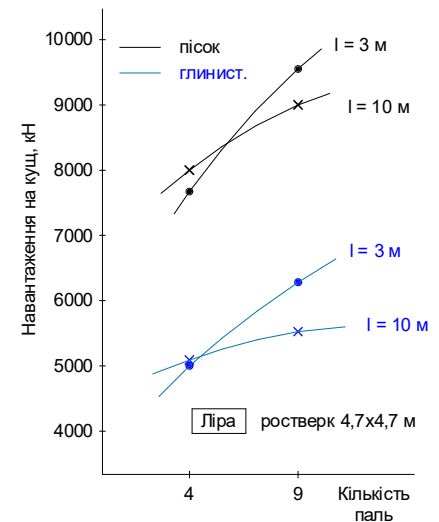
Fig. 3. Graphs showing the relationship between the load per bush and the number of piles in a group, as well as soil type, for different pile lengths.



SOFiSTiK, ростверк 1,8×1,8 м



Ліра, ростверк 1,8×1,8 м



Ліра, ростверк 4,7×4,7 м

Рис. 4. Графіки залежності навантаження на куц з ростверком 1,8×1,8 = 3,24 м² від кількості паль в групі та виду ґрунту при різній довжині паль.

Fig. 4. Graphs showing the relationship between the load per pile with a 1.8×1.8 m² pile cap and the number of piles in a group, as well as the soil type, for different pile lengths.

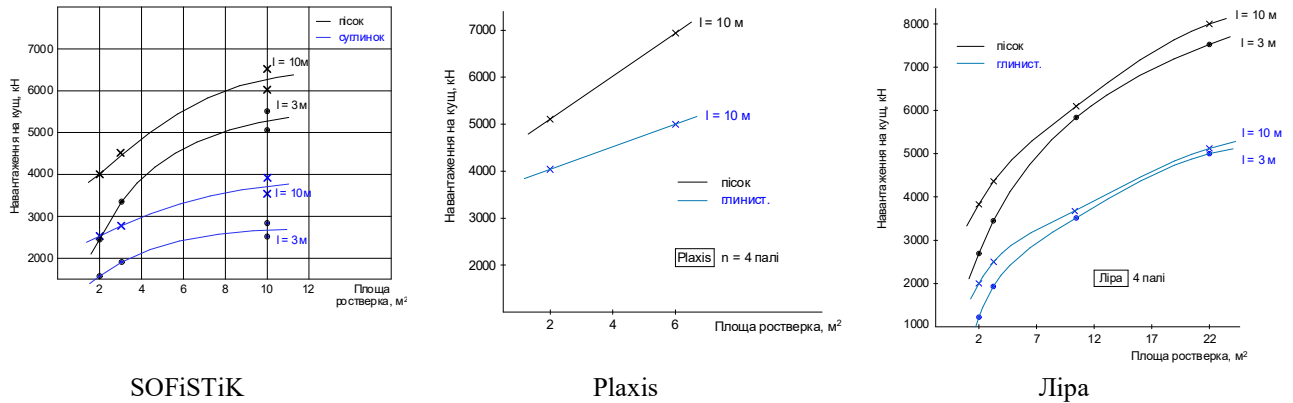


Рис. 5. Графіки залежності навантаження на куц з 4 палей від площі ростверку та виду ґрунту при різній довжині палей.
 Fig. 5. Graphs showing the relationship between the load per pile (with 4 piles) and the pile cap area and soil type for different pile lengths.

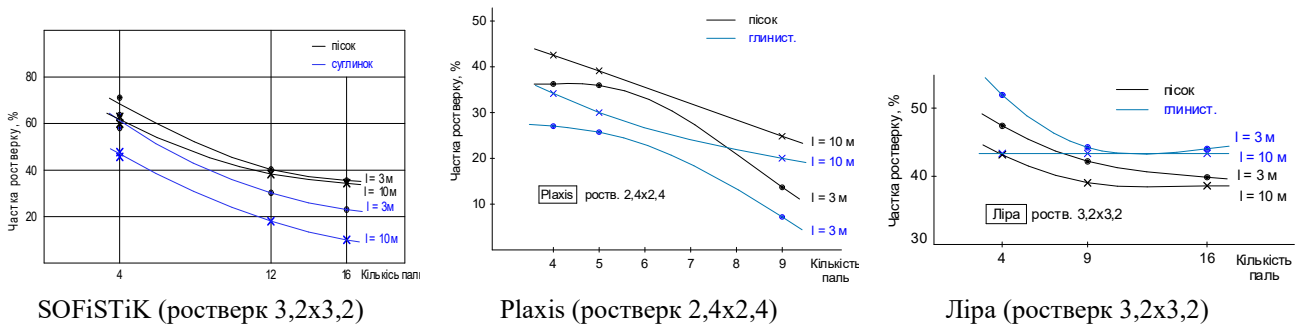


Рис. 6. Графіки залежності частки ростверку у навантаженні на куц з ростверком від кількості палей в групі та виду ґрунту при різній довжині палей.
 Fig. 6. Graphs showing the relationship between the proportion of the pile cap in the load on a pile group with a pile cap, the number of piles in the group, and the soil type, for different pile lengths.

