

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ПЕРЕБИЙНІС МИХАЙЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 624.131:621.154

ДИСЕРТАЦІЯ

**РІЗНИЦЯ В РОБОТІ БУРОВИХ І ЗАБИВНИХ ПАЛЬ
У СКЛАДІ ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ**

Спеціальність 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Галузь знань 19 «Архітектура та будівництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



_____. М.В. Перебийніс

Науковий керівник:

Блащук Наталя Вікторівна,
кандидат технічних наук

Вінниця – 2026

АНОТАЦІЯ

Перебийніс М.В. Різниця в роботі бурових і забивних паль у складі пальового фундаменту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – «Будівництво та цивільна інженерія» «галузь знань 19 – «Архітектура та будівництво» – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2026.

Дисертацію присвячено дослідженню різниці в роботі забивних та бурових паль у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту з низьким ростверком.

Актуальність теми зумовлена потребою в розробці та удосконалення методики врахування спільної роботи паль в групі та частки навантаження, що сприймає ростверк в складі стрічкового пальового однорядного фундаменту.

Врахування ступеню реалізації паль при сумісній роботі в складі стрічкового пальового однорядного фундаменту на палях є важливим напрямком в досліджень в галузі проектування основ та фундаментів. Відомо, що палі в складі пальового фундаменту показують вищу ступінь реалізації ніж одиночна паля. Також відомо, що палі влаштовані з вийманням ґрунту мають більший ступінь реалізації ніж влаштовані без виймання ґрунту. Ростверк в складі пальового фундаменту передає частину навантаження на ґрунт міжпальового простору, а частину розподіляє на палі.

Ці ефекти позитивно впливають на несучу здатність пальового фундаменту та залежать від довжини та кроку паль і фізико механічних характеристик ґрунтової основи. Дослідники в галузі основ та фундаментів пропонують методи врахування особливостей роботи системи «ростверк - палі - ґрунтова основа», які в тій чи іншій мірі враховують вплив геотехнічних процесів на несучу здатність фундаменту, але на даний час не існує єдиного методу ефективного врахування особливостей роботи пальових фундаментів під навантаженням, а ті, які існують засновані на ряді припущень.

Впровадження методів врахування вищеописаних факторів при проектуванні пальових фундаментів дозволить підвищити ефективність використання матеріалів та трудових ресурсів при влаштуванні стрічкових пальових фундаментів, так як дозволяє забезпечити необхідну несучу здатність пальового фундаменту меншою кількістю паль.

Метою роботи є удосконалення методики розрахунку несучої здатності палі у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту з урахуванням впливу кроку, довжини і способу улаштування паль.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії елементів стрічкового пальового однорядного фундаменту з ґрунтовою основою під навантаженням.

Предмет дослідження – різниця в роботі бурових і забивних паль у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту з низьким ростверком під дією вертикального навантаження.

Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі проведено фізичні дослідження на маломасштабних моделях в лабораторних умовах та чисельне моделювання методом скінченних елементів напружено-деформованого стану системи «стрічковий паловий ростверк – палі - ґрунтова основа».

У першому розділі проведено аналіз досвіду досліджень, як теоретичних так і практичних особливостей поведінки пальових фундаментів під навантаженням та залежність реалізації несучої здатності фундаменту від геометричних характеристик, способу розміщення в ростверку та способу влаштування паль. Розглянуто дослідження ефекту сумісної роботи паль та ростверку, які взаємодіють між собою через ґрунт підвищуючи при цьому свої характеристики несучої здатності, що обумовлено складними геотехнічними процесами, які проходять і ґрунті, де ростверк, на відміну від класичних методів визначення несучої здатності пальових фундаментів несе частину навантаження, а частину розподіляє навантаження на палі. Також розробка та удосконалення методів визначення несучої здатності, які враховували б роль

ростверку в несучій здатності, ефект сумісної роботи паль, між собою та ростверком.

У підрозділі 1.2. розглянуто чисельного моделювання для дослідження напружено-деформованого стану в будівельних конструкціях та основах, що базується на методі скінченних елементів. Описано переваги та недоліки чисельного методу дослідження. Надано перелік програмних комплексів заснованих на методі скінченних елементів від розробників різних країн світу та наведено приклад ефективного використання чисельного моделювання для розробки оптимального проектного рішення.

У підрозділі 1.3 розглянуто існуючі методи розрахунку пальових фундаментів та нормативна база, настановами якої керуються при розрахунку та проектуванні пальових фундаментів.

У другому розділі описані результати фізичного дослідження на маломасштабних моделях у лабораторному лотку стрічкових пальових однорядних фундаментів на бурових та забивних палях зі зміною довжини та кроку у пал. Наведено опис упорної конструкції для стрічкових фундаментів та одиночних паль, моделей паль та ростверку, характеристики ґрунту в лотку, прилади та обладнання, необхідне для проведення випробування. Складено програму виробування стрічкових фундаментів з низьким ростверком на палях з різним кроком, довжиною та способом влаштування, по якій виконано серію досліджень. Показано фото конструкції під час випробування та розроблених для дослідження приладів. Результати випробування представлено у вигляді графіків залежності навантаження - осідання. Виконано порівняння забивних і бурових паль в складі стрічкового фундаменту та одиночних, на основі якого визначений ступінь їх реалізації. Визначено частку навантаження, яку несе ростверк, а яку передає на палі. Результати порівняння роботи паль та ростверку при різному кроці та довжині паль представлено у вигляді таблиць та порівняльних графіків. Отримані результати дослідження вказують на підвищення частки ростверку при збільшенні кроку паль та зниження при збільшенні довжини паль, а ступінь реалізації паль підвищується зі збільшенням кроку та довжини паль. Частка

навантаження, що сприймає ростверк та ступінь реалізації паль вища при використанні бурових паль ніж забивних.

У третьому розділі описано результати чисельного моделювання напружено-деформованого стану системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа».

В підрозділі 3.1. обґрунтовано вибір розрахункової моделі системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа» в програмному комплексі Sofistik. Виконано моделювання одиночної забивної і бурової палі та пальового фундаменту, результати якого порівняні з натурним випробуванням для оцінки коректності роботи вибраної розрахункової моделі.

В підрозділі 3.2. описано геометричні параметри моделі стрічкового фундаменту з низьким ростверком на палях та фізико механічні властивості ґрунту. Представлена програма чисельного моделювання, яка розділена на дві підгрупи в різних ґрунтових умовах (пісок дрібний та суглинок) для паль влаштованих з вийманням та без виймання ґрунту різної довжини та при різному кроці. Показані схеми та зображення з програмного комплексу Sofistik розрахункової моделі фундаменту та ґрунтового масиву.

В підрозділі 3.3. описані результати моделювання системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа» у вигляді таблиць та графіків залежності навантаження - осідання для фундаментів всіх випробуваних варіантів та одиночних паль тієї ж довжини та діаметром перерізу. Показано графіки залежності навантаження від кроку при різній довжині. Визначено ступінь реалізації паль в складі фундаменту, частку навантаження що несе ростверк величину тиску під ростверком. Показано у вигляді таблиць та графіків. Отримано величину деформації масиву ґрунтової основи під фундаментом та представлено у вигляді ілюстрацій.

В підрозділі 3.4. описано порівняння результатів чисельного моделювання з результатами теоретичних розрахунків несучої здатності фундаментів для виявлення кількісної різниці роботи бурових і забивних паль в складі стрічкового фундаменту з низьким ростверком. Результати показані в

формі таблиць, та графіків. Опираючись на порівняння результатів фізичного моделювання з результатами теоретичних розрахунків та результати дослідження надано практичні рекомендації щодо розрахунку стрічкових пальових фундаментів.

Запропоновано удосконалення методики визначення необхідної кількості паль в складі однорядного стрічкового пального фундаменту, яка враховує різницю в роботі бурових та забивних паль та залежність ступеню реалізації палі в складі стрічкового фундаменту від довжини та кроку. Удосконалення полягає у врахуванні ступеню реалізації палі в складі стрічкового пального фундаменту. На прикладі проектного. рішення фундаменту багатоповерхового будинку доведено екстремальну доцільність використання методу.

Результати моделювання системи «стрічковий паловий ростверк – палі - ґрунтова основа» підтверджують висновки отримані при фізичному моделюванні та вказують на більший приріст ступеню реалізації при влаштуванні бурових паль ніж забивних та показує залежність реалізації резерву несучої здатності стрічкового фундаменту на палях від довжини та кроку паль в різних ґрунтових умовах.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- вперше встановлено кількісні та якісні відмінності перерозподілу вертикального навантаження між низьким стрічковим ростверком та палями у складі стрічкового пального однорядного фундаменту для паль з різним способом улаштування;
- удосконалено методику розрахунку несучої здатності паль у складі стрічкового пального однорядного фундаменту;
- експериментально отримано нові залежності «навантаження—осідання» (в межах маломасштабного фізичного моделювання) для стрічкових палових однорядних фундаментів, які наочно демонструють відмінності у розподілі навантаження між елементами пального фундаменту для випадків із буровими та забивними палями.

дістала подальшого розвитку методика просторового чисельного моделювання НДС системи «стрічковий пальовий ростверк – палі – ґрунтова основа» у фізично й геометрично нелінійній постановці (ПК SOFiSTiK).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Тема дисертаційної роботи відповідає напрямку наукових тем кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету – №6ОК1 «Інноваційні технології визначення напружено-деформованого стану системи будівля-фундамент-основа та окремих її елементів» та 60-К6 «Удосконалення методів розрахунку і технологій автоматизованого проектування та влаштування елементів системи будівля-фундамент-основа з врахуванням інформаційних технологій супроводу об'єктів будівництва».

Практичне значення роботи полягає в тому що:

- розроблено практичні рекомендації щодо інженерного розрахунку та проектування стрічкових пальових однорядних фундаментів із низьким ростверком при різному способі влаштування паль;

- створено та верифіковано просторові розрахункові моделі системи «ростверк – палі – ґрунтова основа» у програмному комплексі SOFiSTiK у фізично й геометрично нелінійній постановці;

- врахування реального перерозподілу зусиль між елементами фундаменту та ґрунтом дозволяє оптимізувати геометричні параметри пальового фундаменту (зменшити їх кількість) та забезпечує зниження матеріаломісткості та вартості влаштування стрічкових пальових однорядних фундаментів.

- результати дослідження впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів Вінницького національного технічного університету, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Ключові слова: стрічковий пальовий фундамент, ґрунтова основа, забивна паля, бурова паля, ростверк, лоткове дослідження, метод скінченних елементів, осідання, чисельне моделювання, напружено-деформований стан, перерозподіл навантаження, частка ростверку.

ABSTRACT

Perebyinis M.V. The difference in the operation of drilled and driven piles in the composition of a pile foundation – Qualifying scientific work as manuscript.

The thesis for the degree of philosophy doctor on specialty 05.23.02 «Bases and Foundations» (192 – Construction and civil engineering). – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2026.

The dissertation is devoted to studying the behavioral differences between driven and bored piles within a pile-supported strip foundation with a low pile cap.

The relevance of the topic is conditioned by the need to develop and improve the methodology for considering the interaction of piles within a group and the portion of the load sustained by the grillage as part of a single-row strip pile foundation.

Accounting for the degree of pile capacity mobilization during cooperative behavior within a single-row strip pile foundation is an important research direction in the field of soil mechanics and foundation engineering. It is well known that piles within a pile group exhibit a higher degree of capacity mobilization compared to an isolated pile. It is also established that bored piles (installed with soil extraction) demonstrate a greater degree of capacity mobilization than driven or displacement piles (installed without soil extraction). The grillage within the pile foundation transfers a portion of the load to the soil between the piles, while distributing the remaining portion among the piles.

These effects favorably influence the bearing capacity of the pile foundation and depend on the length and spacing of the piles, as well as the physical and mechanical properties of the soil base. Researchers in the field of soil mechanics and foundations propose various methods to account for the specific behavior of the "grillage-piles-soil base" system, which to a certain extent reflect the impact of geotechnical processes on the bearing capacity of the foundation. However, there is currently no unified method to effectively account for the specific behavior of pile foundations under load, and existing methods are based on a number of assumptions.

The implementation of methods for considering the above-mentioned factors in the design of pile foundations will increase the efficiency of material and labor resource utilization during the construction of strip pile foundations, as it allows ensuring the required bearing capacity of the pile foundation with a smaller number of piles.

The purpose of the work is to improve the methodology for calculating the bearing capacity of a pile within a single-row strip pile foundation, taking into account the influence of the spacing, length, and installation method of the piles.

Object of research: the process of interaction between the elements of a single-row strip pile foundation and the soil base under load.

Subject of research: the difference in the performance of bored and driven piles within a single-row strip pile foundation with a low grillage under the action of a vertical load.

To achieve the set objective, the dissertation thesis involves conducting physical studies on small-scale models under laboratory conditions and numerical modeling of the stress-strain state of the "strip pile grillage – piles – soil base" system using the finite element method.

In the first chapter, an analysis of research experience is conducted, covering both theoretical and practical aspects of pile foundation behavior under load, as well as the dependence of the foundation's bearing capacity mobilization on geometric characteristics, placement configuration within the grillage, and the pile installation method. Studies on the interaction effect between piles and the grillage, which interact with each other through the soil, thereby increasing their bearing capacity characteristics, are reviewed. This interaction is driven by complex geotechnical processes occurring in the soil, where the grillage—contrary to classical methods for determining the bearing capacity of pile foundations—sustains a portion of the load while distributing the remaining part among the piles. Furthermore, the development and improvement of methods for determining bearing capacity that would account for the role of the grillage in the overall bearing capacity, as well as the cooperative behavior effect among the piles themselves and with the grillage, are addressed.

In subsection 1.2, numerical modeling for investigating the stress-strain state in building structures and foundations based on the finite element method is reviewed. The advantages and disadvantages of this numerical research method are described. A list of software packages based on the finite element method from developers worldwide is provided, and an example of the effective use of numerical modeling for developing an optimal design solution is presented.

In subsection 1.3, existing methods for calculating pile foundations and the regulatory framework, the guidelines of which govern the calculation and design of pile foundations, are reviewed.

In the second chapter, the results of physical research on small-scale models in a laboratory flume of single-row strip pile foundations on bored and driven piles with varying pile lengths and spacings are described. A description of the retaining structure for strip foundations and isolated piles, models of piles and the grillage, soil characteristics in the flume, and the instruments and equipment required for testing is provided. A testing program for low-grillage strip foundations on piles with different spacings, lengths, and installation methods was compiled, according to which a series of studies was conducted. Photographs of the structure during testing and the instruments developed for the research are shown. The test results are presented in the form of load-settlement curves. A comparison between driven and bored piles within a strip foundation and isolated piles was performed, based on which the degree of their capacity mobilization was determined. The portion of the load sustained by the grillage and the portion transferred to the piles were determined. The results comparing the performance of the piles and the grillage at different pile spacings and lengths are presented in the form of tables and comparative graphs. The obtained research results indicate an increase in the grillage share with an increase in pile spacing and a decrease with an increase in pile length, while the degree of pile capacity mobilization increases with increasing pile spacing and length. The portion of the load sustained by the grillage and the degree of pile capacity mobilization are higher when using bored piles than driven ones.

In the third chapter, the results of numerical modeling of the stress-strain state of the "strip pile grillage – piles – soil base" system are described.

In subsection 3.1, the choice of the calculation model for the "strip pile grillage – piles – soil base" system in the Sofistik software package is substantiated. Modeling of an isolated driven pile, an isolated bored pile, and a pile foundation was performed, the results of which were compared with full-scale testing to evaluate the correctness of the selected calculation model.

In subsection 3.2, the geometric parameters of the low-grillage strip pile foundation model and the physical and mechanical properties of the soil are described. The numerical modeling program is presented, which is divided into two subgroups under different soil conditions (fine sand and loam) for piles installed with and without soil extraction, of various lengths and at different spacings. Diagrams and images of the calculation model of the foundation and the soil mass from the Sofistik software package are shown.

In subsection 3.3, the modeling results of the "strip pile grillage – piles – soil base" system are described in the form of tables and load-settlement curves for foundations of all tested variants and isolated piles of the same length and cross-sectional diameter. Graphs showing the dependence of load on spacing at different lengths are presented. The degree of pile capacity mobilization within the foundation, the portion of the load sustained by the grillage, and the pressure magnitude beneath the grillage were determined and presented in the form of tables and graphs. The deformation magnitude of the soil base mass beneath the foundation was obtained and presented in the form of illustrations.

In subsection 3.4, a comparison of the numerical modeling results with the results of theoretical calculations of the foundation bearing capacity is described to reveal the quantitative difference in the performance of bored and driven piles.

An improvement to the methodology for determining the required number of piles within a single-row strip pile foundation is proposed, which takes into account the difference in the performance of bored and driven piles, as well as the dependence of the degree of pile capacity mobilization within a strip foundation on

its length and spacing. The improvement consists in accounting for the degree of pile capacity mobilization within the strip pile foundation. Using the example of a design solution for the foundation of a multi-story building, the economic feasibility of using this method is proven.

The modeling results of the "strip pile grillage – piles – soil base" system confirm the conclusions obtained from physical modeling and indicate a greater increase in the degree of capacity mobilization when installing bored piles compared to driven ones, and demonstrate the dependence of the bearing capacity reserve mobilization of a strip pile foundation on the length and spacing of piles under various soil conditions.

Scientific novelty of the work lies in the following:

- for the first time, quantitative and qualitative differences in the redistribution of vertical load between a low strip grillage and piles within a single-row strip pile foundation have been established for piles with different installation methods;
- the methodology for calculating the bearing capacity of piles within a single-row strip pile foundation has been improved;
- new "load-settlement" relationships have been experimentally obtained (within small-scale physical modeling) for single-row strip pile foundations, clearly demonstrating the differences in load distribution among the pile foundation elements for cases with bored and driven piles;
- the methodology for spatial numerical modeling of the stress-strain state of the "strip pile grillage – piles – soil base" system in physically and geometrically non-linear formulation (SOFiSTiK software package) has been further developed.

Link between the work and scientific programs, plans, themes, or grants

The thesis theme aligns with the research focus areas of the Department of Construction, Municipal Engineering, and Architecture at Vinnytsia National Technical University, specifically themes: No. 6OK1 "Innovative technologies for determining the stress-strain state of the building-foundation-soil base system and its individual elements" and 60-K6 "Improvement of calculation methods and

technologies for automated design and installation of components within the building-foundation-soil base system, incorporating information technology support for construction objects."

Practical significance of the work lies in the following:

- practical recommendations have been developed for the engineering calculation and design of single-row strip pile foundations with a low grillage for different pile installation methods;
- spatial calculation models of the "grillage – piles – soil base" system have been created and verified within the SOFiSTiK software package in physically and geometrically non-linear formulation;
- accounting for the actual redistribution of forces between the foundation elements and the soil allows optimizing the geometric parameters of the pile foundation (reducing the number of piles) and ensures a reduction in material consumption and installation costs of single-row strip pile foundations;
- the research results have been implemented into the educational process for training bachelor students at Vinnytsia National Technical University, studying in the specialty 192 "Construction and Civil Engineering".

Keywords: strip pile foundation, soil base, driven pile, bored pile, grillage, flume study, finite element method, settlement, numerical modeling, stress-strain state, load redistribution, grillage share.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:

[1] Блащук Н. В. Маєвська І. В. Шмундяк О. Ю. Перебийніс М. В. Різниця в роботі бурових і забивних паль у складі стрічкового пальового фундаменту. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. 2023. №35, вип. 2. С.89-97. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-89-97>

[2] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. Різниця в роботі бурових і забивних паль за результатами фізичного моделювання. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. 2025. №39, вип. 2. С. 65-69. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-2-65-69>

[3] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. Різниця в роботі бурових і забивних паль в складі стрічково-пальового фундаменту за результатами фізичного моделювання. *Основи та фундаменти*. 2025. №51, С.36-42. DOI: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.51.2025.36-42>

[4] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. Ступінь реалізації паль в складі стрічкового фундаменту за результатами випробувань на маломасштабних моделях. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. 2026. №40, вип. 1. С. 76-82 DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2026-1-76-82>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[5] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. «Різниця в роботі бурових і забивних паль в складі стрічкового фундаменту» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 21 – 23 листопада 2023 р., URI: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/818/1427/2698-1>

- [6] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. «Фізичне моделювання на маломасштабних моделях стрічкових пальових фундаментів під дією вертикального навантаження» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 19 – 21 листопада 2025 р., URI: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/939/1636/2956-2>
- [7] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. «Ступінь реалізації бурових паль в складі стрічкового однорядного пальового фундаменту» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», Вінниця, Україна, 22-26 червня 2026 р., URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/viewFile/29566/24651>

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ.....	22
1.1 Огляд досліджень сумісної роботи ростверку і паль у складі стрічкових пальових фундаментів.....	22
1.2 Чисельне моделювання системи «паля – ростверк – основа».....	40
1.3 Аналіз методів розрахунку пальових фундаментів з низьким ростверком.....	45
Висновки до розділу 1.....	55
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРІКОВОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ ПІД ДІЄЮ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	56
2.1 Планування модельного експерименту.....	56
2.2 Програма та методика дослідження.....	56
2.3 Результати досліджень стрічкових пальових фундаментів на маломасштабних моделях.....	63
Висновки до розділу 2.....	73
РОЗДІЛ 3. ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СИСТЕМИ «СТРІКОВИЙ ПАЛЬОВИЙ РОСТВЕРК – ПАЛІ - ГРУНТОВА ОСНОВА».....	75
3.1 Обґрунтування вибору моделі системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа»	75
3.2 Програма чисельного моделювання НДС системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа».....	82
3.3 Результати моделювання НДС системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа».....	87
3.4 Практичні рекомендації щодо розрахунку стрічкових пальових фундаментів.....	111
Висновки до розділу 3.....	125

ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	129
ДОДАТОК А.....	137
ДОДАТОК Б.....	139
ДОДАТОК В.....	140

ВСТУП

Актуальність теми. На даний час було проведено багато експериментальних і фізичних досліджень стрічкових пальових фундаментів [1-34], які показали, що частину навантаження сприймає ростверк, а частину – палі. Відсоток вертикального навантаження, яке сприймає ростверк залежить від виду паль, від характеру передачі навантаження на стрічковий паловий фундамент, від конструктивних характеристик самого фундаменту та від фізико-механічних властивостей ґрунтової основи. Також практично всі дослідники відмічають, що несуча здатність палі у складі палового фундаменту вища ніж одиночної. Вона залежить від кроку, довжини та способу улаштування паль, а також від ґрунтових умов.

Вивченням роботи стрічкового палового фундаменту під дією навантаження та експериментальними дослідженнями займалися Василенко А. Ю., Whitaker T., Л.Д. Козачок , Титко О. В., Burland J. B., Hanna T. H., Katzenbach R., Poulos H. G, Randolph M. F. та інші.

Нормативною документацією, яка діє на території України, рекомендується враховувати сумісну роботу елементів палового фундаменту, але не наведено достатньо точних та вичерпних положень і методик для його розрахунку. Також нормами не передбачено врахування впливу сусідніх паль на несучу здатність окремої палі. Фізичним і чисельним моделюванням різними дослідниками [1-34] було встановлено, що відсоток навантаження, яке сприймає ростверк, залежить від виду паль, кроку їх розміщення та від довжини паль. Також реалізація несучої здатності паль при спільній роботі в складі палового фундаменту підвищується. В цілому врахування позитивних впливів спільної роботи системи «ростверк - палі -основа» несе за собою здешевлення вартості фундаменту. Також дослідженнями [30-32] встановлено вищу ступінь реалізації бурових паль порівняно з забивними, що може наблизити їх за техніко - економічними показниками тому дана тема є актуальною.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення методики розрахунку несучої здатності палі у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту з урахуванням впливу кроку, довжини і способу улаштування паль.

Для реалізації даної мети необхідно вирішити наступні задачі:

- проаналізувати та узагальнити наявні теоретичні підходи, результати експериментальних досліджень та чинні методи розрахунку сумісної роботи низьких стрічкових ростверків, паль та ґрунтової основи;
- на маломасштабних моделях виявити якісну картину і особливості роботи стрічкового пальового однорядного фундаменту при різному кроці, довжині і способі улаштування паль;
- шляхом чисельного моделювання, в якому використовується пружно-пластична модель ґрунту, методом скінчених елементів (МСЕ) проаналізувати напружено-деформований стан системи «стрічковий паловий ростверк – палі – ґрунтова основа»;
- провести чисельне моделювання та параметричний аналіз системи «стрічковий паловий ростверк – палі – ґрунтова основа» для встановлення відмінностей у перерозподілі зусиль між ростверком та палями різних типів (буровими та забивними);
- розробити практичні рекомендації щодо удосконалення методики проектування стрічкових палових однорядних фундаментів з урахуванням особливостей реалізації несучої здатності палі у складі палового фундаменту.

Об'єкт дослідження – процес взаємодії елементів стрічкового пальового однорядного фундаменту з ґрунтовою основою під навантаженням.

Предмет дослідження – різниця в роботі бурових і забивних паль у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту з низьким ростверком під дією вертикального навантаження.

Методи дослідження – науково-теоретичний аналіз, фізичне дослідження на маломасштабних моделях, чисельний метод скінчених елементів у фізично й геометрично нелінійній постановці для моделювання напружено-деформованого стану ґрунтових основ; методи математичної статистики для обробки даних експериментів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше встановлено кількісні та якісні відмінності перерозподілу вертикального навантаження між низьким стрічковим ростверком та палями у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту для паль з різним способом улаштування;
- удосконалено методику розрахунку несучої здатності паль у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту;
- експериментально отримано нові залежності «навантаження–осідання» (в межах маломасштабного фізичного моделювання) для стрічкових пальових однорядних фундаментів, які наочно демонструють відмінності у розподілі навантаження між елементами пальового фундаменту для випадків із буровими та забивними палями;
- дістала подальшого розвитку методика просторового чисельного моделювання НДС системи «стрічковий пальовий ростверк – палі – ґрунтова основа» у фізично й геометрично нелінійній постановці (ПК SOFiSTiK).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Тема дисертаційної роботи відповідає напрямку наукових тем кафедри будівництва, міського господарства та архітектури Вінницького національного технічного університету – №6ОК1 «Інноваційні технології визначення напружено-деформованого стану системи будівля-фундамент-основа та окремих її елементів» та 60-К6 «Удосконалення методів розрахунку і технологій автоматизованого проектування та влаштування елементів системи будівля-фундамент-основа з врахуванням інформаційних технологій супроводу об'єктів будівництва».

Практичне значення одержаних результатів.

- розроблено практичні рекомендації щодо інженерного розрахунку та проектування стрічкових пальових однорядних фундаментів із низьким ростверком при різному способі влаштування паль;
- створено та верифіковано просторові розрахункові моделі системи «ростверк – палі – ґрунтова основа» у програмному комплексі SOFiSTiK у фізично й геометрично нелінійній постановці;

врахування реального перерозподілу зусиль між елементами фундаменту та ґрунтом дозволяє оптимізувати геометричні параметри пальового фундаменту (зменшити їх кількість) та забезпечує зниження матеріаломісткості та вартості влаштування стрічкових пальових однорядних фундаментів;

результати дослідження впроваджено в навчальний процес підготовки бакалаврів Вінницького національного технічного університету, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Особистий внесок здобувача полягає в розробці методики і виконанні фізичних досліджень на маломасштабних моделях, моделюванні методом скінчених елементів роботи стрічкового пальового однорядного фундаменту (ПК Sofistik), удосконаленні методики розрахунку несучої здатності паль у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту.

Апробація результатів дисертації.

Основний зміст дисертації викладено та обговорено на таких наукових конференціях: Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, 21 – 23 листопада 2023 р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Енергоефективність в галузях економіки України» (м. Вінниця, 19 – 21 листопада 2025 р), Всеукраїнська науково практична інтернет-конференція «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)» (м. Вінниця, 22 – 26 червня 2026 р)

- Міжнародна науково-технічна конференція «Інноваційні технології в будівництві» (Вінниця, ВНТУ, 2026).

Публікації.

Матеріали дисертації викладено в 6 наукових роботах, у т. ч.: 4 статті у фахових виданнях; 3 тезах у збірниках за матеріалами конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел (69 найменувань) та 3 додатків. Робота викладена на 140 сторінках. Робота містить 90 рисунків та 19 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ

1.1 Огляд досліджень сумісної роботи ростверку і паль у складі стрічкових пальових фундаментів

Палі та пальові фундаменти застосовуються досить давно і в різних ґрунтових умовах, але при їх проектуванні та влаштуванні залишається ще досить багато питань. Актуальними серед них є урахування розподілу навантаження між палями та ростверком та реалізація несучої здатності паль у складі пальового фундаменту.

Переважна кількість публікацій по пальових фундаментах присвячена роботі паль в групі, при їх дослідженні аналізується робота пальових кушів. Значно менше досліджень розглядає роботу паль в складі стрічкових фундаментів. При тому менша частина з таких досліджень розглядає роботу бурових паль в групі. Робота бурових паль в групі частіше розглядається в складі пальово-плитних фундаментів.

Рядом вчених, які займалися дослідженням пальових фундаментів встановлено, що навантаження між палями в групі розподіляється нерівномірно. Дослідження Василенко А. Ю. [1], Whitaker T. [2], Л.Д. Козачка [3], Титка О. В. [4] показують, що центральні палі несуть менше навантаження, ніж кутові, що свідчить про нерівномірний розподіл навантажень на палі.

Встановлено також, що у складі пальового фундаменту з низьким ростверком частину навантаження, яке прикладено на фундамент сприймає ростверк, а частина передається на палі, що разом з нерівномірним розподілом навантаження на палі спричиняє суттєві відмінності роботи палі у групі у порівнянні з роботою одиночної палі. Ці та інші ефекти позитивно впливають на несучу здатність пальового фундаменту, що доведено багатьма авторами (Burland J. B.[5], Hanna T. H.[6], Whitaker T. [2], Katzenbach R. [7], Poulos H. G. [8], Randolph M. F. [9]). Результати досліджень вказують на те, що розрахунки

проведені на основі параметрів одиночних паль без врахування взаємодії всіх елементів пальового фундаменту з ґрунтом та між собою мають певну неточність.

На поведінку пальового фундаменту під навантаженням впливає взаємодія паль між собою та ростверком через ґрунт. Дослідники поділяють взаємодії, які відбуваються між елементами фундаменту на такі види: паля–ґрунт–паля (в тому числі паля–паля через ґрунт) і паля–ґрунт–ростверк (в тому числі ростверк–ґрунт) [10, 11].

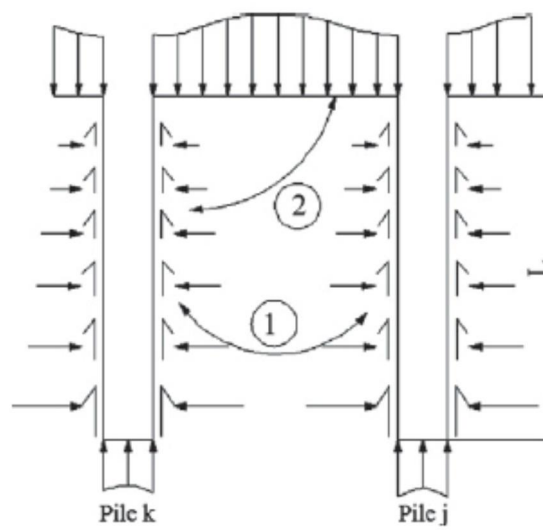


Рисунок 1.1 – Взаємодії в системі палі-ґрунт-ростверк [10]:

1- взаємодія паля–ґрунт-паля; 2 - взаємодія паля–ґрунт-ростверк

У роботі [10] досліджувалась поведінка пальового фундаменту, на яку впливає багато складних процесів взаємодії фундаменту з ґрунтом та яка залежить від характеристик фундаменту (довжина, кількість паль, розташування паль) і стану ґрунту. Визначена загальна закономірність роботи пальового фундаменту, яка полягає в тому, що на першому етапі роботи фундаменту навантаження більше сприймають палі, а на другому етапі в роботу вступає ростверк. На рис. 1.2 наведені результати моделювання в центрифугі, опрацьовані за допомогою двох розрахункових методів. На рисунку видно, що запропонований автором метод пружної основи дає точніші результати.

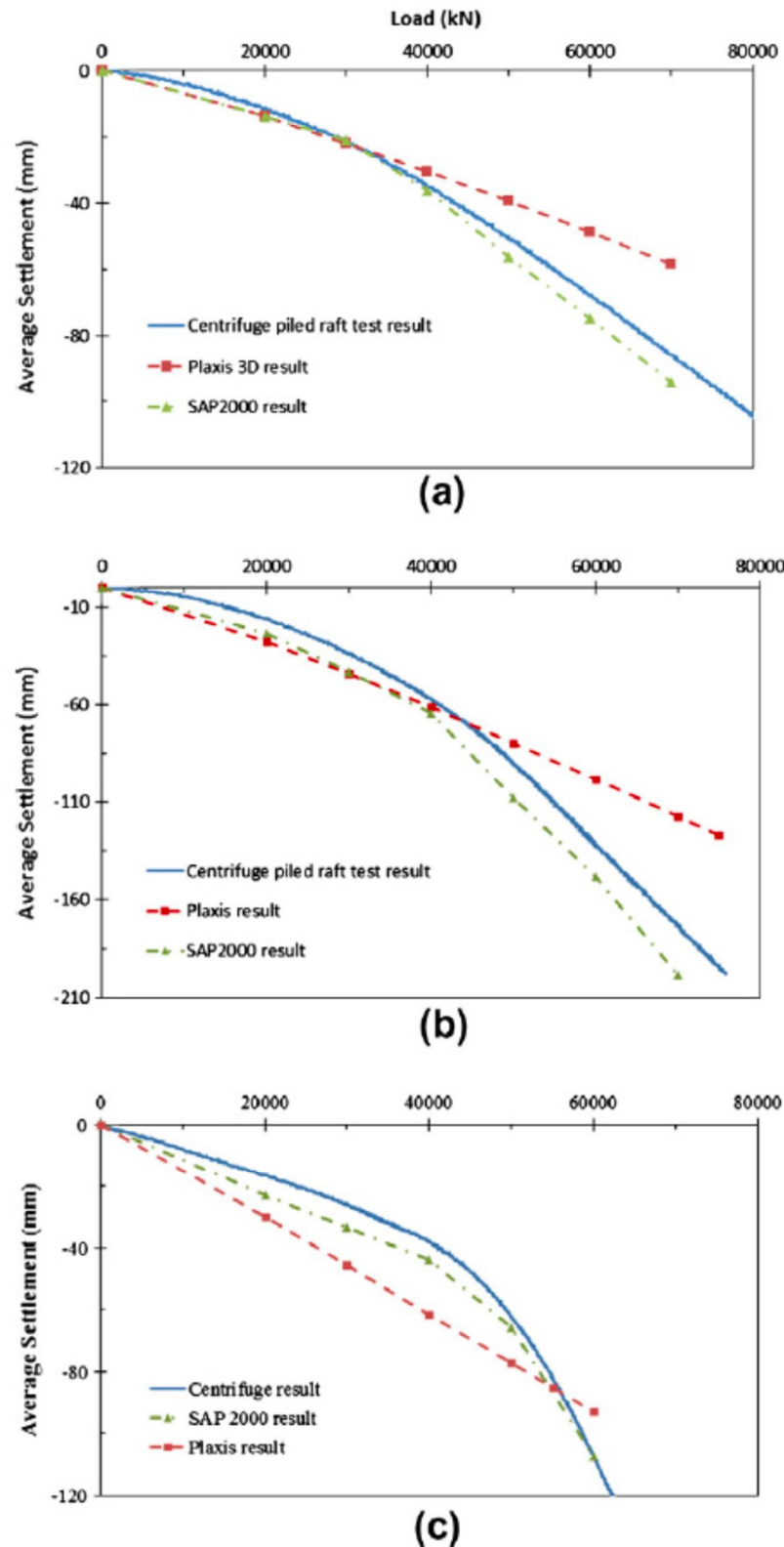


Рисунок 1.2 – Порівняння поведінки пальового фундаменту за випробуваннями в центрифугі, за запропонованим методом аналізу через SAP 2000 та аналізу основи Plaxis 3D: (a) пальовий фундамент з 16 паль ($D = 0,6$ м; $L = 15$ м) у щільному піску; (b) пальовий фундамент з 16 паль ($D = 0,6$ м; $L = 15$ м) в пухкому піску; (c) пальовий фундамент з 9 паль ($D = 0,6$ м; $L = 9$ м) в щільному піску [10]

При дослідженні плитно-пального фундаменту Davids [12] показав, що частка навантаження, що приходить на палі складає 50–80%. Abdel-Fattah та Nemada [13] в свою чергу довели, що частина навантаження, що передається на ґрунт через контактний тиск з підшвою ростверка, складає 30–60 % від загального навантаження в залежності від характеристик ґрунту основи. Частка ростверку збільшується із зменшенням довжини і збільшенням кроку паль. Hemsley [14] у дослідженні довів, що ростверк може нести до 50% загального навантаження. Leung [15] визначив, що частка навантаження, що приходить на ростверк в пальному фундаменті коливається від 25% до 51% від прикладеного навантаження з медіанним значенням 36%.

Авторами Elwakil A. Z., Azzam W. R. [16] було проведено лабораторні випробування фундаментів на маломасштабних моделях для дослідження поведінки ростверку в складі пального фундаменту на піщаній основі. Було розглянуто 23 варіанти фундаментів, що поділялися на 4 підгрупи дослідів з різним розміщенням паль та висотою розміщення ростверку над ґрунтом. Навантаження на ростверк вимірювалось при різних значеннях співвідношення осідання до ширини ростверку а навантаження на палі, при однакових значеннях того ж співвідношення і порівнювалось з навантаженням на фундамент в цілому. Оцінка ефективності роботи пального фундаменту проводилась за допомогою методу розрахунку суми граничного опору паль і ростверку, розробленим Паулосом [17]. Ефективність роботи пального фундаменту виражалася фактором β , який враховує ширину ростверку, осідання фундаменту, часту навантаження що сприймає ростверк та яке передається на палі.

За результатами дослідження зроблено висновки, що система палових фундаментів вважається ефективною, коли коефіцієнт β більше 1. При відношенні S/B більше 0,7 % проявляється позитивний ефект сумісної роботи елементів пального фундаменту через збільшення тертя по боковій поверхні, що спричинене збільшенням нупружень в ґрунті під підшвою ростверку, що

описано у [7]. Результати експерименту визначення залежності коефіцієнту β показані на рис.1.3.

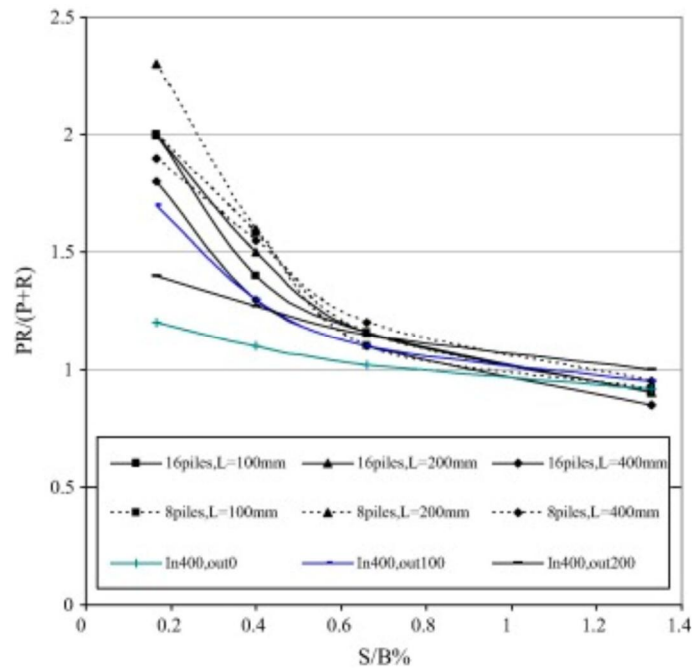


Рисунок 1.3 – Залежність коефіцієнта β від відношення осідання до ширини ростверку S/B [16]

Випробування на маломасштабних моделях дозволило якісно оцінити сумісну роботу елементів пальового фундаменту, для кількісної оцінки в роботі [16] виконано чисельне моделювання роботи пальових фундаментів під навантаженням (рис.1.4.).

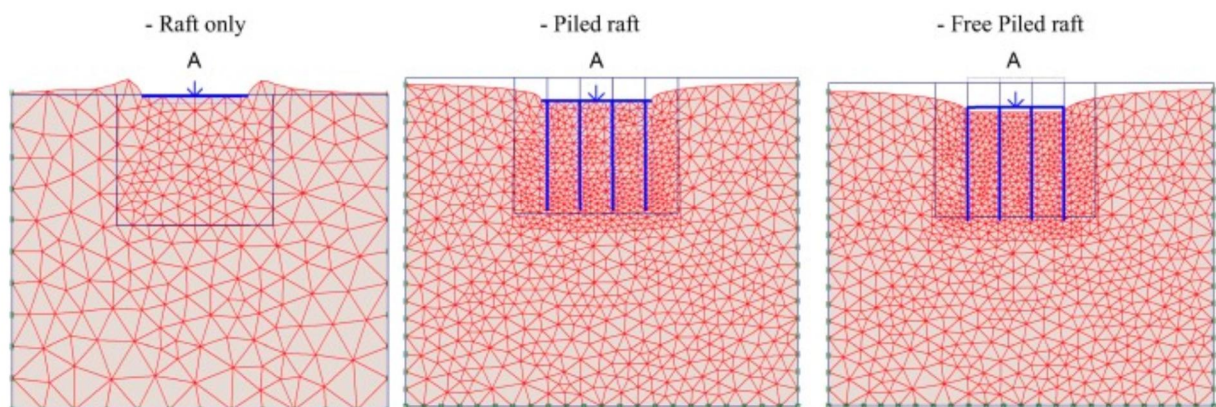


Рисунок 1.4 – Мозаїка деформацій ґрунту ($D_r = 65\%$, $L = 400$ мм) [16]:

Raft only – лише ростверк, Piled raft – пальовий фундамент з низьким ростверком; Free piled raft - – пальовий фундамент з високим ростверком

У дослідженні дійшли наступних висновків: пальовий фундамент є ефективною системою, що зменшує осідання; відсоток навантаження, яке сприймає ростверк в плитно-пальовому фундаменті складає близько 39%; відсоток навантаження, яке несе ростверк, збільшується по мірі зменшення довжини і кількості паль; частка навантаження, що сприймається ростверком, збільшується зі зменшенням довжини паль до 38%; частка навантаження, що сприймається ростверком, збільшується зі зменшенням кількості паль до 55%; при навантаженні на ростверк, вище, ніж сума навантаження, що сприймається окремо ростверком і палями відношення S/B , менше або рівне 0,7%.

З метою дослідження факторів, що впливають на поведінку паль при підсиленні стрічкового фундаменту Маєвською І. В та ін. [18] виконано кореляційний аналіз на основі результатів чисельного моделювання, в результаті якого отримано функціонал $(F_{pi} - F_{p0}) / (F_i - F_{p0}) = \hat{O}(a_i / d_i, l_i / d_i, E_i, f_{0i})$, який вказує на частку ростверку у складі підсиленого палями фундаменту. Порівняння з числовим моделюванням роботи отриманої залежності показані на рис 1.5.

