

УДК 624.131

РОБОТА БУРОВИХ МІКРОПАЛЬ ІЗ РОЗШИРЕНОЮ П'ЯТОЮ

О. Гнатюк, к. т. н.

ORCID ID: 0000-0003-2218-0295

В. Крет, аспірант

ORCID ID: 0009-0000-2407-5435

Львівський національний університет природокористування

<https://doi.org/10.31734/architecture2025.26.051>

Гнатюк О., Крет В. Робота бурових мікропаль із розширеною п'ятою

У дослідженнях буронабивних палей із розширеннями виявлено суттєві розбіжності між розрахунковими та експериментальними значеннями несучої здатності, що свідчить про потенціал для вдосконалення наявних методик. Зауважено значний внесок українських учених, які дослідили вплив кількості та розташування розширень, а також різних типів ґрунтів на ефективність палей. Розроблено нові методики розрахунку несучої здатності, уточнено коефіцієнти для розрахунків та підтверджено їхню надійність натурними випробуваннями.

Значну увагу приділено трубобетонним мікроपालям, які виявили кращі показники в слабких ґрунтах і мають переваги з кута зору зручності використання та мінімального впливу на будівлі. Показано, що палі з розширеною п'ятою мають вищу несучу здатність та менше осідання порівняно з фрикційними палями. Чисельне моделювання з використанням PLAXIS 3D і ANSYS WORKBENCH підтвердило ефективність таких конструкцій та дозволило точно змодельовувати їхню поведінку. Встановлено, що глибина, кількість і діаметр розширень суттєво впливають на міцність і деформаційні характеристики.

Проведено техніко-економічні оцінки, які вказують на доцільність використання буронабивних мікропалей із розширеннями в умовах щільної забудови, зменшуючи витрати на демонтаж і земляні роботи. Загалом дослідження показують актуальність подальшого вдосконалення моделей розрахунку та впровадження нових конструктивних рішень у пальових фундаментах.

Ключові слова: буронабивні палі, мікропалі з розширенням, несуча здатність, статичні навантаження, дисперсні ґрунти, розширена п'ята палі, геотехнічні дослідження, глибокий фундамент, випробування палей, осадка основи, армування палей, діаметр палей, буріння свердловин, методика випробувань, опір ґрунту, граничний стан, натурні дослідження, деформації основ, пальові фундаменти, технічна ефективність.

Hnatiuk O., Kret V. Operation of drilled micropiles with enlarged base

Significant discrepancies have been identified in studies of drilled piles with enlargements, particularly regarding the differences between calculated and experimental values of bearing capacity. This indicates an opportunity to enhance existing methodologies. Ukrainian researchers have made notable contributions to this field by examining the impact of the number and arrangement of enlargements, as well as various soil types, on pile performance. They have developed new methods for calculating bearing capacity, refined calculation coefficients, and validated their reliability through field tests.

Considerable focus has also been directed towards concrete-filled steel tube micropiles, which demonstrate superior performance in weak soil conditions and provide advantages such as ease of use and minimal disruption to existing structures. Piles with an enlarged base exhibit higher bearing capacity and reduced settlement compared to friction piles. Numerical modeling utilizing PLAXIS 3D and ANSYS WORKBENCH has confirmed the effectiveness of these structures and enabled accurate simulations of their behavior. It was determined that the depth, number, and diameter of enlargements significantly influence strength and deformation characteristics.

Technical and economic assessments have shown that the use of drilled micropiles with enlargements is feasible in densely built-up areas, leading to reductions in demolition and earthwork costs. Overall, this research underscores the importance of further enhancing calculation models and adopting innovative structural solutions in pile foundations.

Keywords: bored piles, micropiles with enlargement, bearing capacity, static loads, dispersive soils, enlarged pile base, geotechnical research, deep foundation, pile testing, foundation settlement, pile reinforcement, pile diameter, borehole drilling, testing methodology, soil resistance, limit state, field research, foundation deformations, pile foundations, technical efficiency.

Постановка проблеми. Зростаюче будівництво та урбанізація міст вимагають освоєння нових територій із несприятливими геологічними умовами. В умовах щільної забудови та реконст-

рукції будівель необхідно використовувати нові типи фундаментів, які забезпечують надійність і мінімізують вплив на навколишні споруди. Одним із таких рішень є пальові системи, що дозволяють

зводити будівлі у складних ґрунтових умовах, зменшуючи деформації осідання та оптимізуючи витрати на земляні роботи.