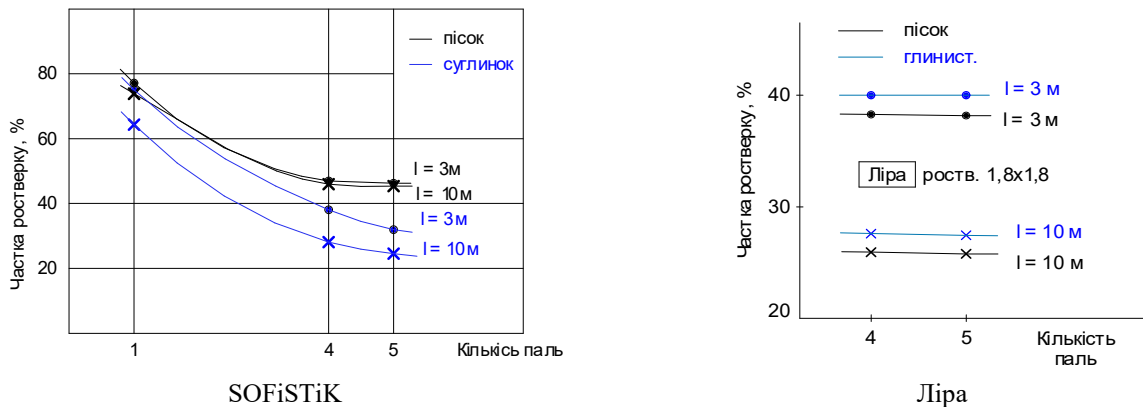


Рис. 7. Графіки залежності частки ростверку у навантаженні на куц з ростверком $1,8 \times 1,8 = 3,24\text{ м}^2$ від кількості палей в групі та виду ґрунту при різній довжині палей.
 Fig. 7. Graphs showing the relationship between the proportion of the grillage in the load on a pile group with a grillage area of $1.8 \times 1.8 = 3.24\text{ м}^2$ and the number of piles in the group and soil type, for different pile lengths.

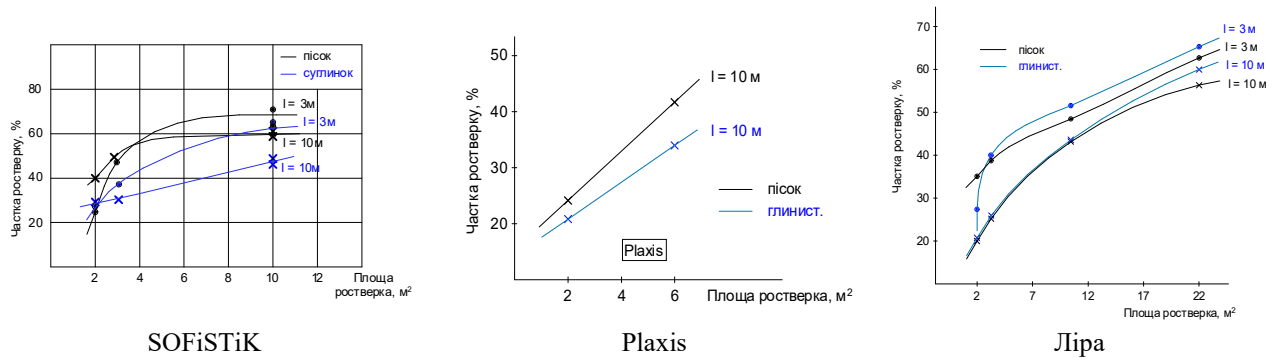


Рис. 8. Графіки залежності частки ростверку у навантаженні на куц з 4 паль від площі ростверка та виду ґрунту при різній довжині паль.
 Fig. 8. Graphs showing the relationship between the proportion of the grillage in the load on a cluster of four piles and the grillage area and soil type, for different pile lengths.