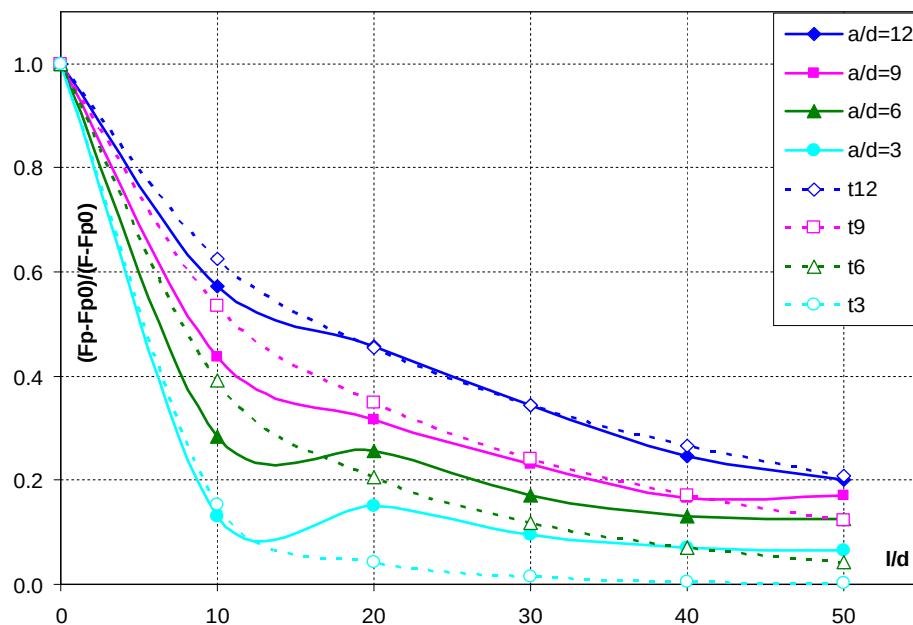


Рисунок 1.5 – Ізолінії поверхонь, отриманих у Plaxis та за запропонованою математичною формулою [18]

Дослідження роботи пальових фундаментів проводяться на базі Вінницького національного технічного університету. Аль-Хасауни Аднан [19] проводив дослідження пальових груп, результати якого показали, що навантаження, яке приходить на кожну палю, залежить від розташування палі в групі, відносного занурення палі, величини навантаження на групу при заданих ґрунтових умовах та жорсткості ростверку. У роботі І. В. Маєвської та Н. В. Блащук [20] розглянуто залежність частки навантаження, що сприймається ростверком у стрічковому пальовому фундаменті, від різних факторів. Чобановою К. А. [21] проводилось дослідження сумісної роботи паль та ростверку у складі стовпчастого пальового фундаменту, за результатами якої отримана залежність частки навантаження, яка сприймається ростверком від характеристик міцності ґрунту. В роботі Гембарської М. А. [22] відзначається вплив жорсткості ростверку на перерозподіл зусиль між елементами пальового фундаменту. Дослідженням [23] підтвердилося твердження, що збільшення кількості паль при перевищенні допустимого навантаження на палю не приводить до зменшення осідання від навантаження. В роботах [24, 25, 26] пропонують, розроблені на основі досліджень, нові методики врахування роботи ростверку з ґрунтом.

У статті [27] виконаний комплексний розрахунок несучої здатності бурових паль різними методами, враховуючи результати натурних випробувань широкої вибірки паль в діапазоні довжини від 2 м до 19,7 м і діаметром ствола від 0,4 м до 0,83 м. В роботі були використані результати статичних випробувань бурових паль, виконаних у Науково-дослідному інституті будівельного виробництва та Науково-дослідному інституті будівельних конструкцій м. Київ. Розглянуті результати натурних випробувань 17-ти бурових паль з 10-ти різних майданчиків, які мали різні ґрунтові умови. Результати дослідження свідчать, що розрахунковий опір по боковій поверхні бурових паль у піщаних ґрунтах відрізняються в порівнянні із результатами розрахунків за чинними нормами. Також авторами встановлено, що несуча здатність бурових паль залежить не тільки від показника текучості для

глинистих ґрунтів, а і від коефіцієнту пористості для піщаних, але методика розрахунку наведена в нормативних документах не враховує коефіцієнт пористості.

Проведено лабораторне дослідження [49] для порівняння роботи алюмінієвих та залізобетонних паль під навантаженням для виявлення відмінностей в роботі залежно від жорсткості палі. Встановлено, що осідання залежать від матеріалу паль і різниця є навіть при прикладенні невеликих навантажень (рис. 1.6).

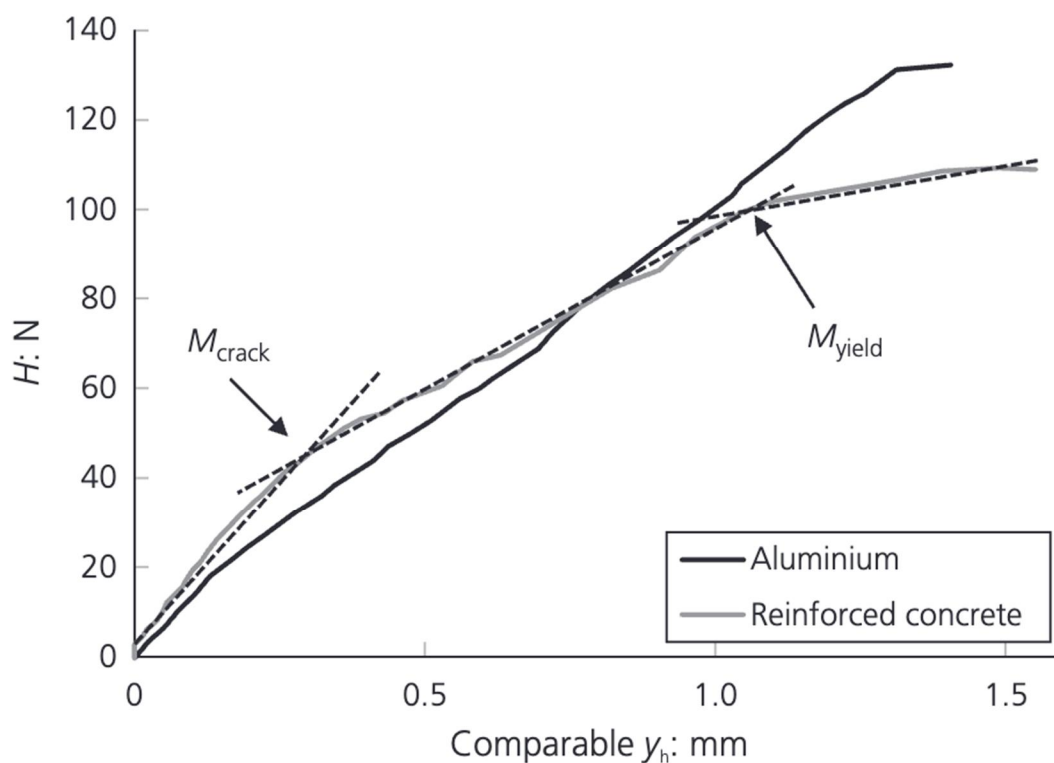


Рисунок 1.6 – Графік залежності осідання – навантаження для паль з алюмінію та залізобетону [49]

У роботі [50] розглянуто досвід впровадження методів та підходів для проектування комбінованих плитно-пальових фундаментів з врахуванням взаємного впливу елементів фундаменту (рис 1.7.), що дозволило реалізувати ефективне рішення використання паль для зменшення осідань плити фундаменту.

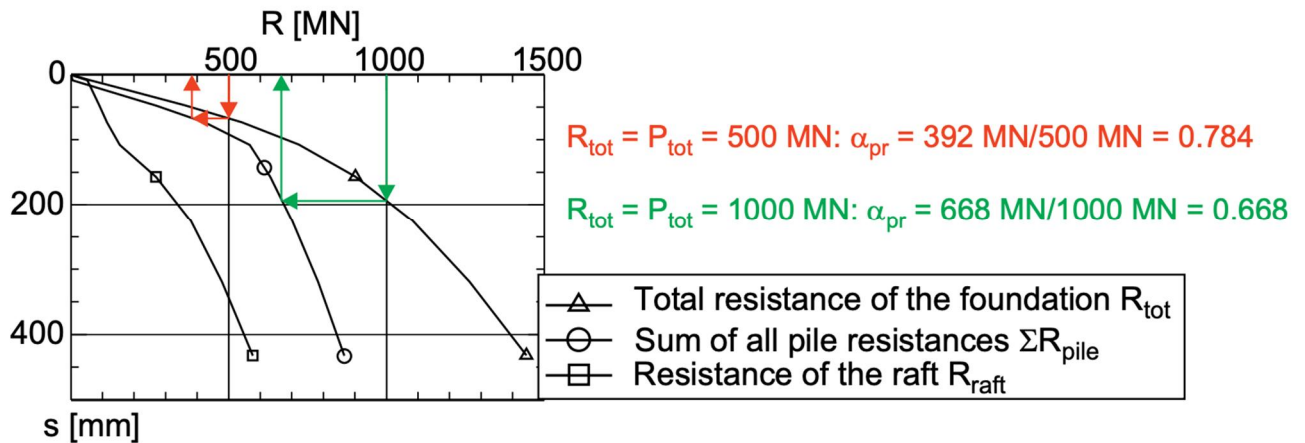


Рисунок 1.7 - Графік залежності осідання – навантаження при сумісній роботі елементів комбінованих плитно-пальових фундаментів [50]

У статті [28] авторами Гаврилюком О., Кашоїдою О. та Жуком В. реалізовано комп'ютерну симуляцію випробування натурної палі статичним вдавлюючим навантаженням в піщаних ґрунтах для дослідження характеру формування напружено-деформованого стану ґрунтового масиву під п'ятою палі та вздовж бічної поверхні палі на всіх етапах навантаження. Також виявлено етапи поступового включення в роботу палі по бічній поверхні та включення складової несучої здатності під п'ятою палі. За результатами дослідження, похибка для величини несучої здатності палі за даними комп'ютерної симуляції не перевищує 5% в порівнянні із даними натурних випробувань аналітична методика дала завищений на 40% результат розрахунку несучої здатності.

Важливим чинником у порівнянні фактичної несучої здатності виступає непостійність передачі навантаження на ґрунт через бічну поверхню та підшву палі. Чисельне моделювання роботи бурової палі на основі результатів випробувань статичним навантаженням [29] показує, що при початковому навантаженні паля, переважно, працює по бічній поверхні (85 – 90% навантаження) і при подальшому навантаженні включається в роботу її підшва. і до значення, яке відповідає розрахунковій несучій здатності, а передача навантаження по бічній поверхні стає наближеною до розрахункової

(70%). Результати, представлені у вигляді діаграм, які показують фактичну несучу здатність паль у порівнянні з визначеною аналітичним методом та вказують на наявність резерву несучої здатності паль.

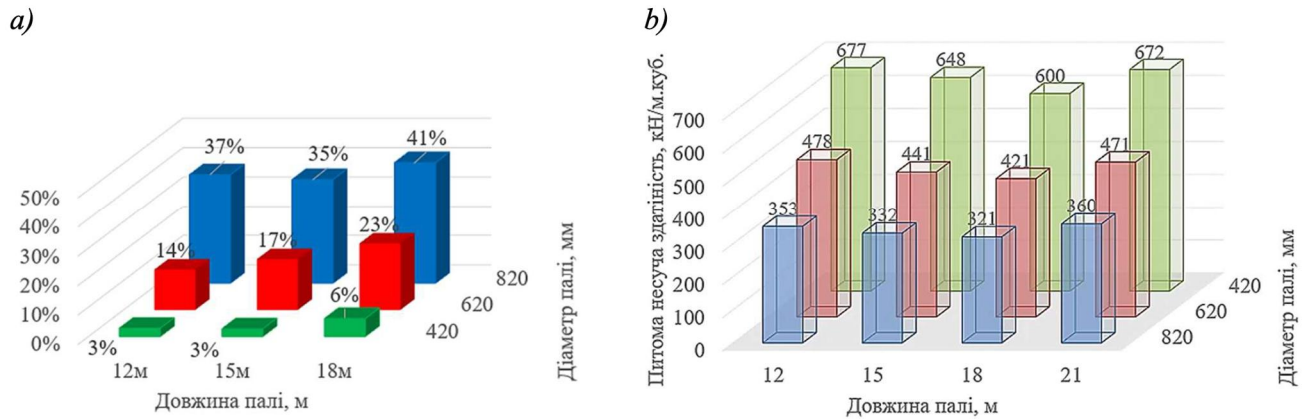


Рисунок 1.8 – Несуча здатність паль, визначена за даними комп'ютерної імітації: а – похибка аналітичної методики розрахунку; б - питома несуча здатність паль [29]

П. Сорока провів натурні випробування та числове моделювання бурових паль [51], де розглянув особливості використання бурових паль малого діаметру в сучасному будівництві акцентуючи увагу на їх переваги та сфери застосування в специфічних умовах (рис.1.9.). Також у роботі описано особливості їх використання в різних ситуаціях та приведено натурний експеримент для перевірки висловлених тверджень. У висновках зазначається, що діапазон умов, за яких можуть бути ефективно використані бурові палі малого діаметру є досить широким. Можливість використання бурових паль малого діаметру в складних геотехнічних умовах робить їх деяких випадках єдиною альтернативою, в інших більш ефективними ніж більш традиційні типи паль в певних обставинах. Проведення порівняння [52] показує високу ефективність методу скінченних елементів (рис.1.10) для прогнозування несучої здатності бурових паль малого діаметру, що дозволяє пропонувати ефективні рішення з використанням описаного типу паль.

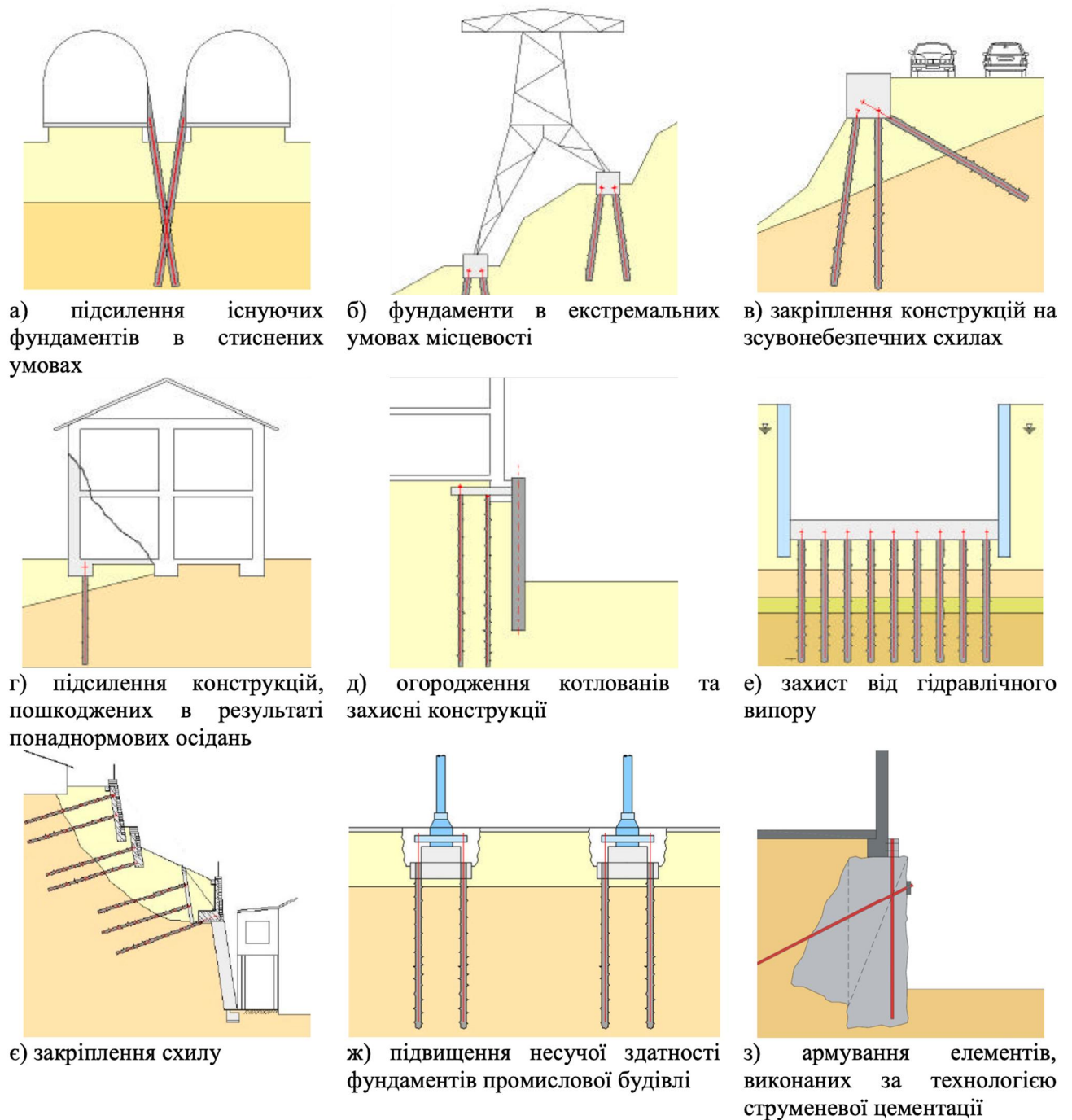


Рисунок 1.9 – Приклади реалізації бурових паль малого діаметру [51]

Дослідження фактичної здатності бурових паль [53] показують, що несуча здатність бурових паль, визначена аналітичним шляхом менша по відношенню до статичних випробувань в середньому на 25 % в піщаних ґрунтах. Встановлено, що за результати статичного зондування несуча здатність бурових паль менша орієнтовно на 10%...15% від несучої здатності,

отриманої за даними статичного випробування натурних паль на будівельному майданчику. Розрахунок несучої здатності за формулою з норм [35], ефективно застосовується для бурових паль довжиною до 16...20 м, а при використанні бурових паль, більш заглиблених, слід користуватися запропонованою автором формулою після уточнення відповідних коефіцієнтів.

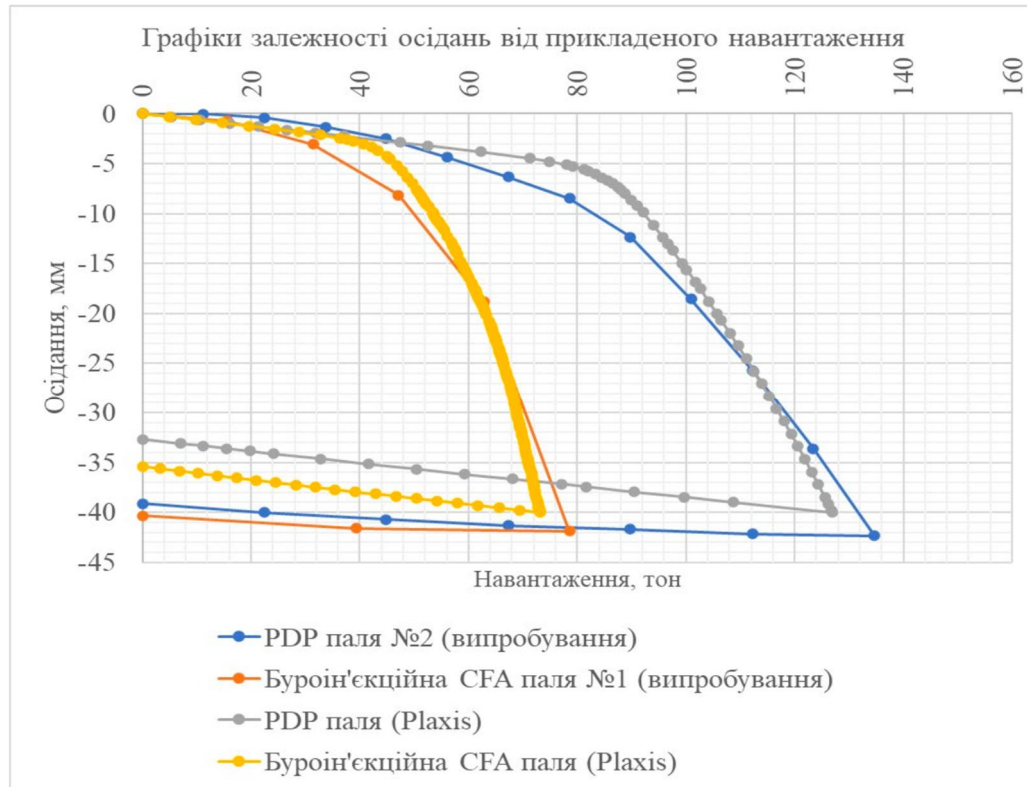


Рисунок 1.10 – Порівняння графіків залежності осідань від прикладеного навантаження бурових паль малого діаметру [52]

З отриманих результатів [54] дослідження залежності жорсткості та несучої здатності паль від різної їх кількості та відстані між ними видно, що при збільшенні відстані між палями в куші їх жорсткість та несуча здатність наближається до результатів одиночної палі (рис. 1.11.). При зменшенні кількості паль в куші їх характеристики також наближаються до характеристик одиночної палі. Головним висновком роботи вказано, що жорсткість паль залежить від їх взаємного розташування в пал'овому фундаменті. Що вказує на те що, розташування паль на відстані трьох діаметрів, як прийнято в

нормативних документах, не завжди є раціональним і для розрахунку пальових фундаментів.

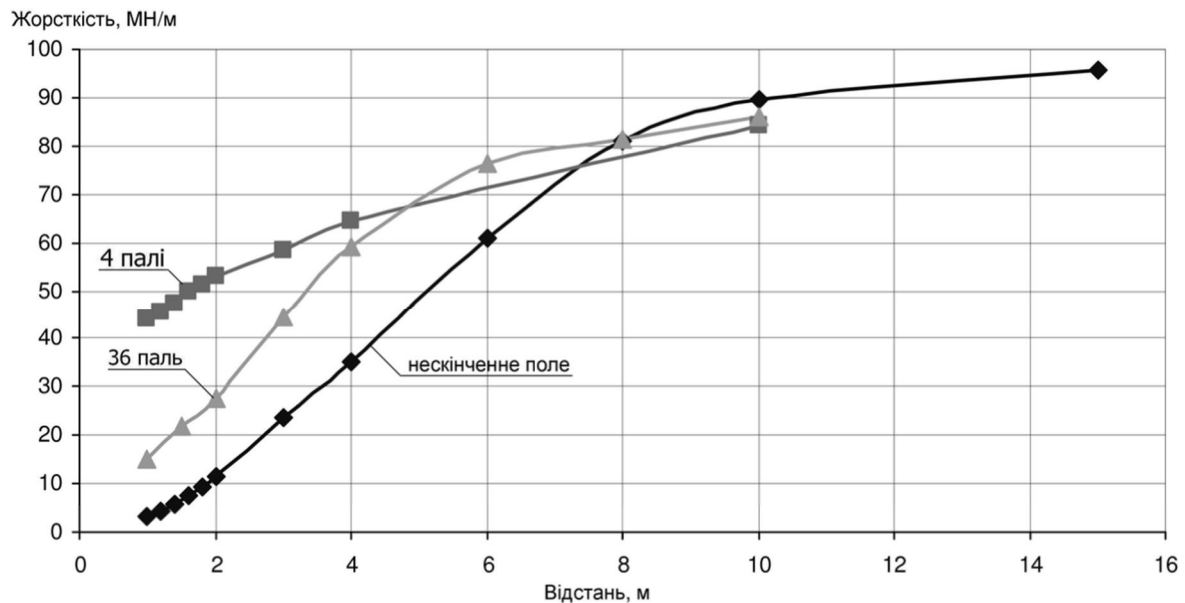


Рисунок 1.11 - Графік залежності жорсткості палі від відстані між палями для задач з різною кількістю паль в куці [54]

У дослідження [54] зміни несучої здатності бурових паль в залежності від методів її визначення показано, що несуча здатність паль, визначена за формулами норм на 12-ти об'єктах дослідження показали занижені результати в середньому на 78 %, а визначена за методикою статичного зондування – лише на 85,5% у порівнянні з натурними випробуваннями паль, що говорить про можливість застосування даної методики в практиці проектування (рис. 1.12.).

Аналіз результатів досліджень несучої здатності бурових паль за методикою норм, статичним зондуванням та результатами статичних випробувань [30] показує резерв фактичної несучої здатності за теоретичних розрахунків. Визначено, що в середньому бурові палі мають резерв 20 % порівняно з методикою норм та 15 % порівняно з статичним зондуванням.

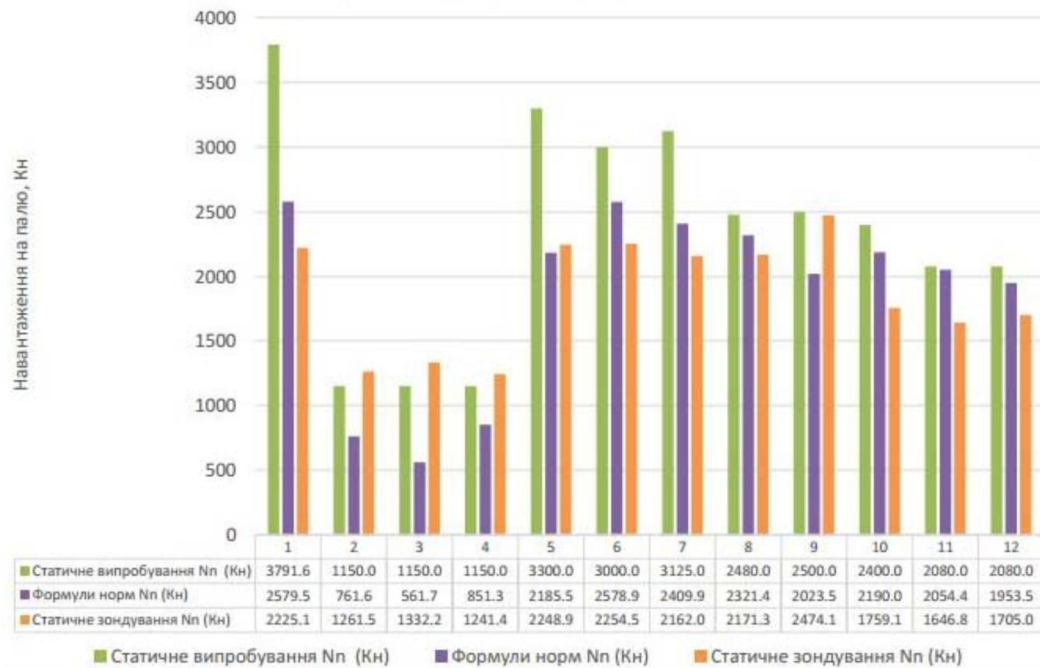


Рисунок 1.12 – Діаграма розрахункового навантаження на палі кожного об'єкту дослідження в залежності від методу визначення [55]

Результати новітніх досліджень [31, 32] показують що резерв несучої здатності паль фактично в значній мірі вищий ніж розрахований за допомогою аналітичних моделей, запропонованих у нормативних джерелах [1-3]. Тож методика розрахунку навантаження, яке здатні сприймати бурові та забивні палі потребує удосконалення. При чому необхідність в удосконаленні методів розрахунку навантажень паль у складі фундаменту зростає з широтою їх застосування при проектуванні нових будівель та споруд так і для підсилення основи існуючих.

Дослідження проведене [33] про характер залежності сил тертя по бічній поверхні, доводить що, співвідношення зусиль, що сприймає ґрунт під вістрям і за бічною поверхнею палі, залежить від її розмірів, жорсткості та властивостей ґрунтів, які прорізає паля. Повна реалізація несучої здатності палі тертя залежить від зрушувальної деформації палі, на що впливає вид й стан ґрунту, що оточує палю, та її розміри. Тому чим слабкіше ґрунт і більші поперечні розміри палі, тим величина зрушувального осідання більша.

Також з ціллю більш точного визначення несучої здатності паль по боковій поверхні в тому ж дослідженні, отримано залежності розподілу напружень по стовбуру в палі. Результати показують що навантаження, які передає паля на ґрунт залежить від її розмірів та жорсткості ґрунту. Чим міцніший ґрунт під вістрям палі тим більше навантаження буде приходиться на нижню частину палі і менше передаватися на ґрунт через сили тертя.

Такі результати вказують на важливість більш точного розрахунку несучої здатності палі, так як нерівномірний розподіл зусиль може призвести до неповної реалізації можливостей палі та передчасного її руйнування. Для ефективної роботи палі повинна відбуватися повна реалізація сил тертя по бічній поверхні, яка відповідає осіданню палі відносно оточуючого ґрунту при навантаженні.

Середнє значення опору однієї палі в складі стрічкового пальового фундаменту, за результатами експерименту [34] менше опору одиночної палі, що зумовлено взаємовпливом напружених зон основи сусідніх паль. Приріст середнього опору однієї палі зменшується зі збільшенням кількості паль. Разом з тим розподіл навантаження, що приходиться на фундамент нерівномірно розподіляється на окремі палі.

Аналітичні методи, які використовуються для розрахунку пальових фундаментів базуються на низці спрощень, що не в повній мірі відображає реальну роботу палі в ґрунтових умовах на під дією навантажень. Відсутні методи визначення несучої здатності паль в складі стрічкового фундаменту з низьким ростверкам, які в повній мірі враховують взаємодію паль між собою та ростверком через напруження в ґрунті, особливо для бурових паль. Досліджень сумісної роботи паль з ростверком та основою є досить мало, саме для стрічкових фундаментів на палях, особливо забивних. Тому актуальним залишається напрямок дослідження роботи паль в ґрунтових умовах для удосконалення розрахункових методів та врахування особливостей складних геотехнічних умов та роботи паль під навантаженням.

Проведене дослідження [56] на маломасштабних моделях поведінки ростверку та паль в складі пальового фундаменту. З огляду на якість триманих результатів авторами стверджується, що застосування маломасштабних моделей для якісної оцінки несучої здатності паль у пухкому піску суттєво не пов'язане з розміром моделі.

За результатами експерименту зроблено висновки:

- системи фундаментів на основі ротсверків з меншими контактними поверхнями за однакових рівнів навантаження мають вищі осідання, ніж системи з більшими контактними поверхнями;
- збільшення контактної поверхні ростверків покращує несучу здатність системи пальових фундаментів за однакових значень осідання. Це покращення характеристик зумовлене горизонтальним тиском у ґрунті під плитою ростверку, який збільшує тертя між ґрунтом та поверхнею палі, тим самим збільшуючи несучу здатність пальового фундаменту вцілому;
- під час забивання групи паль, як тільки плита контактує з піском, плита ростверку вступає в роботу і її внесок у несучу здатність збільшується зі збільшенням осідання. У випадку осідання плити при значенні $0,1B$ (де B ширина палі), плита ростверку несе, залежно від відстані між палями, від 24% до 50% загального навантаження, що діє на фундаментну систему;
- довжина паль не відіграє суттєвої ролі в розподілі навантаження між плитою ростверку та палями (рис.1.13);
- для відстані між палями $3d$ вплив групи паль дуже виражений (рис.1.14), тоді як зі збільшенням відстані вплив групи паль зменшується. При тому відстань між палями $5d$ являє собою верхнє граничне значення, після якого внесок впливу групи паль у несучу здатність втрачається (рис.1.15).

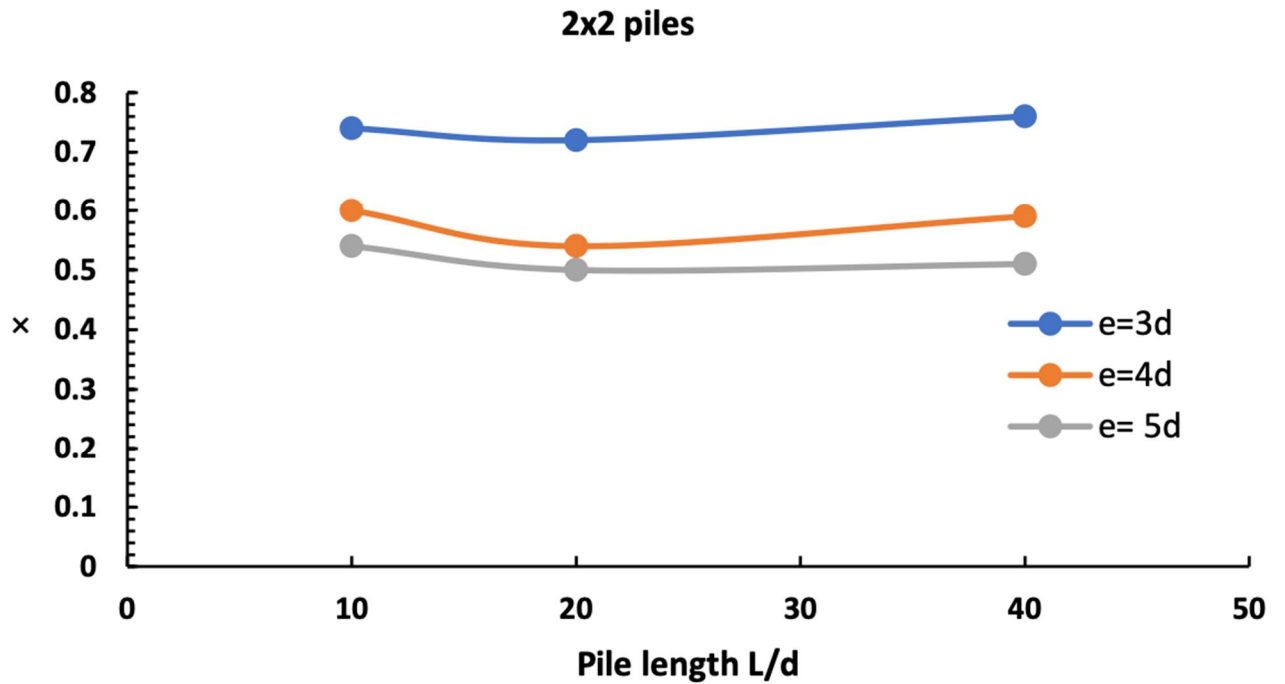


Рисунок 1.13 – Загальна частка навантаження, що припадає на палі при однакових відстанях і різній довжині палей [56]

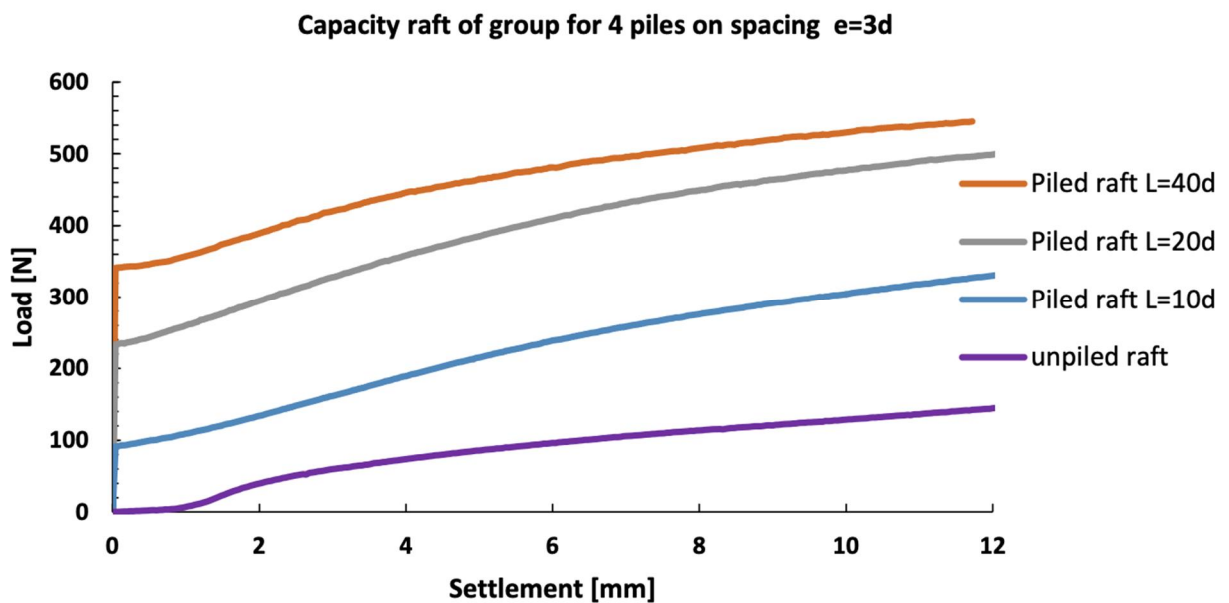


Рисунок 1.14 – Несуча здатність палових фундаментів і фундаментів без палей для різних довжин палей та при відстані між палями $3d$ [56]

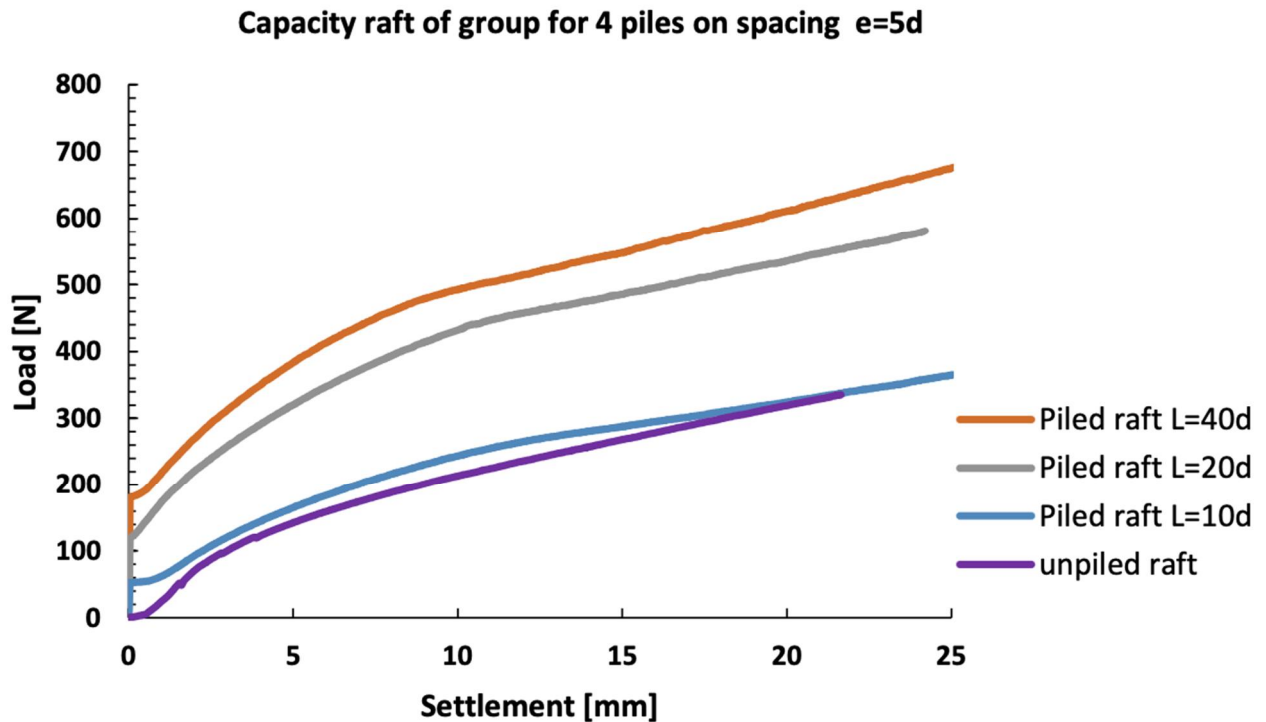
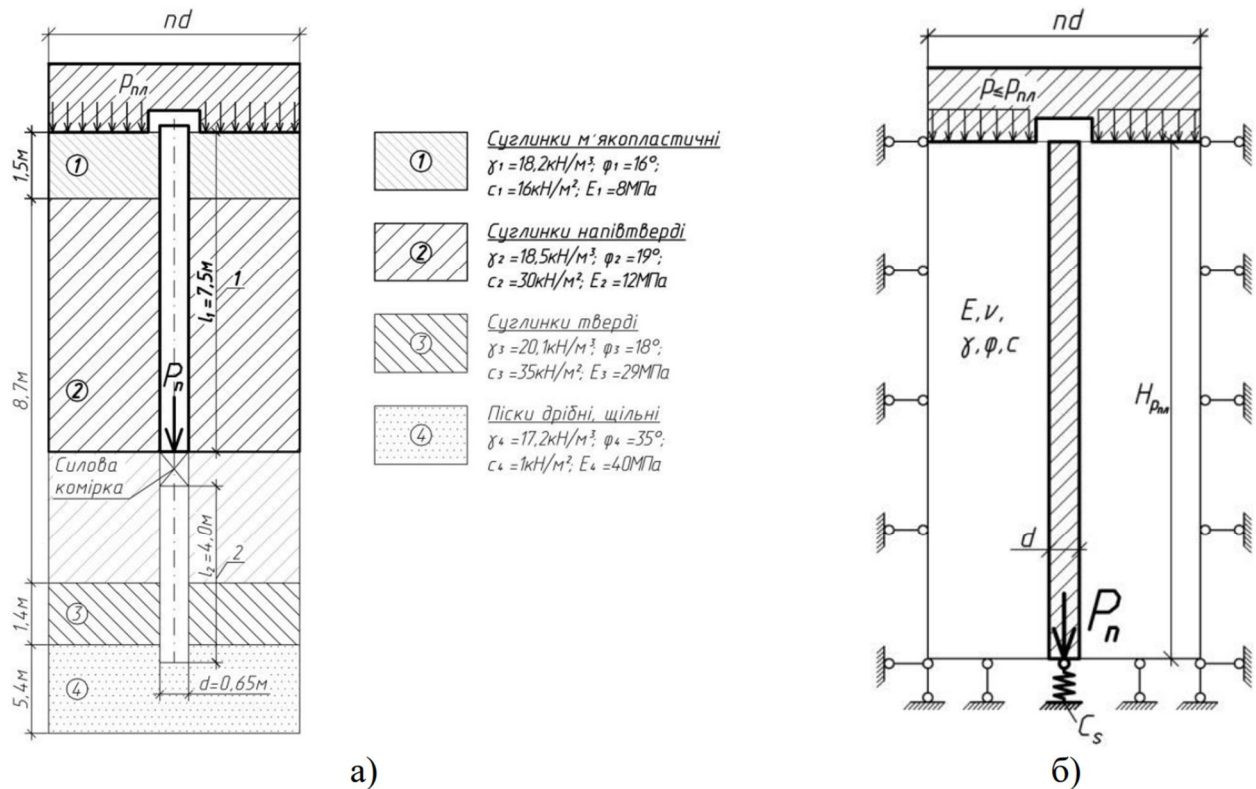


Рисунок 1.15 – Несуча здатність пальових фундаментів і фундаментів без паль для різних довжин паль та при відстані між палями $3d$ [56]

При натурному дослідженні на будівельному майланчику Самородов О. В., Дитюк О. Є. та Табачніков С. В [67] виявили якісно нову залежність деформації паль від дії довантажувальних сил тертя ґрунту, яка показує «ефект прослизання паль уверх» внаслідок перевищення силами тертя сил опору по їх бічній поверхні з проявом зворотних (пружних) деформацій ґрунтової основи паль. На основі даного дослідження авторами запатентовано корисну модель розрахунку комбінованого плитно-пального фундаменту, новизна якої полягає в проектуванні зазору між плитою та палями, де передбачається розподіл опорів основи під плитою. При використанні методу рекомендується враховувати початкове осідання паль, яке виникає від впливу довантажувальної сили тертя, що діє по їх бічній поверхні в межах стисливої товщі при початковому завантаженні основи плитною частиною.