У місті Львові з огляду на слабкі ґрунти часто спостерігається руйнування будівель через нерівномірне осідання фундаментів. Це створює нагальну потребу в реконструкції об'єктів, зокрема в центральній частині міста, що є об'єктом під охороною ЮНЕСКО. Для підсилення фундаментів у складних умовах важливо розробити методи, що дозволяють зберегти стабільність будівель без їх демонтажу, зокрема при зміні функціонального призначення чи надбудови поверхів.

Одним із ефективних рішень є використання паль із розширенням, що забезпечують високу несучу здатність. Такі палі використовують разом із монолітною плитою, що розподіляє навантаження між плитою та пальовою системою. Важливим є також економічне і екологічне обґрунтування таких рішень, зокрема зменшення шуму і енерговитрат під час монтажу. Однак широке застосування таких паль гальмується через недосконалість методик розрахунку та проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У численних дослідженнях, присвячених буронабивним палям із розширеннями, значний внесок зробили Корнієнко М. В., який вивчав вплив замочування на несучу здатність паль, та Демчина Б. Г., який досліджував трубобетонні мікропалі у слабких ґрунтах. Гнатюк О. Т. аналізував роботу буронабивних мікропаль у ґрунтах різного типу, а Бойко І. П. вивчав чисельне моделювання взаємодії паль та фундаментних плит. Моргун А. С. і Наср А. М. досліджували поведінку паль із розширенням у складних ґрунтових умовах із застосуванням методу скінченних елементів. Ефрем Фелекс довів перевагу паль з розширенням над фрикційними при вертикальних навантаженнях, а професор Мадх'я-Прадеш виявив зменшення горизонтальних переміщень конструкцій при використанні фундаментних плит. Отже, сучасні дослідження охоплюють широкий спектр питань – від польових випробувань і лабораторного аналізу до чисельного моделювання, що дозволяє вдосконалювати проєктні підходи до пальових фундаментів.

Постановка завдання. Розвиток будівельних технологій та зростаючі вимоги до надійності й ефективності фундаментних конструкцій зумовлюють необхідність удосконалення пальових систем. Одним із перспективних рішень у сфері фундаментобудування є палі з розширенням, які забезпечують підвищену несучу здатність та ефективну взаємодію з ґрунтовою основою.

Сьогодні тривають дослідження, спрямовані на вивчення впливу геометричних параметрів розширень, технологій їх улаштування та особливостей роботи в різних інженерно-геологічних умовах. Незважаючи на наявні експериментальні й теоретичні напрацювання, актуальним залишається питання розроблення методик розрахунку, проєктування та оцінювання довготривалої експлуатаційної надійності таких паль.

Наше завдання – аналіз сучасного стану досліджень паль із розширенням, вивчення їхніх конструктивних особливостей, методів розрахунку та технічних рішень, а також узагальнення новітніх досягнень у цій сфері. Особливу увагу приділено ефективності таких паль у складних інженерно-геологічних умовах, їхньої взаємодії з ґрунтовою основою та перспективам подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. Важливий внесок у вивчення і розвиток буронабивних паль із розширеннями зробив кандидат технічних наук, професор М. В. Корнієнко. Зокрема у дослідженні [15] проведено статичні випробування буронабивних паль на вдавлювання та висмикування в лесових ґрунтах за умов їх замочування. Вода подавалася через спеціальні дренажні свердловини. Результати експериментів виявили значні відмінності (понад 50 %) між розрахунковими і експериментальними значеннями сил тертя. Виявлена фактична несуча здатність паль була значно вищою за розрахункову, що свідчить про значний потенціал для покращення точності методів розрахунку та ефективності використання таких паль. Подібні розбіжності спостерігаються також для інших типів паль, зокрема для забивних. Проте для буронабивних паль із розширеною п'ятою ці невідповідності зумовлені низкою факторів, які впливають на визначення несучої здатності, зокрема фізико-механічними властивостями ґрунтів, аналітичними методами визначення опору ґрунту та структурною міцністю.