На рис. 9 – 11 наведені графіки залежності ступеня реалізації несучої здатності паль у складі палювих фундаментів. Як бачимо із збільшенням кількості паль у групі при сталих розмірах ростверка палі реалізують себе гірше. При великій кількості паль ступінь реалізації їх несучої здатності за результатами розрахунків у SOFiSTiK та Ліра коливається в діапазоні 0,3-0,6, при незначній кількості відповідно в діапазоні 0,5-1,1. При розрахунках у програмному комплексі Plaxis відповідні діапазони вищі: 0,6-1,3 при великій кількості паль та 0,9-2,1 при незначній кількості.

При сталій кількості паль збільшення площі ростверку призводить до незначного покращення ступеню реалізації довгих паль і мало впливає на реалізацію коротких паль. Є відмінності у кількісних показниках при переході від малої площі ростверку

(2 м²) до ростверків з більшою площею. Для результатів у Plaxis та Лірі ця відмінність має місце, а за результатами у SOFiSTiK ступінь реалізації паль при їх сталій кількості при збільшенні площі ростверку змінюється несуттєво.

Довжина паль також впливає на ступінь їх реалізації. Короткі палі показують кращу реалізацію при розрахунках у всіх програмних комплексах (виключення складають палі у глинистих ґрунтах за розрахунками у SOFiSTiK).

В глинистих ґрунтах палі реалізують себе краще за результатами розрахунків у всіх програмних комплексах.

Зміна ступеню реалізації тиску під ростверком наведена на рис. 12 – 14. Як бачимо із збільшенням кількості паль у групі при сталих розмірах ростверку тиск під ростверком реалізується менше.

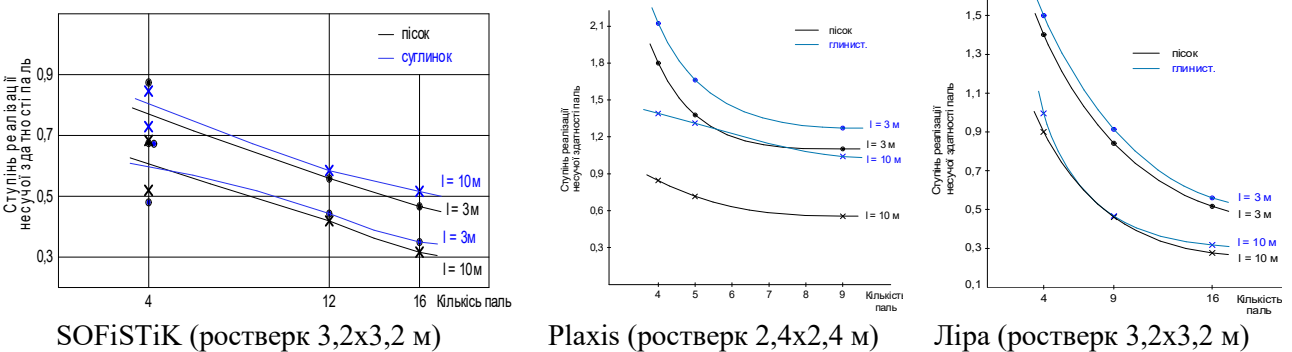
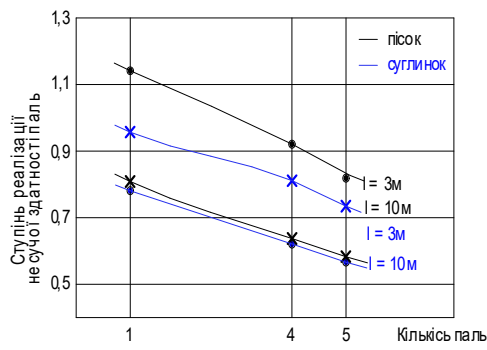


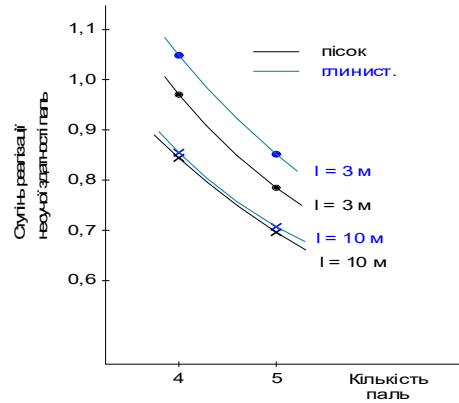
Рис. 9. Графіки залежності ступеня реалізації несучої здатності паль у куці від кількості паль в групі та виду ґрунту при різній довжині паль.
 Fig. 9. Graphs showing the relationship between the degree of load-bearing capacity utilisation of piles in a cluster and the number of piles in the group, as well as the soil type, for different pile lengths.