Опираючись на результати натурних випробуванням паль цим же колективом авторів [68] розроблено методику моделювання початкових осідань

одиначних паль у складі комбінованого плитно-пального фундаменту. Розрахункова схема моделі фундаменту показана на рис. 1.16.



1.2 Чисельне моделювання системи «палля – ростверк – основа»

Для дослідження напружено-деформованого стану будівельних конструкцій та ґрунтових основ використовують методи математичного моделювання. Досить точним та практичним та на сьогодні являється метод скінченних елементів. Він закладений в основу сучасних програмних комплексів для розрахунку складних інженерних задач, в тому числі геотехнічних.

Метод скінченних елементів має переваги в гнучкості при заданні неоднорідних параметрів для будівельних конструкцій та основ з неоднорідними характеристиками міцності та граничними умовами.

Універсальний для широкого кола інженерних задач. При відтворенні в розрахунковій схемі коректних параметрів конструкцій дає близьку до реальної картину поведінки конструкцій та ґрунтів під навантаженням.

Також перевагами використання програмних комплексів, в яких реалізований метод скінченних елементів, для вирішення інженерних та геотехнічних задач є простота отримання інженерних рішень, можливість згущення сітки скінченних елементів в місцях концентрації напружень та розрідження при віддаленні від місця прикладення зусилля, можливість реалізації широкого спектру матеріалів з різними характеристиками жорсткості та міцності, варіативність в типі та послідовності комбінацій навантажень. При дослідженні напружено-деформованого стану методом скінченних елементів є можливість після розрахунку отримати з програмного комплексу багато результатів, які детально описують поведінку конструкції під навантаженням. Такі як: осідання різних елементів конструкції на кожній стадії навантаження, деформації конструкцій та ґрунтів, напруження в основі, розподілення навантажень по конструкції та інші. Нормативними документами [35-38] рекомендовано виконувати розрахунки за допомогою програмних комплексів, в яких реалізований метод скінченних елементів.

Для оцінки напружено-деформованого стану системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа» є доцільним та доступним рішенням використання програмного комплексу заснованому на методі скінченних елементів.

Програми з використанням методу скінченних для розрахунку основ та фундаментів розроблені І. П. Бойком [39-41], Ю. Л. Винниковим [42-44], М. Л. Зоценком [45,46], О. О. Петраковим [47], Д. М. Шапіро [48], також закордонними вченими S. Alturi, D. Druker, J. Duncan, M. Kimura, R. Lewis та ін.

Найбільш поширені програмні комплекси для розрахунку геотехнічних задач від розробників різних країн: 3D Z-soil (Швейцарія), VSEM, PRIZ-Pile, Algor, Lira, SCAD (Україна), ANSYS, DANFE, NASTRAN (США), Plaxis, Diana (Нідерланди), GGU-Allpile, Sofistik (Німеччина), Geo 5 (Чехія) та ін. Програмні

комплекси дозволяють аналізувати роботу фундаментів та основ користуючись широким вибором моделей ґрунтового середовища. Вони відрізняються користувацьким інтерфейсом, функціональним наповненням та бібліотеками кінцевих елементів і матеріалів.

На відміну від фізичних випробувань натурних чи маломасштабних моделей, чисельне моделювання дозволяє суттєво скоротити затрати часу та фінансові витрати на обладнання та дослідження. Навіть при неможливості повноцінно дослідити поставлену задачу дослідження чисельними методами, їх використання для обмеження діапазону дослідницьких робіт при плануванні експериментів дозволяє ефективніше використати ресурси та час на проведення експериментів.

Впровадження програмних рішень на основі методу скінченних елементів дозволяє застосовувати складні нелінійні моделі. В роботі [66] показано значну різницю в осіданні паль в групі між розповсюдженною спрощеною аналітичною моделлю Вінклера, лінійно-деформованою моделю шару ґрунту та нелінійною. З рис. 1.17 видно, що в лінійної моделі велика концентрація опорних реакцій на крайніх палях, а розподіл навантажень нелінійної моделі більше наближений до реального розподілу навантажень та в цілому перевищує аналітичну модель Вінклера.

Існують також і недоліки та особливості методу чисельного моделювання, які обмежують сферу його застосування в дослідженнях, хоч програмні комплекси і пропонують широкий спектр моделей, що в тій чи іншій мірі враховують геотехнічні процеси та взаємодію конструкцій під навантаженням. Математичні моделі наближені до реальної поведінки фундаментів та основ під навантаженням і відображають її з певною похибкою порівняно з проведенням натурального випробування. Також до недоліків можна віднести необхідність знання особливостей моделювання зв допомогою методу скінченних елементів, що вимагає від дослідника високої кваліфікації у сфері геологічних процесів та програмного забезпечення.

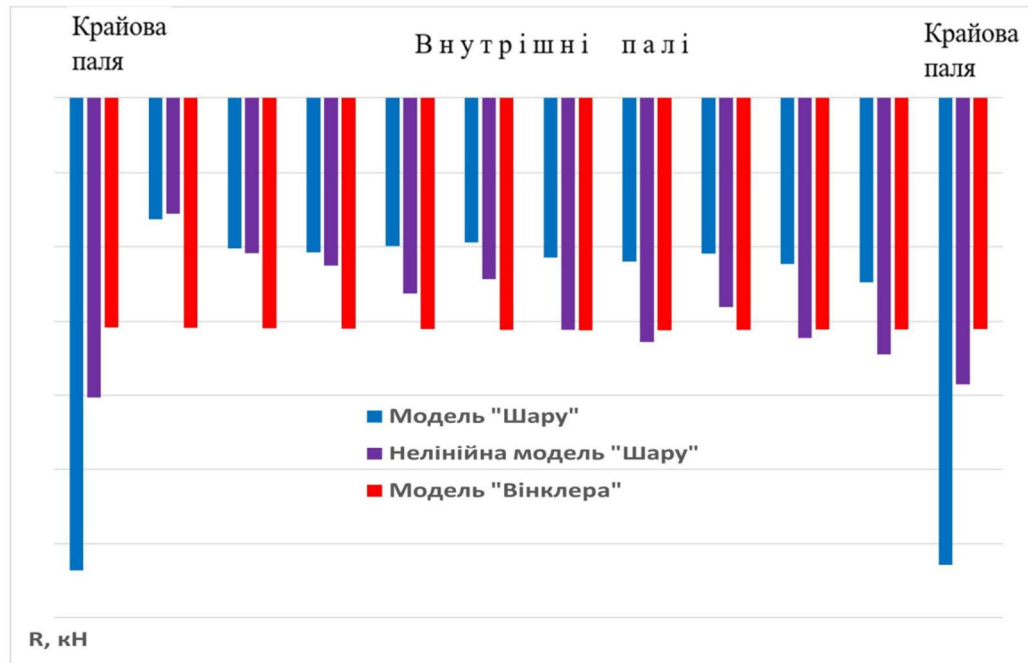


Рисунок 1.17 – Характер розподілу реакцій у палях великорозмірного пальово-плитного фундаменту у системі «ОФС» із застосуванням різних моделей [66]

У роботі [57] за допомогою програмного комплексу, що базується на методі скінченних елементів, розроблено проектне рішення для реконструкції багатоповерхових будинків (рис. 1.19), що дозволило оптимально використовувати будівельні конструкції та матеріали. Аналіз дослідження проектних рішень показує наступні рішення:

- для випадку обпирання пілонів на палі підпірної стіни та при наявності в цій зоні простору з габаритами проїзду пожежної техніки на два поверхи, в окремих конструктивних елементах суттєво зростають згинальні моменти, які зумовлюють зони з площею арматури за $120 \text{ см}^2/\text{м}$;
- рекомендується передбачити захисний екран із задавлюваних паль малого діаметру для блокування напружень в стисливій зоні основи під існуючим будинком;
- аналіз НДС основи та надземних конструкцій показав, що різна жорсткість конструкцій підпірної стіни та паль фундаменту будівлі зумовлює появу зон концентрації напружень в ростверку та плитах перекриття нижніх

поверхів і відповідно в них збільшується процент армування, який перевищує традиційне значення;

- виявлено позитивні і негативні впливи технології вдавлювання за допомогою вантажної платформи за китайським патентом, а саме можливий динамічний удар на основу що недопустимо при прибудові. Цей факт слід досліджувати, як ударні хвилі, що впливають на основу існуючого будинку якщо він побудований на фундаментах неглибокого закладання;

- виявлено факт зростання навантаження на палю, що зумовлюється не збільшенням опору ґрунтів основи, а зміною взаємодії палі з основою по її бічній поверхні, тобто виникає нахилений штамп замість вертикальних дотичних напружень на бічній поверхні палі.

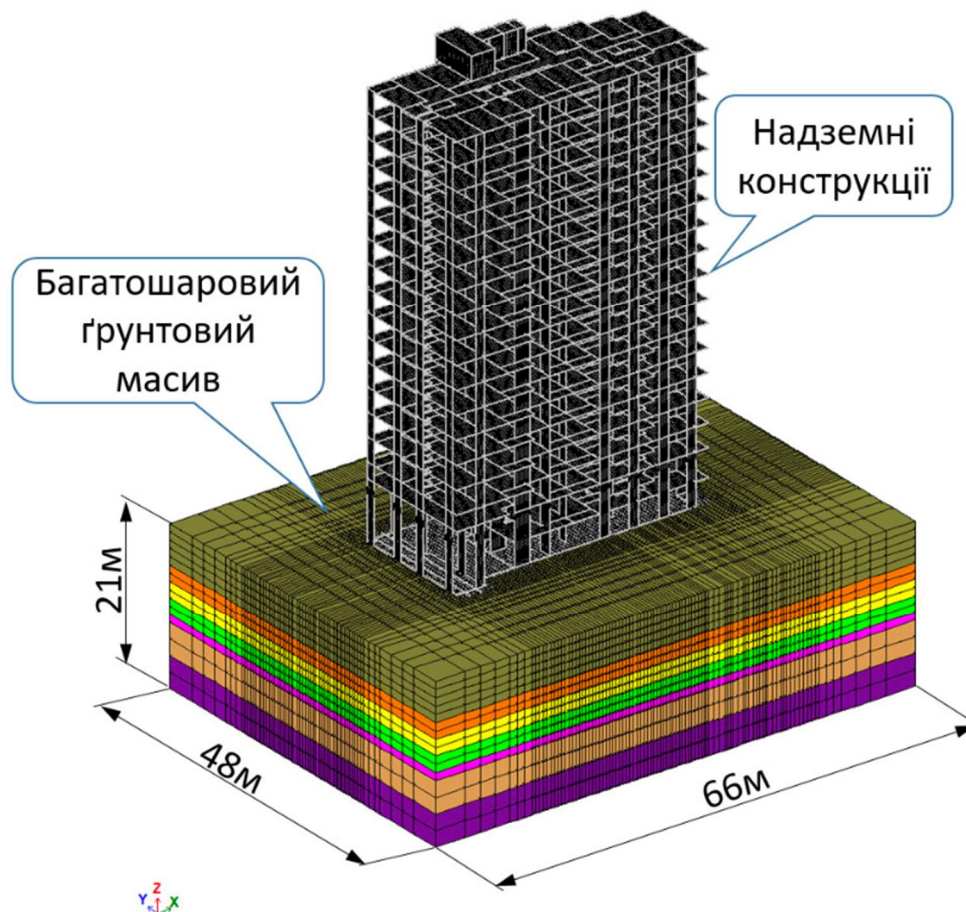


Рисунок 1.19 – Скінчено-елементна модель системи
«основа-фундамент-надземні конструкції» [57]

Як висновок аналізу дослідження проектних рішень, числове моделювання взаємодії елементів конструкції системи «основа – фундамент – надземні конструкції» дозволяє обґрунтувати раціональне розташування паль і їх геометричні розміри (довжину, переріз), а також забезпечує контроль за розподілом зусиль в палях під пілонами і стінами ядр жорсткості.

Отже, метод числового моделювання для дослідження напружено-деформованого стану системи «паля – ростверк – основа» та сумісної роботи її компонентів є перспективним напрямком дослідження, але не виключає потребу в польових та лабораторних дослідженнях, для отримання точних та достовірних результатів. Використання доступних методів в комплексі значно спрощує задачі дослідження та підвищує ефективність експериментів.

1.3 Аналіз методів розрахунку пальових фундаментів з низьким ростверком

Практичні методи визначення несучої здатності пальових фундаментів з урахуванням роботи низького ростверку були запропоновані багатьма авторами в різний час [20]. Серед них зокрема:

- Метод Рендольфа (Randolph, 1994) - спрощений аналітичний метод, який використовує коефіцієнти взаємодії. Він дозволяє оцінити загальне осідання та розподіл навантаження між плитою ростверку і групою паль за допомогою аналітичних кривих;

- Метод Бурланда (Burland, 1995) - запропонував концепцію, де палі розглядаються як «зменшувачі осідання» (settlement reducers), ростверк бере на себе основну частину навантаження, а палі включаються в роботу на 100% своєї несучої здатності для мінімізації деформацій;

- Метод Поулоса та Девіса (Poulos & Davis, 1980) - базується на теорії пружності та методі граничних елементів. Розрахункові графіки та коефіцієнти дозволяють оцінити, який відсоток вертикального навантаження передається через підшву ростверку залежно від кроку паль та їхньої довжини.

Визначення несучої здатності пальових фундаментів з урахуванням роботи низького ростверку є важливою інженерною задачею, оскільки підосва ростверку передає частину навантаження безпосередньо на ґрунт основи.

Основний метод розрахунку пальових фундаментів полягає у визначенні його несучої здатності як суми несучих здатностей паль та ростверку. Несучою здатністю такої моделі буде сума граничних несучих здатностей елементів фундаменту, при тому вважається, що вертикальні навантаження від надфундаментних конструкцій повністю передаються на палі. За чинними нормами [35 - 37], рекомендується враховувати спільну роботу системи «ростверк – паля – основа». Розроблені методи, які враховують частку ростверку в розподіленні навантаження на палі і на ґрунт, містять певну кількість допущень та не мають єдиного підходу до врахування взаємодії елементів фундаменту з основою.

Самородовим О. В. запропоновано уточнений аналітичний метод визначення сил опору по бічній роверхні (не більше 10% відхилення від натурних випробувань). В основі методу лежить диференційований підхід, який дозволяє розділити сили опору ґрунту в стані спокою та додаткові сили обтиснення, що виникають під дією різноспрямованих вертикальних навантажень. Складається з розрахунку опру палі в стані спокою та довжини взаємодії палі з ґрунтом. Потім несуча здатність по боковій поверхні розраховується за формулою:

$$F_{d,f} = k_f \cdot (T_0 + T_{du}) \quad (1.1)$$

де: T_{du} - додаткова сила обтиснення, яка з'являється від тиску будівлі.

k_f — коефіцієнт напрямку сили. Він змінює результат залежно від роботи палі.

На даний час в Україні одночасно діє дві паралельні нормативні бази для проектування основ та фундаментів. Національні будівельні норми та гармонізовані нормативні документи ЄС (Єврокодами). В цій системі головним

документом вважається [35], в якому викладені основні положення та його доповнення [36]. Документ випущений йому на заміну [37] містить граничні значення деформацій основ і фундаментів споруд при новому будівництві, а довідкових даних і методик розрахунків практично немає (планується настанова). В рамках гармонізації з Єврокод 7 випущений документ [38], який повинен використовуватись сумісно з національними будівельними нормами.

Несуча здатність висячих паль в ґрунтовій основі розраховуються як сума величини опору по боковій поверхні та опору під нижнім кінцем палі за формулою [35]:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} \cdot R \cdot A + u \sum \gamma_{cf} \cdot f_i \cdot h_i), \quad (1.2)$$

де γ_c – коефіцієнт умов роботи палі в ґрунті;

γ_{cf} , – коефіцієнти умов роботи відповідно під нижнім кінцем та за боковою поверхнею палі (табл. Н.2.3) [35];

R – розрахунковий опір ґрунту під нижнім кінцем палі (табл. 3.1) [35], для бурової палі визначається за формулою (1.4.), кПа;

A – площа спирання палі на ґрунт, м²;

u – зовнішній периметр поперечного перерізу палі, м.

f_i – розрахунковий опір i -го шару ґрунту основи за боковою поверхнею палі, що визначається за формулою (1.2), для попередніх розрахунків допускається f_i брати за табл. 3.2 [35], кПа;

h_i – товщина i -го шару ґрунту, що прорізається боковою поверхнею палі, м.

Опір по боковій поверхні може визначитися по таблиці або за формулою:

$$f_i = \sigma_{zg,i} \frac{\nu_i}{(1-\nu_i)} \operatorname{tg} \varphi_{II,i} + c_{II,i}, \quad (1.3)$$

де $\sigma_{zg,i}$ – напруження від власної ваги ґрунту всередині i -го шару ґрунтової основи;

ν_i – коефіцієнт Пуассона ґрунту всередині i -го шару ґрунтової основи.

Для визначення пружної складової осідання палі напружена зона навколо неї поділяється на дві частини (рис. 1.20): напружена зона по боковій поверхні з середнім модулем деформації E_f (осереднення здійснюється в межах бічної поверхні палі) та напружена зона під нижнім кінцем палі, яка визначається в межах одного діаметра (або сторони) палі d_0 вище і чотирьох нижче позначки нижнього кінця палі.

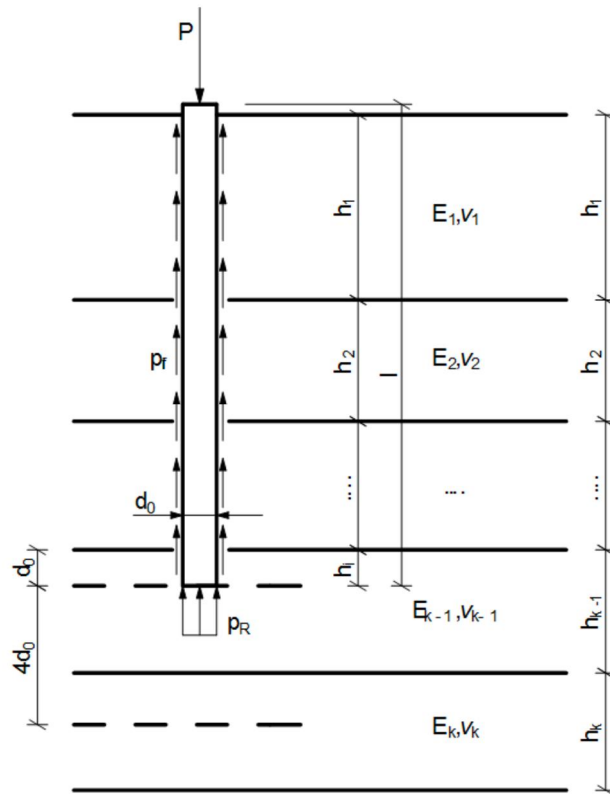


Рисунок 1.20 – Розрахункова схема для визначення осідання вертикально навантаженої палі в пружному середовищі [35]

Опір ґрунту під підшовною ростверку пропонується визначати як розрахунковий опір ґрунту під підшовною фундамента мілкового закладання згідно з нормами [35] за формулою:

$$R = \frac{(\gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2})}{\kappa} \cdot [M_{\gamma} \cdot k_z \cdot b_{\gamma} \cdot \gamma_{II} + M_q \cdot d_1 \cdot \gamma_{II} + (M_q - 1) \cdot d_b \cdot \gamma'_{II} + M_c \cdot c_{II}] \quad (1.4)$$

де γ_{c1} , γ_{c2} – коефіцієнти умов роботи ґрунту основи [35];

k – коефіцієнт, який беруть рівним 1 при визначенні характеристик φ_{II} і c_{II} випробуванням зразків ґрунту і рівним 1,1, якщо φ_{II} і c_{II} визначенні за довідниковими таблицями норм [35];

M_γ , M_q , M_c — безрозмірні коефіцієнти, які вибирають по довідниковим таблицям [35] залежно від кута внутрішнього тертя φ_{II} ;

$k_z = 1$, якщо $b \leq 10$ м, і $k_z = z_0 / b + 0,2$, якщо $b > 10$ м ($z_0 = 8$ м);

b – ширина підшви фундаменту;

γ_{II} – середнє значення питомої ваги ґрунтів, розміщених нижче підшви фундаменту в межах пласта завтовшки $0,5b$;

γ_{II}' – те саме для ґрунтів, які залягають вище від підшви;

d_1 – глибина закладання фундаментів від спланованої поверхні: для без підвальних будівель $d_1 = d$;

c_{II} – розрахункове значення питомого зчеплення ґрунту, який залягає під підшвою.

Для врахування спільної роботи паль та ростверку пропонується заміна конструкції фундаменту на еквівалентний умовний фундамент (додатки Д та П [35]). Це дозволяє звести складну просторову задачу до одновимірної задачі, яка розраховується методом пошарового підсумовування. Схема формування умовних фундаментів показана на рис.1.21.

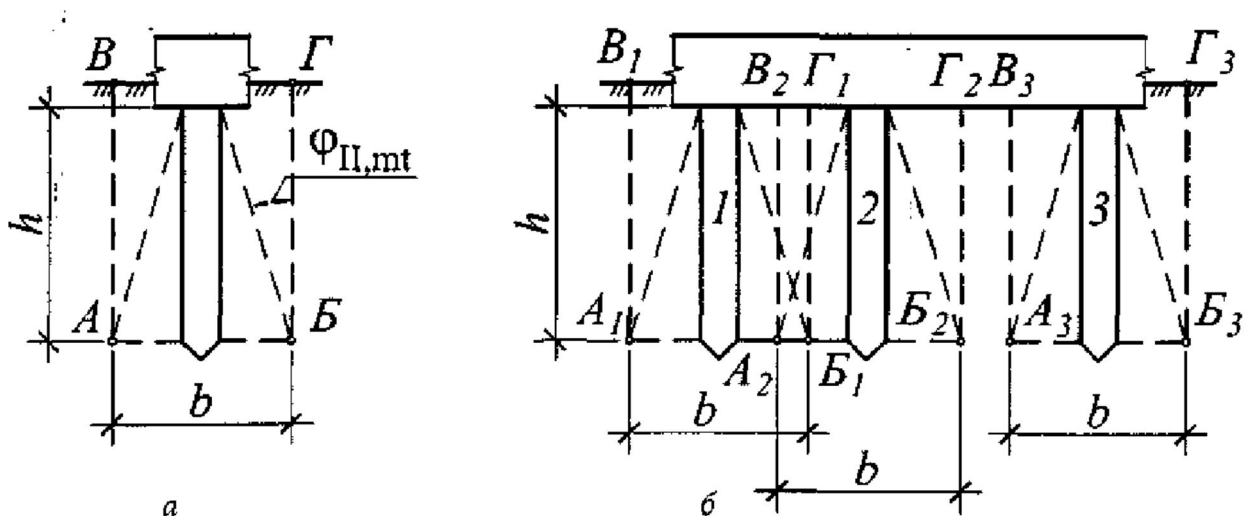


Рисунок 1.21 – Схема формування умовних фундаментів для: а) – однієї палі;

б) – декількох паль як системи умовних фундаментів [35]

Розроблена низка методів для врахування спільної роботи паль на основі припущень про фізико-механічні процеси, що проходять в ґрунті під навантаженням. Вони спрямовані, щоб наблизити теоретичні розрахунки до реальної поведінки паль та основи, що в тій чи іншій мірі вдається досягти при їх використанні. Найвідомішими методами, які довели свою ефективність є:

- метод, що розробив Poulos [58], для оцінки коефіцієнта взаємодії двох паль на основі представлення ґрунту як пружний континууму;
- метод, який запропонований Randolph and Wroth [59], що розроблений на основі апроксимації Вінклера [2] та теорії, що дотичні напруження навколо палі згасатимуть обернено пропорційно радіусу. В математичній моделі взаємодія між двома палями розраховується окремо через переміщення однакових жорстких сусідніх паль, враховується робота бічної поверхні та п'яти палі;
- уточнення для методу Poulos [8] запропоноване El Sharnouby і Novak [60], яке полягає у збільшенні дискредитованих точок при збільшенні довжини паль при чисельному моделюванні методом скінченних елементів. В тій же роботі зустрічається врахування впливу проміжних паль, що уточнює коефіцієнт взаємодії групи паль;
- в роботі, що виконана Southcott і Small [61], представлено розрахунки розрахункової моделі висячих паль, які вказують на суттєву відмінність у роботі паль в неоднорідних ґрунтах порівняно з однорідними, для яких коефіцієнт взаємодії достатньо узгоджений з реальною поведінкою паль;
- для врахування впливу напружень, що виникають уздовж стовбура на сумісну роботу паль Mylonakis і Gazetas [62] розробили загальне аналітичне формулювання. Було запропоновано функцію затухання для поля переміщень ґрунту(яке паля викликає навколо себе при осіданні), для врахування такого аспекту фізичної поведінки;
- аналітичний метод представили автори Cao і Chen [63] для розрахунку коефіцієнта взаємодії між двома однаковими палями. Полягає у розкладанні задачі на дві частини (масив ґрунту та дві фіктивні палі). Далі

грунт розглядається як тривимірний пружний матеріал, а палі як одновимірний. Тоді коефіцієнт взаємодії між палями залежить від співвідношення модулів деформації ґрунту основи та ґрунту навколо стовбура палі і залежить від відношення відстані між п'ясами та довжини паль.

У статті [64] представлено порівняння вищезазначених методів та їх комбінацій. В якості еталона для порівняння методів виконано чисельне моделювання. Результати порівняння (рис.1.22) показують ефективність аналітичних методів з певною розбіжністю, яка залежить від геометричних параметрів фундаменту та типу ґрунту.

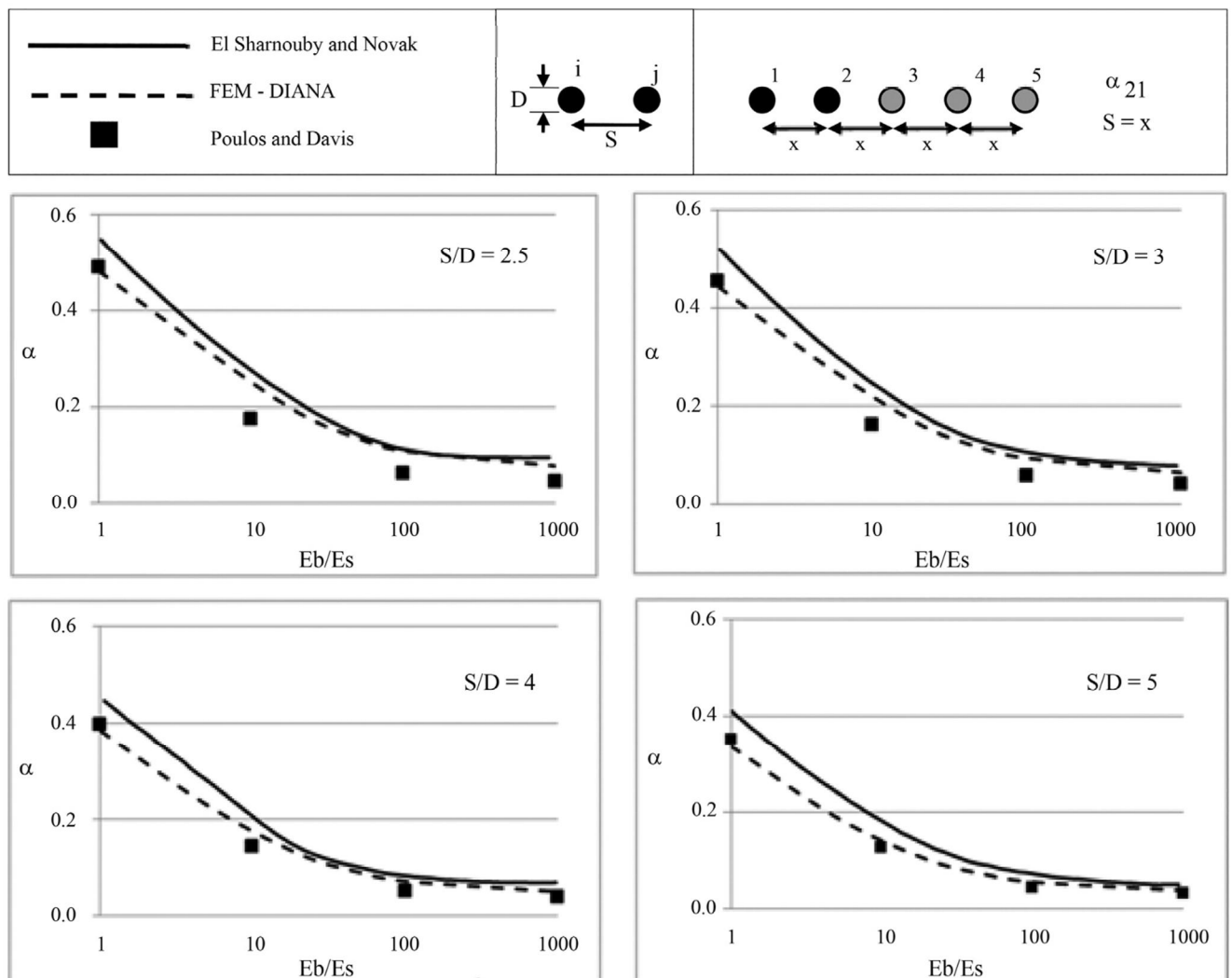


Рисунок 1.22 – Порівняння коефіцієнту взаємодії для двох паль у групах з двох та п'яти паль, визначеному різними методами [64]

У підручнику [65] спільну роботу паль запропоновано розраховувати по за формулою (1.5):

$$Q_{Gult} = EnQ_{ult} \quad (1.5)$$

де n - кількість паль;

E - коефіцієнт ефективності, розраховується за формулою(1.6);

Q_{ult} - опір основи, розраховується за формулою(1.7);

$$E = 1 - \frac{\arctg \frac{s}{d} [(f-1)g + (g-1)f]}{\frac{\pi}{2} fg} \quad (1.6)$$

де s - питомий опір по бічній поверхні;

d - діаметр палі;

f, g - кількість рядів в повздовжньому та поперечному напрямку ($fg = n$);

$$Q_{ult} = \pi d \int_0^L s dz + \frac{\pi d^2}{4} p - W \quad (1.7)$$

де p - питомий опір під вістрям;

s - питомий опір по бічній поверхні;

w - вага палі (віднімається від стискаючого навантаження);

d - діаметр палі;

z - глибина залягання палі.

В роботі [66] для вивчення динамічної реакції паль та пальових груп на осьове навантаження, автором запропонований напіваналітичний підхід, що базується на поєднанні методу матриці жорсткості із системою векторних функцій рядів Фур'є–Бесселя, що дозволяє замінити громіздкі класичні інтегральні перетворення на симулювання шарів в напруженому півпросторі (рис.1.23). У методі впроваджено коефіцієнти розкладання, які обчислюються для однієї палі та використовуються для розрахунку інших паль в групі та інших конфігурацій розміщення. Метод використовує матричне формулювання

вільного поля шаруватого ґрунту, яке інтегрується з матрицею палі, що забезпечує ефективне обчислення коефіцієнтів розкладання.

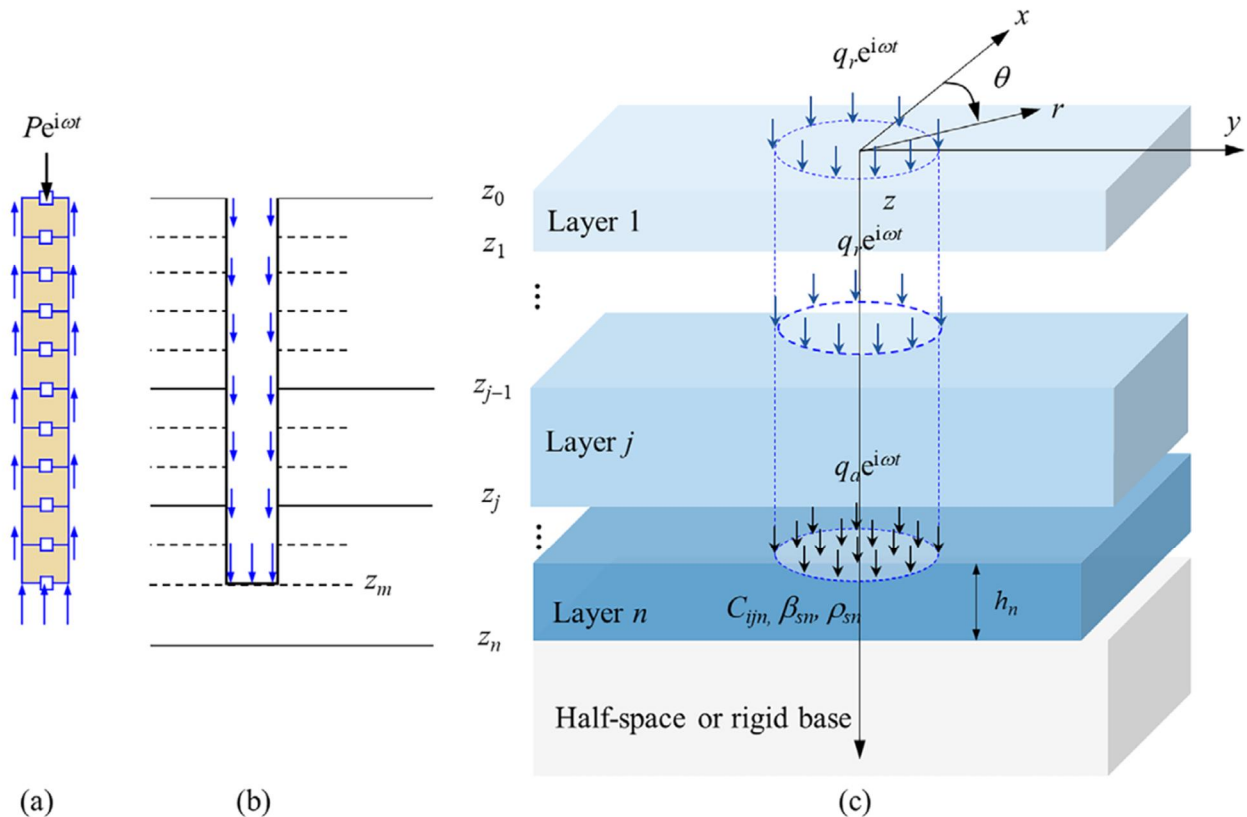


Рисунок 1.23 – Одиночна паля, вбудована в шаруватий поперечно-ізотропний ґрунт під вертикальним навантаженням: (а) розподіл напружень вздовж межі ґрунт-паля з боку палі; (б) розподіл напружень вздовж межі ґрунт-паля з боку ґрунту; (с) схема шарів ґрунту, що піддається двом випадкам навантаження: (і) рівномірно розподілене кільцеве навантаження q_r , прикладене до поверхні та межі шарів (за винятком z_n), та (іі) рівномірно розподілене навантаження q_a , прикладене до кругової області на основі (тобто на z_n).

У висновках авторами відзначається:

- проведений параметричний аналіз виявив ключові закономірності взаємодії системи «паля–ґрунт»;
- доведено, що анізотропія та шаруватість ґрунту (наприклад, наявність слабких або жорстких прошарків) суттєво змінюють механізм передачі навантаження вздовж стовбура палі;

- встановлено, що коефіцієнт взаємодії у пальових групах чітко залежить від частоти динамічного навантаження та геометрії розташування паль;

створений підхід є потужним інструментом для швидкого інженерного аналізу, оптимізації параметрів та надійного проектування пальових фундаментів в складних ґрунтових умовах.

Ефективність використання методу показана на навантаженні груп паль різної кількості та довжини (рис.1.24), що показує ефективність методу в широкому діапазоні задач.

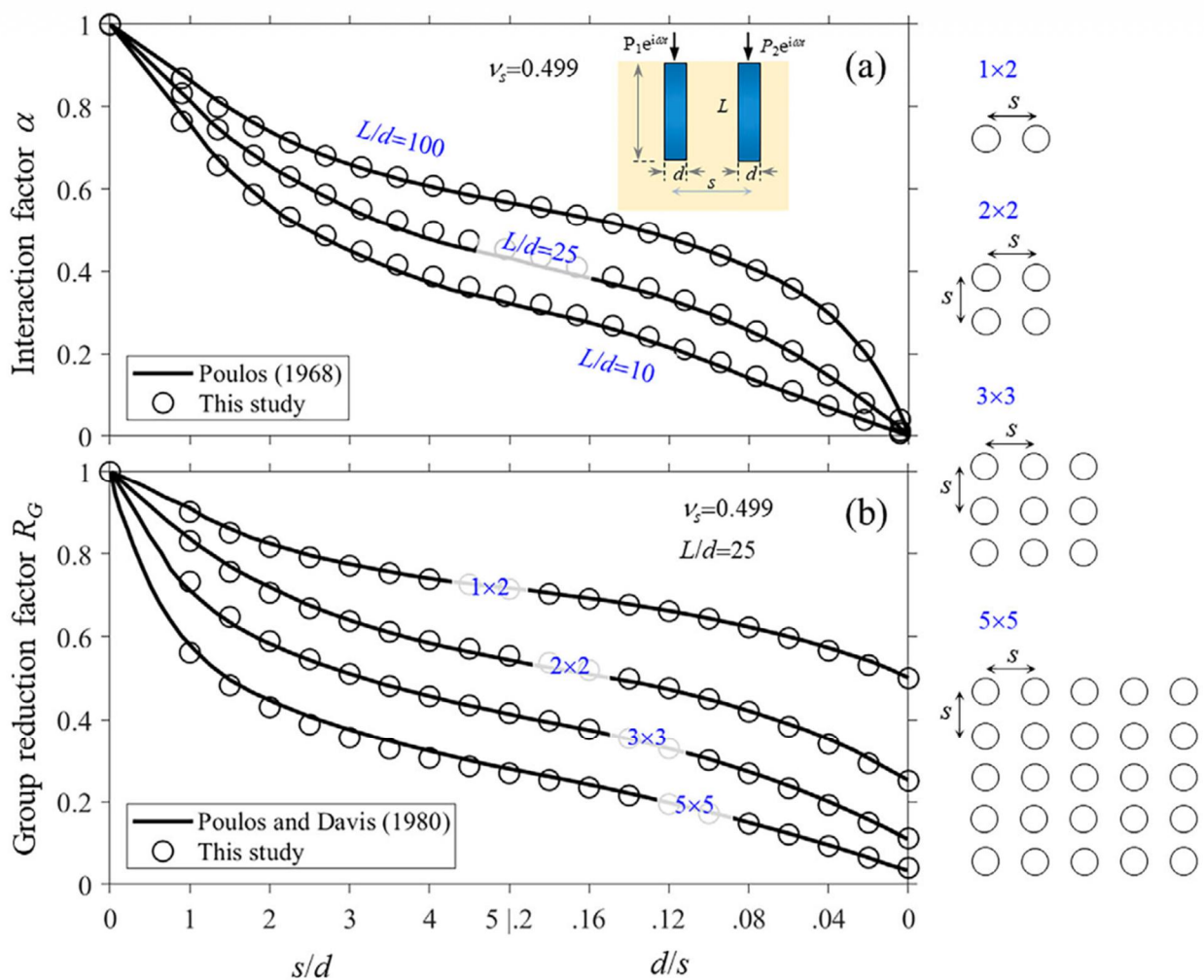


Рисунок 1.24 – (а) Коефіцієнт статичної взаємодії між двома однаковими палями, вбудованими в анізотропний ґрунт, у порівнянні зі збільшенням відстані між палями при $L/d=10, 25$ та 100 ; та (б) зміна коефіцієнта зменшення групи R_G з s/d для груп паль 1×2 , 2×2 , 3×3 та 5×5 . В обох випадках $\nu_s = 0,499$, а E_p/E_s встановлено достатньо великим, щоб представити жорстку палю

Висновки до розділу 1

Аналіз попередніх досліджень ростверком показав, що:

- несуча здатність паль в групі може суттєво відрізнятись від несучої здатності одниночної палі та залежить від відстані між палями, довжини паль та виду ґрунту;
- частина навантаження передається ґрунту основи через підшву ростверку;
- при зміні кількості, кроку і довжини паль частина навантаження, що сприймається ростверком, змінюється;
- навантаження між палями групи розподіляється нерівномірно та залежить від геометричних параметрів паль та розміщенні в ростверку;
- виконані експериментальні дослідження не в повній мірі висвітлили сумісну роботу ростверку і паль для стрічкових фундаментів особливо при використанні бурових паль;
- огляд результатів чисельних досліджень показує, що основним питанням при моделюванні пальових фундаментів є вибір моделі ґрунту, яка б адекватно відображала взаємодію основи і конструктивних елементів пальового фундаменту під навантаженням;
- проведені дослідження поки ще недостатні для практичних рекомендацій та розробки удосконаленого методу розрахунку пальових фундаментів.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СТРІЧКОВОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТУ ПІД ДІЄЮ ВЕРТИКАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Для порівняння ступеня реалізації забивних і бурових паль в складі стрічкового однорядного фундаменту під дією вертикального навантаження та визначення частки навантаження, яке сприймає ростверк, а яке приходить на палі в залежності від виду паль (бурова, забивна), кроку та довжини паль проведено випробування статичним навантаженням на маломасштабних моделях у лабораторних умовах.

2.1 Планування модельного експерименту

Для оцінки несучої здатності паль та ростверку в складі однорядного стрічкового фундаменту та виявлення чинників, які впливають на частку вертикального навантаження, яке сприймає ростверк і яке приходить на палі заплановано фізичне дослідження на маломасштабних моделях однорядного стрічкового пальового фундаменту з різною довжиною та кроком бурових та забивних паль. Також для врахування ступеню реалізації паль в складі стрічкового пальового фундаменту заплановано випробування моделей одиночних паль з тими ж геометричними характеристиками, що і для моделі стрічкового пальового фундаменту.

З метою отримання прогнозованих результатів фізичного моделювання розроблено програму та методику проведення експерименту.

2.2 Програма та методика дослідження

Для визначення залежності між фізичними та геометричними характеристиками і характеру перерозподілу зусиль між елементами фундаменту виконано фізичне моделювання на маломасштабних моделях, яке має вагомі переваги для дослідження поведінки конструкцій під дією

вертикальних навантажень. Таке дослідження дозволяє отримати достовірну та якісну оцінку поведінки фундаменту під навантаженням та взаємодію елементів конструкції в наближених до реальних умовах. Також дає широкий вибір варіантів розмірів, розміщення паль та можливість багаторазового повторення.

Моделювання проводиться в лотку з піщаним ґрунтом, де штучно створені умови із заданими характеристиками однорідної основи (щільність, вологість, характеристики міцності). Умови моделювання обґрунтовані методами теорії подібності, прийнятий масштаб моделювання однаковий для навантажень, напружень та геометричних параметрів моделі.

Моделювання ґрунтової основи виконано в лотку розмірами 1800´1200´1000 мм. Масштаб моделювання прийнятий 1:15. В якості ґрунту заплановано використовувати пісок середньої крупності. Основа створюється шляхом пошарового засипання у лоток піску заданої вологості з обов'язковим ущільненням кожного шару до заданої щільності. Прийняті характеристики піску вказані в табл. 2.1. Щільність основи планується контролювати методом ріжучого кільця відповідно до вимог.