У праці [16] досліджено вплив розширень на вдавлювання паль з одним, двома і трьома розширеннями. Під час досліджень вперше було виявлено, як взаємодіють різні типи розширень для вдавлюваних паль в однорідних ґрунтах. Для неоднорідних ґрунтових умов з'ясовано, що ефективність застосування двох і більше розширень залежить від конкретних ґрунтових умов та розташування розширень на стовбурі палі. Було запропоновано нову методику розрахунку несучої здатності одиночної палі з розширеннями, що базується на врахуванні відстані між розши-

реннями та їх розташування відносно кінця палі. Також уточнено коефіцієнти для роботи ґрунту під нижнім кінцем палі та під розширеннями, що дозволило створити формулу для попереднього визначення несучої здатності вдавлюваних паль з кількома розширеннями. Результати аналізу несучої здатності паль, розраховані за запропонованою методикою, виявились близькими до результатів статичних випробувань з допустимими відхиленнями, що дозволяє рекомендувати її для практичного використання.

Змістовні дослідження основ [14] зосереджуються на вимірюванні модуля деформації ґрунту за допомогою стискання. Різниця між величинами модуля, отриманими під час компресійних та штапових випробувань, становила до 16,5 разів. Ці розбіжності пояснюються відмінностями в підготовці поверхні ґрунту в польових і лабораторних умовах. Модулі, визначені за марками, виявились більшими за ті, що отримані за допомогою переміщення штампа, через наявність зони зім'яття під штампом.

У дослідженні [13] проведено випробування несучої здатності палі, після чого отримані результати порівняно з розрахунковими значеннями. За результатами розрахунків виявлена різниця у несучій здатності між українськими та європейськими стандартами на рівні 10,0 % і 13,2 % відповідно. Це вказує на необхідність уточнення критеріїв оцінки несучої здатності для паль великого діаметру, що підтверджується випробуваннями паль та баретів діаметром понад 1,6 м.

Фундаментальні дослідження роботи трубобетонних мікропаль здійснив Демчина Б. Г. У статті [17] досліджено методи вдавлювання для визначення експериментальних значень несучої здатності палі. Виявлено, що фактична несуча здатність палі має значний запас міцності (23 %) порівняно з розрахунковими величинами, отриманими відповідно до ДСТУ Б.В.2.1-27:2010. Підкреслено ефективність використання мікропаль у слабких ґрунтах, які не завдають шкоди екології, мають низьку собівартість і не спричиняють звукових, вібраційних або ударних ефектів.

У праці [10] розроблено спеціальну п'яту паль з вимірювальною пластиною, що дозволило вивчити розподіл зусиль по поверхні тертя та під підшвою палі. Розроблені методики були використані при натурних випробуваннях у м. Хмельницькому [11] та у м. Львові [26]. Результати експериментів підтвердили ефективність використання мікропаль без необхідності застосування динамічних навантажень, що не має

значного впливу на сусідні будівлі. Зазначено, що робота паль у різних ґрунтах потребує подальших досліджень.

Польові дослідження трубобетонних мікропаль висвітлені у працях доктора технічних наук, професора Бойка І. П. [1; 3; 5]. Зокрема у [1] встановлено, що несуча здатність паль у піщаних ґрунтах на 25 % перевищує розрахункову величину, визначену згідно з ДБН В.2.1-10-2009. У [3] досліджено взаємодію пальового поля і фундаментної плити за допомогою числового моделювання, де було досягнуто високої точності (до 10 %) між аналітичними і експериментальними даними. Важливу роль у точності результатів відіграють методика досліджень, професійна підготовка спеціалістів та об'єктивність отриманих результатів.

Буронабивні мікропалі із розширеною п'ятою активно досліджував Гнатюк О. Т. Зокрема роботу буронабивних мікропаль [19] під дією горизонтальних навантажень та можливість використання куців мікропаль як підпірних стінок. У статті [7] порівняно ефективність паль діаметром 250 мм із розширенням 400 мм і паль діаметром 200 мм із розширенням 350 мм у пластичному супіску в лабораторних умовах. Результати показали, що несуча здатність палі більшого діаметра в 1,2 рази перевищує аналогічний показник для меншого зразка. Техніко-економічний аналіз показав незначний економічний вплив (приблизно 2 %) при використанні паль меншого діаметра.