© І. Маєвська, Н. Блацук, О. Шмундяк

Опубліковано Київським Національним університетом будівництва і архітектури



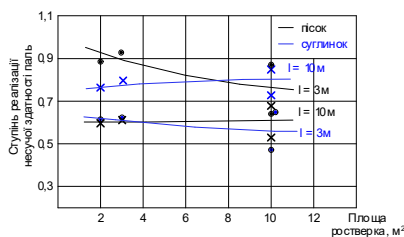
SOFiSTiK



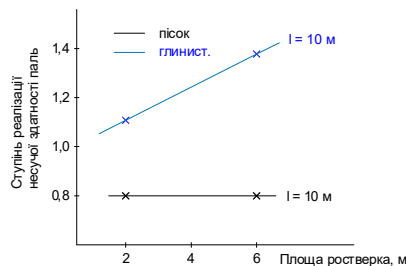
Ліра

Рис. 10. Графіки залежності ступеня реалізації несучої здатності палів у куці з ростверком $3,2 \times 3,2 = 10,24 \text{ м}^2$ від кількості палів в групі та виду ґрунту при різній довжині палів.

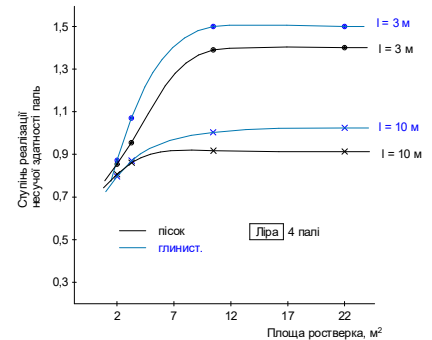
Fig. 10. Graphs showing the relationship between the degree of utilisation of the bearing capacity of piles in a pile group with a grillage measuring $3.2 \times 3.2 = 10.24 \text{ m}^2$ and the number of piles in the group and soil type, for different pile lengths



SOFiSTiK



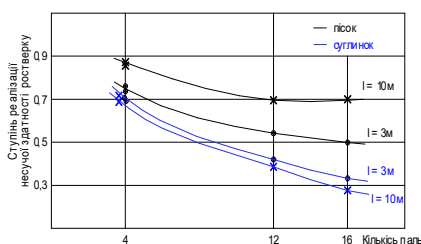
Plaxis



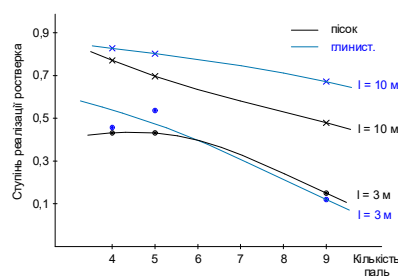
Ліра

Рис. 11. Графіки залежності ступеня реалізації несучої здатності палів у куці з 4 палів від площі ростверку та виду ґрунту при різній довжині палів.

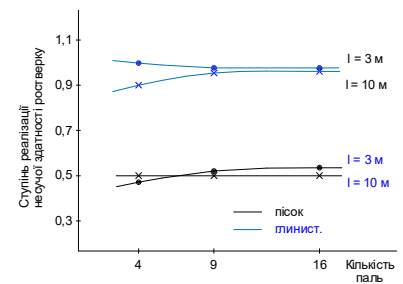
Fig. 11. Graphs showing the relationship between the degree of load-bearing capacity utilisation of piles in a cluster of four piles and the area of the pile cap, as well as the soil type, for different pile lengths.



SOFiSTiK (ростверк $3,2 \times 3,2 \text{ м}$)



Plaxis (ростверк $2,4 \times 2,4 \text{ м}$)



Ліра (ростверк $3,2 \times 3,2 \text{ м}$)

Рис. 12. Графіки залежності ступеня реалізації несучої здатності ростверку у куці від кількості палів в групі та виду ґрунту при різній довжині палів.

Fig. 12. Graphs showing the relationship between the degree of utilisation of the bearing capacity of a pile cap in a cluster and the number of piles in the group, as well as the soil type, for different pile lengths.