Таблиця 2.1

Характеристики моделі ґрунтової основи в лотку

Назва характеристики	Пісок середньої щільності
Щільність, г/см ³	1670
Вологість	0,07
Коефіцієнт пористості	0,70
Кут внутрішнього тертя, °	30
Питоме зчеплення, кПа	1
Модуль деформації, МПа	24

Для моделювання паль довжиною 6, 4.5 і 3 м, поперечним перерізом 30х30 см, виготовлено моделі з деревини, зі стороною поперечного перерізу 2 см і довжиною 20, 30 і 40 см, які влаштовуються без виймання ґрунту та діаметром 25мм і довжиною 20, 30 і 40 см, які влаштовуються з вийманням ґрунту. Виготовлено модель низького ростверку з металу висотою 2 см та довжиною 66 см, який об'єднує 11 паль з однорядним розміщенням і дозволяє моделювати паливий фундамент з кроком $3d$ та $6d$. Конструктивне рішення моделі ростверку наведене на рис. 2.1.

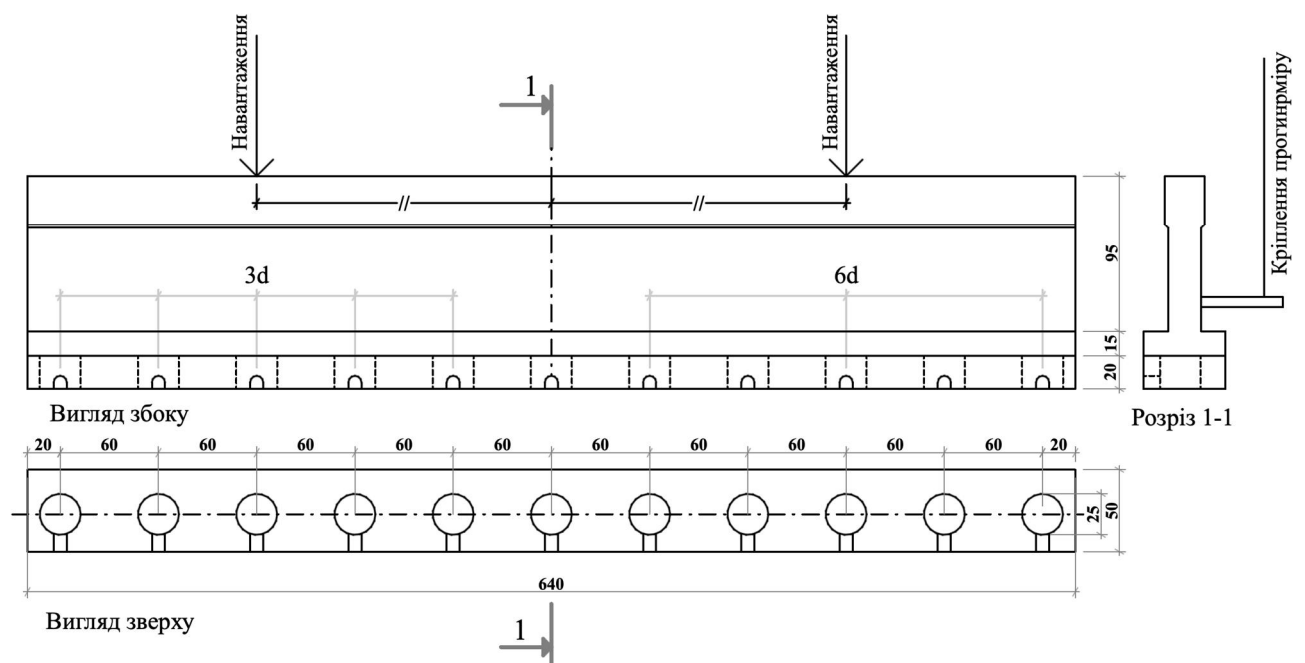


Рисунок 2.1 – Конструкція моделі стрічкового ростверку для розміщення паль

Забивні палі влаштовувалися без виймання ґрунту, а бурові палі з повним вийманням ядра. Для буріння свердловини виготовлений бур з радіусом різучої кромки відповідно до перерізу палі. Конструкція приладу подана на рисунку 2.2.

На модель стрічкового однорядного паливого фундаменту навантаження прикладалося від 2-х домкратів встановлених на жорстку балку (для рівномірного розподілення навантаження) з рівною відстанню від центра конструкції, величина якого подавалася з кроком 1.5 кН та контролювалося за допомогою динамометрів ДС-5 і ДС-3, встановленими між домкратами та упорною балкою. Величина

осідання конструкції замірялася прогиномірами, встановленими на незалежній від системи навантаження рейці.

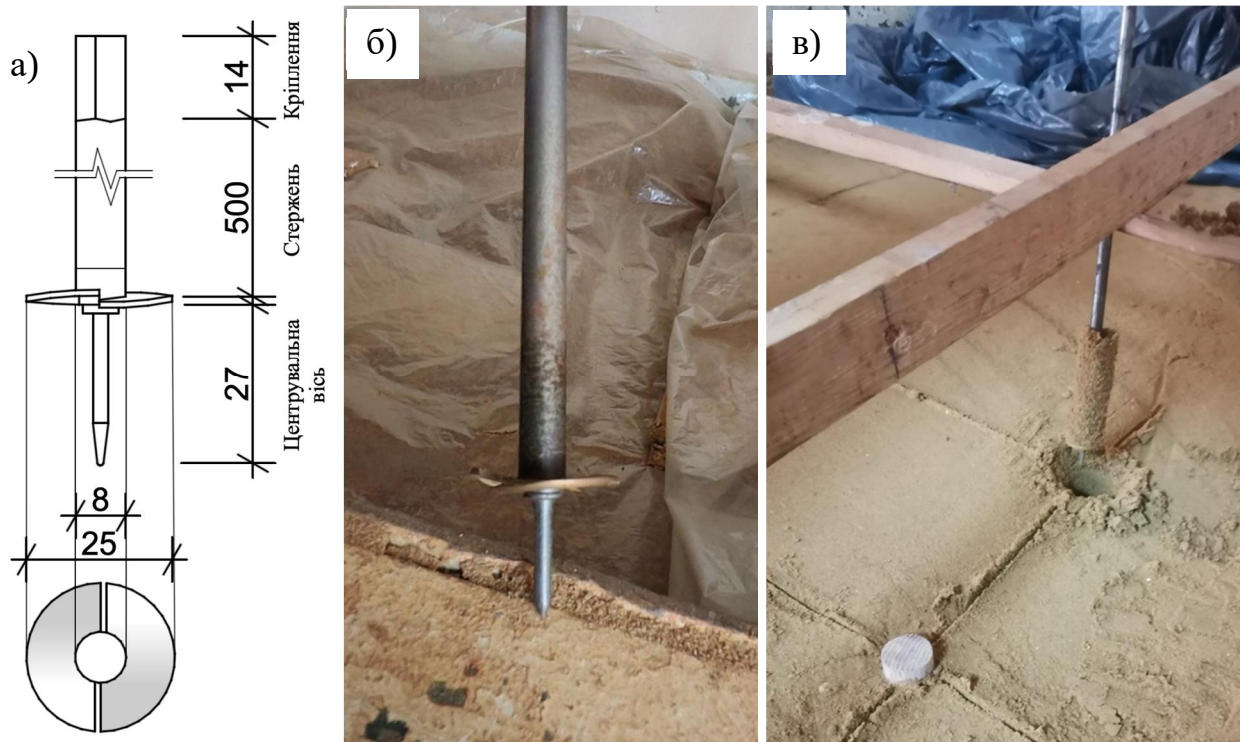


Рисунок. 2.2 – Бур для виконання свердловин а) конструктивна схема буру; б) фото буру; в) процес буріння свердловини

Для вимірювання навантажень, які приходяться на кожну з паль, використовуються тензодатчики (розраховані на навантаження до 200 кг.) які передають дані на аналого-цифровий перетворювач ваги hx-711, та виводить показники на дисплей модулю вагового індикатору, показано на рис.2.3.

Для можливості одночасно влаштувати та отримати показники з одинадцятьох датчиків сконструйовано прилад, який об'єднує схеми модулів підключення, тензометричних датчиків в одну схему з спільним контуром живлення. Для приладу сконструйований корпус, модель якого виконана в програмі для полігонального моделювання Blender. та надрукований на 3d принтері. Процес виготовлення приладу показано на рис.2.4. Важливим етапом було тарирування тензометричних датчиків. За допомогою ручного пресу

прикладалось навантаження ступенями на тензодатчики по черзі в межах від 0 до 200 кг, величина прикладеного навантаження контролювалась динамометром.

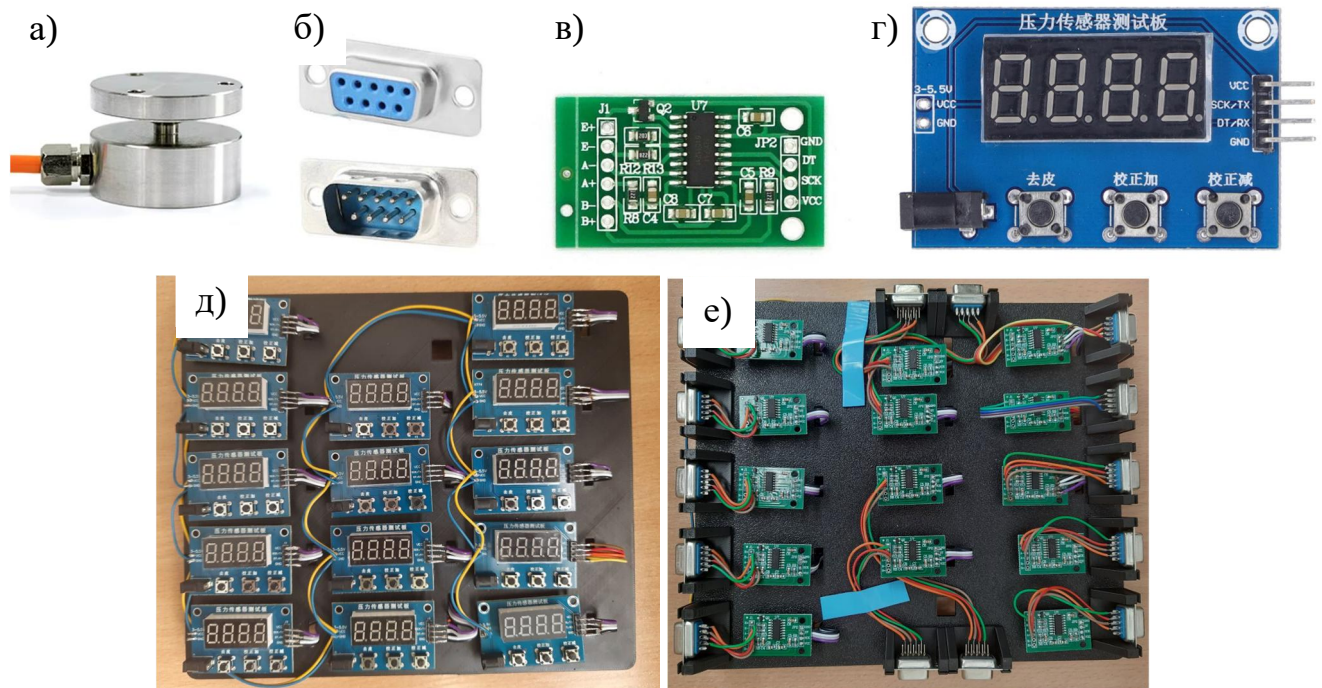


Рисунок 2.3 – Складові приладу для вимірювання навантажень на палі:
 а) тензометричний датчик; б) інтерфейси підключення датчиків DB9 VGA;
 в) плата hx-711; г) Digital Load Cell Module; розміщення деталей на платі
 приладу д) вид зверху; е) вид знизу

На рис 2.5 показана система для передачі навантаження на однорядний стрічковий фундамент та встановлення тензометричних датчиків в попередньо підготовлені отвори з канавкою для виведення кабелю датчика.

Проведено серію дослідів зі зміною кроку та довжини паль, за програмою експерименту модельних випробувань, представленою в таблиці 2.2.

Для оцінки несучої здатності окремої палі в складі стрічкового пального фундаменту проведено фізичне моделювання одиночних паль забивних та бурових, тих же геометричних характеристик як для паль в складі стрічкового фундаменту. Паля в ґрунтовій основі розміщувалась на відстані не менше $12d$ від

стінок лотку. При випробуванні одиночної палі тензометричні датчики не використовувались, навантаження передавалось на палю за допомогою важільного пристосування, що кріпиться до стінки лотка, схему навантаження показано на рис 2.6. В ході експерименту на одиночну палю подавалось навантаження з кроком 5 кг. На кожному етапі навантаження після умовної стабілізації навантаження знімалися показники осідання для формування графіків залежності осідання до навантаження та подальшого порівняння результатів.

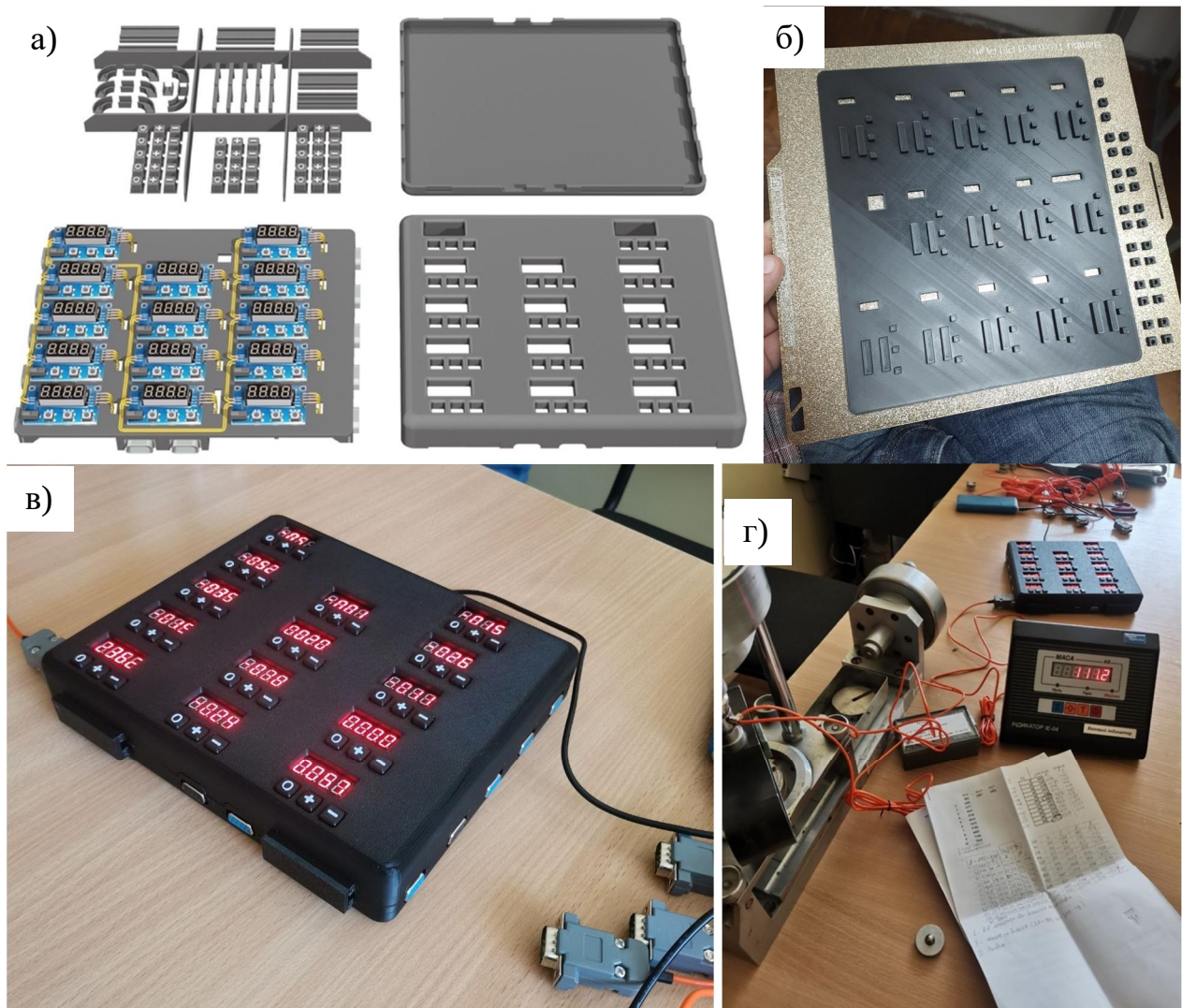


Рисунок 2.4 – Прилад для вимірювання навантажень на палі: а) модель деталей корпусу; б) надрукована деталь; в) фото готового приладу; г) процес тарування датчиків

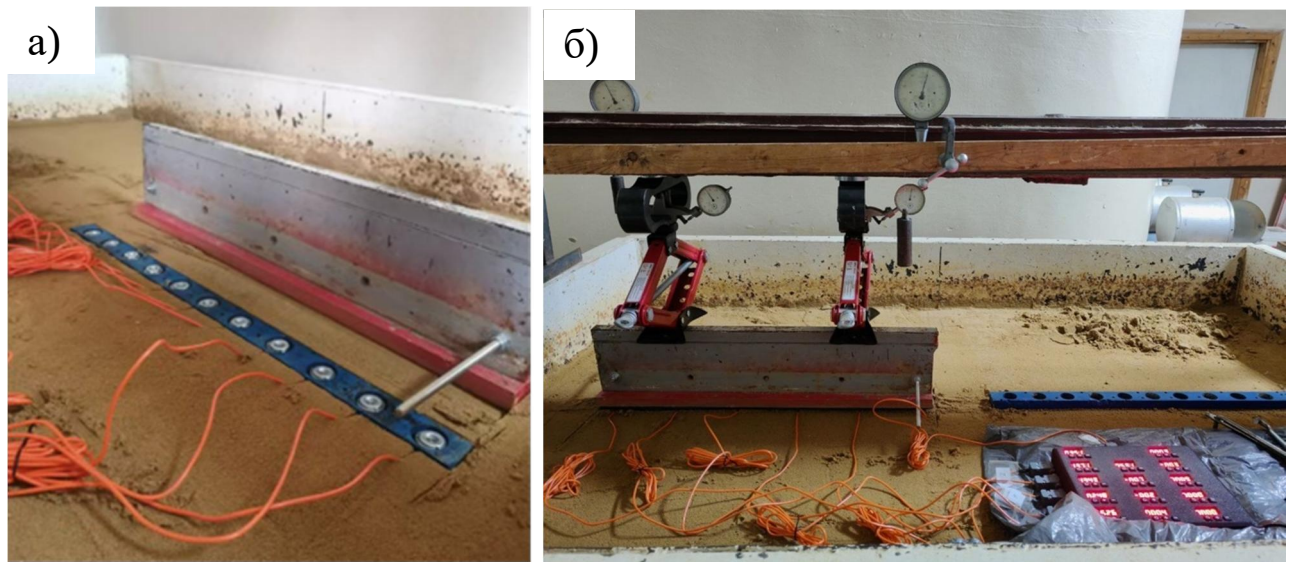


Рисунок 2.5 – Система для випробування стрічкового фундаменту на палях:
а) встановлення тензометричних датчиків в ростверк; б) схема завантаження
фундаменту

Таблиця 2.2

**Програма випробування стрічкового фундаменту
на палях статичним навантаженням**

Крок палі	Спосіб влаштування	Довжина палі, см
3D	забивна	400
		300
		200
	бурова	400
		300
		200
6D	забивна	400
		300
		200
	бурова	400
		300
		200

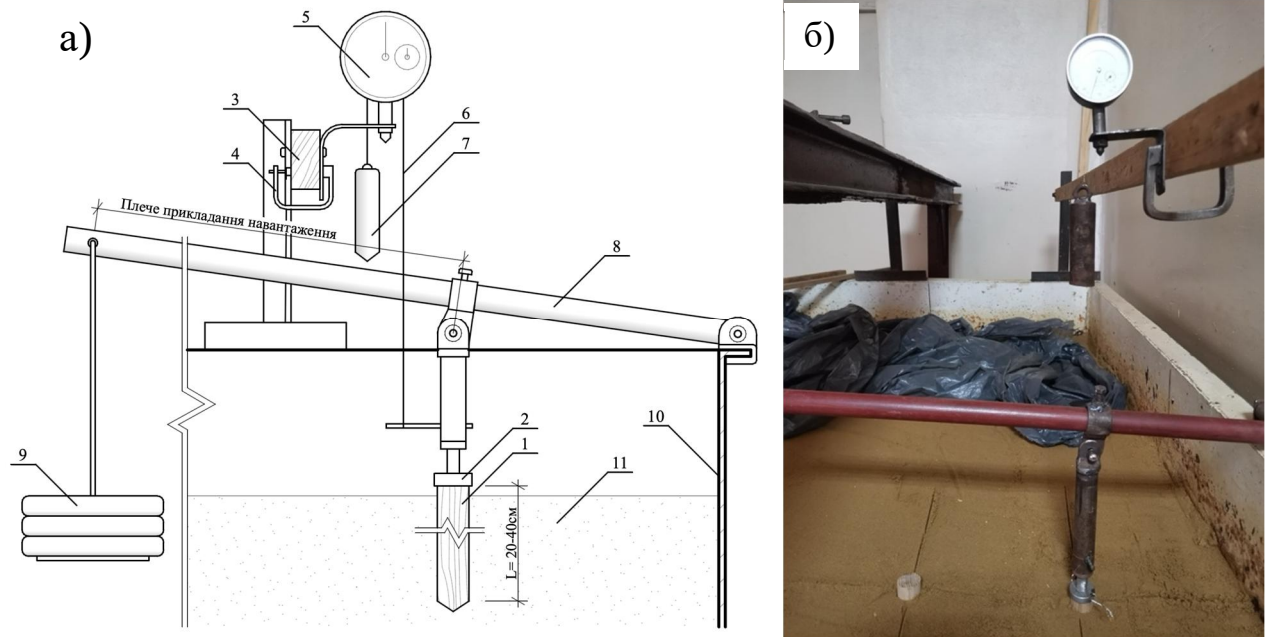


Рисунок 2.6 – Конструкція для випробування одиночних паль а) схема завантаження палі в лотку: 1 – паля; 2 – центрувальна металева пластина; 3 – незалежна рейка для кріплення прогиноміру; 4 – трубцина; 5 – прогиномір; 6 – сталевий дріт; 7 – висок; 8 – важільна система; 9 – навантаження; 10 – стінки лотка; 11 – ґрунтова основа; б) випробування моделі одиночної палі

2.3 Результати досліджень стрічкових фундаментів на палях

При аналізі результатів визначались:

- частка навантажень, яке приходить на палі у складі пального фундаменту;
- ступінь реалізації несучої здатності паль у складі однорядного стрічкового пального фундаменту;
- частка навантажень, яке сприймає низький ростверк;
- тиск під подошвою ростверку;
- залежність частки навантажень, що сприймає ростверк і яке приходить на палі від довжини та кроку паль в складі стрічкового фундаменту на забивних та бурових палях.

Результати дослідження представлено у вигляді таблиць та графіків, що відображають залежність осідання від навантаження для однорядного стрічкового пальового фундаменту від покрокового прикладання навантаження.

В результаті проведених випробувань моделей однорядного стрічкового пальового фундаменту на бурових та забивних палях було отримано величину деформацій та сформовано порівняльні графіки залежності осідання від навантаження для стрічкових пальових фундаментів з кроком паль 3d та 6d зі зміною довжини, зображені на рис. 2.7 - 2.10.

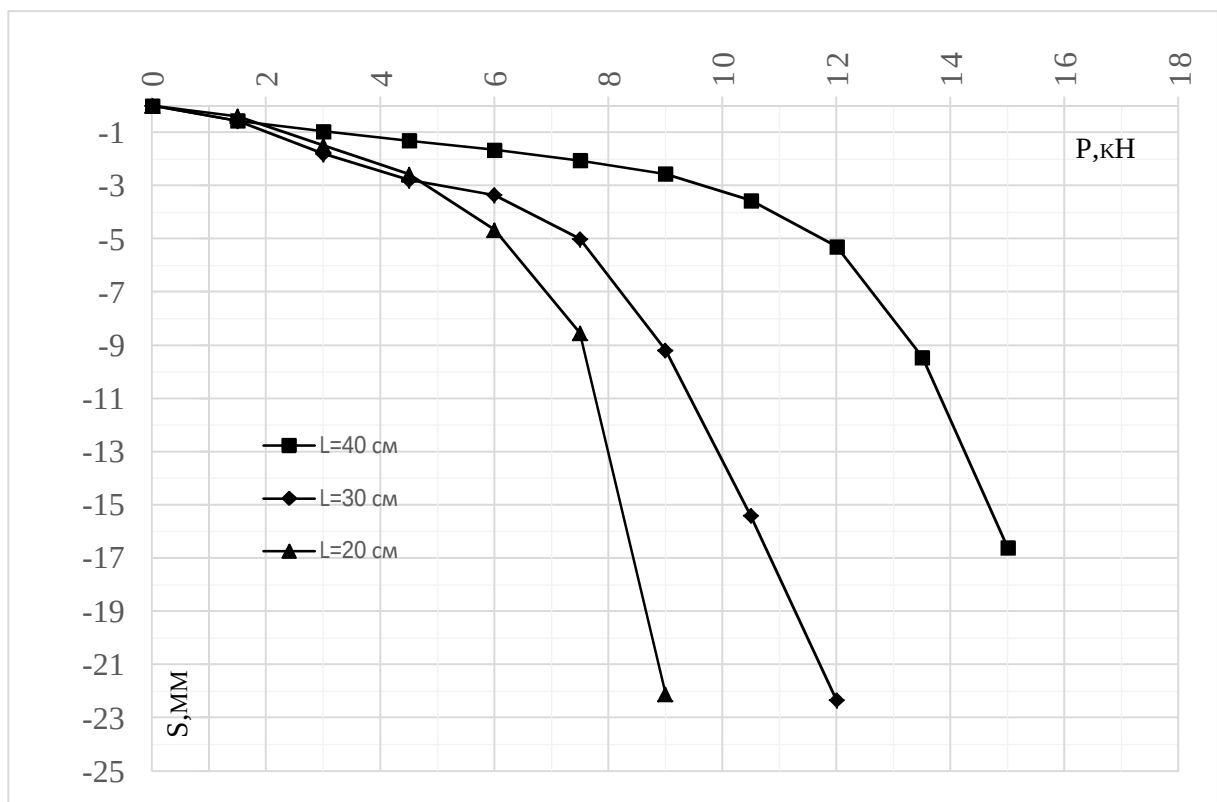


Рисунок 2.7 – Графіки залежності осідання-навантаження моделей стрічкових фундаментів на забивних палях при кроці 3d

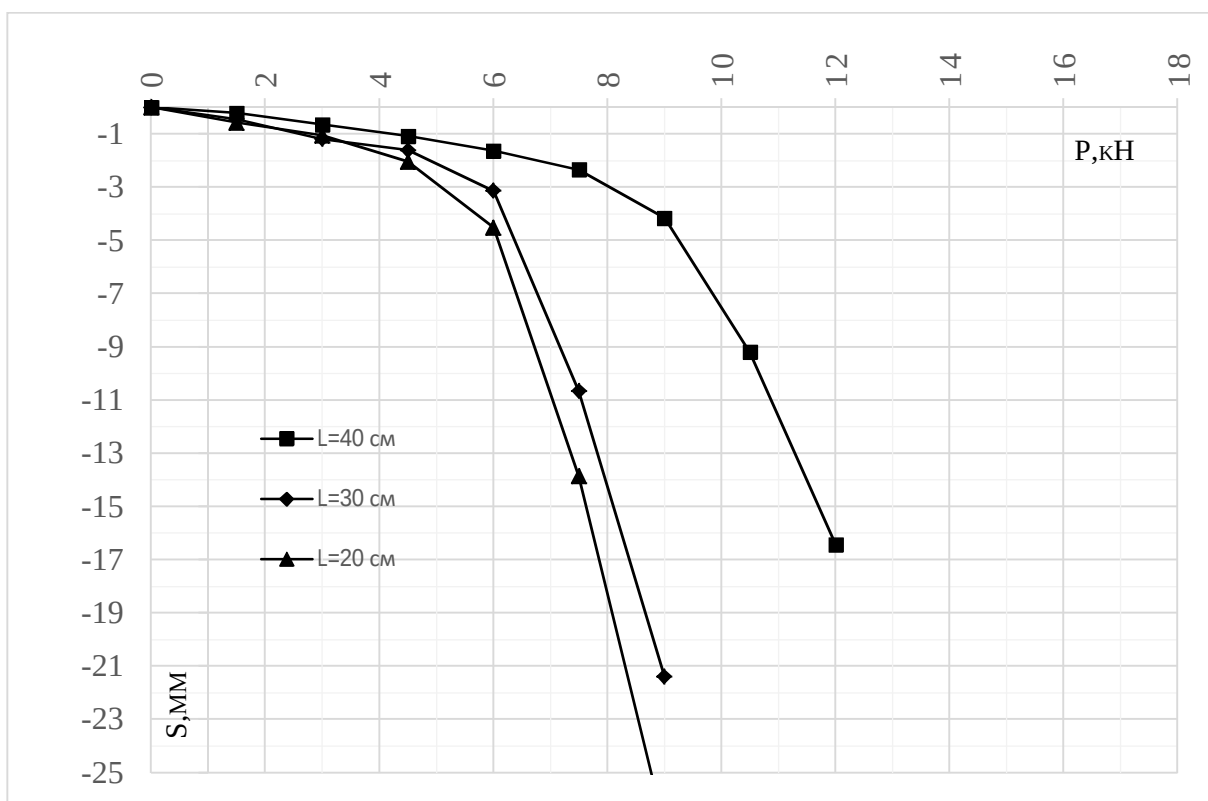


Рисунок 2.8 – Графіки залежності осідання-навантаження моделей стрічкових фундаментів на забивних палях при кроці 6d

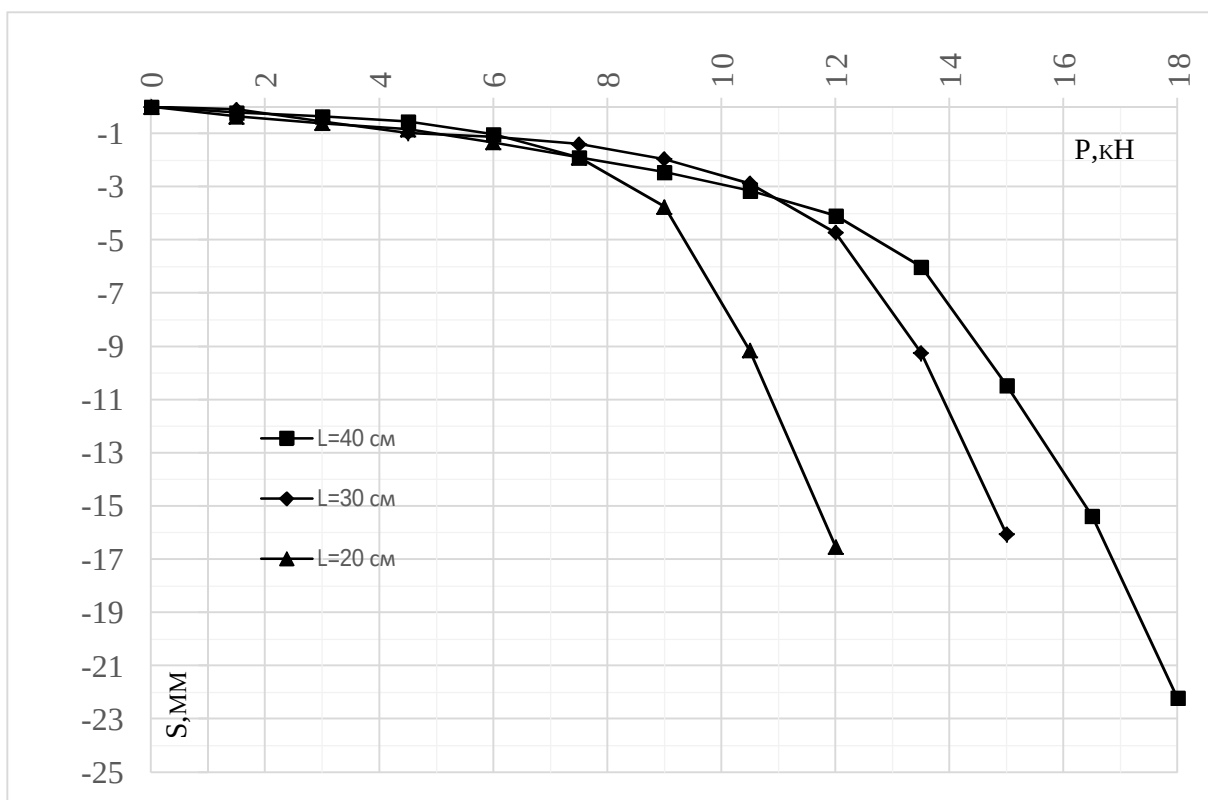


Рисунок 2.9 – Графіки залежності осідання-навантаження моделей стрічкових фундаментів на бурових палях при кроці 3d

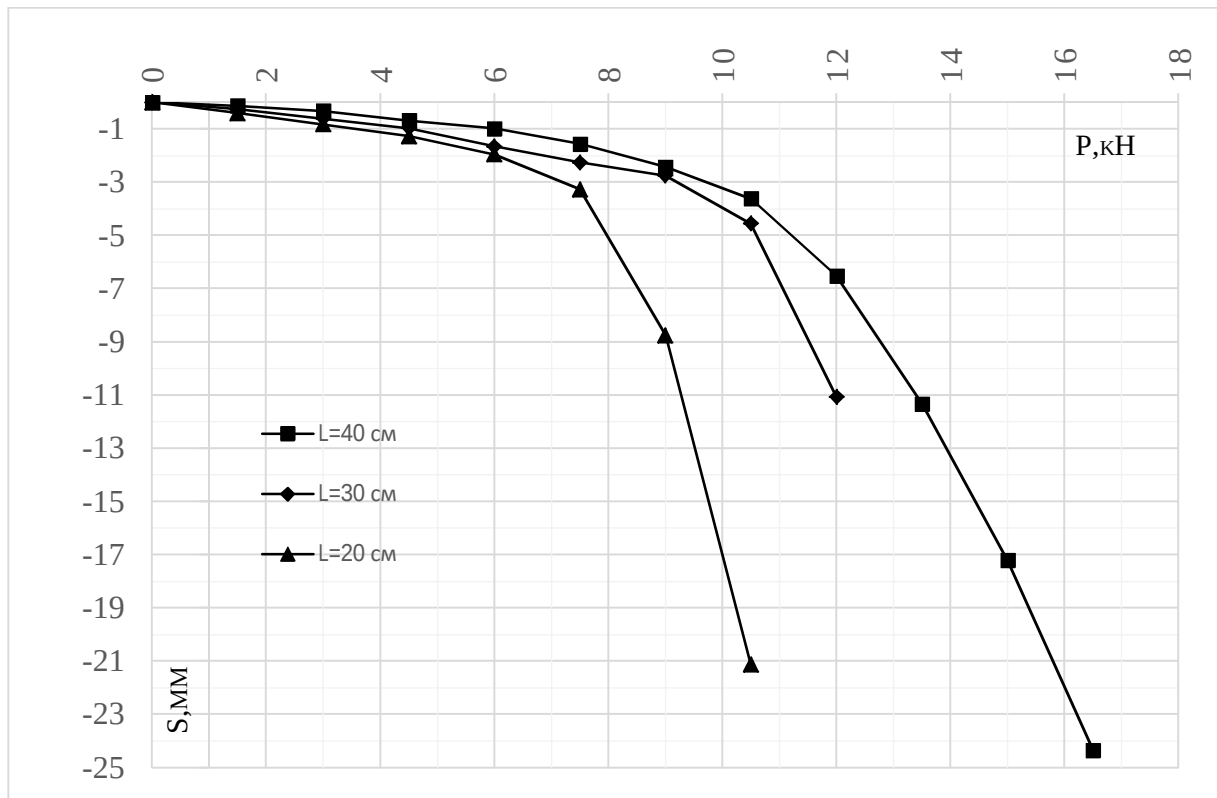


Рисунок 2.10 – Графіки залежності осідання-навантаження моделей стрічкових фундаментів на бурових пальях при кроці 6d

На основі графіку залежності осідання-навантаження визначено несучу здатність випробуваних палевих фундаментів при величині осідання, що відповідає гранично допустимому осіданню. Отримані значення несучої здатності моделей фундаментів з різним кроком та довжиною паль показані в таблиці табл. 2.3.

Таблиця 2.3

**Несуча здатність бурових ти забивних паль за результатами
модельного дослідження, кН**

Крок паль	Спосіб влаштування	Довжина паль, см		
		20	30	40
3d	забивна	6,8	7,5	12,0
	бурова	9,4	12,0	12,7
6d	забивна	6,0	6,3	9,2
	бурова	8,0	10,6	11,3

Проаналізовано ступінь реалізації несучої здатності бурових та забивних паль у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту при кроці паль 3d та 6d різної довжини у порівнянні з несучою здатністю одиночної палі. Графіки залежності осідання до навантаження для паль в складі стрічкового пальового однорядного фундаменту на палях показані на рис.2.11, 2.13. Графіки залежності осідання до навантаження сформовані за результатами випробування одиночних паль, показано на рис.2.12, 2.14.

Величину ступеню реалізації виражено у відношенні несучої здатності палі в складі пальового фундаменту до несучої здатності одиночної палі та показано в табл. 2.4. Проаналізовано залежність ступеню реалізації палі в складі стрічкового пальового однорядного фундаменту від довжини та кроку (рис. 2.15).