Також було проведено 25 натурних досліджень [8] буронабивних мікропаль із розширенням у ґрунтах різного типу. Встановлено співвідношення між розрахунковим і експериментальним допустимим навантаженням на палі для основного несучого шару ґрунту. Середні значення цього співвідношення варіювало від 1,1 для дрібних пісків до 3,52 для суглинків. Найбільш близькими до фактичних є значення для дрібних пісків, тоді як для супісків розрахункові значення виявились найбільш недооціненими. Ці розбіжності вимагають подальших досліджень із використанням нових методів моделювання для точного прогнозування реальної несучої здатності залізобетонних паль.

Дослідження буронабивної палі в ґрунтоцементній оболонці, проведені на базі Полтавського національного університету імені Юрія Кондратюка [18], показали, що така паля має більшу несучу здатність порівняно з традиційними залізобетонними пальовими конструкціями. Статичні випробування підтвердили високу точність моделювання роботи таких паль.

Лебеда О. Ф. у своєму дослідженні [20] аналізував фундаменти із вдавлюваних мікропаль в умовах наявної забудови. Результати підтвердили економічну доцільність використання таких фундаментів, оскільки це дозволяє зменшити обсяг демонтажних та земляних робіт, запобігаючи негативному впливу на прилеглі будівлі.

Кваша В. Г. провів випробування буронабивної палі фундаменту в стволі шахти [12], що підтвердило її несучу здатність у металевій обсадній трубі та правильність конструктивних рішень для фундаменту.

Грецький Д. В. на базі Черкаського державного технологічного університету досліджував [9] технологічний процес бетонування буронабивних паль, у результаті чого встановлено оптимальну рухливість бетонних сумішей при напірному бетонуванні, а також відзначено мінімальний опір арматурного каркасу при підйомі бетонних сумішей, що дозволяє занурювати його у свердловину до початку бетонування палі.

Чисельне моделювання взаємодії бурових паль досліджено у працях Бойка І. П. [4; 6], де визначено несучу здатність буроін'єкційних паль у піщаних ґрунтах. Виявлено, що аналітичний метод, згідно з ДБН В.2.1-10-2009, занижує несучу здатність палі на 20 %. Натомість застосування числових методів, зокрема використання ПК «Lira», дозволяє наблизити результати статичного навантаження паль до результатів моделювання. У статті [2] проаналізовано значний вплив послідовності будівництва окремих секцій висотних будинків, де у певних випадках зміни у несучій здатності можуть досягати до 30 % до і після зведення секцій.

Дослідження Моргуна А. С. присвячені буронабивним палям із розширеною п'ятою у набухаючих ґрунтах [21; 22]. Зокрема проведено значну роботу з моделювання пальових фундаментів за допомогою методу скінченних елементів. Відзначено високу точність аналітичних результатів комп'ютерних моделей та актуальність впровадження сучасних методів розрахунку для підвищення точності прогнозування поведінки таких конструкцій.

Наср А. М. у своєму дослідженні [27] змодлював роботу буронабивних паль із розширенням різної конструкції. Зокрема порівняно палі з 1, 2 та 3 розширеннями, а також різним співвідношенням довжини палі до діаметра розширення. Для моделювання використано програмний комплекс PLAXIS 3D. Зазначено значне збільшення несучої здатності паль із збільшенням діаметра розширення і кількості розширень. Автор вказує на

важливість подальших досліджень співвідношення відстані між розширеннями до діаметра палі.

Ефрем Фелеке [24] порівнює роботу фрикційної палі з палею з розширенням у м. Аддис-Абеба (Ефіопія) при дії вертикального осьового навантаження. У дослідженні використано метод скінченних елементів у програмі PLAXIS 3D. Встановлено, що модель ґрунту Мора-Кулона та лінійно-пружна модель палі можуть ефективно відображати взаємодію палі з ґрунтом, а збільшення діаметра палі зменшує її осідання. Палі з розширеною п'ятою мають удвічі більшу ефективність у зменшенні осідання порівняно з фрикційними палями, а збільшення їх діаметра, висоти та модуля пружності значно покращує несучу здатність. Аналіз показав, що із збільшенням глибини паль їх осідання зменшується, а більш точне моделювання можливе при використанні моделі ґрунту з ущільненням та реальних лабораторних даних. Подальші дослідження можуть охоплювати аналіз групи паль, впливу бічного та динамічного навантаження, а також використання точніших геотехнічних параметрів для покращення точності розрахунків.