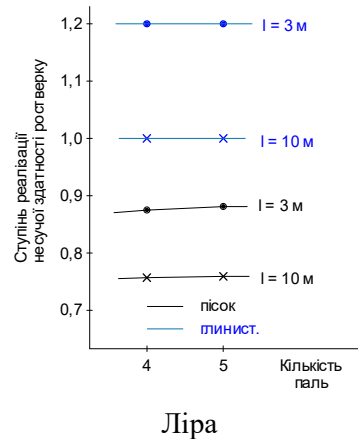
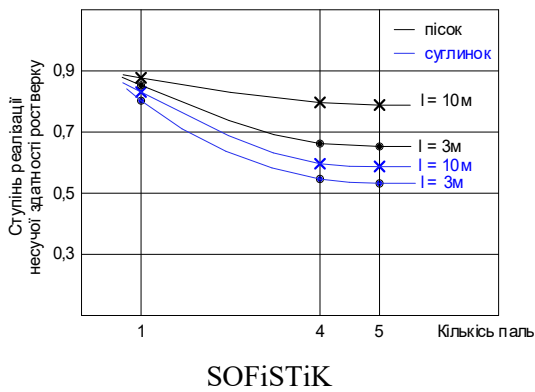


Рис. 13. Графіки залежності ступеня реалізації несучої здатності ростверку у куці з ростверком $1,8 \times 1,8 = 3,24 \text{ м}^2$ від кількості палей в групі та виду ґрунту при різній довжині палей.
 Fig. 13. Graphs showing the relationship between the degree of utilisation of the bearing capacity of a pile cap in a pile group with a pile cap area of $1.8 \times 1.8 = 3.24 \text{ m}^2$ and the number of piles in the group and soil type, for different pile lengths

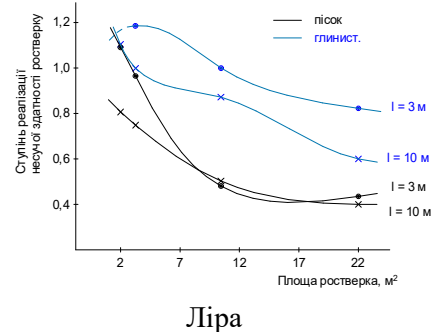
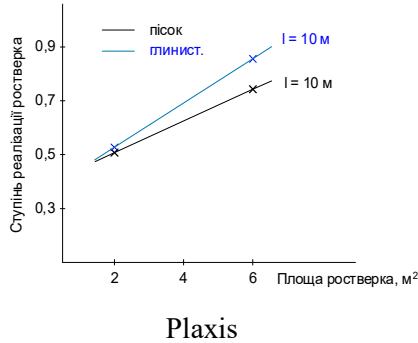
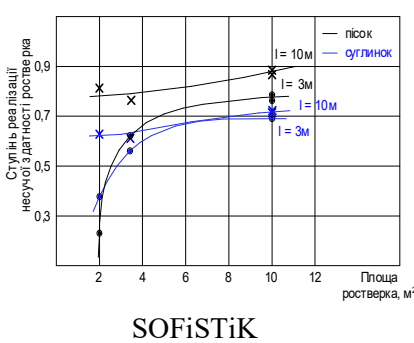


Рис. 14. Графіки залежності ступеня реалізації несучої здатності ростверку у куці з 4 палей від площі ростверку та виду ґрунту при різній довжині палей.
 Fig. 14. Graphs showing the relationship between the degree of utilisation of the bearing capacity of a pile cap in a cluster of four piles and the area of the pile cap and soil type, for different pile lengths.

При великій кількості палей ступінь реалізації тиску під ростверком за колюається в діапазоні 0,3-1,1, при незначній кількості відповідно в діапазоні 0,5-1,0.

При сталій кількості палей збільшення площі ростверку призводить до покращення його ступеню реалізації за результатами розрахунків у SOFiSTiK та Plaxis. При розрахунках у Лірі збільшення площі ростверку погіршує його реалізацію.

Довжина палей також впливає на ступінь

реалізації ростверку. При використанні коротких палей ступінь реалізації ростверку зменшується за результатами розрахунків у SOFiSTiK та Plaxis. При розрахунках у Лірі – навпаки.

В глинистих ґрунтах ростверки реалізують себе краще за результатами розрахунків у Plaxis та Лірі. При розрахунках у SOFiSTiK ростверки краще реалізуються у піщаних ґрунтах.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Математичне моделювання за допомогою різних програмних комплексів

в цілому дозволяє зробити однакові висновки в якісній картині розподілу зусиль між палями і ростверком.

2. Характер розподілу напружень і переміщень по подошві ростверку при використанні різних програмних комплексів виявився аналогічним. А саме, найбільше осідання спостерігається в місці прикладання зосередженого навантаження від колони посередині ростверку. Найбільші напруження під подошвою ростверку спостерігаються в зоні його периметру. Зусилля в палях розподіляються нерівномірно: найбільші зусилля сприймають кутові палі, найменші – центральні. Одержані результати з визначення напружено-деформованого стану якісно відповідають відомим результатам попередніх дослідників.