Таблиця 2.4

Порівняння ступеню реалізації несучої здатності паль у складі стрічкового фундаменту з одиночними

Крок паль	Спосіб влаштування	Довжина паль, см								
		20			30			40		
		у складі фундаменту, кН	Одиночна, кН	ступінь реалізації несучої здатності паль	у складі фундаменту	Одиночна, кН	ступінь реалізації несучої здатності паль	у складі фундаменту	Одиночна, кН	ступінь реалізації несучої здатності паль
3d	забивні	0,55	0,6	0,92	0,75	0,9	0,83	1,30	1,14	1,14
	бурові	0,35	0,46	0,76	0,72	0,6	1,20	1,55	0,76	1,51
6d	забивні	0,42	0,6	0,70	0,67	0,9	0,72	1,05	1,14	0,92
	бурові	0,25	0,46	0,54	0,54	0,6	0,90	0,93	0,76	1,22

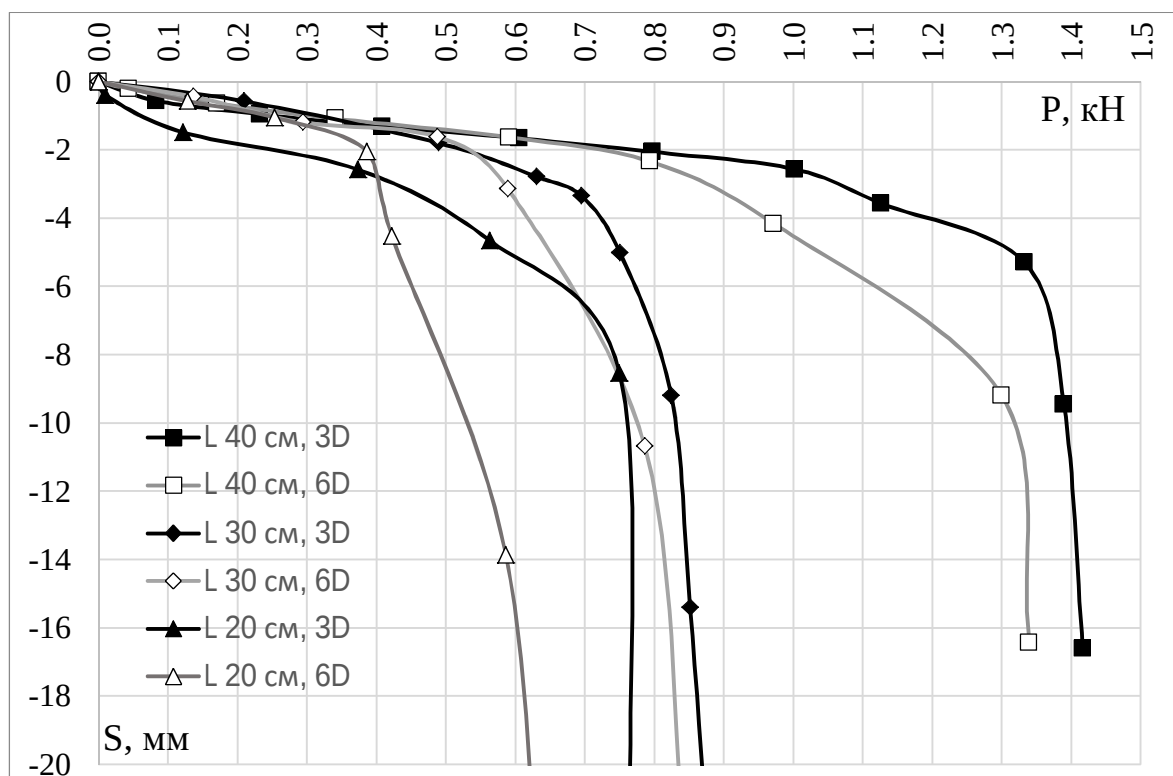


Рисунок 2.11 – Залежність осідання-навантаження для палей в складі однорядного стрічкового фундаменту на забивних палях з кроком $3d$ та $6d$

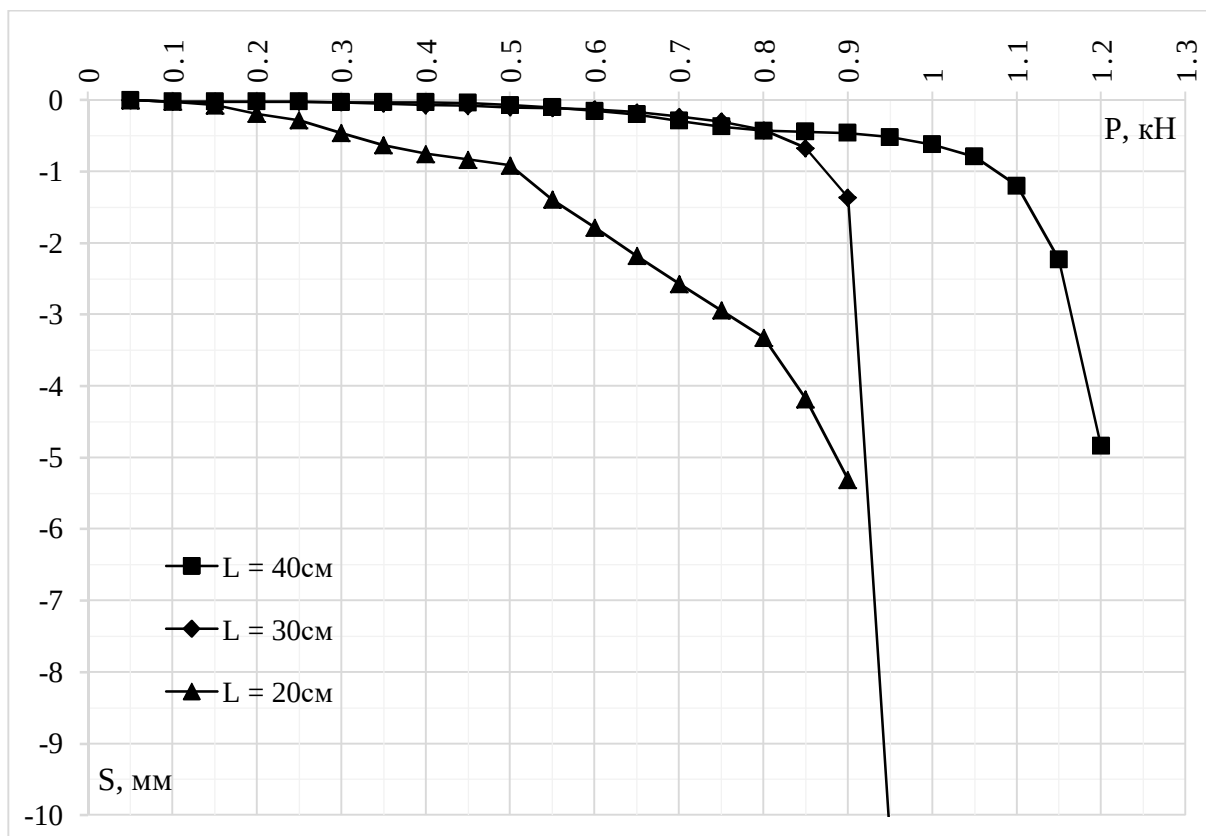


Рисунок 2.12 – Графік залежності осідання-навантаження забивних палей

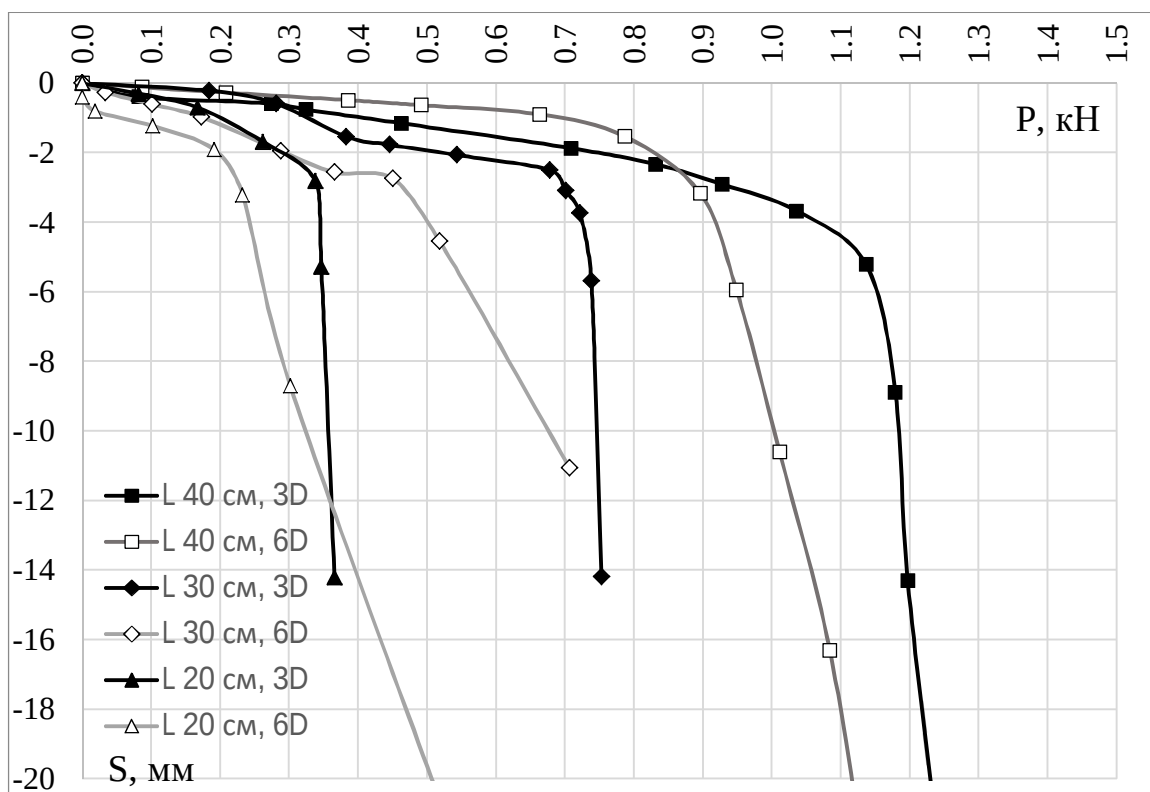


Рисунок 2.13 – Залежність осідання-навантаження для паль в складі однорядного стрічкового фундаменту на бурових палях з кроком 3d та 6d

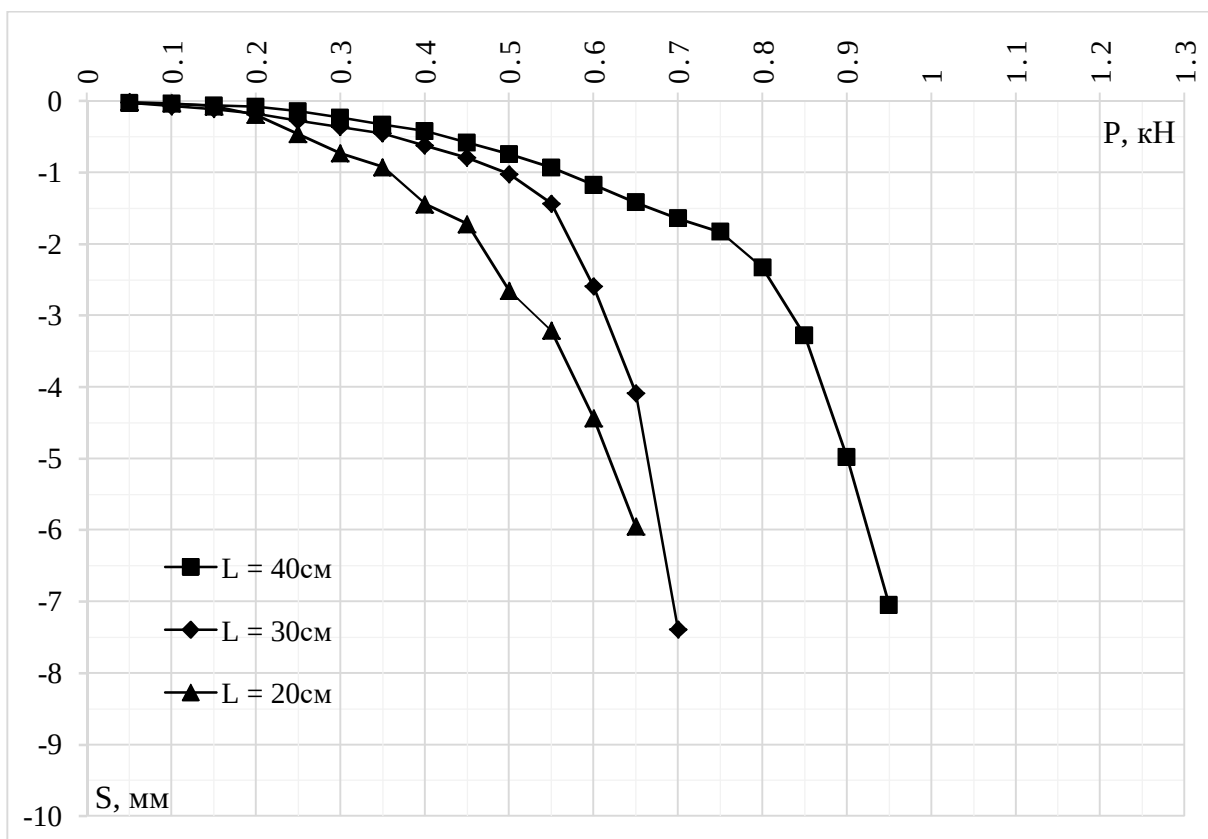


Рисунок 2.14 – Графік залежності осідання-навантаження бурових паль

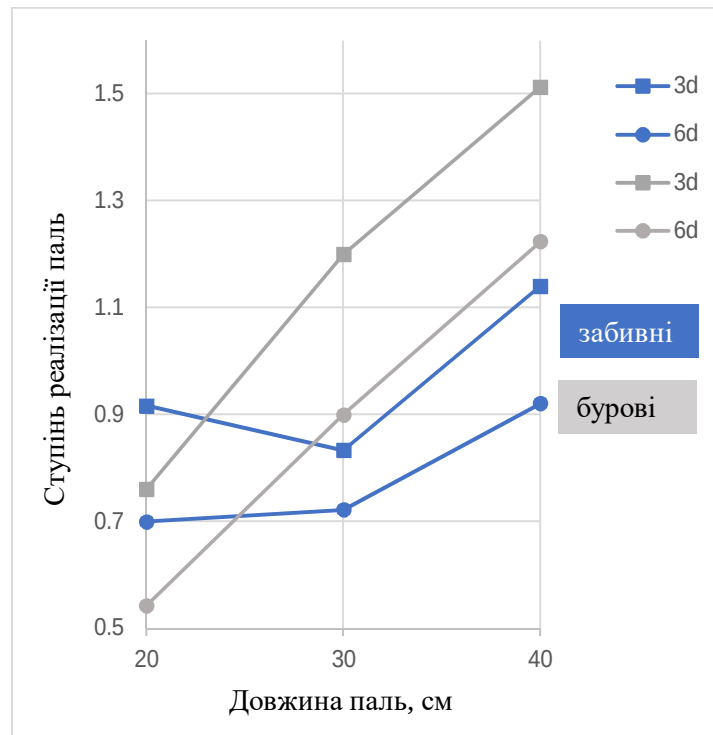


Рисунок 2.15 – Залежність ступеню реалізації несучої здатності паль у складі фундаменту у порівнянні з навантаженням, яке сприймає одиночна паля

Для виявлення залежності включення в роботу низького ростверку в складі стрічкового пального однорядного фундаменту на бурових та забивних на палях від довжини та кроку визначено частку несучої здатності низького ростверку, як різницю несучої здатності фундаменту в цілому та сумарної несучої здатності паль (табл.2.5).

Графік залежності частки ростверку та тиску під подошвою від довжини та кроку паль показано на рис.2.16. Також визначений тиск під подошвою ростверку, як частка навантажень, що сприймає ростверк, поділена на площу подошви ростверку без врахування площі перерізу паль.

Робота ростверку залежить від кроку і довжини паль (рис.2.16):

- підвищення тиску під ростверком та частка ростверку зростає зі збільшенням кроку паль (зі збільшенням площі контакту з ґрунтом);
- зниження частки ростверку відбувається зі збільшенням довжини (через більше включення в роботу паль за рахунок збільшення тертя по боковій поверхні палі).

Таблиця 2.5

**Частка навантаження, яку сприймає ростверк стрічкового пальового
однорядного фундаменту на бурових та забивних палях**

Крок паль	Спосіб влаштування	Довжина паль, см								
		20			30			40		
		Тиск під подошвою ростверку, кПа	Частка навантаження, що сприймає ростверк		Тиск під подошвою ростверку, кПа	Частка навантаження, що сприймає ростверк		Тиск під подошвою ростверку, кПа	Частка навантаження, що сприймає ростверк	
			кН	%		кН	%		кН	%
3d	бурові	86,9	2,57	38	58,5	1,73	23	67,5	1,99	17
	забивні	227,3	6,71	71	218,8	6,46	54	130,3	3,85	30
6d	бурові	156,3	4,24	71	131,7	3,57	57	176,8	4,79	52
	забивні	256,5	6,95	87	307,5	8,33	79	276,5	7,49	66

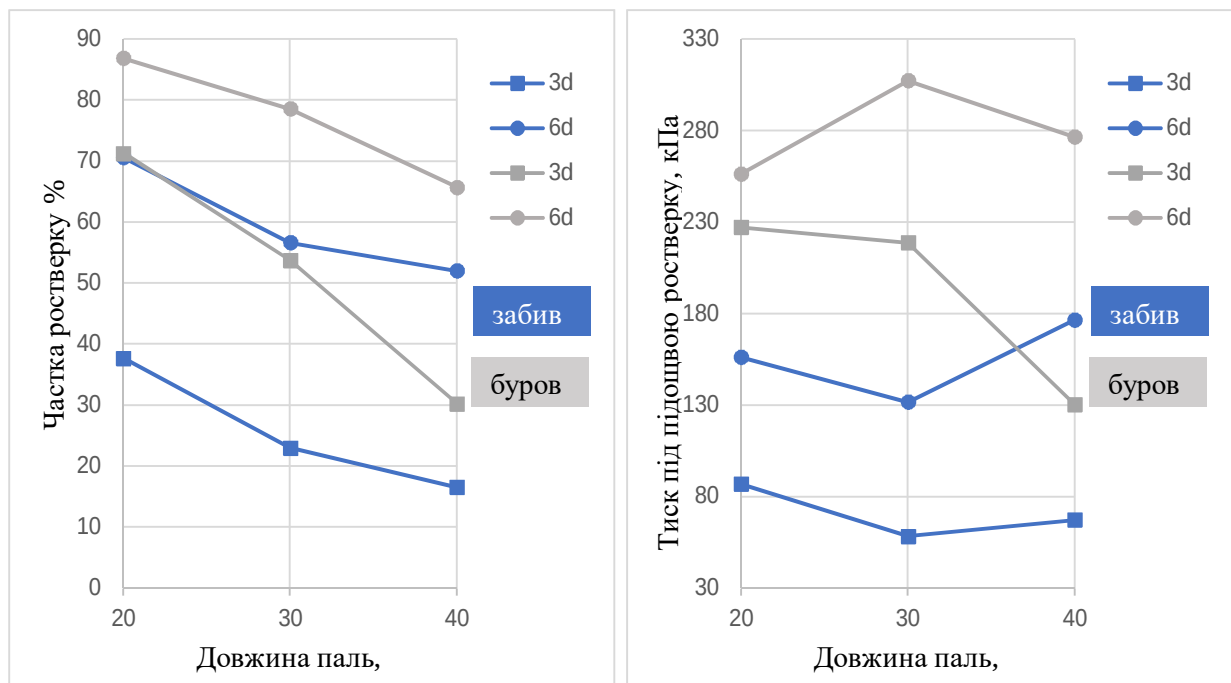


Рисунок 2.16 – Залежність частки навантаження що сприймає ростверк(зліва),
однорядного стрічкового фундаменту на палях та тиску під подошвою (справа),
від кроку паль різної довжини

Для порівняння частки навантажень, що сприймає ростверк і що приходить на палі до несучої здатності фундаменту в цілому та виявлення залежності розподілу навантажень від довжини та кроку забивних та бурових паль в складі стрічкового фундаменту на палях. Приведені графіки залежності несучої здатності елементів стрічкового пального однорядного фундаменту від довжини та кроку на рис.2.17 для фундаментів на забивних палях та на рис 2.18 для фундаментів на бурових палях.

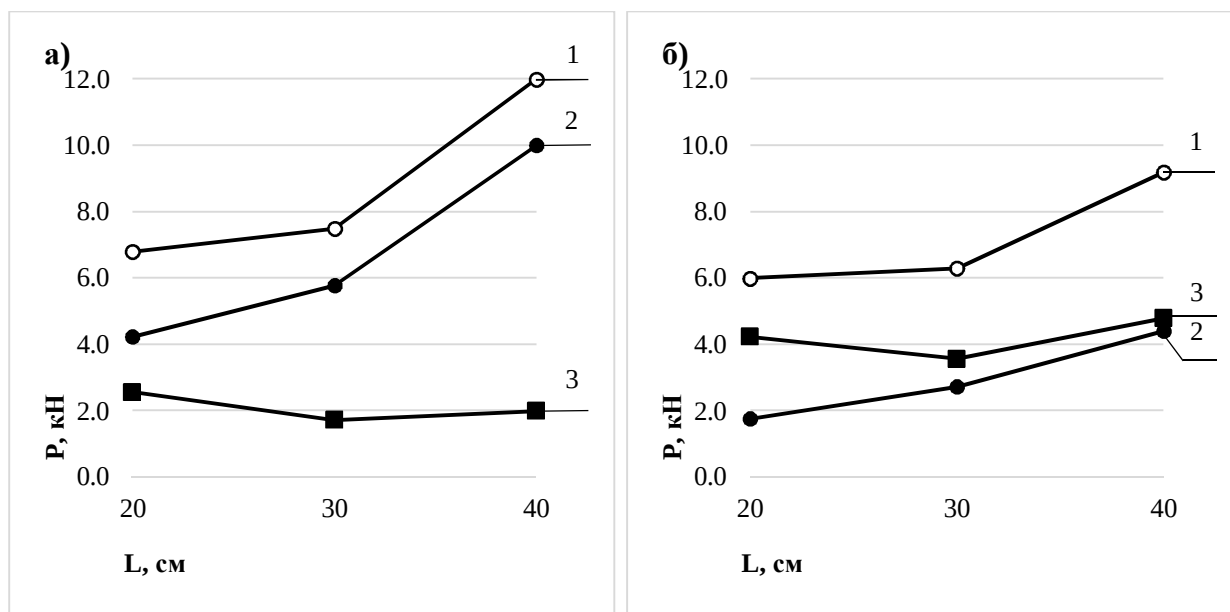


Рисунок 2.17 – Залежність несучої здатності стрічкових палиових однорядних фундаментів на забивних палях від довжини при кроці 3d (a) і 6d (б) : 1 – несуча здатність фундаменту в цілому; 2 – несуча здатність групи паль; 3 – несуча здатність стрічкового ростверку

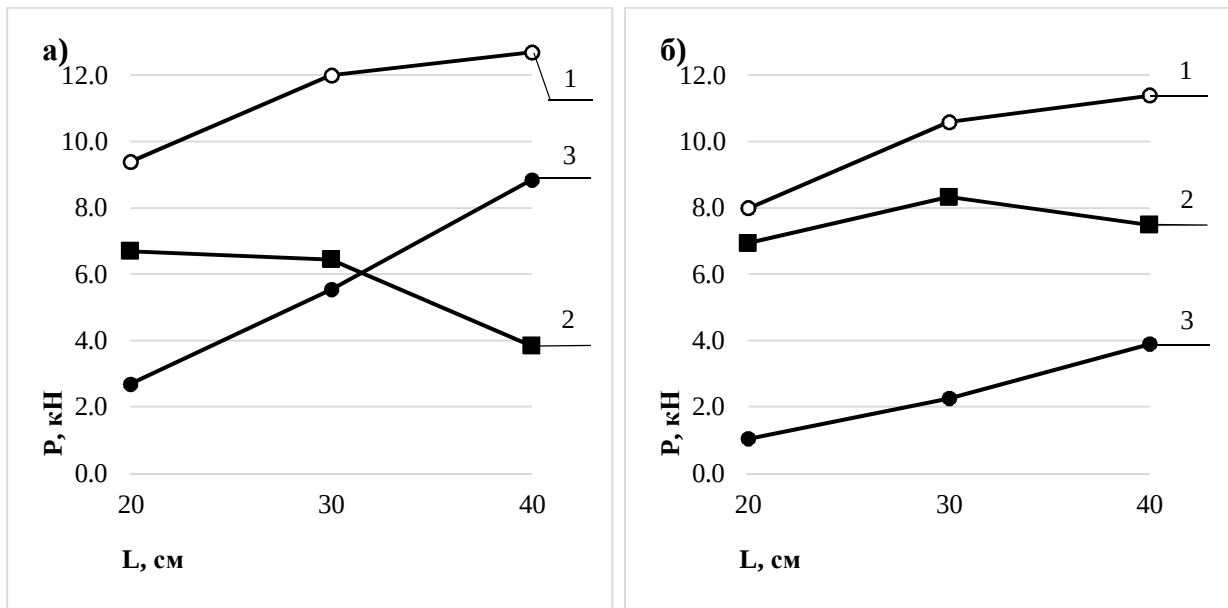


Рисунок 2.18 – Залежність несучої здатності пальових фундаментів на бурових палях від довжини при кроці 3d (а) і 6d (б) : 1 – несуча здатність фундаменту в цілому; 2 – несуча здатність групи паль; 3 – несуча здатність стрічкового ростверку

Висновки до розділу 2

У розділі виконано дослідження роботи стрічкового пальового однорядного фундаменту на маломасштабних фізичних моделях на однорідній піщаній ґрунтовій основі. Експерименти дозволили встановити якісні закономірності сумісної роботи низького ростверку з палями при їх однорядному розміщенні з кроком 3d та 6d, а також порівняти роботу забивних та бурових паль у складі фундаменту.

1. Несуча здатність фундаменту в цілому при використанні забивних і бурових паль має однаковий порядок величин, а при кроці паль 6d фундаменти з бурових паль показують кращі результати.

2. Експериментально встановлено, що ступінь реалізації несучої здатності палі у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту з низьким ростверком порівняно з одиночною палею зростає суттєвішим при влаштуванні бурових паль, ніж забивних. Для бурових паль цей показник досягає максимального значення 1,51, тоді як для забивних — лише 1,14.

3. Установлено характер впливу кроку паль на їхню несучу здатність. При кроці 3d ступінь реалізації несучої здатності паль у ряду є вищим, ніж при кроці 6d. При цьому тенденція кращої роботи бурових паль у порівнянні із забивними зберігається.

4. Визначено закономірності включення низького ростверку в спільну роботу з основою. Доведено, що частка вертикального навантаження, яке сприймає підшва ростверку, залежить від кроку та довжини паль:

- зі збільшенням кроку паль (від 3d до 6d) тиск під ростверком та його частка зростає через збільшення фактичної площі контакту ростверку з ґрунтом;
- зі збільшенням довжини паль від 20 см до 40 см частка навантаження, що припадає на ростверк, закономірно зменшується, оскільки більша частина зусиль перерозподіляється на стовбури паль за рахунок опору по їхній бічній поверхні;
- виявлено суттєву відмінність у розподілі зусиль між елементами забивних та бурових фундаментів. За однакових геометричних параметрів (крок і довжина) низький ростверк у фундаментах на забивних палях сприймає значно більшу частку загального навантаження (до 79–87% при кроці 6d та 54–71% при кроці 3d) порівняно з буровими палями (52–71% при 6d та 17–38% при 3d). Це свідчить про суттєве початкове ущільнення та затиснення піщаного ґрунту під підшвою ростверку в процесі забивання пального ряду.

РОЗДІЛ 3

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СИСТЕМИ «СТРІЧКОВИЙ ПАЛЬОВИЙ РОСТВЕРК – ПАЛІ - ГРУНТОВА ОСНОВА»

В другому розділі наведено результати випробування на маломасштабних моделях стрічкових пальових однорядних фундаментів, які дозволили провести якісну оцінку сумісної роботи паль та ростверку в однорідному ґрунтовому середовищі при різному кроці та довжині забивних та бурових паль.

У третьому розділі за допомогою числового моделювання методом скінченних елементів в програмному комплексі Sofistik виконано комплексний аналіз напружено-деформованого стану системи «стрічковий пальовий ростверк – палі – ґрунтова основа» з врахуванням фізико-механічних властивостей ґрунтової основи (для піщаних ґрунтів та суглинків), зміни довжини та кроку паль і способу влаштування (з вийманням чи без виймання ґрунту).

3.1 Обґрунтування вибору моделі системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа»

Широкого розповсюдження для моделювання та розрахунку фундаментів здобули методи числового моделювання на основі скінченних елементів та нелінійно - деформованого півпростору. За допомогою математичних моделей та числових методів розрахунку досліджено значну кількість взаємодії пальових фундаментів з ґрунтовою основою, в тому числі стрічкових пальових. Залишається нерозкритою та потребує уточнення ряд чинників, що впливають на несучу здатність стрічкових пальових однорядних фундаментів в залежності від способу влаштування паль в ґрунтових умовах.

Для розрахунку моделей пальових фундаментів обрано програмний комплекс Sofistik, який пристосований для вирішення геотехнічних задач на основі методу скінченних елементів.

Для постановки задачі модель ґрунтової основи представляється у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності із обмеженнями вертикальних та горизонтальних деформацій на певній відстані від навантаження, за межами якого деформаціями можна знехтувати. В межах вказаної деформативної області задаються закономірності деформування ґрунтів під навантаженням на основі обраної моделі ґрунту. В напруженому ґрунтовому середовищі моделюються конструктивні елементи фундаменту кінцевими елементами та їх контактні властивості, що впливають на передачу навантаження на основу. Також створюються елементи комбінованих навантажень, що діють на конструкції та зберігають результати розрахунку та накопичені напруження основи для можливості поетапного навантаження.

Для оцінки коректності роботи вибраної розрахункової моделі було виконано моделювання одиночної буронабивної палі, натурне випробування якої проведені лабораторіями ДП НДІБК і забивної, статичне випробування якої проведено НДЛ ЕфБК ВНТУ. Також пальового фундаменту з десяти паль, випробування якого було виконане Баротолomeєм А. А.[1].

Випробування одиночної буронабивної палі діаметром 350 мм, довжиною 10 м на будівельному майданчику вул. Чернівецька, м. Бобровиця. Схему розміщення палі в ґрунті і зображення розрахункової моделі представлено на рис.3.1. Результати статичного випробування палі показані в табл. 3.1. Графік залежності осідання-навантаження для одиночної буронабивної палі за результатами натурального випробування та за результатами моделювання наведено на рис.3.2.

Фізико-механічні характеристики ґрунтів будівельного майданчику визначені за даними інженерно-геологічних вишукувань:

1 – Насипний шар (1,3 м) $g = 14,6 \text{ кН/м}^3$;

2 – Супісок твердий (4 м), $g = 16,4 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 22 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 25^\circ$,
 $E = 3,9 \text{ МПа}$;

3а – Суглинок тугопластичний (2,9 м), $g = 18,8 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 21 \text{ кПа}$,
 $\varphi_{II} = 17^\circ$, $E = 4,7 \text{ МПа}$;

4 – Пісок пилюватий (0,4 м), $g = 17,8 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 4 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 29^\circ$,
 $E = 17 \text{ МПа}$;

6 – Супісок пластичний (3,8 м), $g = 20,6 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 15 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 26^\circ$,
 $E = 25 \text{ МПа}$;

7 – Супісок пластичний (4,7 м), $g = 19,8 \text{ кН/м}^3$; $c_{II} = 11 \text{ кПа}$, $\varphi_{II} = 18^\circ$,
 $E = 8,2 \text{ МПа}$.

Таблиця 3.1

**Результати випробувань буронабивної палі статичним навантаженням
та результати випробування моделі**

№ зав.	Ступінь зав. кН	Загальне зав. кН	Загальне переміщення, мм	Загальна тривалість, год : хв	Моделювання в Sofistk
0	0	0	0	0	0
1	100	100	0,195	2:05	1,351
2	100	200	1,145	4:40	2,701
3	100	300	4,665	8:15	4,646
4	100	400	12,565	13:20	14,678
5	100	500	28,600	18:55	30,231

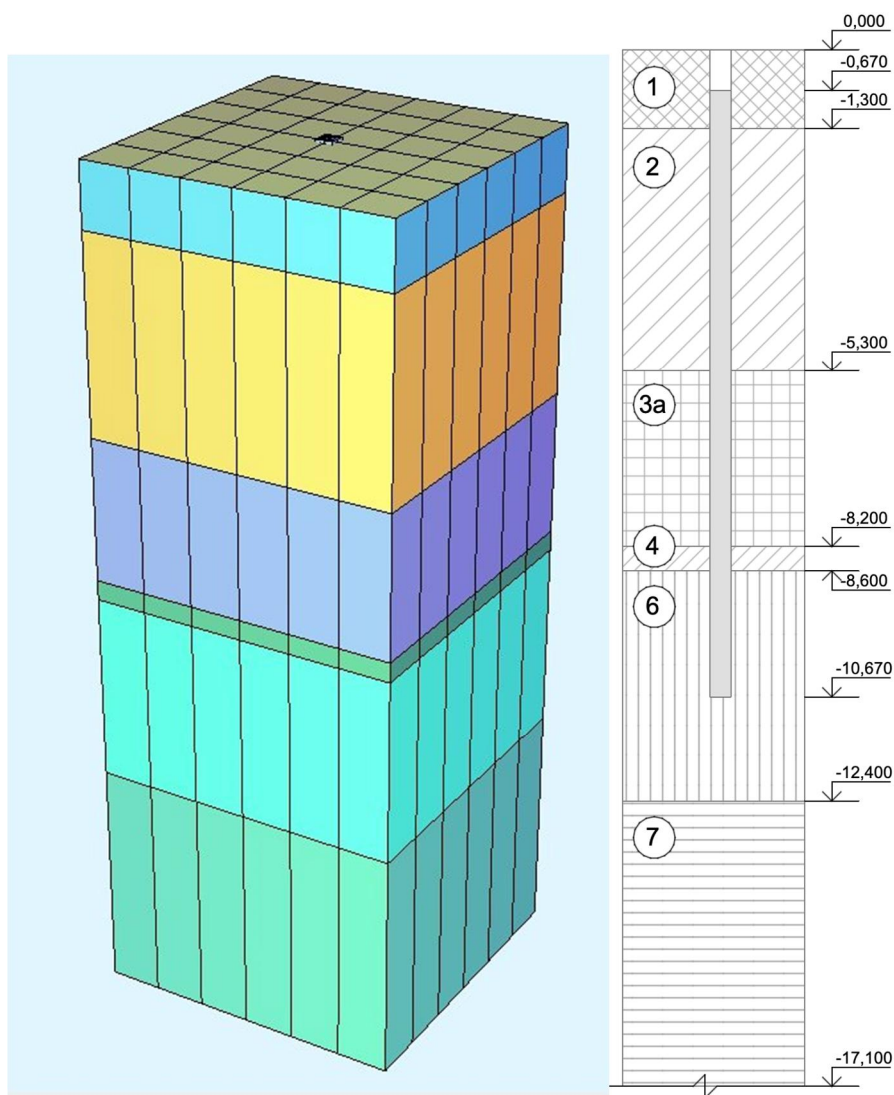


Рисунок 3.1 – Схема розміщення в ґрунті та розрахункова модель одиночної буронабивної палі

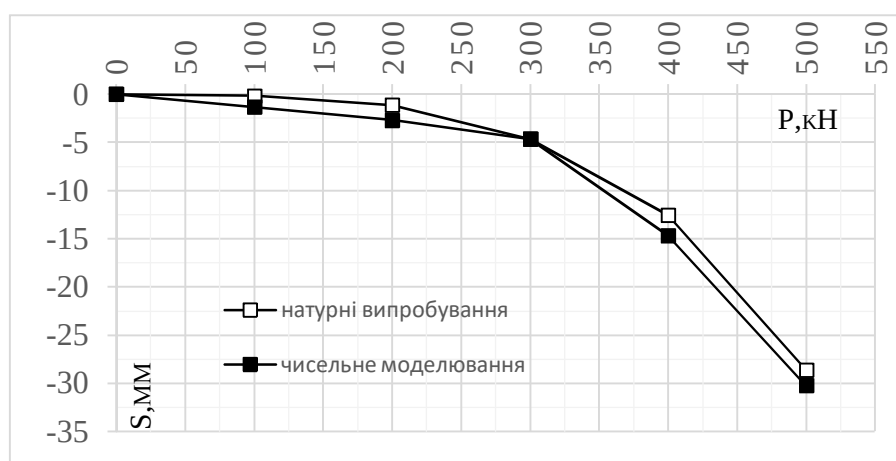


Рисунок 3.2 – Графік залежності осідання-навантаження для одиночної буронабивної палі за результатами натурного випробування та за результатами моделювання

Випробування одиночної забивної палі діаметром 273 мм, довжиною 4 м на будівельному майданчику вул. Ватутіна, 55а, м. Житомир. Схему розміщення палі в ґрунті і зображення розрахункової моделі представлено на рис.3.2. Результати статичного випробування палі показані в табл. 3.2. Графік залежності осідання-навантаження для одиночної забивної палі за результатами статичне випробування та за результатами моделювання наведено на рис.3.4.

Фізико-механічні характеристики ґрунтів будівельного майданчику визначені за даними інженерно-геологічних вишукувань:

- 1 – Рослинний шар (0,8 м) $\rho=20,3 \text{ кН/м}^3$; $c_{II}=3,7 \text{ кПа}$, $j_{II}=19^\circ$, $E=27 \text{ МПа}$;
- 2 – Лесоподібний суглинок м'якопластичний до текучого (1,4 м) $\rho=17,8 \text{ кН/м}^3$; $c_{II}=15,7 \text{ кПа}$, $j_{II}=16^\circ$, $E=4 \text{ МПа}$;
- 3 – Лесоподібний суглинок м'якопластичний до текучого (4,7 м) $\rho=19,8 \text{ кН/м}^3$; $c_{II}=17,3 \text{ кПа}$, $j_{II}=18^\circ$, $E=8 \text{ МПа}$;
- 4 – Суглинок запісочений, тугопластичний (0,7 м) $\rho=18,9 \text{ кН/м}^3$; $c_{II}=20,9 \text{ кПа}$, $j_{II}=24^\circ$, $E=17 \text{ МПа}$;

Таблиця 3.2

**Результати випробувань забивної палі статичним навантаженням
та результати випробування моделі**

№ Зав.	Ступінь зав. кН	Загальне зав. кН	Загальне переміщення, мм	Моделювання в Sofistk
0	0	0	0	0
1	1250	1250	-0.22	-0,488
2	1250	2500	-0.395	-0,976
3	1250	3750	-0.52	-1,464
4	1250	5000	-0.98	-1,952
5	1250	6250	-1.05	-2,44
6	1250	7500	-1.695	-2,929
7	1250	8750	-2.345	-3,479
8	1250	10000	-3.035	-4,289
9	1250	11250	-3.895	-5,157
10	1250	12500	-7.275	-7,438
11	1250	13750	-48.33	

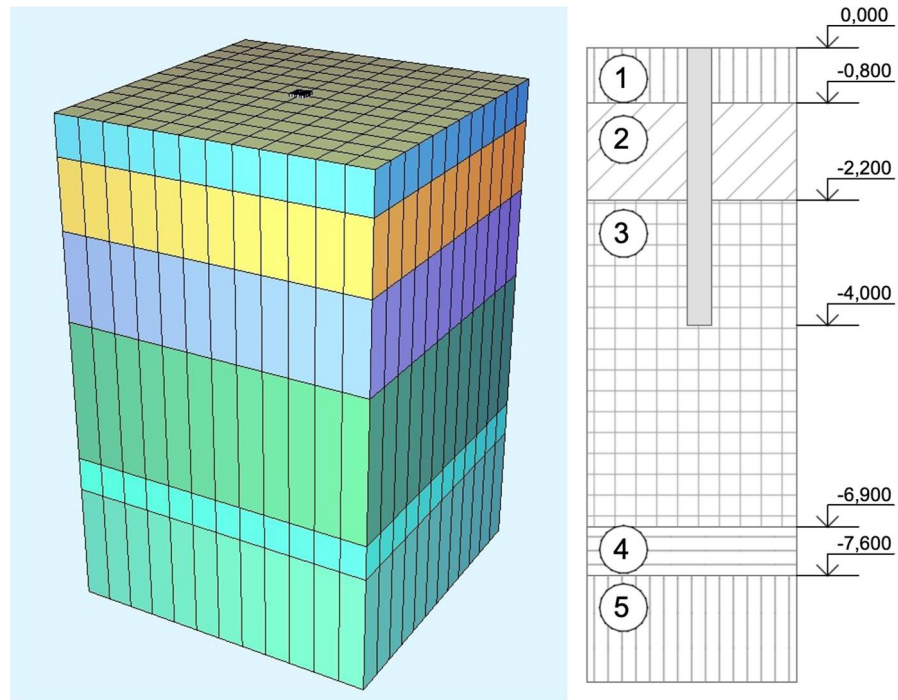


Рисунок 3.3 – Схема розміщення в ґрунті та розрахункова модель одиночної забивної палі.

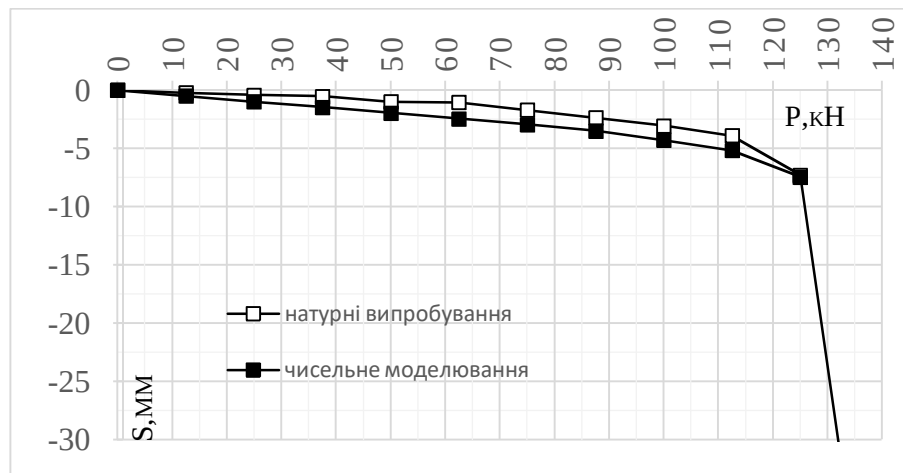


Рисунок 3.4 – Графік залежності осідання-навантаження для одиночної забивної палі за результатами статичне випробування та за результатами моделювання

Випробування стрічкового пальового дворядного фундаменту на 10 призматичних забивних палях С6-30, з ростверком довжиною 4,2 м, шириною 1,5 м, товщиною 0,5 м. Схему розміщення фундаменту в ґрунті і зображення розрахункової моделі представлено на рис.3.5. Графік залежності осідання-

навантаження фундаменту за результатами натурного випробування та за результатами моделювання наведено на рис.3.6.

Ґрунтові умови представлені четвертинними суглинками і глинами потужністю 12 м, питома вага коливається в межах 18,2-19,8 кН/м³, природна вологість – 0,31-0,37, модуль деформації $E=13$ МПа, $c_{II}=5,3$ кПа, $j_{II}=20^\circ$.

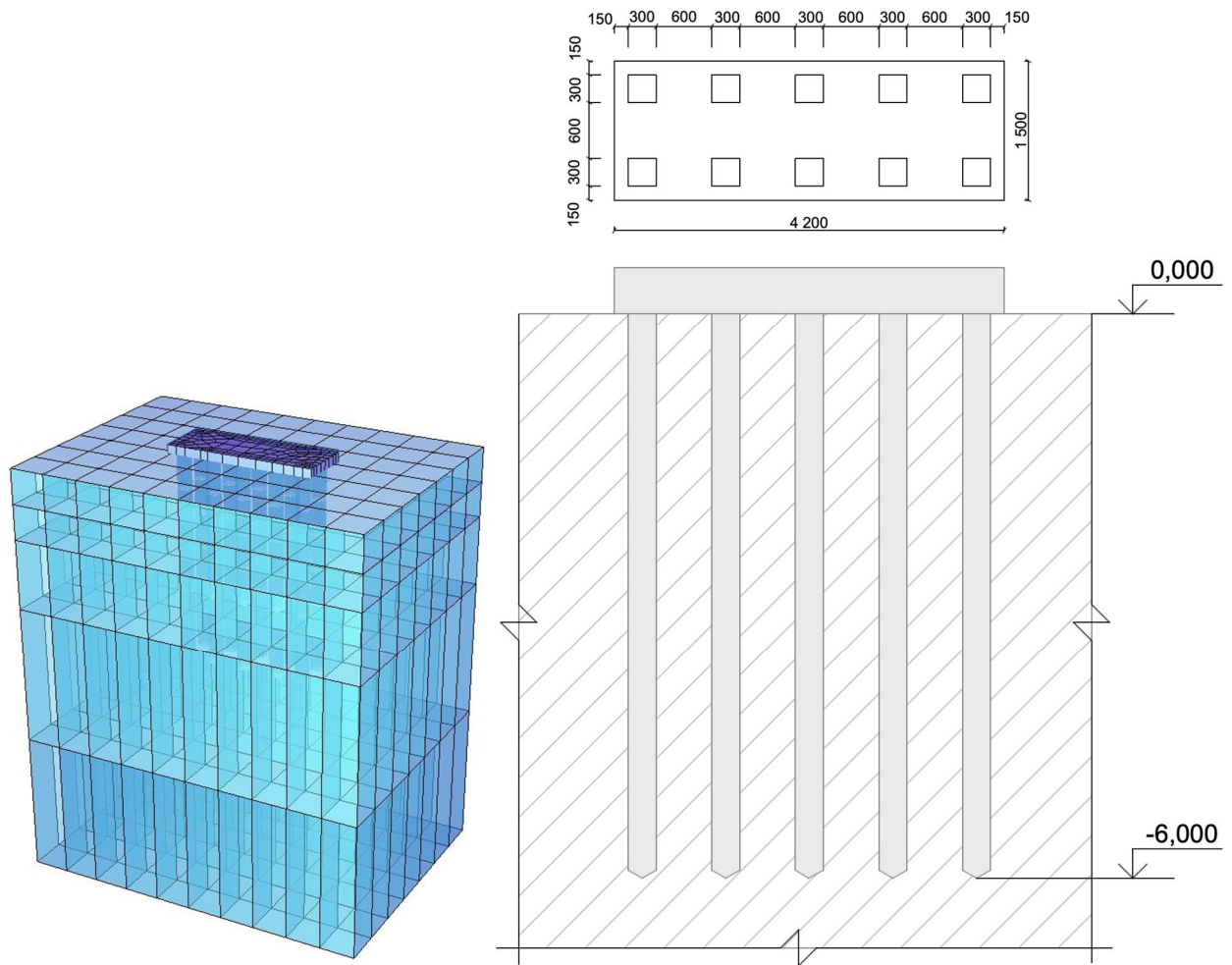


Рисунок 3.5 – Схема розміщення фундаменту в ґрунті і зображення розрахункової моделі

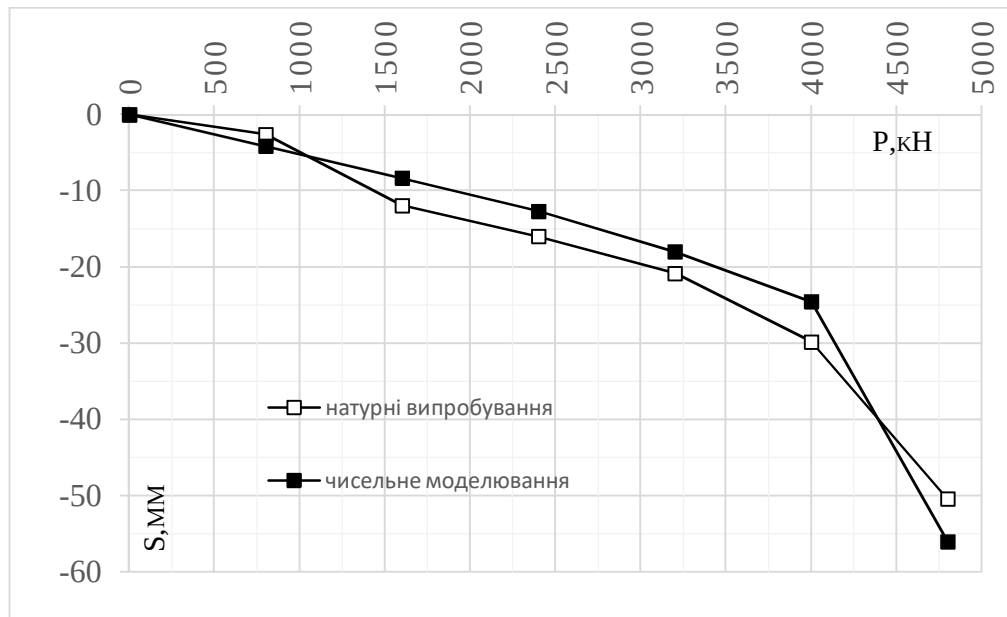


Рисунок 3.6 – Графік залежності осідання-навантаження фундаменту за результатами натурного випробування та за результатами моделювання

Як видно на порівняльних графіках осідань-навантажень 3.2, 3.4, 3.6 різниця між результатами натурних випробувань та чисельного розрахунку при однакових навантаженнях становить не вище 10%. Тому обрана розрахункова модель може бути використана для дослідження роботи стрічкового пальового однорядного фундаменту.