Професор Мадх'я-Прадеш [23] досліджує роботу каркасних чотириповерхових будинків із різними пальовими фундаментами у програмному комплексі ANSYS WORKBENCH. Зокрема порівняно роботу окремо буронабивних паль, паль із розширенням та паль із додатковим мілким фундаментом. Результати аналізу методом кінцевих елементів показують, що додавання фундаментної плити до окремої бурової палі з розширеною п'ятою значно зменшує горизонтальне переміщення каркаса. Для каркаса, що спирається на пальовий фундамент, зміщення перебуває в межах 22,12–27,86 %, тоді як для каркаса на палях із фундаментною плитою воно зменшується до 17–22 %. У випадку окремого мілкого фундаменту зміщення значно більше і становить 49–60 %. Загальна тенденція досліджень показує, що горизонтальні переміщення найбільші для каркаса на ізольованому фундаменті, тоді як додавання фундаментної плити до пальового фундаменту зменшує зміщення приблизно на 22 % порівняно з варіантом без плити.

У статті [25] Казімеж Юзеф'як та Артур Збіяк досліджують вплив опорної кінцевої плити на несучу здатність гвинтових мікропаль за допомогою числового моделювання методом скінченних елементів у програмному середовищі PLAXIS 3D. Оцінено зміни в поведінці фундаменту при використанні модифікованих паль із розши-

ренням порівняно з традиційними гвинтовими палями, зокрема в умовах слабких ґрунтів. Дослідження показало, що наявність розширення значно підвищує вертикальний опір палі та змінює механізм руйнування ґрунту, забезпечуючи більш рівномірний розподіл навантаження.

Висновки. Наявні методики розрахунку несучої здатності бурових мікропалей із розширеною п'ятою недостатньо враховують просторову взаємодію палі з ґрунтом. Типові підходи спрощують геометрію основи та не враховують складну структуру деформацій у зоні п'яти. Для більш точного прогнозування поведінки таких палей необхідно досліджувати їхню роботу у ґрунтах різного типу з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей. Особливо важливе чисельне моделювання процесу взаємодії «пала-ґрунт» для точнішого прогнозу роботи основи. Крім того, необхідно розробити детальні рекомендації щодо параметрів моделювання в сучасних комп'ютерних комплексах для інженерної практики.