3. Для визначення критерію несучої здатності груп паль були виконані ручні розрахунки несучої здатності і осідань палових фундаментів, паль і ростверків у відповідних ґрунтах за вимогами норм. Результати розрахунків показали, що критерієм визначення навантаження, яке сприймає група паль, для розрахунків в різних програмних комплексах слугують різні значення переміщень:

- для програмного комплексу Ліра - осідання 15 мм.

- при використанні програмного комплексу SOFiSTiK таким критерієм була деформація 40 мм,

- при використанні програмного комплексу Plaxis – 100 мм.

4. Всі програмні комплекси дозволили зробити висновок, що при сталих розмірах ростверку основними чинниками, що впливають на ступінь реалізації несучої здатності палового фундаменту, є кількість паль, їх крок і вид ґрунту. Збільшення кількості паль, яке призводить до збільшення компактності їх розміщення, спричинює неповне використання роботи ростверку і паль. При сталій кількості паль збільшення площі ростверку збільшує реалізацію його несучої здатності.

5. Якісні результати оцінки таких параметрів, як частка ростверку у навантаженні на фундамент, ступінь реалізації несучої здатності паль та ростверків однакові при розрахунках в

різних програмних комплексах. Але кількісні діапазони зміни означених параметрів відрізняються. При наявності результатів розрахунків у кількох програмних комплексах слід дотримуватись обережних оцінок на мінімальній межі.

6. Жоден з програмних комплексів не дозволяє достовірно визначити кількісні параметри розподілу зусиль між елементами палового фундаменту. Для підтвердження кількісних параметрів необхідний фізичний експеримент.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Основи та фундаменти споруд: ДБН В.2.1-10-2009 зі зміною №1 та №2.* (2009). Мінрегіонбуд України.
2. Abdolrezayı, A., & Khayat, N. (2021). Comparative three-dimensional finite element analysis of piled raft foundations. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 4(1), 19–36.
3. Hewitt, P., & Gue, S. S. (1994). Piled raft foundation in a weathered sedimentary formation. *Proceedings of Geotropica*, 1–11.
4. Дитюк, О. Є. (2023). *Обґрунтування параметрів комбінованих плитно-палових фундаментів багатопверхових будівель* [Дисертація доктора філософії, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова]. Електронний репозиторій ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. <https://eprints.kname.edu.ua/64617/1/%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%94%D0%B8%D1%82%D1%8E%D0%BA%20%D0%9E..pdf>
5. Bentley Systems. (2021, April 12). *6 reasons why you should use PLAXIS for geotechnical analysis.* Geoworld. <https://www.mygeoworld.com/resources/blog/6-reasons-why-you-should-use-plaxis-for-geotechnical-analysis>
6. Бондарева, Л., & Нечипоренко, Д. (2022). Дослідження впливу способів моделювання паль на розподіл зусиль у паловому фундаменті. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, (44), 44–54.