3.2 Програма чисельного моделювання НДС системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа»

З метою дослідження напружено-деформованого стану основи стрічкового пальового однорядного фундаменту проведено чисельне моделювання системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа».

Програма дослідження розроблена для кількісної оцінки частки ростверку в несучій здатності стрічкового пальового однорядного фундаменту та оцінки роботи паль в його складі, ступеня їх реалізації залежно від способу влаштування при різній довжині та кроці.

Розроблена програма передбачає наступні етапи:

- моделювання розрахункової схеми стрічкових пальових однорядних фундаментів різних геометричних характеристик в програмному комплексі для геотехнічних задач Sofistik;
- моделювання роботи одиночних паль та стрічкового ростверку тих, же розмірів що і для стрічкових пальових однорядних фундаментів;
- обробка отриманих результатів навантаження розрахункових моделей та побудова графіків залежності осідання-навантаження;
- порівняння частки ростверку в несучій здатності фундаменту та його залежність від довжини та кроку;
- порівняння ступеню реалізації паль залежно від способу влаштування в ґрунт та різниця їх несучої здатності порівняно з аналітичним розрахунком;
- побудова порівняльних схем та таблиць для частки ростверку та ступеню реалізації паль в складі стрічкового фундаменту на палях;
- побудова схеми переміщення ґрунту в напруженому півпросторі у вигляді ізоліній.

Для чисельного моделювання були прийняті такі параметри моделі:

- ростверк довжиною 11,3 м, шириною 0,5 м та глибиною закладання 0,5 м (рис.3.8);
- розміщення паль однорядне з кроком 3d, 6d, 9d та 12d (рис.3.7);
- палі з розміром поперечного перерізу 0,3 м, довжиною 6, 9 та 12 м, влаштовані без виймання та з вийманням ґрунту;
- модель ґрунту основи у вигляді суцільного шару скінченної розподільчої здатності із заданими характеристиками ґрунтових умов вказаних в табл.3.3. Прийнято два типи ґрунтів для оцінки різниці роботи паль в різних ґрунтових умовах, які забезпечують достатню міцність основи та мають відмінність в роботі;
- прикладалося розподілене навантаження на ростверк, включаючи вагу конструкції та збільшення кроку з кожною ітерацією.

Таблиця 3.3

Фізико-механічні характеристики ґрунтової основи.

Характеристика	γ , кН/м ³	φ , °	c , кПа	E , МПа
Пісок дрібний	18,7	32	2	28
Суглинок	18,7	21	23	14

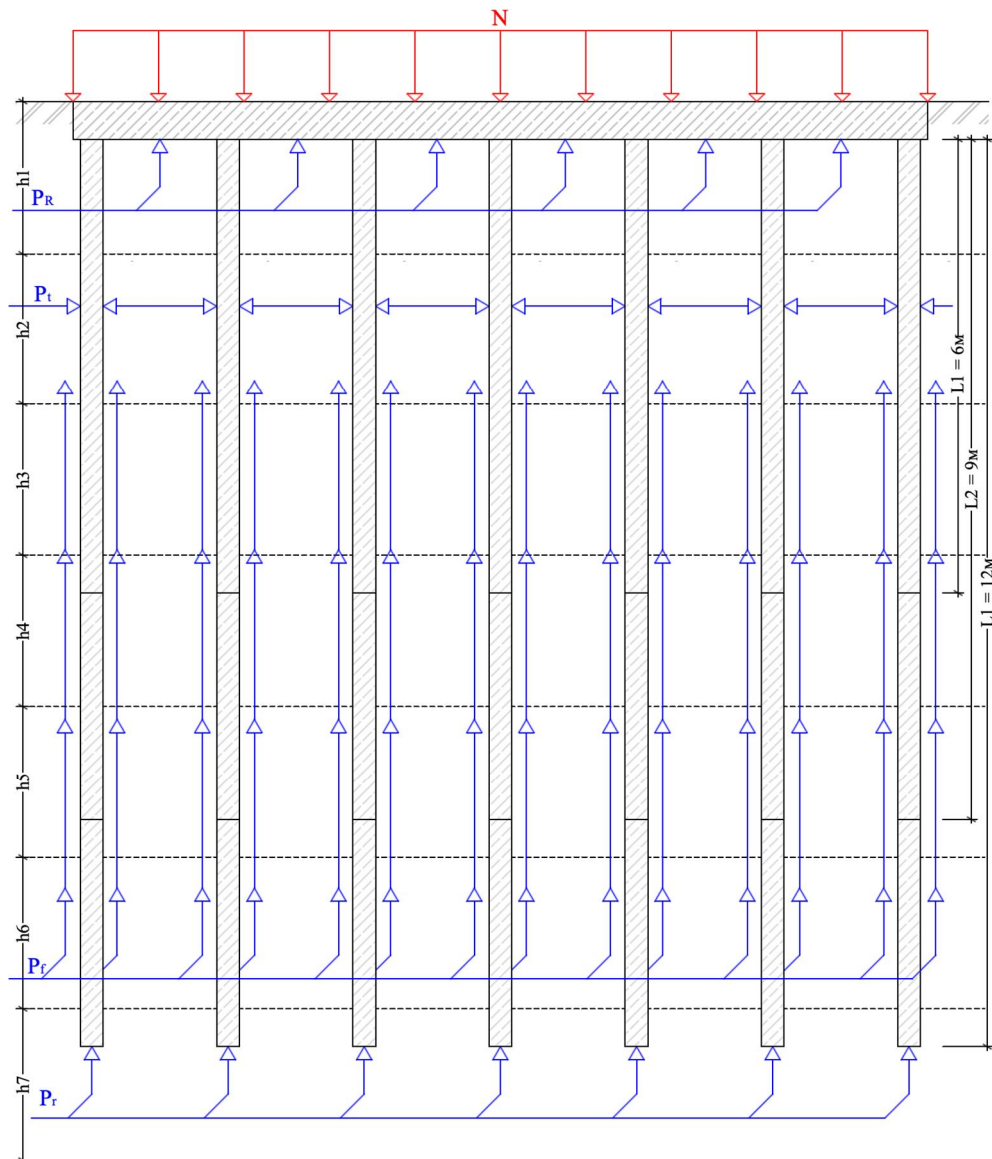


Рисунок 3.7 – Розрахункова схема фундаменту та основи

Примітка: N – навантаження що передається на основу; P_R – опір під подошвою ростверку; P_g – опір під нижнім кінцем палі; P_f – опір по боковій поверхні палі; P_t – опір ґрунту горизонтальним переміщенням; h_{1-7} – товщина i -го шару ґрунту; L_{1-3} – довжина палі

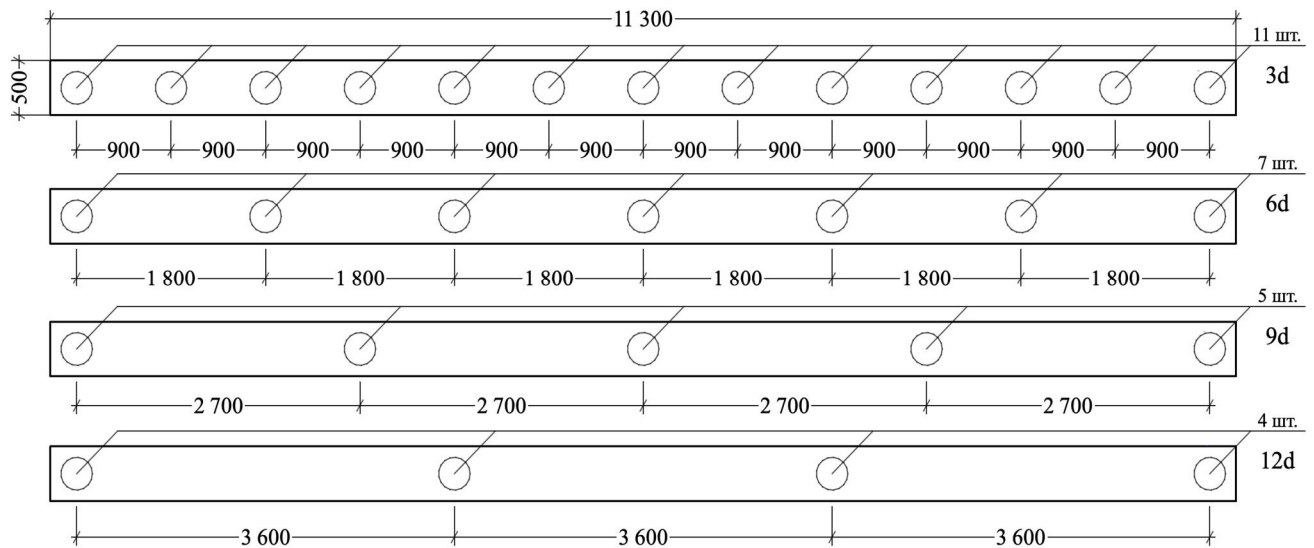


Рисунок 3.8 – Розміри моделі ростверку та розміщення паль

Модельні експерименти розділено на такі підгрупи:

1 – моделювання роботи стрічкового фундаменту на палях влаштованих без виймання та з вийманням ґрунту на однорідній основі (піщаний ґрунт), програму моделювання наведено в табл.3.8;

2 – моделювання роботи стрічкового фундаменту на палях влаштованих без виймання та з вийманням ґрунту на однорідній основі (глинистий ґрунт), програму моделювання наведено в табл.3.8.

Також було заплановано моделювання роботи одиночних паль під дією вертикального навантаження з розміром поперечного перерізу 0,3 м, довжиною 6, 9 та 12 м, що влаштовані без виймання та з вийманням ґрунту. Спосіб улаштування паль при числовому моделюванні враховувався через коефіцієнт умов роботи палі по боковій поверхні (γ_{cf}).

Моделювання виконане в повномасштабному розмірі. Навантаження на модель прикладалось покроково, до досягнення меж допустимих деформацій ґрунту. На рис. 3.9. наведена розрахункова модель фундаменту та ґрунтового масиву.

Таблиця 3.4

**Програма чисельного моделювання роботи стрічкового фундаменту
на палях в різних ґрунтових умовах**

Група дослідів	Довжина та поперечний розмір паль	Крок і кількість паль	Спосіб влаштування		Ґрунтові умови
1	L=6 м, d=0,3 м	3d, 13 шт.	бурова	забивна	піщаний ґрунт
		6d, 7 шт.	бурова	забивна	
		9d, 5 шт.	бурова	забивна	
		12d, 4 шт.	бурова	забивна	
2	L=9 м, d=0,3 м	3d, 13 шт.	бурова	забивна	глинистий ґрунт
		6d, 7 шт.	бурова	забивна	
		9d, 5 шт.	бурова	забивна	
		12d, 4 шт.	бурова	забивна	
	L=12 м, d=0,3 м	3d, 13 шт.	бурова	забивна	
		6d, 7 шт.	бурова	забивна	
		9d, 5 шт.	бурова	забивна	
		12d, 4 шт.	бурова	забивна	

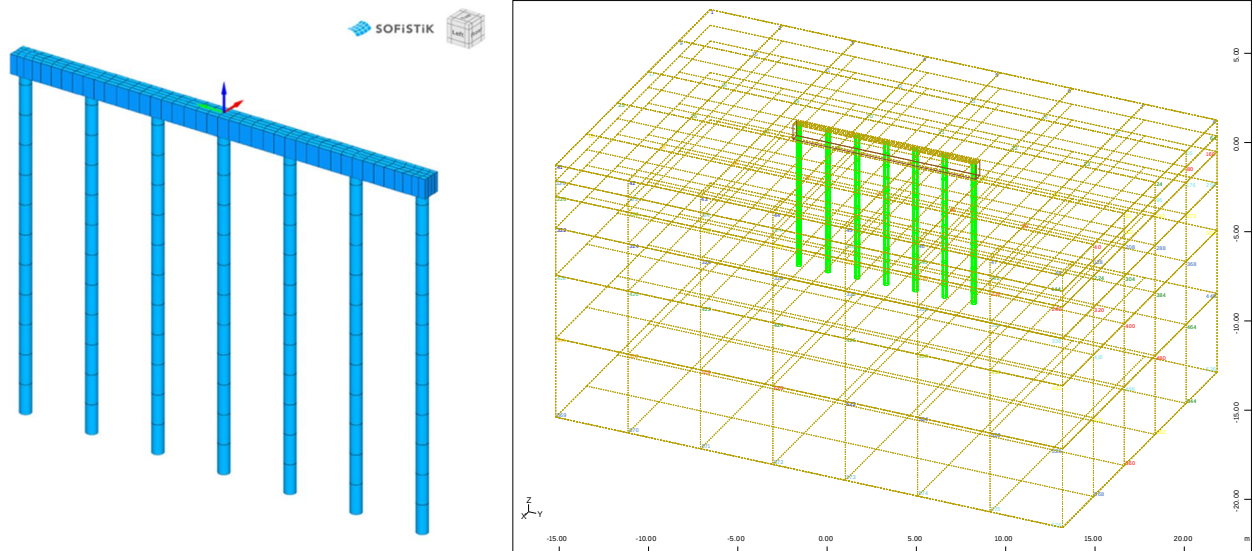


Рисунок 3.9 – Модель стрічкового фундаменту на палях довжиною 9 м кроком 6d та розташування моделі в ґрунтовому масиві в програмному середовищі Sofistik

3.3 Результати моделювання НДС системи «стрічковий пальовий ростверк – палі - ґрунтова основа»

Величину осідання моделі фундаментів від кожного ступеню навантаження сформовано в графіки залежності осідання – навантаження приведеної до погонного метру, для можливості коректного порівняння результатів та виключення впливу розмірності моделі. Результати навантаження стрічкових пальових однорядних фундаментів на бурових і забивних палях при різній довжині та кроці представлені на рис. 3.10 – 3.15 для піщаного ґрунту, на рис. 3.16 – 3.20 для глинистого ґрунту.

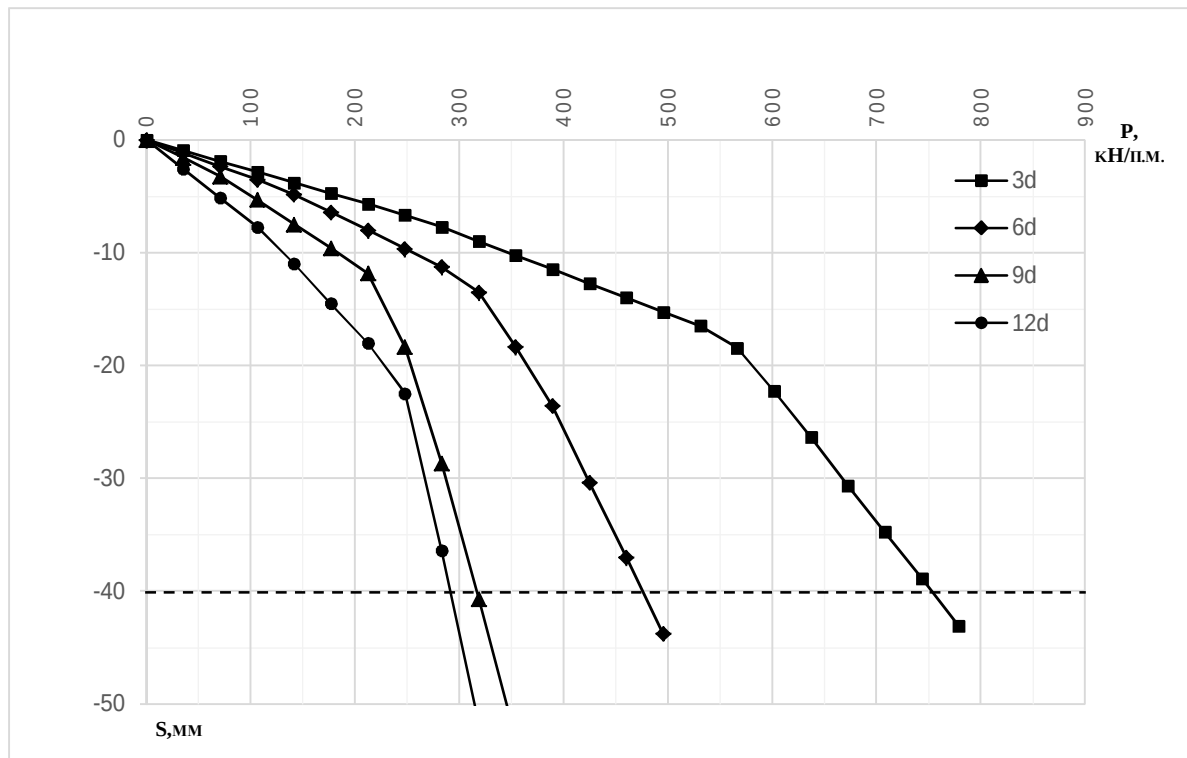


Рисунок 3.10 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на забивних палях за результатами чисельного моделювання при довжині 6 м та різному кроці, піщаний ґрунт

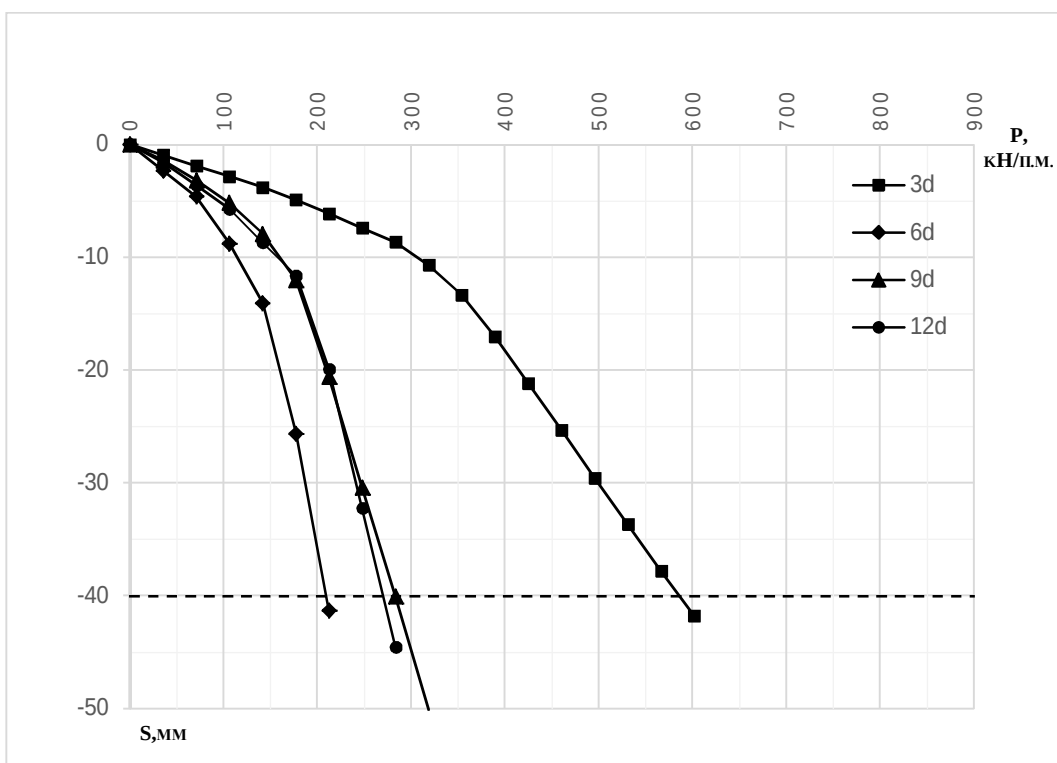


Рисунок 3.11 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на бурових палях за результатами чисельного моделювання при довжині 6 м та різному кроці, піщаний ґрунт

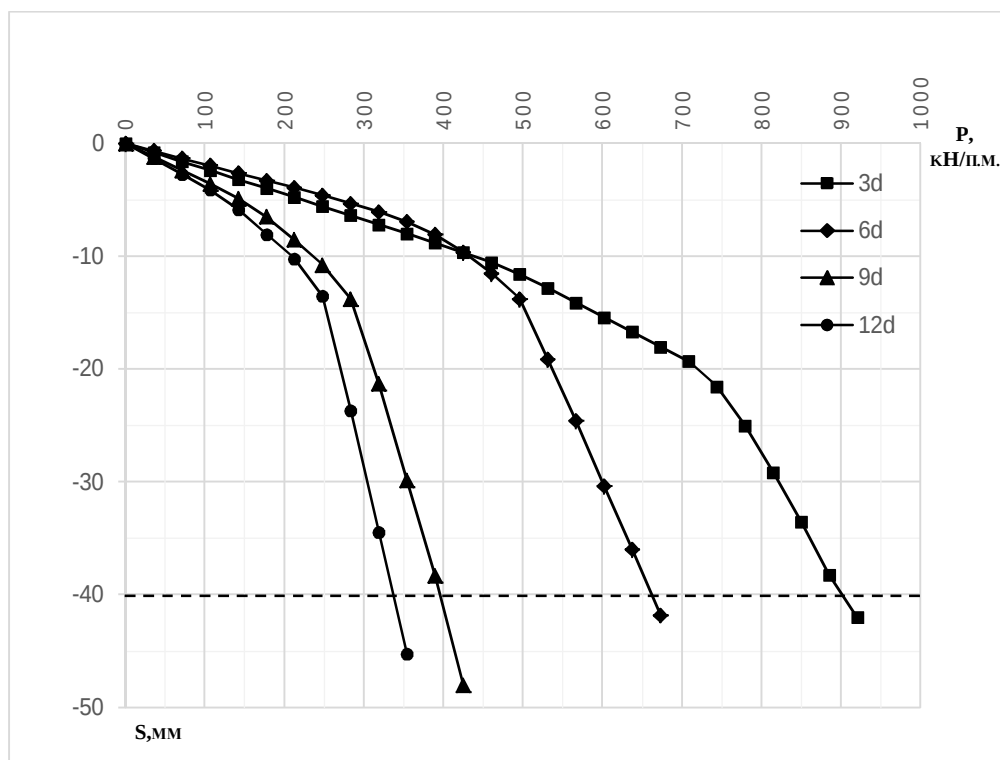


Рисунок 3.12 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на забивних палях за результатами чисельного моделювання при довжині 9 м та різному кроці, піщаний ґрунт

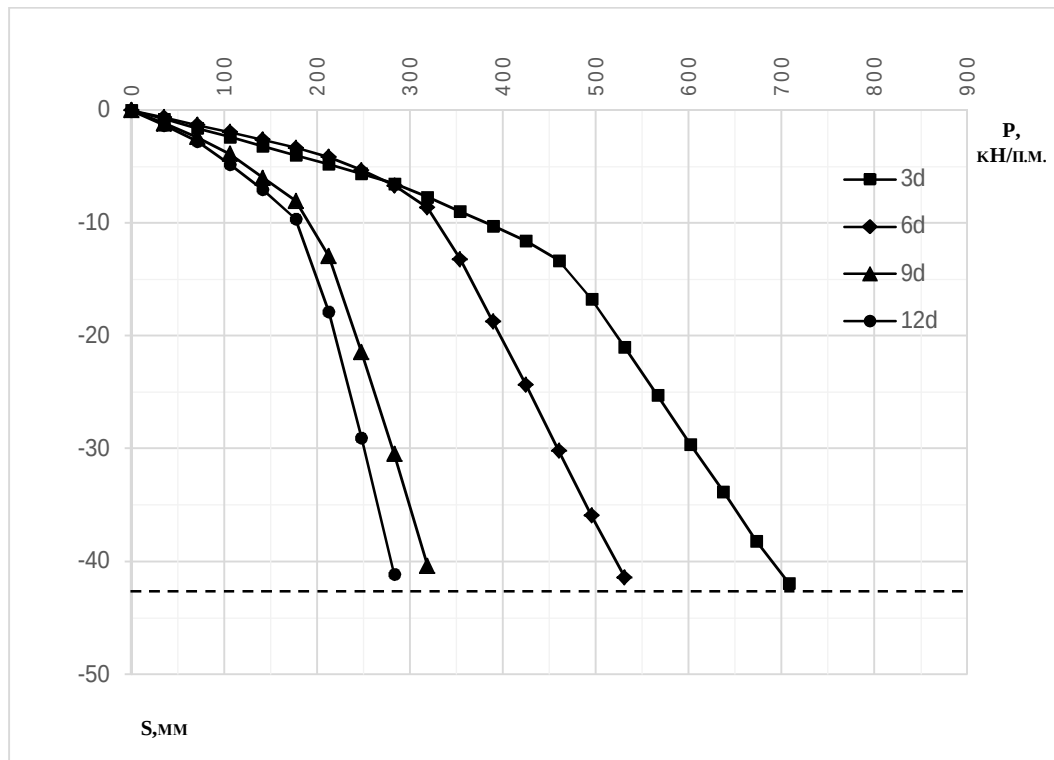


Рисунок 3.13 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на бурових палях за результатами чисельного моделювання при довжині 9 м та різному кроці, піщаний ґрунт

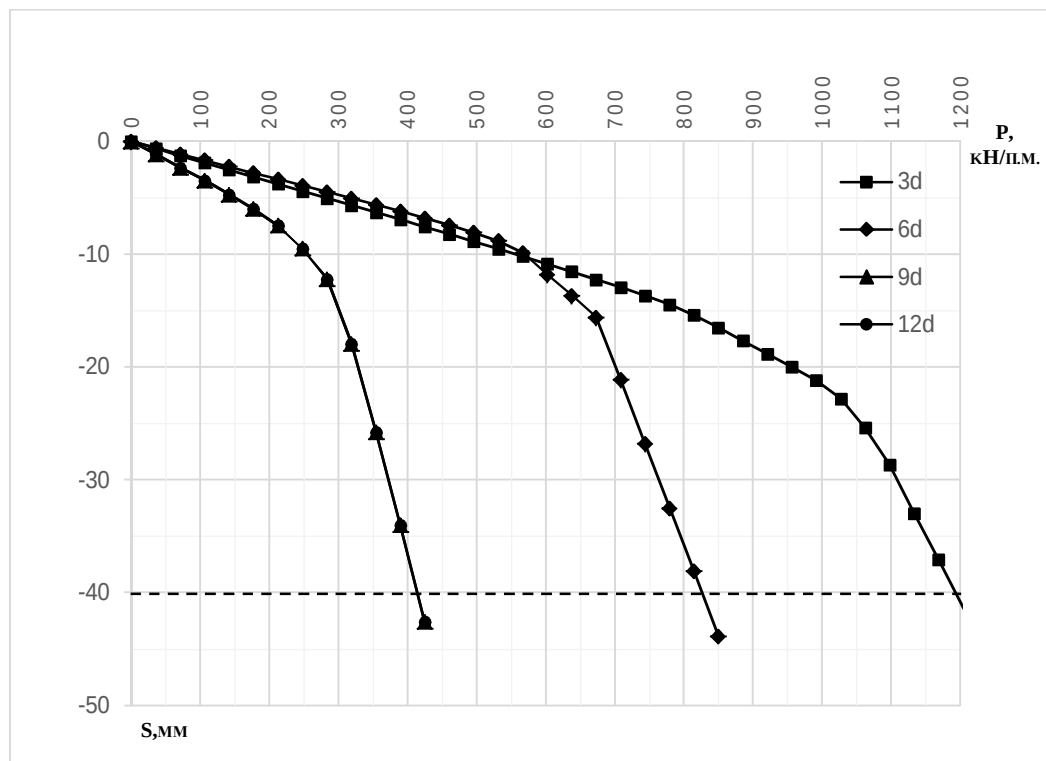


Рисунок 3.14 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на забивних палях за результатами чисельного моделювання при довжині 12 м та різному кроці, піщаний ґрунт

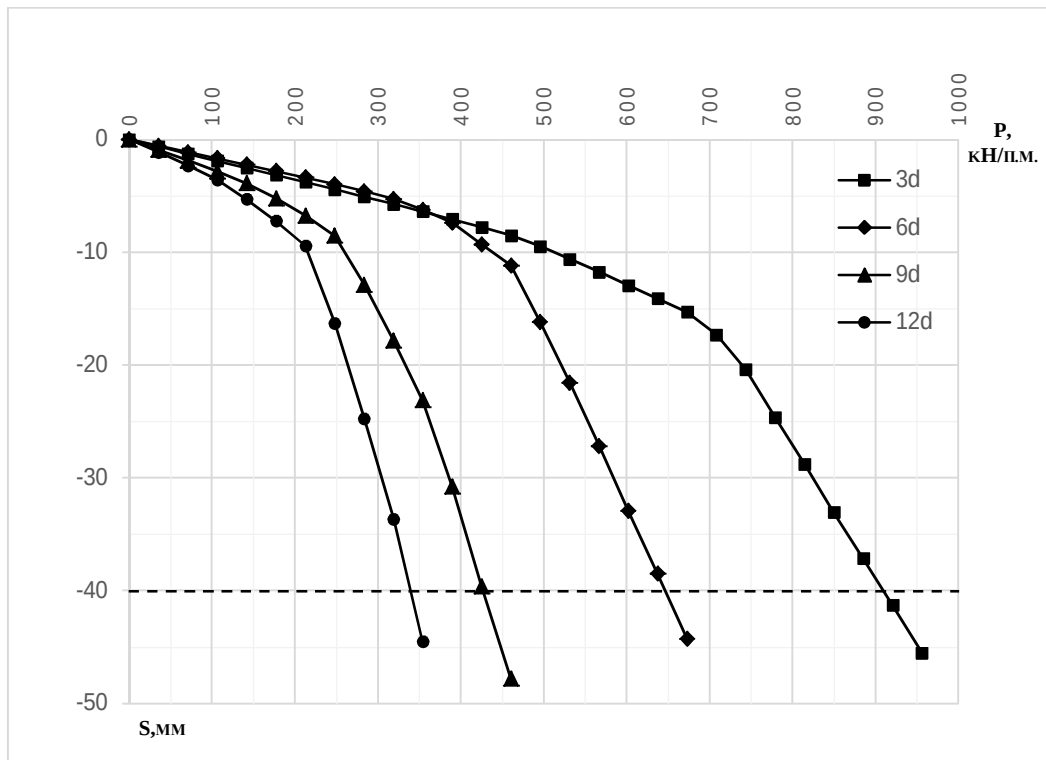


Рисунок 3.15 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на бурових палях за результатами чисельного моделювання при довжині 12 м та різному кроці, піщаний ґрунт

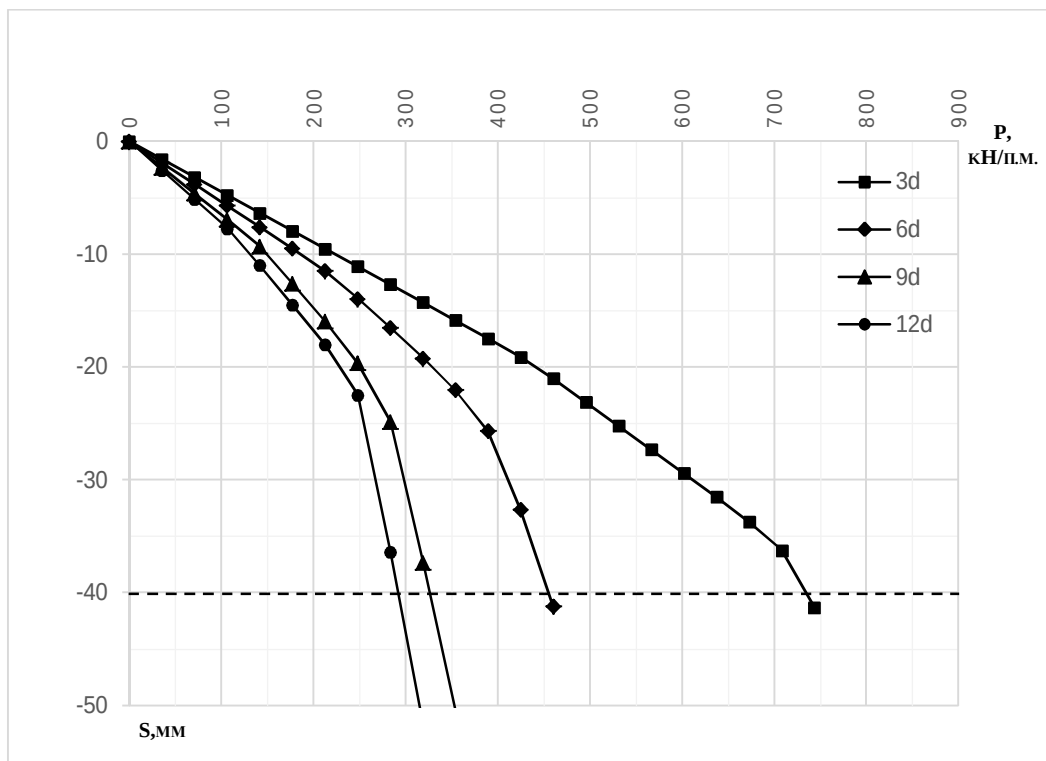


Рисунок 3.16 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на забивних палях за результатами чисельного моделювання при довжині 6 м та різному кроці, глинистий ґрунт

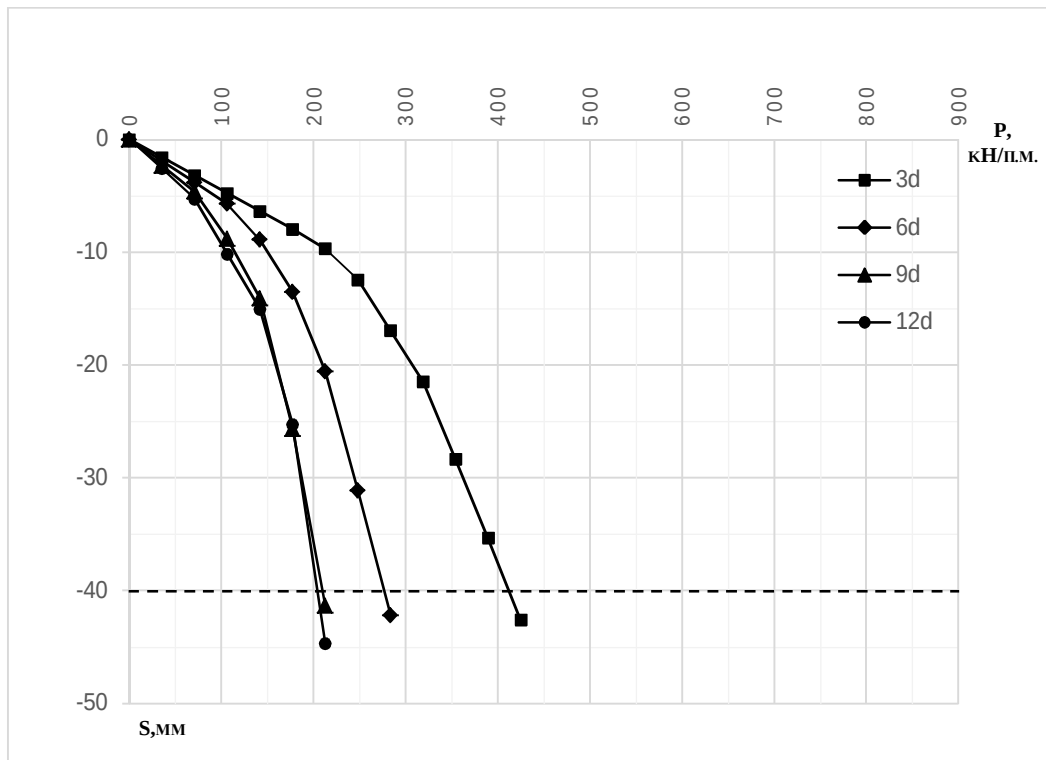


Рисунок 3.17 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на бурових палях за результатами чисельного моделювання при довжині 6 м та різному кроці, глинистий ґрунт

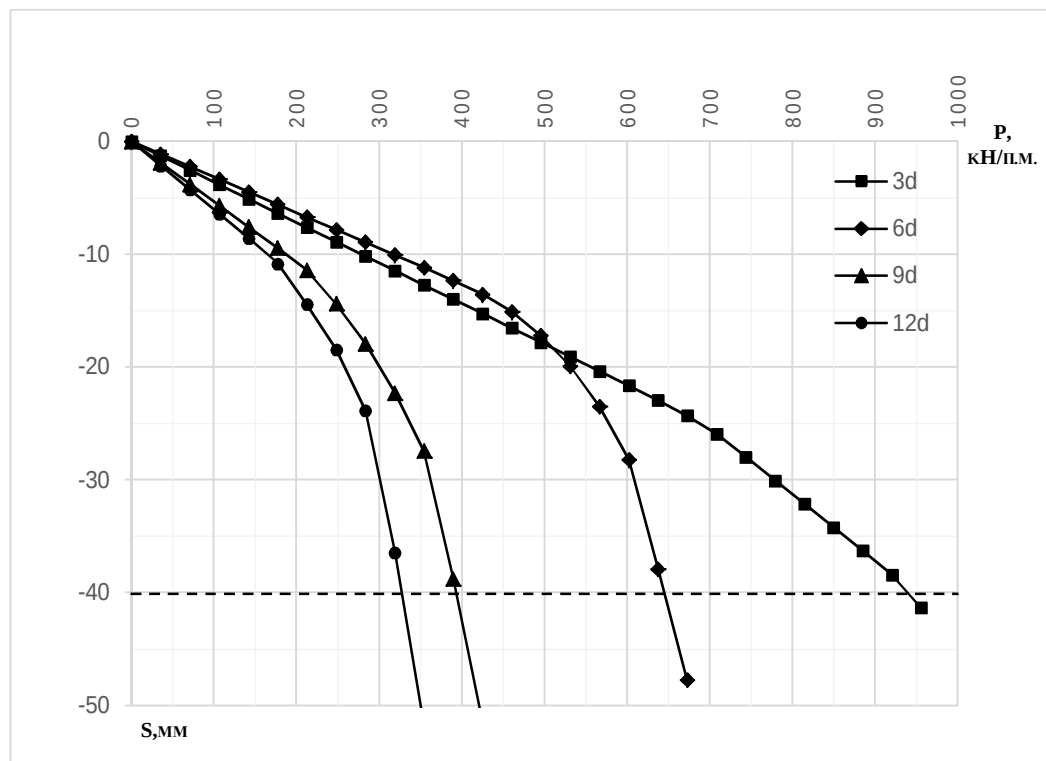


Рисунок 3.18 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на забивних палях за результатами чисельного моделювання при довжині 9 м та різному кроці, глинистий ґрунт

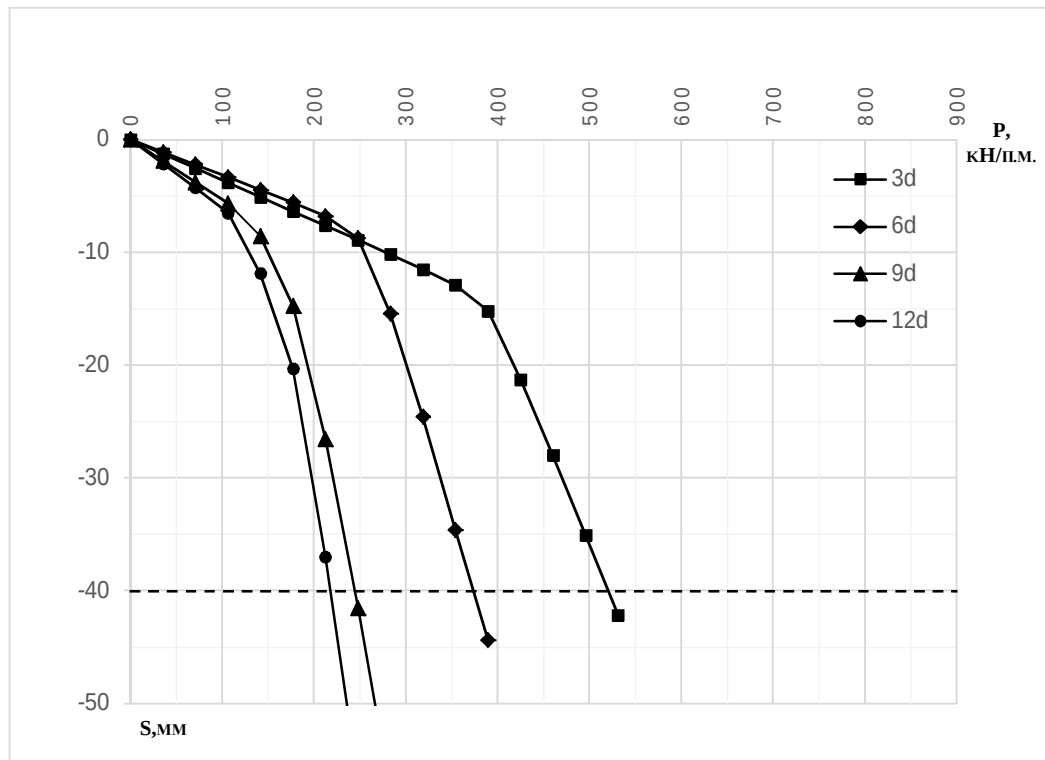


Рисунок 3.19 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на бурових палях за результатами чисельного моделювання при довжині 9 м та різному кроці, глинистий ґрунт

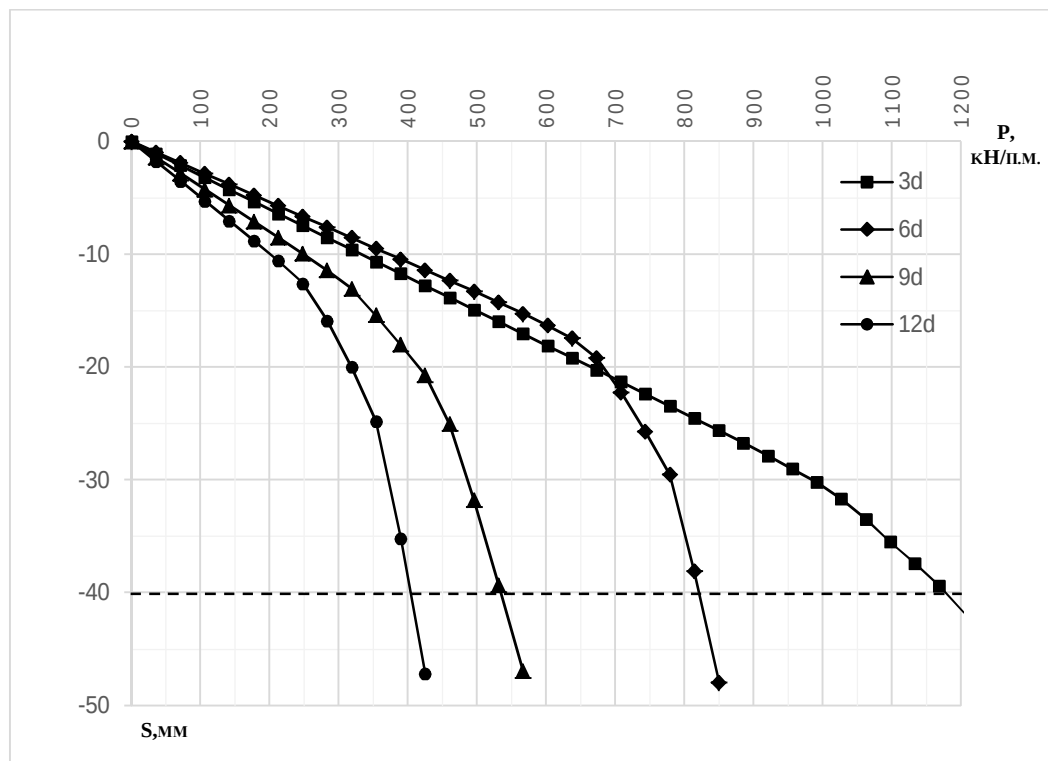


Рисунок 3.20 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на забивних палях за результатами чисельного моделювання при довжині 12 м та різному кроці, глинистий ґрунт

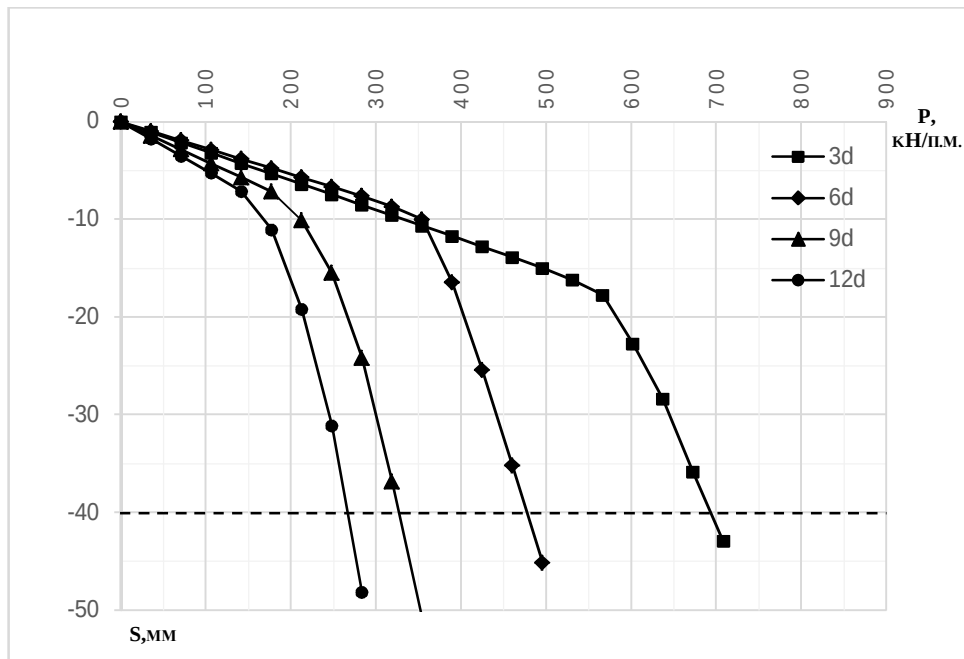


Рисунок 3.21 – Графік залежності осідання – навантаження (на 1 п.м.) стрічкових фундаментів на бурових палях за результатами чисельного моделювання при довжині 12 м та різному кроці, глинистий ґрунт

Також для подальшого порівняння виконано моделювання одиночних бурових та забивних паль аналогічних габаритів, що і для фундаментів. Результати моделювання представлені на рис. 3.22. для піщаного та на рис. 3.23. для глинистого ґрунтів.