Бібліографічний список

1. Бойко І. П., Гаврилюк О. В. Визначення несучої здатності бурових палей в піщаній основі. *Основи та фундаменти*. 2014. Вип. 35. С. 60–67.
2. Бойко І. П., Носенко В. С. Вплив послідовності зведення суміжних секцій висотного будинку на перерозподіл зусиль у пальових фундаментах. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 4 (1). С. 54–60.
3. Бойко І. П., Підлущий В. Л. Дослідження влаштування палей у фундаменті різної довжини. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 4 (2). С. 42–48.
4. Бойко І. П., Пятков О. В., Підлущий В. Л. Дослідження напружено-деформованого стану фундаментів з палями різної довжини багатопверхових будинків у м. Київ. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Галузеве машинобудування, будівництво*. 2013. Вип. 3 (2). С. 40–48.
5. Бойко І. П. Польові методи випробування палей статичними навантаженнями. *Основи та фундаменти*. 2015. Вип. 36. С. 3–8.
6. Бойко І. П., Гаврилюк О. В. Чисельне моделювання взаємодії бурової палі з піщаною основою. *Основи та фундаменти*. 2013. Вип. 34. С. 57–64.
7. Гнатюк О., Косарчин В., Лапчук М. Дослідження роботи буронабивних залізобетонних мікропалей з поширеною п'ятою різного діаметра. *Вісник Львівського національного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2019. № 20. С. 50–52.
8. Гнатюк О., Лапчук М., Холод П. Несуча здатність буронабивних мікропалей з розширеною п'ятою у ґрунтах різного типу. *Вісник Львівського національного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2014. № 15. С. 74–79.
9. Грецький Д. В. Дослідне визначення основних технологічних параметрів, що впливають на процес бетонування буронабивних палей. *Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2013. Вип. 25. С. 643–650.
10. Демчина Б., Кунанець Ю., Волосецький Н. Вимірювання зусиль під підшовою палі за допомогою спеціальної вимірювальної пластини. *Вісник Львівського національного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2014. № 15. С. 40–45.
11. Демчина Б., Кунанець Ю., Главацький Є., Сурмай М. Застосування вдавлюваних трубобетонних палей при реконструкції інженерно-лабораторного корпусу ПАТ «Хмельницькобленерго». *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2020. Вип. 6. С. 64–71.
12. Кваша В. Г., Салійчук Л. В. Випробування статичним вдавлювальним навантаженням буронабивної палі фундаментів надшахтної будівлі технологічного комплексу головного ствола шахти. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2012. № 742. С. 106–110.
13. Корнієнко М. В., Заварзіна Ю. І. Визначення несучої здатності палі великого діаметру за результатами статичних випробувань і за нормативними документами. *Основи та фундаменти*. 2014. Вип. 35. С. 54–59.
14. Корнієнко М. В., Пятков О. В., Поклонський С. В. Вплив методики обробки результатів дослідження ґрунту при стисканні на величину модуля деформації. *Основи та фундаменти*. 2014. Вип. 35. С. 92–101.
15. Корнієнко М. В., Карпенко Д. А. Несуча здатність буронабивних палей з розширенням в лесових ґрунтах за результатами статичних випробувань. *Основи і фундаменти: міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2008. № 31. С. 54–63.
16. Корнієнко М. В., Пресняков О. Б., Балахшин О. І. Розрахунок несучої здатності вдавлюваних палей з одним та двома розширеннями. *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 4 (1). С. 146–153.
17. Кунанець Ю. Підсилення фундаментів методом вдавлювання трубобетонних мікропалей. *Вісник Львівського національного аграрного університету: архітектура і сільськогосподарське будівництво*. 2020. № 21. С. 66–70.
18. Лапін М. І., Петруняк М. В. Оцінка напружено-деформованого стану системи «буронабивна пала в ґрунтоцементній оболонці – основа». *Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Галузеве машинобудування, будівництво*. 2008. Вип. 22. С. 38–43.
19. Лапчук М. А., Гнатюк О. Т., Холод П. Ф. Результати експериментально-теоретичних досліджень

кущів буронабивних мікропаль при дії горизонтальних навантажень. *Будівельні конструкції*. 2013. Вип. 79. С. 173–178.

20. Лебеда О. Ф., Корнієнко М. В., Мовчан В. О., Приступчук В. В. Застосування вдавлюваних мікропаль при влаштуванні фундаментів нового будинку в умовах існуючої забудови. *Будівельні конструкції*. 2013. Вип. 79. С. 307–312.

21. Моргун А. С., Плясовиця В. Ю. Прогнозування за методом граничних елементів деформативності буронабивних паль з розширеною основою. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 6. С. 7–10.

22. Моргун А. С., Чженфен Тянь. Робота буронабивних паль з розширеною п'ятою в набухаючих ґрунтах за числовим методом граничних елементів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2022. № 1. С. 38–42.

23. Chourasia J., Pendharkar U., Singh R. Dynamic Analysis of Pile Foundation with Footing in Different Foundation Soils. *International Research Journal*

of Engineering and Technology (IRJET). 2018. № 5 (1). P. 12–16.

24. Haile, Ephrem, Zeleke, Addisalem. Comparative Study on Load Carrying Capacity of Under Reamed and Friction Pile Using Finite Element Based Software: Case of Selected Site in Addis Ababa. 10.13140/RG.2.2.27642.77768. 2018.

25. Kazimierz Józefiak, Artur Zbiciak, Maciej Maślakowski, Tomasz Piotrowski. Numerical Modelling and Bearing Capacity Analysis of Pile Foundation. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 111. P. 356–363.

26. Kunanets Y., Demchyna B. Applying of multi-section pressed piles in the complex with a foundation plate during the construction of the "Taurus" hotel. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. Вип. 79. С. 145–151.

27. Nasr A. M., Azzam W. R., Harran I. S. Geometrical Effect of Under-reamed Pile in Clay under Compression Load Numerical-Study. *Advances in Geological and Geotechnical Engineering Research*. 2023. № 5 (1). P. 1–9.

Стаття надійшла 18.02.2025