7. Кашоїда, О. О. (2023). *Взаємодія пальових фундаментів з ґрунтовими основами при врахуванні зміни жорсткості конструкцій будівлі* [Дисертація доктора філософії, Київський національний університет будівництва і архітектури]. Офіційний сайт КНУБА. <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/10/dysertacziya-kashoyidy-o.o.pdf>
8. Самородов, О. В. (2016). Нова конструкція плитно-пального фундаменту. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, (1), 58–65. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/301>
9. Самородов О., Табачников С., Дитюк О., Бондар О. Польові дослідження напруженого стану системи «ґрунтова основа – комбінований пально-плитний фундамент» багатофункціонального комплексу у місті Харкові. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, 46. 38-48.
10. Самородов, О. В., & Дитюк, О. Є. (2023). Експериментальне обґрунтування моделі ґрунтової основи для розрахунку комбінованого плитно-пального фундаменту. *Науковий вісник будівництва*, 1(109), 42–49.
11. Носенко, В., & Кашоїда, О. (2021). Визначення напружено-деформованого стану групи паль шляхом числового моделювання їх взаємодії з основою за даними польових досліджень. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, (43), 87–100.
12. Дубінчик, О. І., & Недужа, Л. О. (2021). Обґрунтування напружено-деформованого стану пального фундаменту з використанням програмних комплексів. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*, (20), 13–18.
13. Підлуцький, В., П'ятков, О., & Беган, В. (2023). Дослідження напружено-деформованого стану фундаментних конструкцій при визначенні вертикальної жорсткості паль за допомогою різних програмних комплексів. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, (47), 15–28.
14. Малишев, О. М., Цимбал, С. О., Маєвська, І. В., & Блащук, Н. В. (2018, 2 січня). Сумісна робота паль і ростверку у стовпчастому пальному фундаменті. *Молодь в науці: Матеріали регіональної науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців ВНТУ*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>.
15. Кримняк, Я. М., & Маєвська, І. В. (2021). Робота забивних паль і ростверку у складі стовпчастого пального фундаменту. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2021): Тези Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11077>.
16. Маєвська, І. В., Блащук, Н. В., & Кременська, Ю. О. (2021). Особливості роботи пальових куців з коротких паль за даними числового моделювання. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, (43), 30–39.
17. Блащук, Н. В., Ткачук, А. А., & Шевчук, Є. О. (2022). Перерозподіл зусиль між елементами куцевого пального фундаменту в залежності від кількості паль. *Матеріали LI Науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15454>.
18. Маєвська, І. В., Блащук, Н. В., & Шмундяк, О. Ю. (2025). Ефективність використання ростверку підвищеної площі у складі стовпчастого пального фундаменту. *Основи та фундаменти: Науково-технічний збірник*, (50), 123–138.
19. Шмундяк, О. Ю., Грисюк, В. М., & Маєвська, І. В. (2025). Порівняння результатів моделювання стовпчастих пальових фундаментів у різних програмних комплексах. У Збірник матеріалів LIV Науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/23967/20235>.

REFERENCES

1. Osnovy ta fundamenty sporud: DBN V.2.1-10-2009 zi zminoiu №1 ta №2. (2009). Minrehiobud Ukrainy.
2. Abdolrezayi, A., & Khayat, N. (2021). Comparative three-dimensional finite element analysis of piled raft foundations. *Computational Engineering and Physical Modeling*, 4(1), 19–36.
3. Hewitt, P., & Gue, S. S. (1994). Piled raft foundation in a weathered sedimentary formation. *Proceedings of Geotropica*, 1–11.
4. Dytiuk, O. Ye. (2023). *Obgruntuvannia parametrv kombinovanykh plytno-palovykh fundamentiv bahatopoverkhovykh budivel* [Dysertatsiia doktora filosofii, Kharkivskiy natsionalnyi universytet miskoho hospo-darstva imeni O. M. Beketova]. Elektronnyi repozytorii KhNUMH im. O. M. Beketova. <https://eprints.kname.edu.ua/64617/1/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%94%D0%B8%D1%82%D1%8E%D0%BA%20%D0%9E..pdf>
5. Bentley Systems. (2021, April 12). *6 reasons why you should use PLAXIS for geotechnical analysis*. Geoworld. <https://www.mygeoworld.com/resources/blog/6-reasons-why-you-should-use-plaxis-for-geotechnical-analysis>
6. Bondareva, L., & Nechyporenko, D. (2022). Doslidzhennia vplyvu sposobiv modeliuвання pal na rozpodil zusyly u palovomu fundamenti. *Osnovy ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, (44), 44–54.
7. Kashoida, O. O. (2023). *Vzaiemodiia palovykh fundamentiv z gruntovymy osnovamy pry vrakhuvanni zminy zhorstkosti konstruksii budivli* [Dysertatsiia doktora filosofii, Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury]. Ofitsiinyi sait KNUBA. <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/10/dysertacziya-kashoyidy-o.o.pdf>
8. Samorodov, O. V. (2016). Nova konstruksiiia plytno-palovoho fundamenta. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury*, (1), 58–65. <http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/301>
9. Samorodov O., Tabachnikov S., Dytiuk O., Bondar O. Polovi doslidzhennia napruzhenoho stanu systemy «hruntova osnova – kombinovanyi palovo-plytnyi fundament» bahatofunktsionalnoho kompleksu u misti Kharkovi. *Osnovy ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, 46. 38–48.
10. Samorodov, O. V., & Dytiuk, O. Ye. (2023). Eksperymentalne obhruntuvannia modeli hruntovoi osnovy dlia rozrakhunku kombinovanoho plytno-palovoho fundamentu. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 1(109), 42–49.
11. Nosenko, V., & Kashoida, O. (2021). Vyznachennia napruzhenno-deformovanoho stanu hrupy pal shliakhom chyslovoho modeliuвання yikh vzaiemodii z osnovoju za danymy polovykh do-slidzen. *Osnovy ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, (43), 87–100.
12. Dubinchyk, O. I., & Neduzha, L. O. (2021). Obgruntuvannia napruzhenno-deformovanoho stanu palovoho fundamentu z vykorystanniam prohramnykh kompleksiv. *Mosty ta tuneli: teoriia, doslidzhennia, praktyka*, (20), 13–18.
13. Pidlutskyi, V., Piatkov, O., & Behan, V. (2023). Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu fundamentnykh konstruksii pry vyznachenni vertykalnoi zhorstkosti pal za dopomohoiu riznykh pro-hramnykh kompleksiv. *Osnovy ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, (47), 15–28.
14. Malyshev, O. M., Tsymbal, S. O., Maievska, I. V., & Blashchuk, N. V. (2018, 2 sichnia). Sumisna robota pal i rostverku u stovpchastomu palovomu fundamenti. *Molod v nautsi: Materialy rehionalnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv VNTU* <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2018/paper/viewFile/3694/31033103>.
15. Krymniak, Ya. M., & Maievska, I. V. (2021). Robota zabyvnykh pal i rostverku u skladi stovpchastoho palovoho fundamentu. *Molod v nautsi: doslidzhennia, problemy, perspektyvy (MN-2021): Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv*. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2021/paper/view/11077>.
16. Maievska, I. V., Blashchuk, N. V., & Kreminska, Yu. O. (2021). Osoblyvosti roboty palovykh kushchiv z korotkykh pal za danymy chyslovoho modeliuвання. *Osnovy ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, (43), 30–39.
17. Blashchuk, N. V., Tkachuk, A. A., & Shevchuk, Ye. O. (2022). Pererozpodil zusyly mizh elementamy kushchovoho palovoho