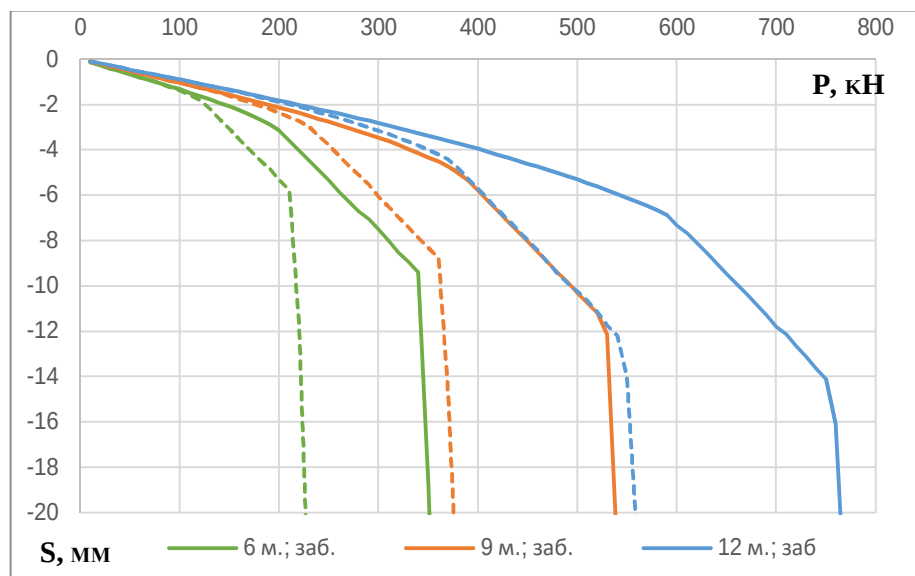


Рисунок 3.22 – Графік залежності осідання – навантаження одиночних бурових та забивних паль за результатами чисельного моделювання, піщаний ґрунт

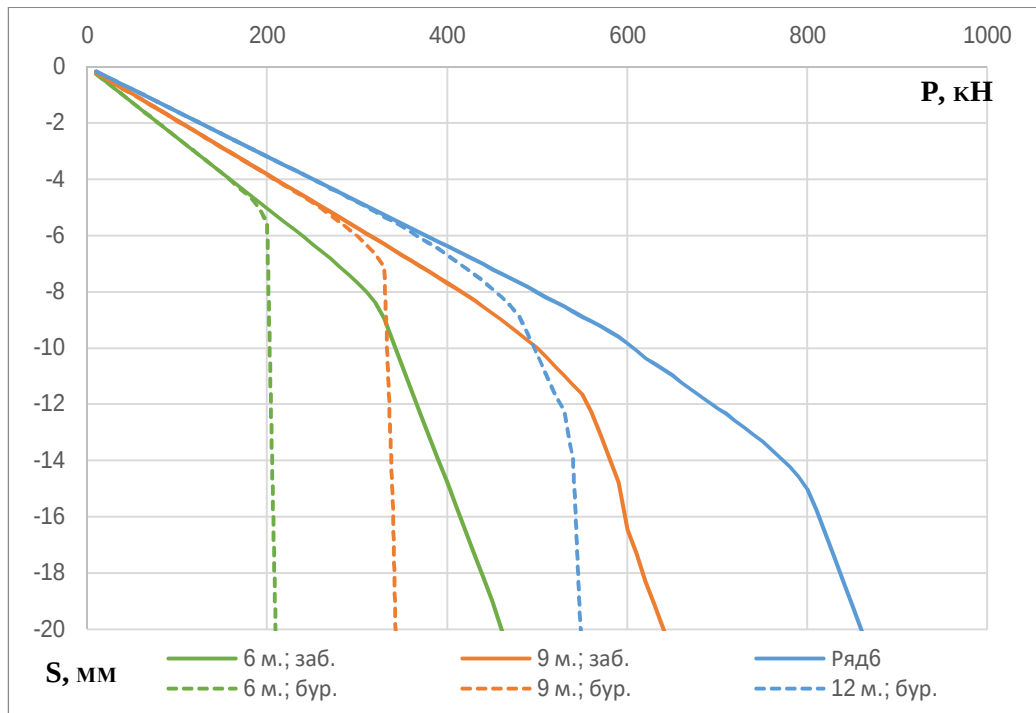


Рисунок 3.23 – Графік залежності осідання – навантаження одиночних бурових та забивних паль за результатами чисельного моделювання, глинистий ґрунт

Для зображення динаміки зміни несучої здатності від кроку при різних довжині паль сформовані порівняльні графіки для стрічкових фундаментів на забивних та бурових палях рис. 3.24, рис.3.25 в піщаному та на рис. 3.26, рис.3.27 в глинистому ґрунтах.

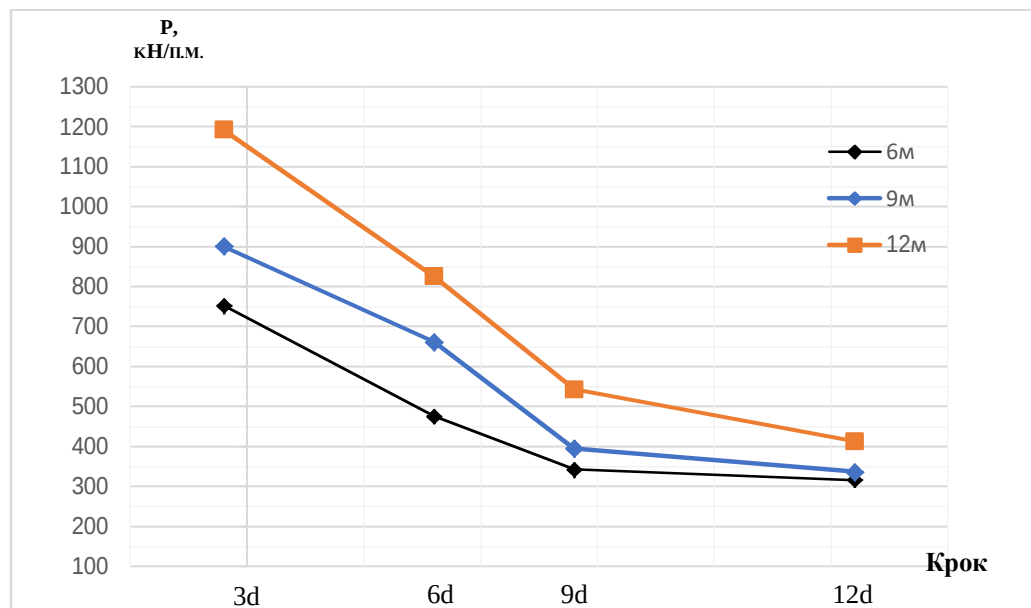


Рисунок 3.24 – Порівняння несучої здатності фундаменту на забивних палях залежно від зміни довжини та кроку (піщаний ґрунт)

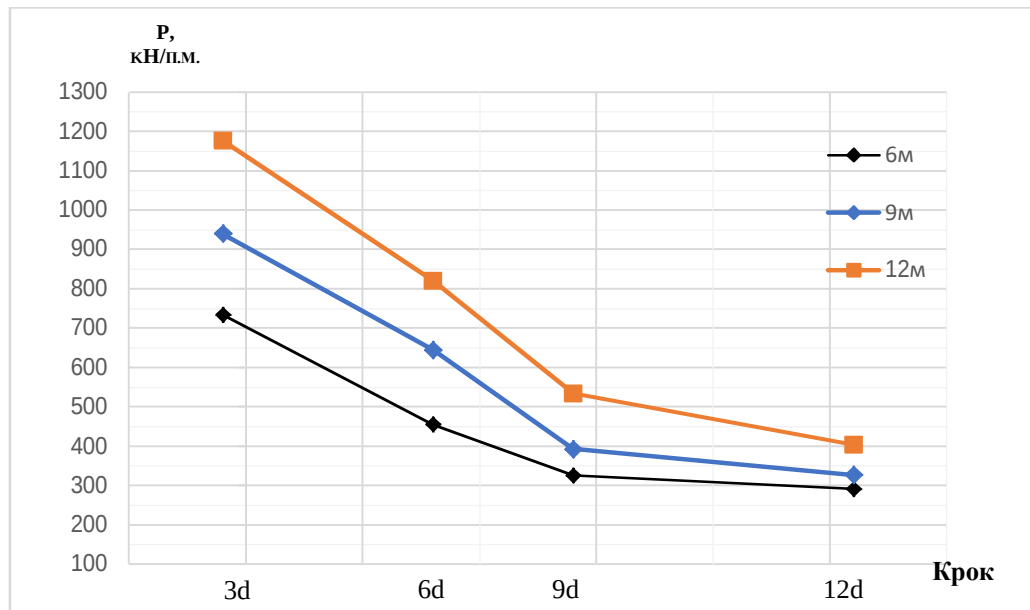


Рисунок 3.25 – Порівняння несучої здатності фундаменту на бурових палях залежно від зміни довжини та кроку (піщаний ґрунт)

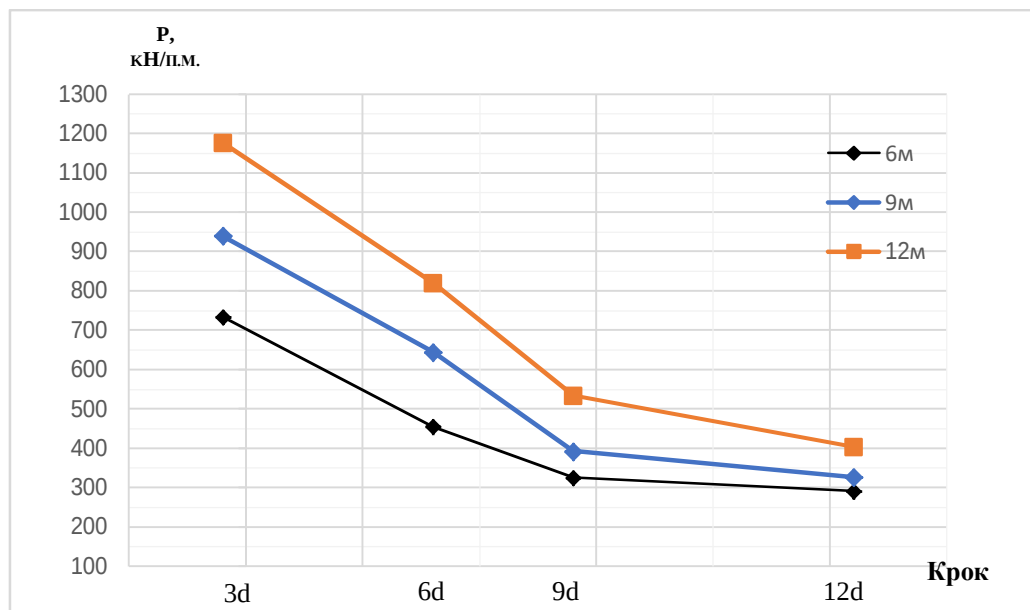


Рисунок 3.26 – Порівняння несучої здатності фундаменту на забивних палях залежно від зміни довжини та кроку (глинистий ґрунт)

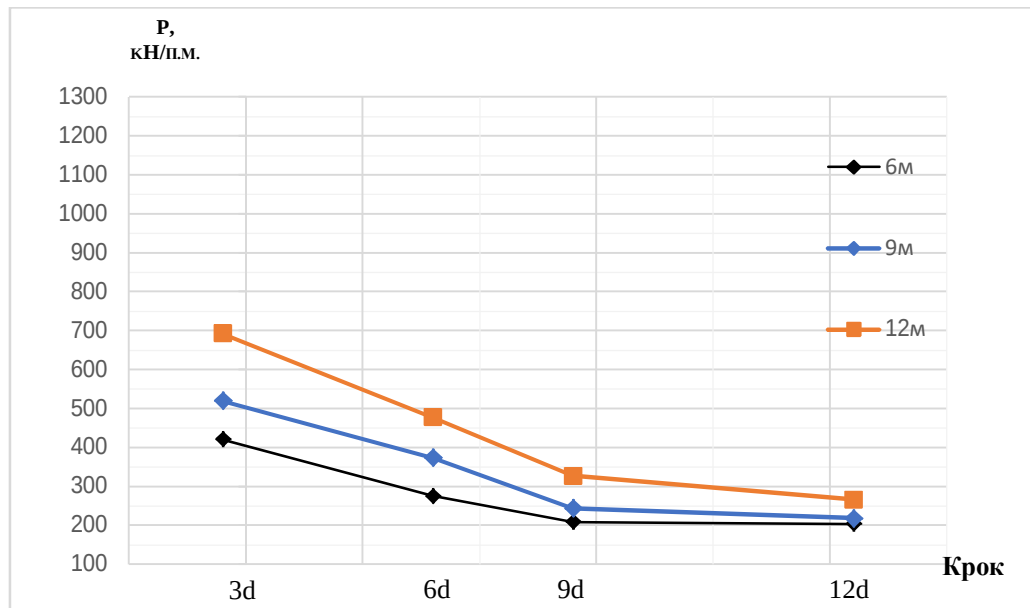


Рисунок 3.27 – Порівняння несучої здатності фундаменту на бурових палях залежно від зміни довжини та кроку (глинистий ґрунт)

На основі результатів проведеного моделювання визначено навантаження на пальові фундаменти при досягненні граничної деформації ґрунту та частку ростверку для порівняння роботи ростверку сумісно з палями залежно від зміни довжини та кроку паль. Результати для моделей пальових фундаментів в піщаному ґрунті показані в табл. 3.5., в глинистому ґрунті - табл. 3.6.

Аналіз чисельного моделювання, підтвердив результати експериментальних досліджень на маломасштабних моделях, що описані в першому розділі. А саме: частка навантаження, яка сприймається ростверком, збільшується зі збільшенням кроку паль, а зі збільшенням довжини паль приріст частки ростверку знижується. При влаштуванні бурових паль частка навантаження, що сприймає ростверк більша ніж при влаштуванні забивних паль та має закономірний характер. Зміна частки ростверку проілюстрована на графіку, який наведено на рис. 3.28., та вказана в таблиці у відсотковому співвідношенні до загальної несучої здатності фундаменту табл. 3.7. Порівняння роботи ростверку в різних ґрунтах показано на рис.3.29.

Таблиця 3.5

Результати чисельного моделювання стрічкового фундаменту на забивних та бурових палях при різному кроці та довжині в піщаному ґрунті

a _i , м	A _{pi} , м ²	l _i , м	Крок паль	F _i , кН/п.м	F _{pi} , кН/п.м	P _p , кН/п.м	F _i - F _{pi} , кН/п.м	F _i / F _{pi} , %
На забивних палях								
0,9	4,48	6	3d	753	67,2	134,1	685,8	8,9
1,8	5,02		6d	476	70,9	241,9	405,1	14,9
2,4	5,2		9d	343	70,7	325,8	272,3	20,6
3,6	5,29		12d	317	69,5	375,1	247,5	21,9
0,9	4,48	9	3d	902	96,2	170,7	805,3	10,7
1,8	5,02		6d	662	117,6	359,6	544,0	17,8
2,4	5,2		9d	396	87,0	390,7	308,5	22,0
3,6	5,29		12d	337	70,6	391,7	266,2	21,0
0,9	4,48	12	3d	1193	114,7	208,8	1078,3	9,6
1,8	5,02		6d	826	147,7	458,2	678,3	17,9
2,4	5,2		9d	543	143,4	476,6	399,6	26,4
3,6	5,29		12d	414	96	509,9	318,0	23,2
На бурових палях								
0,9	4,48	6	3d	586	55,1	108,2	530,9	9,4
1,8	5,02		6d	383	54,1	102,6	328,9	14,1
2,4	5,2		9d	283	54,3	247,6	228,7	19,2
3,6	5,29		12d	270	46,9	250,0	223,1	17,4
0,9	4,48	9	3d	690	79,3	139,9	610,7	11,5
1,8	5,02		6d	521	92,9	161,5	428,1	17,8
2,4	5,2		9d	317	73,02	330,1	244,0	23,0
3,6	5,29		12d	279	67,7	379,9	211,3	24,3
0,9	4,48	12	3d	910	93,2	168,5	816,8	10,2
1,8	5,02		6d	646	117,7	139,8	528,3	18,2
2,4	5,2		9d	427	115,3	462,6	311,7	27,0
3,6	5,29		12d	339	80,8	464,8	258,2	23,8

Примітка: a_i – крок палі в поздовжньому напрямку, м; A_{pi} – площа ростверку без урахування площі палі, м²; d_i – розмір поперечного перерізу палі, м; l_i – довжина палі, м; F_i – несуча здатність фундаменту в цілому, кН/п.м; F_{pi} – несуча здатність ростверку, кН/п.м; F_{pi}/F_i – частка несучої здатності ростверку, %.

Таблиця 3.6

Результати чисельного моделювання роботи стрічкового фундаменту на забивних та бурових палях при різному кроці та довжині в глинистому ґрунті

a _i , м	A _{pi} , м ₂	l _i , м	Крок паль	F _i , кН/п.м	F _{pi} , кН/п.м	P _p , кН/п.м	F _i - F _{pi} , кН/п.м	F _i / F _{pi} , %
На забивних палях								
0,9	4,48	6	3d	734	55,2	135,03	678,8	7,5
1,8	5,02		6d	455	59,0	239,59	396,0	13,0
2,4	5,2		9d	326	55,9	299,09	270,1	17,1
3,6	5,29		12d	292	49,2	328,66	242,8	16,8
0,9	4,48	9	3d	940	68,4	163,66	871,6	7,3
1,8	5,02		6d	645	123,1	451,63	521,9	19,1
2,4	5,2		9d	393	69,1	358,29	323,9	17,6
3,6	5,29		12d	327	59,8	387,50	267,2	18,3
0,9	4,48	12	3d	1177	76,7	191,28	1100,3	6,5
1,8	5,02		6d	821	155,9	571,28	665,1	19,0
2,4	5,2		9d	534	126,8	610,50	407,2	23,7
3,6	5,29		12d	404	80,1	492,27	323,9	19,8
На бурових палях								
0,9	4,48	6	3d	421	41,5	98,76	379,5	9,9
1,8	5,02		6d	276	41,1	159,63	234,9	14,9
2,4	5,2		9d	209	33,7	172,31	175,3	16,1
3,6	5,29		12d	204	26,8	187,37	177,2	13,1
0,9	4,48	9	3d	520	61,4	132,72	458,6	11,8
1,8	5,02		6d	374	70,1	254,56	303,9	18,7
2,4	5,2		9d	244	46,7	234,61	197,3	19,1
3,6	5,29		12d	218	49,1	333,35	168,9	22,5
0,9	4,48	12	3d	693	73,9	161,84	619,1	10,7
1,8	5,02		6d	477	90,4	326,36	386,6	19,0
2,4	5,2		9d	327	90,5	422,42	236,5	27,7
3,6	5,29		12d	266	67,5	416,80	198,5	25,4

Примітка: a_i – крок паль в поздовжньому напрямку, м; A_{pi} – площа ростверку без урахування площі паль, m^2 ; d_i – розмір поперечного перерізу палі, м; l_i – довжина палі, м; F_i – несуча здатність фундаменту в цілому, кН/п.м; F_{pi} – несуча здатність ростверку, кН/п.м; F_{pi}/F_i – частка несучої здатності ростверку, %.

Таблиця 3.7

Порівняння частки ростверку

L, м	Крок паль			
	3d	6d	9d	12d
На забивних палях				
6	14,1%	23,4%	29,9%	28,5%
9	10,6%	17,8%	21,9%	21,0%
12	6,1%	10,9%	15,2%	15,2%
На бурових палях				
6	15,4%	23,3%	31,5%	30,3%
9	11,5%	17,8%	23,0%	24,3%
12	6,7%	13,3%	17,9%	14,4%

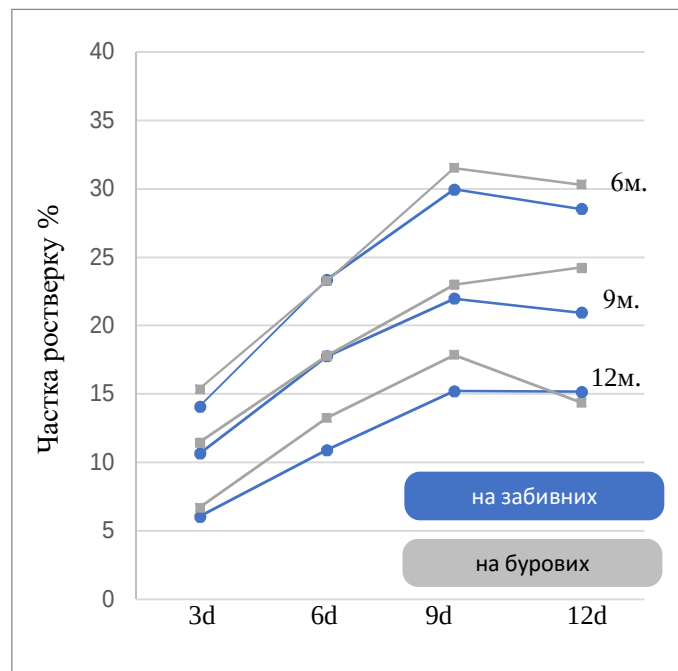


Рисунок 3.28 – Порівняння навантаження, яке сприймає ростверк у складі стрічкового фундаменту на бурових та забивних палях при різній довжині паль та кроці (піщаний ґрунт)

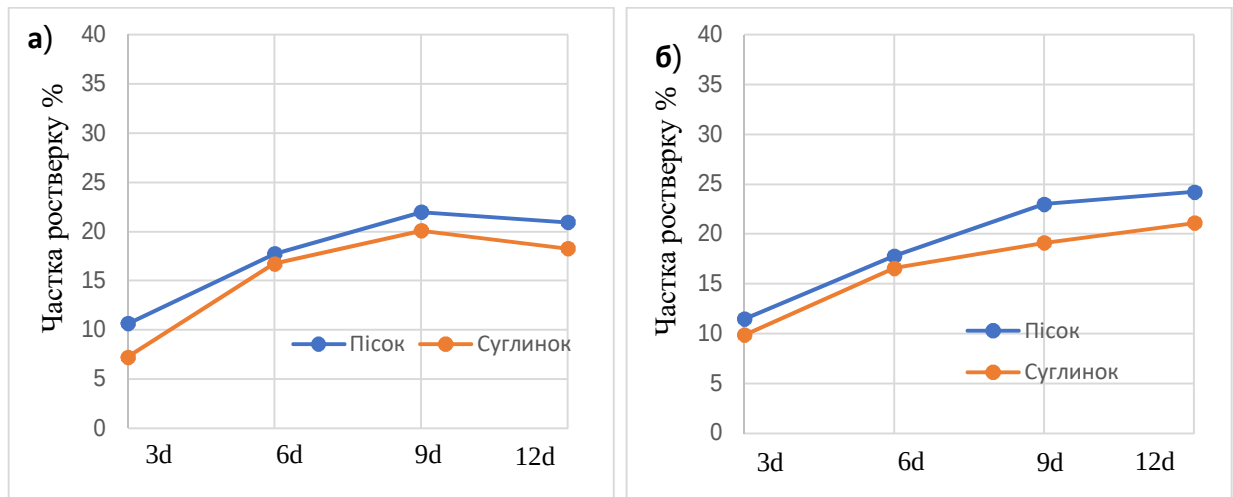


Рисунок 3.29 – Порівняння навантаження, яке сприймає ростверк в різних ґрунтових умовах при зміні кроку для забивних (а) та бурових (б) паль довжиною 9м

Прослідковується залежність тиску під підшоною ростверку від кроку, довжини та способу влаштування паль. При більшій довжині паль тиск під підшоною ростверку менший, краще реалізується при середніх відстанях між палями (рис.3.30).

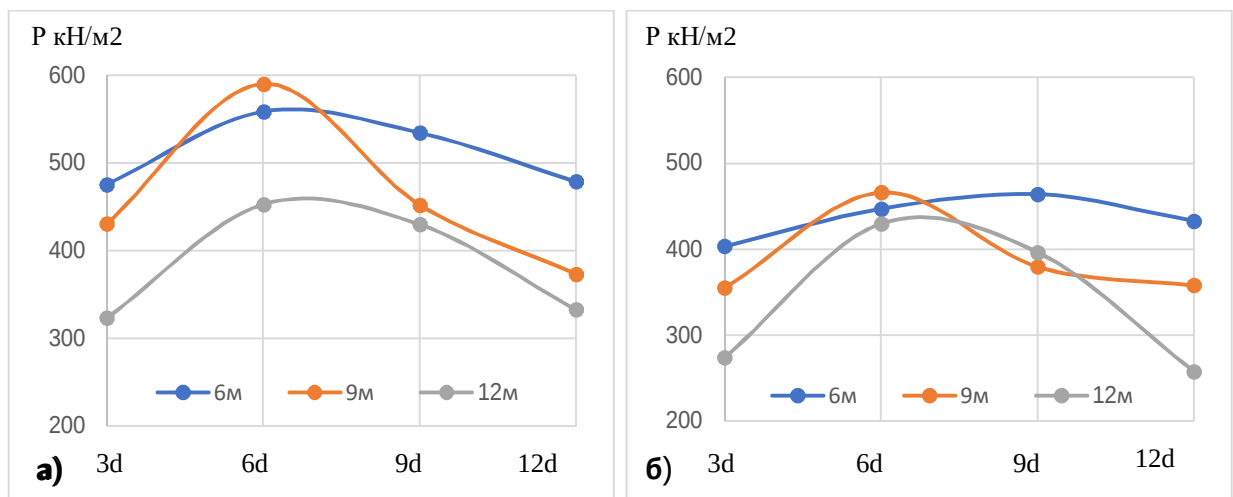


Рисунок 3.30 – Порівняння тиску під підшоною низького ростверку складі стрічкового фундаменту на бурових (а) та забивних (б) палях при зміні кроку та довжини

Проаналізовано навантаження, що сприймає окрема паля в складі стрічкового пальового однорядного фундаменту, та порівняно з навантаженням, що сприймає одиночна паля аналогічних геометричних характеристик в тих самих ґрунтових умовах. Аналіз різниці в навантаженні, що сприймають палі показано в таблиці табл. 3.8. для піщаного ґрунту та в табл. 3.9. для глинистого ґрунту, де кількісний показник ступіню реалізації виражений в відношенні навантаження, що сприймає паля в складі стрічкового пальового однорядного фундаменту та одиночна. Також залежність ступеню реалізації від кроку та довжини показано в табл. 3.10. Аналіз ступеню реалізації паль показує збільшення навантаження, яке несе окрема паля в складі пальового фундаменту, і цей показник збільшується при збільшенні відстані між палями; при зменшенні відстані між палями (менше $9d$) ступінь реалізації знижується для палі в складі пальового фундаменту. Спостерігається вища ступінь реалізації при влаштуванні бурових паль ніж у забивних у піщаних ґрунтах. Динаміка ступеню реалізації палі залежно від її довжини та кроку проілюстрована на графіку рис. 3.29. для забивних і бурових паль в піщаному ґрунті, на рис. 3.30. порівняння ступеню реалізації палі в різних ґрунтових умовах.

З табл. 3.10 видно що ступінь реалізації паль більше 12 м наближується до 1 та змінюється незначно.

Також ступінь реалізації паль показана у вигляді графіків для фундаментів на забивних та бурових палях (рис 3.31, рис 3.32) для різних кроків та довжин паль в піщаному та в глинистому ґрунтах (рис 3.33, рис 3.34).

Таблиця 3.8

Порівняння ступеня реалізації несучої здатності паль у складі однорядного стрічкового фундаменту на палях від кроку і довжини паль в піщаному ґрунті

l_i , м	Спосіб влаштування	Крок паль	F_1 , кН/п.м	$F_i - F_{pi}$, кН/п.м	F_2 , кН/п.м	Ступінь реалізації несучої здатності паль
6	Забивна	3d	753	617	340	1,82
		6d	476	729	340	2,14
		9d	343	654	340	1,92
		12d	317	891	340	2,62
6	Бурова	3d	586	478	210	2,28
		6d	383	592	210	2,82
		9d	283	549	210	2,61
		12d	270	803	210	3,82
9	Забивна	3d	901,5	725	530	1,37
		6d	661,6	979	530	1,85
		9d	395,5	740	530	1,40
		12d	336,8	958	530	1,81
9	Бурова	3d	690	550	360	1,53
		6d	521	771	360	2,14
		9d	317	586	360	1,63
		12d	279	761	360	2,11
12	Забивна	3d	1193	970	750	1,29
		6d	826	1221	750	1,63
		9d	543	959	750	1,28
		12d	414	1145	750	1,53
12	Бурова	3d	910	735	540	1,36
		6d	646	951	540	1,76
		9d	427	748	540	1,39
		12d	339	930	540	1,72

Примітка: F_1 – несуча здатність фундаменту в цілому по результатам дослідів, кН/п.м; $F_i \rightarrow F_{pi}$ – несуча здатність паль; F_2 – несуча здатність паль, як сума їх несучих здатностей, у відношенні F_2/F_1 – відношення несучої здатності паль у складі стрічкового фундаменту до суми несучих здатностей тої ж кількості паль.

Таблиця 3.9

**Порівняння ступеня реалізації несучої здатності паль у складі стрічкового
пального однорядного фундаменту залежно від кроку і довжини паль,
глинистий ґрунт**

li, м	Спосіб влаштування	Крок паль	F ₁ , кН/п.м	F _i - F _{pi} , кН/п.м	F ₂ , кН/п.м	Ступінь реалізації несучої здатності паль
6	Забивна	3d	734	611	340	1,80
		6d	455	713	340	2,10
		9d	326	648	340	1,91
		12d	292	874	340	2,57
6	Бурова	3d	421	342	200	1,71
		6d	276	423	200	2,11
		9d	209	421	200	2,10
		12d	204	638	200	3,19
9	Забивна	3d	940	784	550	1,43
		6d	645	939	550	1,71
		9d	393	777	550	1,41
		12d	327	962	550	1,75
9	Бурова	3d	520	413	330	1,25
		6d	374	547	330	1,66
		9d	244	474	330	1,43
		12d	218	608	330	1,84
12	Забивна	3d	1177	990	810	1,22
		6d	821	1197	810	1,48
		9d	534	977	810	1,21
		12d	404	1166	810	1,44
12	Бурова	3d	693	557	490	1,14
		6d	477	696	490	1,42
		9d	327	568	490	1,16
		12d	266	715	490	1,46

Примітка: F₁ – несуча здатність фундаменту в цілому по результатам дослідів, кН/п.м; F_i – F_{pi} – несуча здатність паль; F₂ – несуча здатність паль, як сума їх несучих здатностей, у відношенні F₂/F₁ – відношення несучої здатності паль у складі стрічкового фундаменту до суми несучих здатностей тої ж кількості паль.

Таблиця 3.10

**Ступінь реалізації несучої здатності паль у складі стрічкового пальового
однорядного фундаменту залежно від кроку і довжини паль в різних
грунтових умовах**

Довжина палі	Спосіб влаштування	Крок паль				Грунтові умови
		3d	6d	9d	12d	
6м	заб	1,82	2,14	1,92	2,62	Піщаний ґрунт
	бур	2,28	2,82	2,61	3,82	
9м	заб	1,37	1,85	1,40	1,81	
	бур	1,53	2,14	1,63	2,11	
12м	заб	1,29	1,63	1,28	1,53	
	бур	1,36	1,76	1,39	1,72	
6м	заб	1,80	2,10	1,91	2,57	Глинистий ґрунт
	бур	1,71	2,11	2,10	3,19	
9м	заб	1,43	1,71	1,41	1,75	
	бур	1,25	1,66	1,43	1,84	
12м	заб	1,22	1,48	1,21	1,44	
	бур	1,14	1,42	1,16	1,46	
15м	заб	1,16	1,41	1,10	1,35	
	бур	1,10	1,35	1,02	1,34	
18м	заб	1,12	1,36	1,14	1,28	
	бур	1,08	1,30	1,08	1,27	

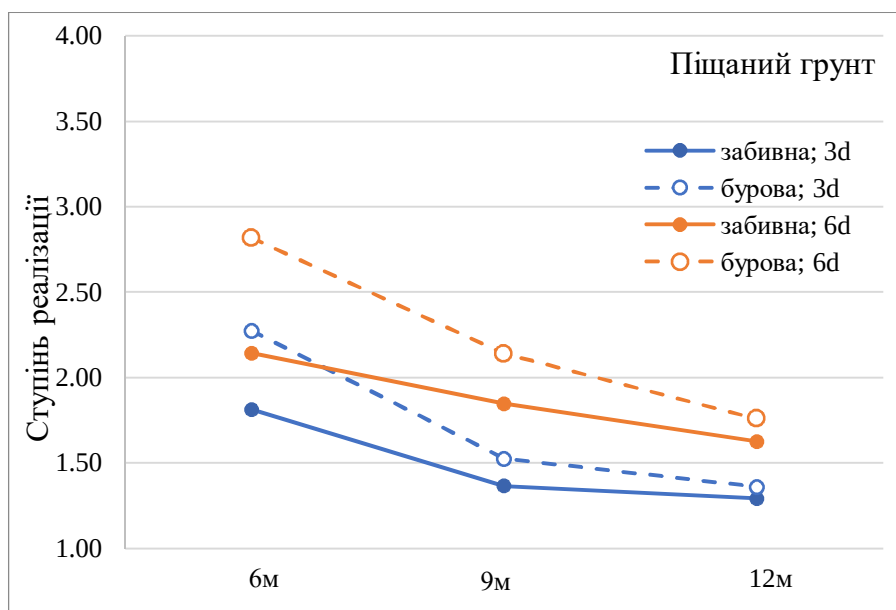


Рисунок 3.31 – Порівняння ступеню реалізації несучої здатності забивних та бурових паль в складі фундаменту при зміні кроку та довжини в піщаному ґрунті

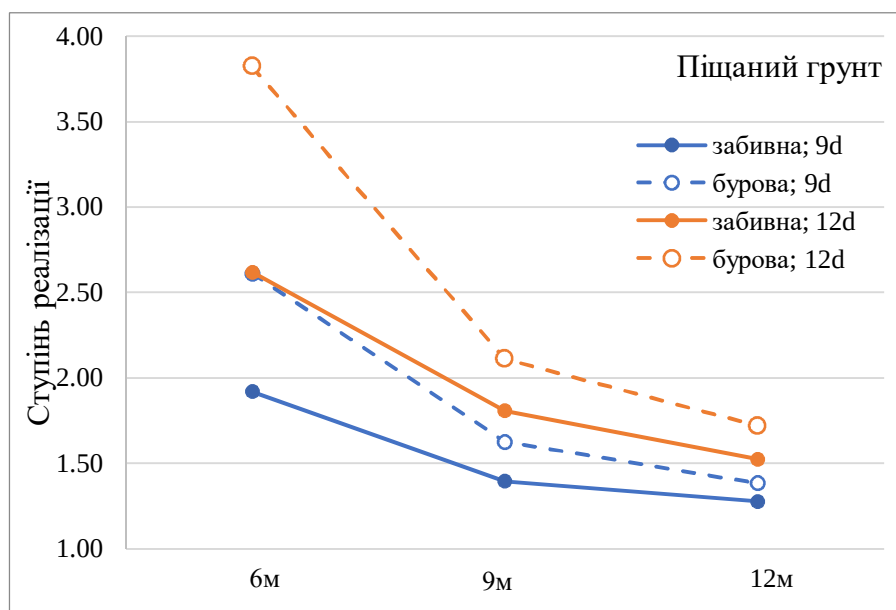


Рисунок 3.32 – Порівняння ступеня реалізації несучої здатності забивних та бурових паль в складі фундаменту при зміні кроку та довжини в піщаному ґрунті

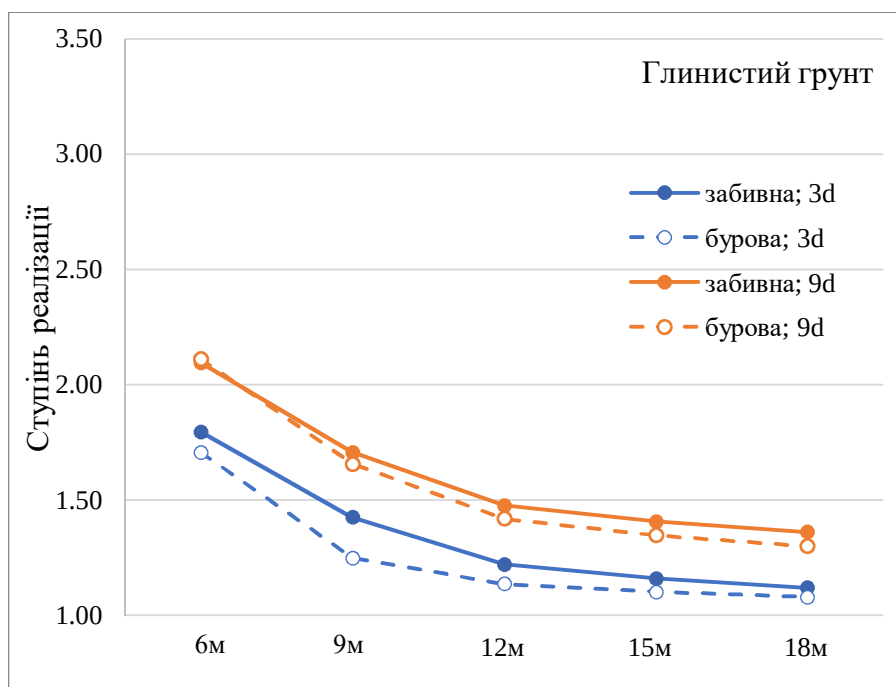


Рисунок 3.33 – Порівняння ступеня реалізації несучої здатності забивних та бурових паль в складі фундаменту при зміні кроку та довжини в глинистому ґрунті

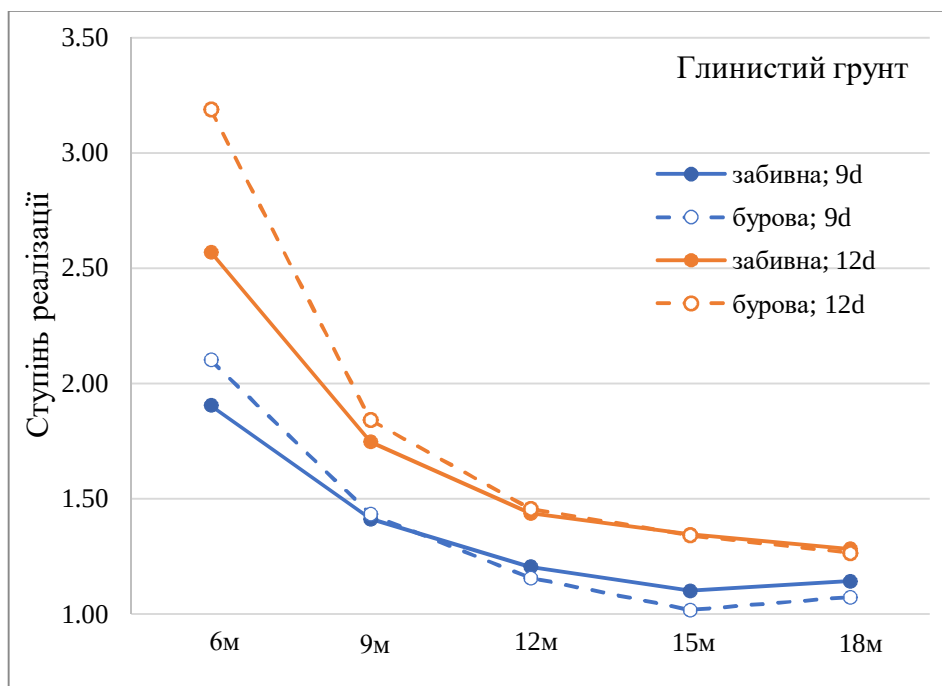


Рисунок 3.34 – Порівняння ступеня реалізації несучої здатності забивних та бурових паль в складі фундаменту при зміні кроку та довжини в глинистому ґрунті

Отримано величину деформації ґрунтової основи під фундаментом, яка вказує на характер різниці в роботі стрічкового пальового однорядного фундаменту на забивних та бурових палях при зміні геометричних параметрів. Переміщення ґрунту показано у вигляді ізоліній на рис.3.35- 3.38.

При однаковому осіданні основи у верхніх шарах переміщення ґрунту в нижніх шарах відрізняється залежно від способу влаштування паль. При влаштуванні бурових паль переміщення в шарах ґрунту менші ніж при влаштуванні забивних паль.