fundamentu v zalezhnosti vid kilkosti pal. *Materialy LI Naukovo-tekhnichnoi konferentsii pidrozdiliv Vinnytskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu.* <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2022/paper/view/15454>.

18. Maievskaya, I. V., Blashchuk, N. V., & Shmundiak, O. Yu. (2025). Efektyvnist vykorystannia rostverku pidvyshchenoi ploschi u skladi stovpchastoho palovoho fundamentu. *Osnovy ta fundamenty: Naukovo-tekhnichnyi zbirnyk*, (50), 123–138.
19. Shmundiak, O. Yu., Hrysiuk, V. M., & Maievskaya, I. V. (2025). Porivniannia rezultativ modeliuvannia stovpchastykh palovykh fundamentiv u riznykh prohramnykh kompleksakh. *Zbirnyk materialiv LIV Naukovo-tekhnichnoi konferentsii pidrozdiliv Vinnytskoho natsionalnogo tekhnichnogo universytetu.* <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/23967/20235>.

A comparative analysis of the results of studies on finger groups using different software packages

*Irina MAEVSKA,
Natalya BLASHCHUK
Oleksandr SHMUNDYAK*

Summary. A comparison was carried out of the results of mathematical modelling of the behaviour of pile foundations comprising driven piles, using various software packages, and an analysis of the differences between them. The results of the research were first systematised and compiled using the Plaxis, SOFiSTiK and LIRA-CAD 2024 software packages. During modelling, the number, length and spacing of piles, the area of the pile caps, and the type of subsoil were varied. Some input parameters were repeated when modelling using different methods, which made it possible to compare the results of studies conducted using different methods.

The distribution of stresses and displacements across the grillage base was found to be similar when using different software packages. The greatest settlement is observed at the point where the concentrated load from the column is applied in the centre of the grillage. The highest stresses be-

neath the grillage base are observed along its perimeter. The forces in the piles are distributed unevenly: the greatest forces are borne by the corner piles, the smallest by the central ones. The results obtained from the determination of the stress-strain state correspond qualitatively to the known results of previous researchers.

The qualitative results of the assessment of parameters such as the proportion of the grillage in the load on the foundation, and the degree to which the bearing capacity of the piles and grillage is realised, are consistent across different software packages. However, the quantitative ranges of variation for these parameters differ. Where calculation results are available from several software packages, conservative estimates at the lower limit should be adopted. None of the software packages allows for a reliable determination of the quantitative parameters of force distribution between the elements of a pile foundation. To confirm the quantitative parameters, numerous physical experiments are required.

Key words. Columnar pile foundation, software package, mathematical modelling, grillage, driven pile, load redistribution, degree of bearing capacity realisation.

Стаття надійшла до видання:
20.05.2026.

Стаття прийнята до друку після рецензування:
27.05.2026.

Стаття опублікована:
30.05.2026