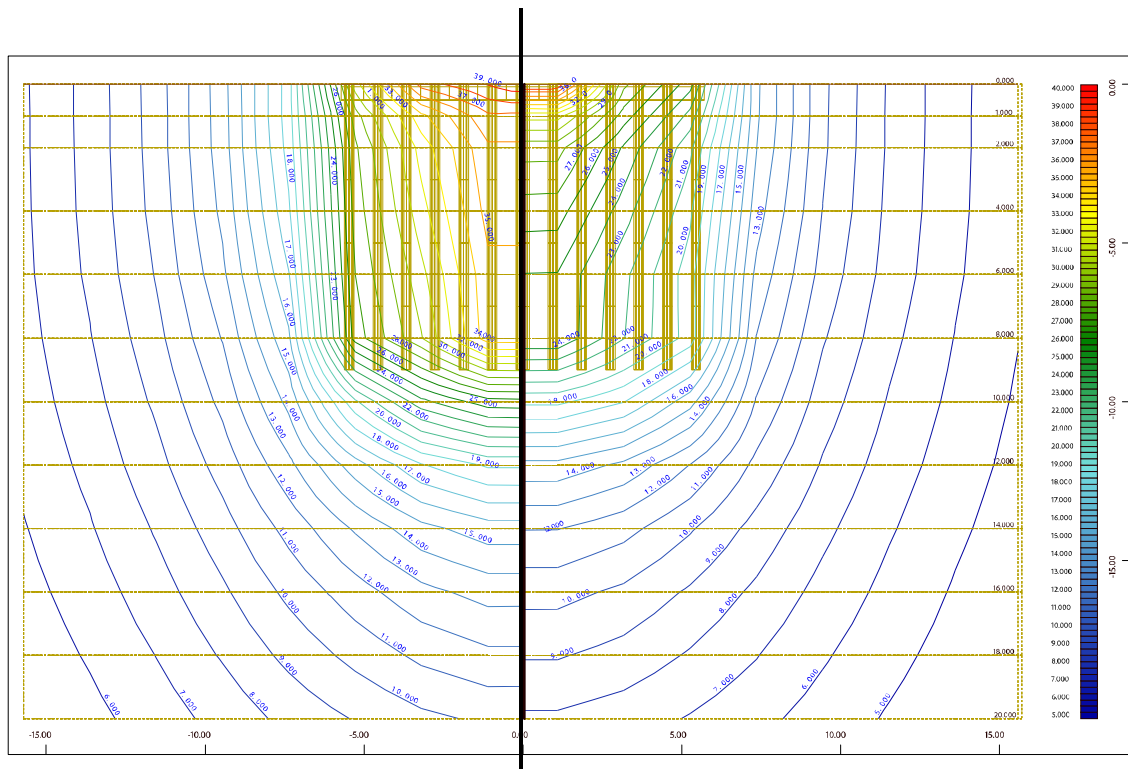


Рисунок 3.35 – Ілюстрація деформацій основи від навантаження на фундамент на бурових (справа) та забивних (зліва) палях довжиною 9 м при кроці 3d

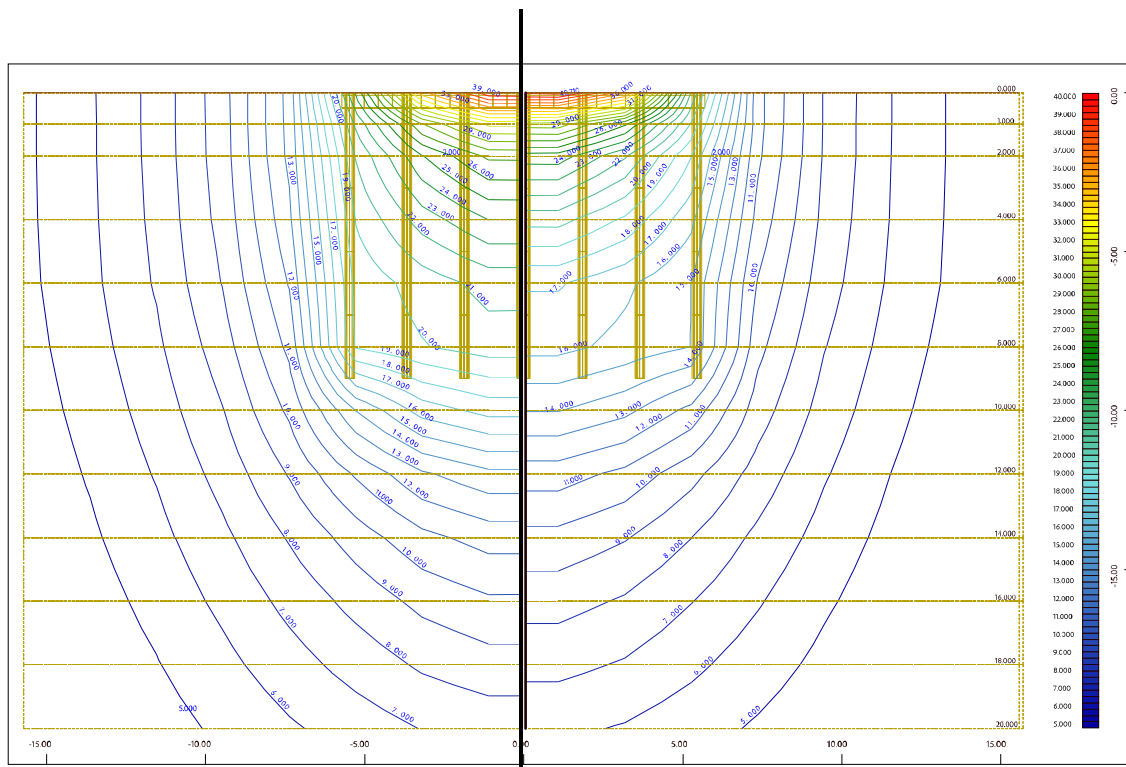


Рисунок 3.36 – Ілюстрація деформацій основи від навантаження на фундамент на бурових (справа) та забивних (зліва) палях довжиною 9 м при кроці 6d

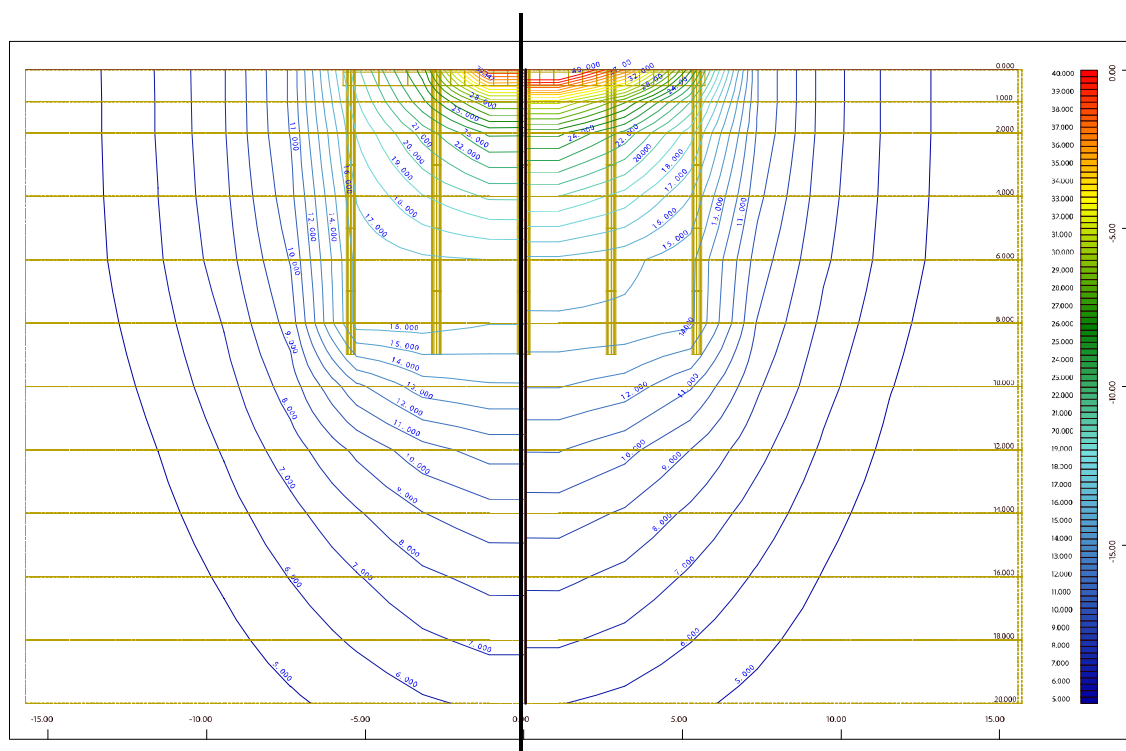


Рисунок 3.37 – Ілюстрація деформацій основи від навантаження на фундамент на бурових (справа) та забивних (зліва) палях довжиною 9 м при кроці 9d

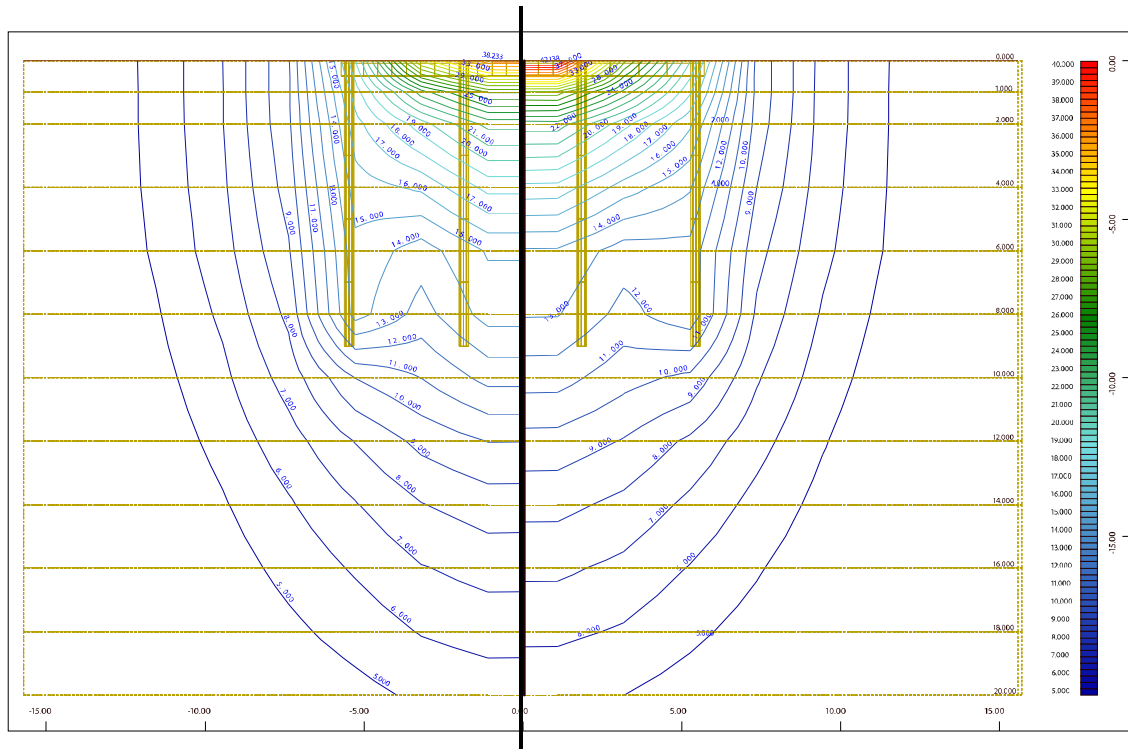


Рисунок 3.38 – Ілюстрація деформацій основи від навантаження на фундамент на бурових (справа) та забивних (зліва) палях довжиною 9 м при кроці 12d

Також про менший вплив на ґрунтову основу при використанні бурових паль в складі стрічкового пального фундаменту свідчать напруження в ґрунті, які виникають при передачі навантажень від паль та ростверку (рис.3.38.- 3.41.).

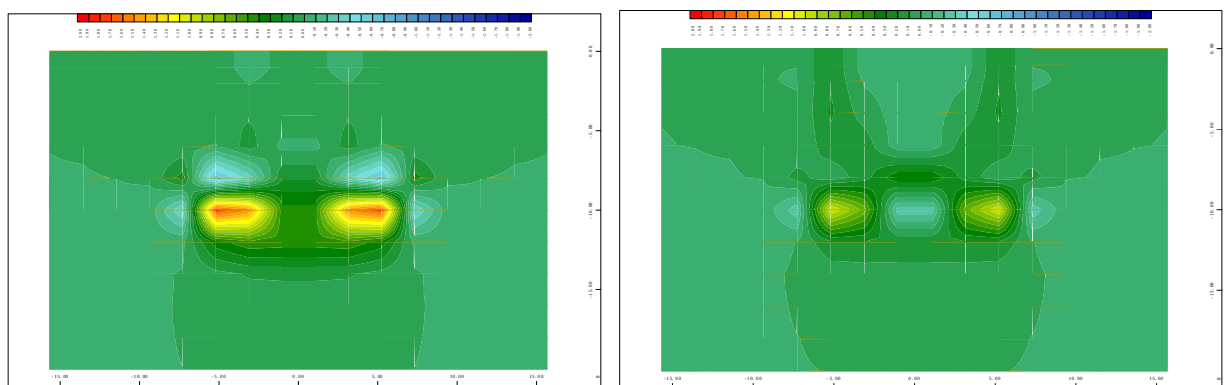


Рисунок 3.39 – Ілюстрація напруження основи від навантаження на фундамент на бурових (справа) та забивних (зліва) палях довжиною 9 м при кроці 3d

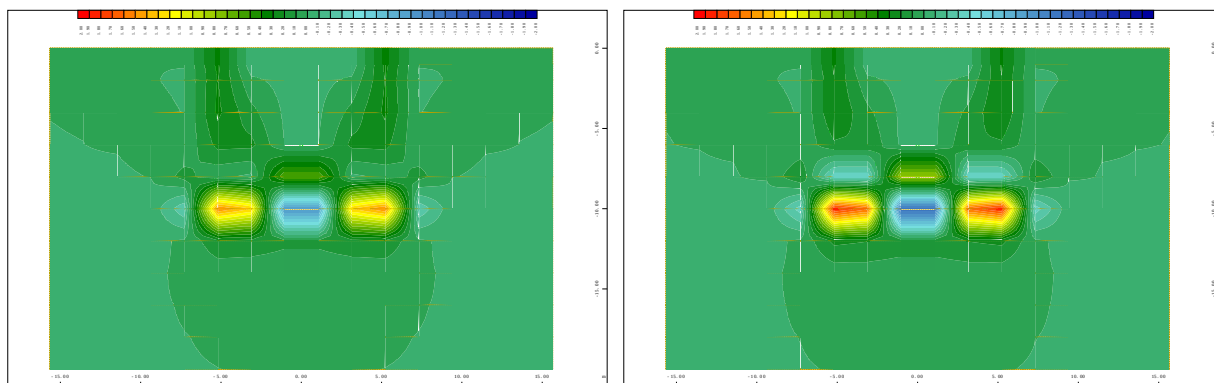


Рисунок 3.40 – Ілюстрація напруження основи від навантаження на фундамент на бурових (справа) та забивних (зліва) палях довжиною 9 м при кроці 6d

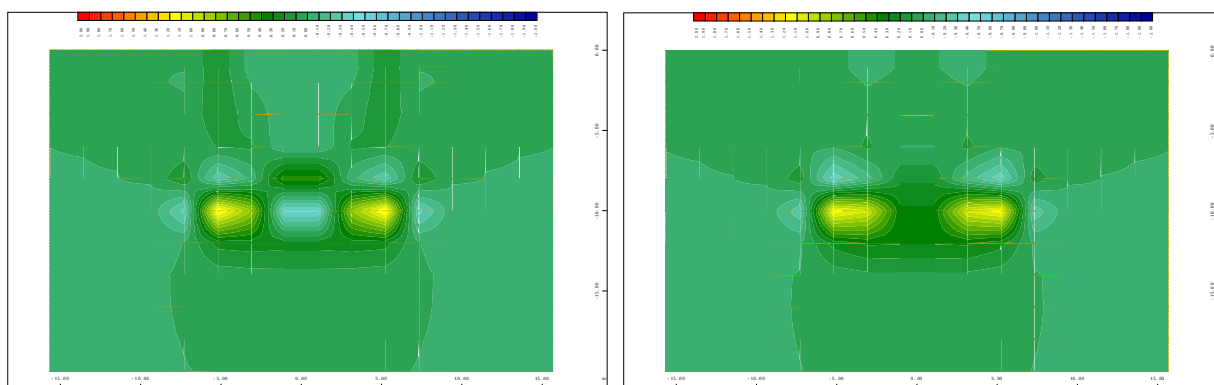


Рисунок 3.41 – Ілюстрація напруження основи від навантаження на фундамент на бурових (справа) та забивних (зліва) палях довжиною 9 м при кроці 9d

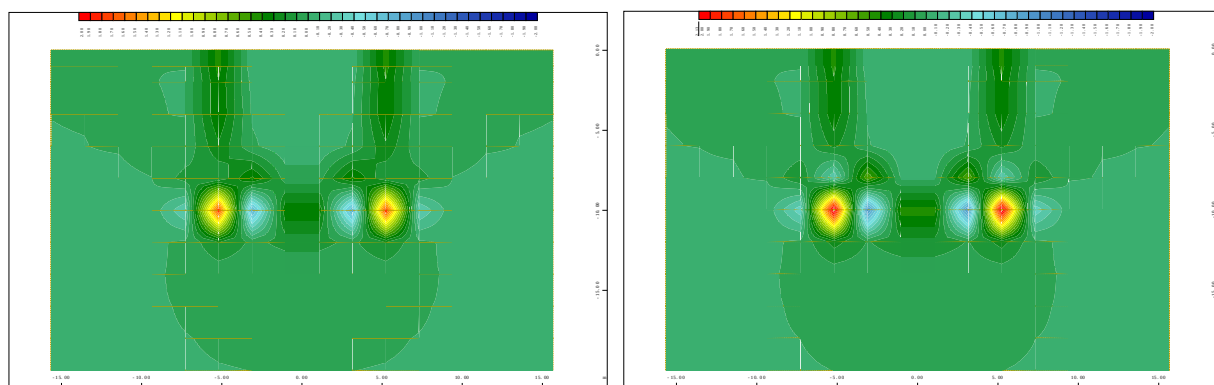


Рисунок 3.42 – Ілюстрація напруження основи від навантаження на фундамент на бурових (справа) та забивних (зліва) палях довжиною 9 м при кроці 12d

3.4 Практичні рекомендації щодо розрахунку стрічкових пальових однорядних фундаментів

Для оцінки величини зовнішнього навантаження, що сприймається стрічковим пальовим однорядним фундаментом в однорідному ґрунті, за результатами моделювання виконано порівняння з результатами теоретичних розрахунків (табл. 3.10 - 3.11, рис. 3.43 - 3.50).

З графіків (рис. 3.45, 3.50) видно збільшення навантаження на фундамент за результатами чисельного моделювання у порівнянні до суми навантажень паль та ростверку, що визначенні моделюванням окремо. При влаштуванні бурових паль отримано більший приріст навантаження ніж при влаштуванні забивних паль для всіх типів випробуваних фундаментів. При використанні паль 6 м спостерігається більший приріст навантаження ніж при використанні паль 9 м, а при 12 м навпаки менший. З рис. 3.46 та рис. 3.51 видно вищий приріст зовнішнього навантаження за результатами чисельного моделювання відносно теоретичних розрахунків згідно [37] ніж відносно до суми несучих здатностей паль та ростверку визначених моделюванням.

В табл. 3.11., 3.12. наведено наступні дані:

F_1 - навантаження, що сприймається стрічковим пальовим однорядним фундаментом, за результатами моделювання в Sofistik;

F_2 - навантаження, що сприймається стрічковим пальовим однорядним фундаментом, що визначене як алгебраїчна сума допустимого навантаження на поодинокі палі та стрічковий ростверк визначене моделюванням в Sofistik;

F_3 - навантаження, що сприймається стрічковим пальовим однорядним фундаментом, як алгебраїчна сума допустимих навантажень на палі, що визначена без урахування роботи ростверку;

$$F_3 = Fd \cdot n \quad (3.2)$$

F_4 - навантаження, що сприймається стрічковим пальовим фундаментом, що визначене згідно з рекомендаціями [37] за формулою:

$$F_4 = F_d \cdot n + A \cdot R \quad (3.3)$$

в формулах (3.1. - 3.3.):

F_d – допустиме навантаження на палю, що визначається згідно з [37], кН;

n – кількість паль в складі фундаменту, кН;

A – площа підшви ростверку, м²;

R – розрахунковий опір ґрунту під підшвою ростверку за формулою, кПа.

Таблиця 3.11

Порівняння навантаження на стрічковий пальовий однорядний фундамент, що визначене різними методами, піщаний ґрунт

№	Довжина і крок паль	Навантаження на стрічковий пальовий фундамент, кН/п.м						
		F ₁	F ₂	F ₁ /F ₂	F ₃	F ₁ /F ₃	F ₄	F ₁ /F ₄
1	2	3	4	5	6	7	8	9
		На забивних палях						
1	$l = 6 \text{ м}, 3d$	753,0	487,9	1,5	367,8	2,0	418,3	1,8
2	$l = 6 \text{ м}, 6d$	476,0	293,5	1,6	198,0	2,4	254,6	1,9
3	$l = 6 \text{ м}, 9d$	343,0	228,8	1,5	141,4	2,4	200,1	1,7
4	$l = 6 \text{ м}, 12d$	317,0	196,4	1,6	113,2	2,8	172,8	1,8
5	$l = 9 \text{ м}, 3d$	901,5	709,9	1,3	574,6	1,6	625,1	1,4
6	$l = 9 \text{ м}, 6d$	661,6	413,1	1,6	309,4	2,1	366,0	1,8
7	$l = 9 \text{ м}, 9d$	395,5	314,2	1,3	221,0	1,8	279,6	1,4
8	$l = 9 \text{ м}, 12d$	336,8	264,7	1,3	176,8	1,9	236,4	1,4
9	$l = 12 \text{ м}, 3d$	1193,0	973,4	1,2	833,0	1,4	883,5	1,4
10	$l = 12 \text{ м}, 6d$	826,0	555,0	1,5	448,6	1,8	505,2	1,6
11	$l = 12 \text{ м}, 9d$	543,0	415,5	1,3	320,4	1,7	379,0	1,4
12	$l = 12 \text{ м}, 12d$	414,0	345,8	1,2	256,3	1,6	316,0	1,3

Продовження таблиці 3.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9
		На бурових палях						
1	$l = 6 \text{ м}, 3d$	586,0	345,2	1,7	232,8	2,5	283,3	2,1
2	$l = 6 \text{ м}, 6d$	383,0	216,7	1,8	125,3	3,1	182,0	2,1
3	$l = 6 \text{ м}, 9d$	283,0	173,9	1,6	89,5	3,2	148,2	1,9
4	$l = 6 \text{ м}, 12d$	270,0	152,5	1,8	71,6	3,8	131,3	2,1
5	$l = 9 \text{ м}, 3d$	690,0	521,2	1,3	397,4	1,7	447,9	1,5
6	$l = 9 \text{ м}, 6d$	521,0	311,5	1,7	214,0	2,4	270,6	1,9
7	$l = 9 \text{ м}, 9d$	317,0	241,6	1,3	152,9	2,1	211,5	1,5
8	$l = 9 \text{ м}, 12d$	279,0	206,6	1,4	122,3	2,3	181,9	1,5
9	$l = 12 \text{ м}, 3d$	910,0	731,8	1,2	598,6	1,5	649,1	1,4
10	$l = 12 \text{ м}, 6d$	646,0	424,9	1,5	322,3	2,0	378,9	1,7
11	$l = 12 \text{ м}, 9d$	427,0	322,6	1,3	230,2	1,9	288,9	1,5
12	$l = 12 \text{ м}, 12d$	339,0	271,4	1,2	184,2	1,8	243,8	1,4

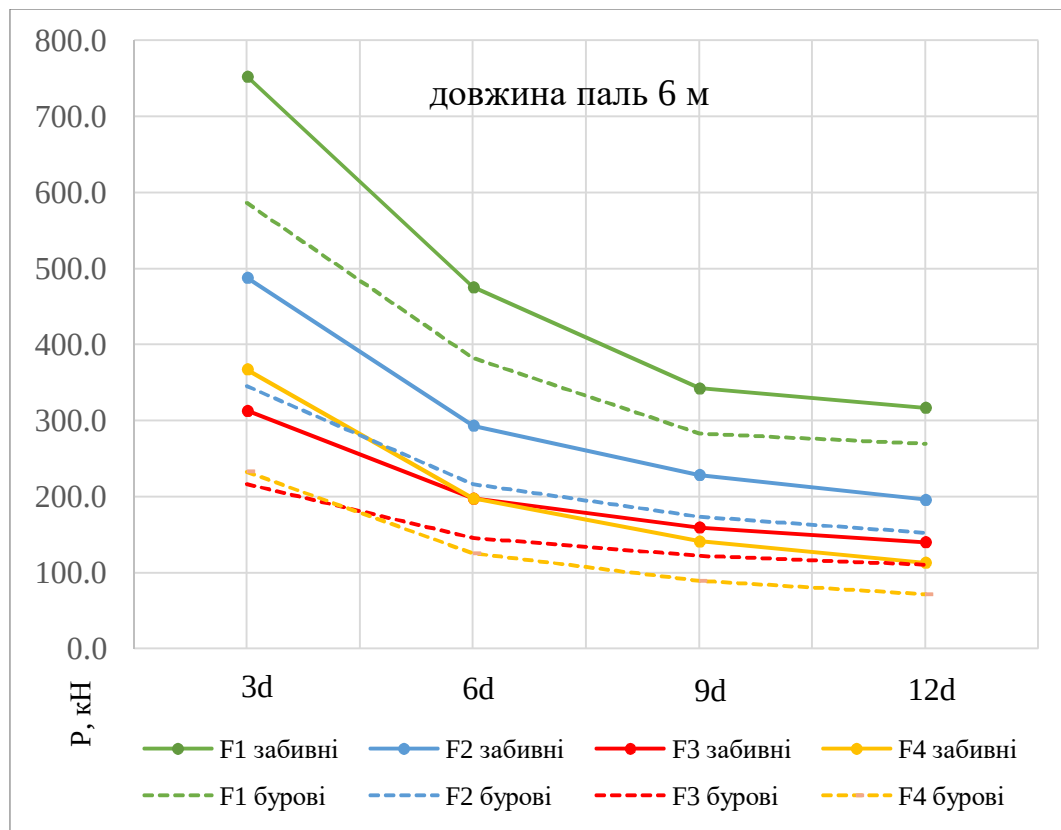


Рисунок 3.43 – Порівняння несучої здатності однорядного стрічкового пальового фундаменту на бурових та забивних палях, що визначена різними методами в залежності від кроку паль довжиною 6 м в піщаному ґрунті

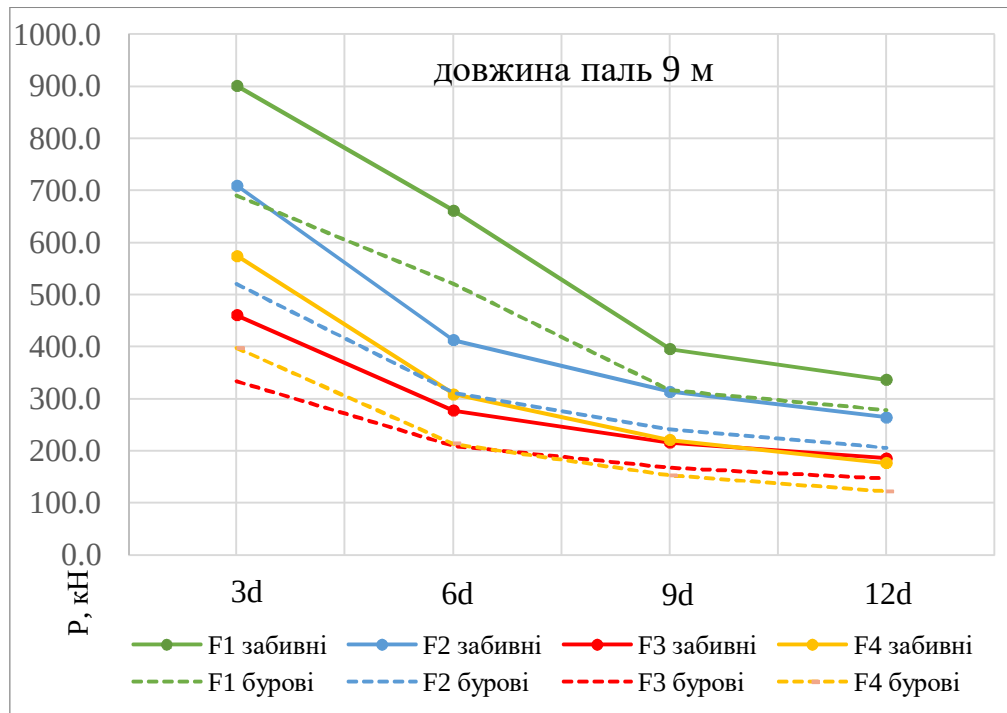


Рисунок 3.44 – Порівняння несучої здатності однорядного стрічкового пальового фундаменту на бурових та забивних палях, що визначена різними методами в залежності від кроку паль довжиною 9 м в піщаному ґрунті

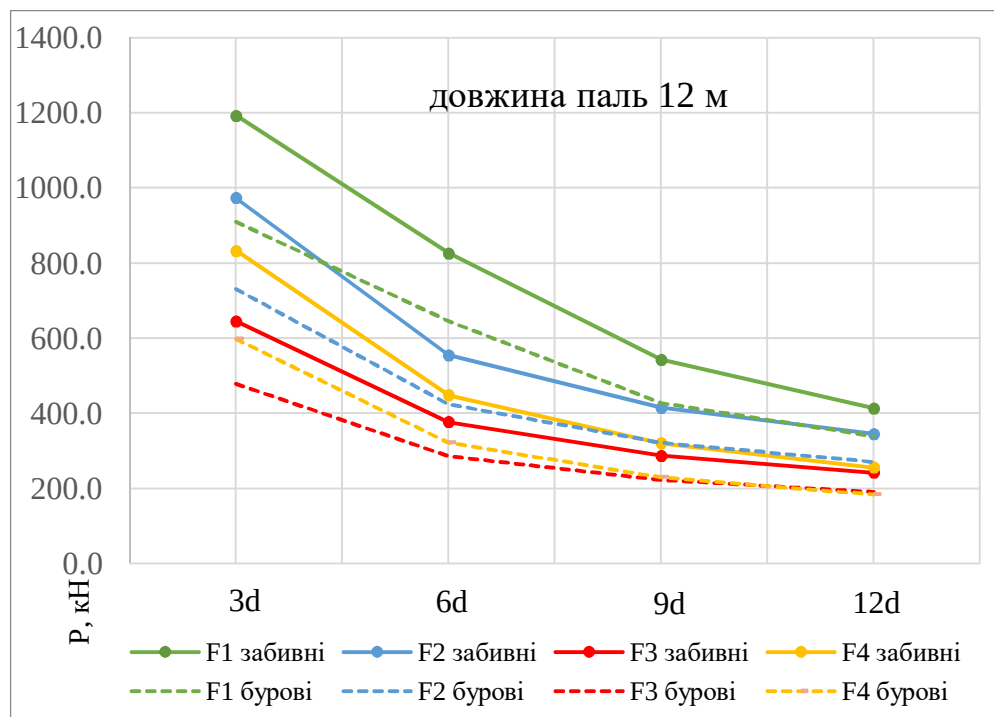


Рисунок 3.45 – Порівняння несучої здатності однорядного стрічкового пальового фундаменту на бурових та забивних палях, що визначена різними методами в залежності від кроку паль довжиною 12 м в піщаному ґрунті

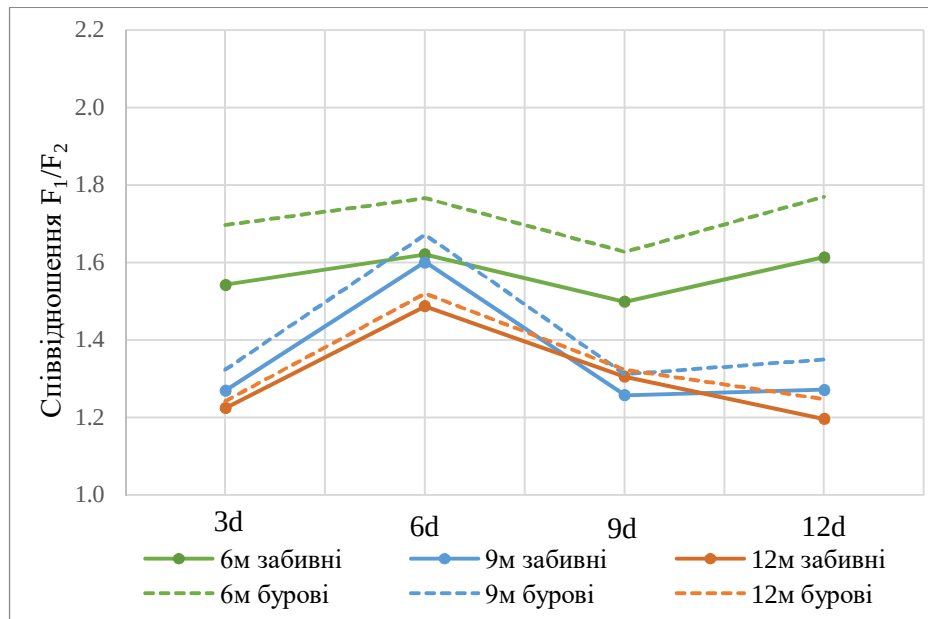


Рисунок 3.46 – Співвідношення F_1/F_2 для піщаного ґрунту (F_1 - навантаження, що сприймається стрічковим пальовим однорядним фундаментом за результатами чисельного моделювання; F_2 - алгебраїчна сума допустимого навантаження на поодинокі палі та стрічковий ростверк за результатами чисельного моделювання)

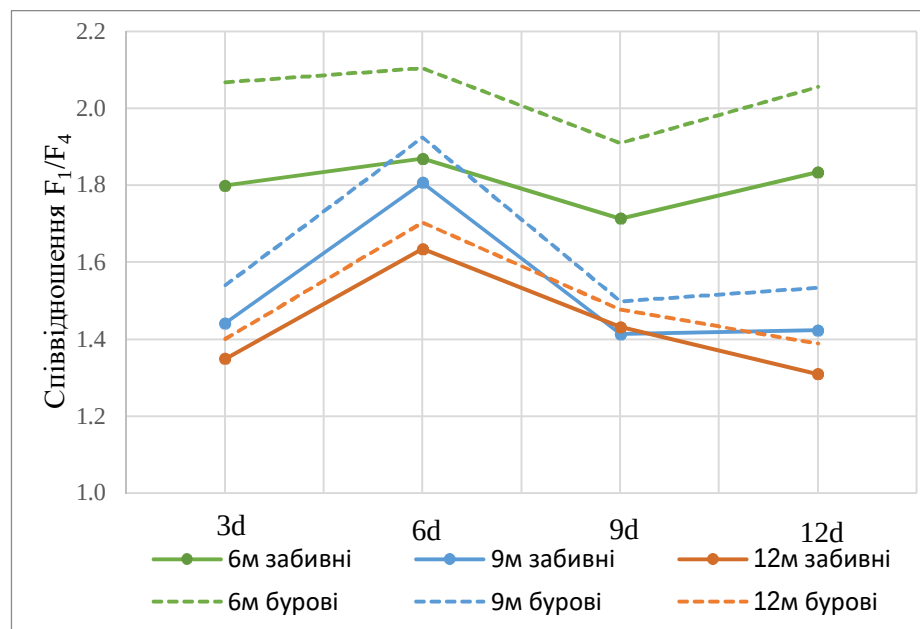


Рисунок 3.47 – Співвідношення F_1/F_4 для піщаного ґрунту (F_1 - навантаження, що сприймається стрічковим пальовим однорядним фундаментом за результатами чисельного моделювання; F_4 - алгебраїчна сума допустимого навантаження на поодинокі палі та стрічковий ростверк за теоретичним розрахунком)

Таблиця 3.12

**Порівняння навантаження на стрічковий пальовий однорядний
фундамент, що визначене різними методами, глистий ґрунт**

№ п/п	Довжина, кількість і крок паль	Навантаження на стрічковий пальовий фундамент, кН/п.м						
		F ₁	F ₂	F ₁ /F ₂	F ₃	F ₁ /F ₃	F ₄	F ₁ /F ₄
		На забивних палях						
1	<i>l</i> = 6 м, 3d	734,0	909,7	0,8	604,5	1,2	655,0	1,1
2	<i>l</i> = 6 м, 6d	455,0	538,5	0,8	325,5	1,4	382,1	1,2
3	<i>l</i> = 6 м, 9d	326,0	414,8	0,8	232,5	1,4	291,1	1,1
4	<i>l</i> = 6 м, 12d	292,0	352,9	0,8	186,0	1,6	245,6	1,2
5	<i>l</i> = 9 м, 3d	940,0	1115	0,8	866,7	1,1	917,3	1,0
6	<i>l</i> = 9 м, 6d	645,0	649,4	1,0	466,7	1,4	523,3	1,2
7	<i>l</i> = 9 м, , 9d	393,0	494,0	0,8	333,4	1,2	392,0	1,0
8	<i>l</i> = 9 м, 12d	327,0	416,3	0,8	266,7	1,2	326,3	1,0
9	<i>l</i> = 12 м, 3d	1177	1369	0,9	1164	1,0	1214	1,0
10	<i>l</i> = 12 м, 6d	821,0	786,3	1,0	627,0	1,3	683,6	1,2
11	<i>l</i> = 12 м, 9d	534,0	591,8	0,9	447,9	1,2	506,5	1,1
12	<i>l</i> = 12 м, 12d	404,0	494,5	0,8	358,3	1,1	417,9	1,0
		На бурових палях						
1	<i>l</i> = 6 м, 3d	421,0	362,0	1,2	219,6	1,9	270,1	1,6
2	<i>l</i> = 6 м, 6d	276,0	243,6	1,1	118,2	2,3	174,8	1,6
3	<i>l</i> = 6 м, 9d	209,0	204,2	1,0	84,5	2,5	143,1	1,5
4	<i>l</i> = 6 м, 12d	204,0	184,4	1,1	67,6	3,0	127,2	1,6
5	<i>l</i> = 9 м, 3d	520,0	515,0	1,0	369,4	1,4	419,9	1,2
6	<i>l</i> = 9 м, 6d	374,0	326,0	1,1	198,9	1,9	255,5	1,5
7	<i>l</i> = 9 м, 9d	244,0	263,0	0,9	142,1	1,7	200,7	1,2
8	<i>l</i> = 9 м, 12d	218,0	231,5	0,9	113,7	1,9	173,3	1,3
9	<i>l</i> = 12 м, 3d	693,0	756,6	0,9	547,5	1,3	598,1	1,2
10	<i>l</i> = 12 м, 6d	477,0	456,1	1,0	294,8	1,6	351,4	1,4
11	<i>l</i> = 12 м, 9d	327,0	355,9	0,9	210,6	1,6	269,2	1,2
12	<i>l</i> = 12 м, 12d	266,0	305,8	0,9	168,5	1,6	228,1	1,2

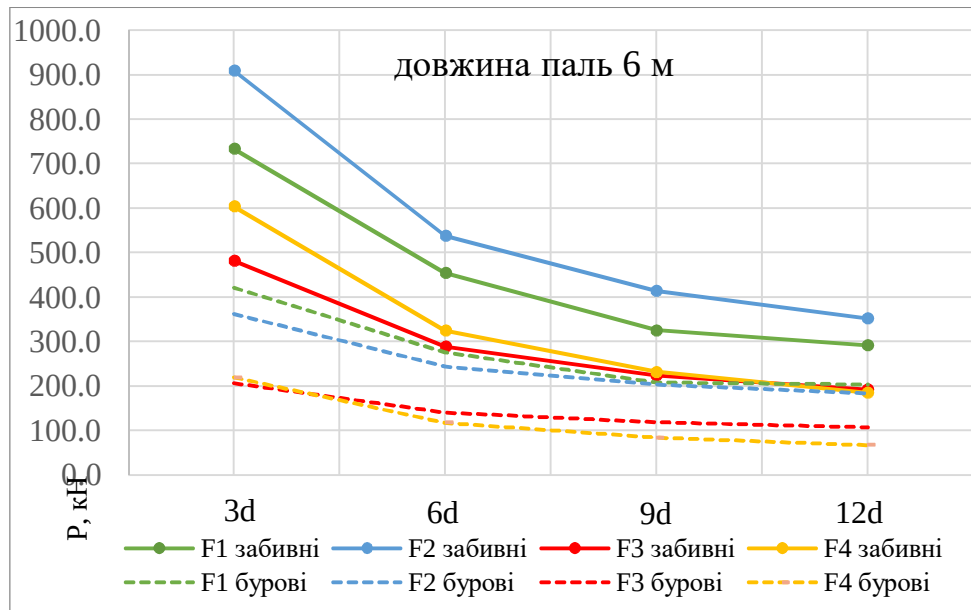


Рисунок 3.48 – Порівняння несучої здатності однорядного стрічкового пальового фундаменту на бурових та забивних палях, що визначена різними методами в залежності від кроку паль довжиною 6 м в глинистому ґрунті

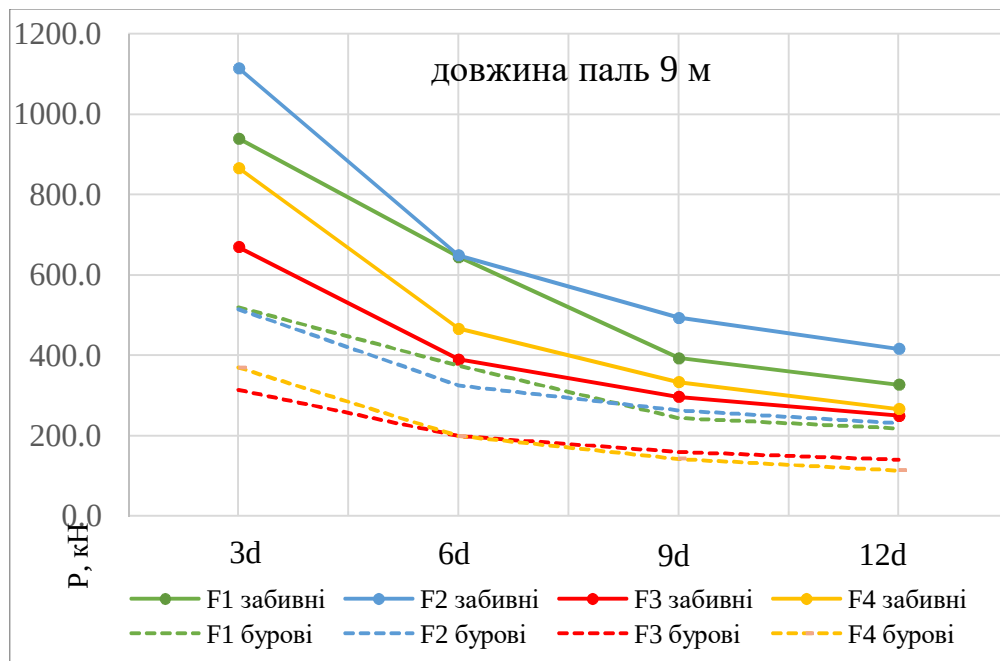


Рисунок 3.49 – Порівняння несучої здатності однорядного стрічкового пальового фундаменту на бурових та забивних палях, що визначена різними методами в залежності від кроку паль довжиною 9 м в глинистому ґрунті

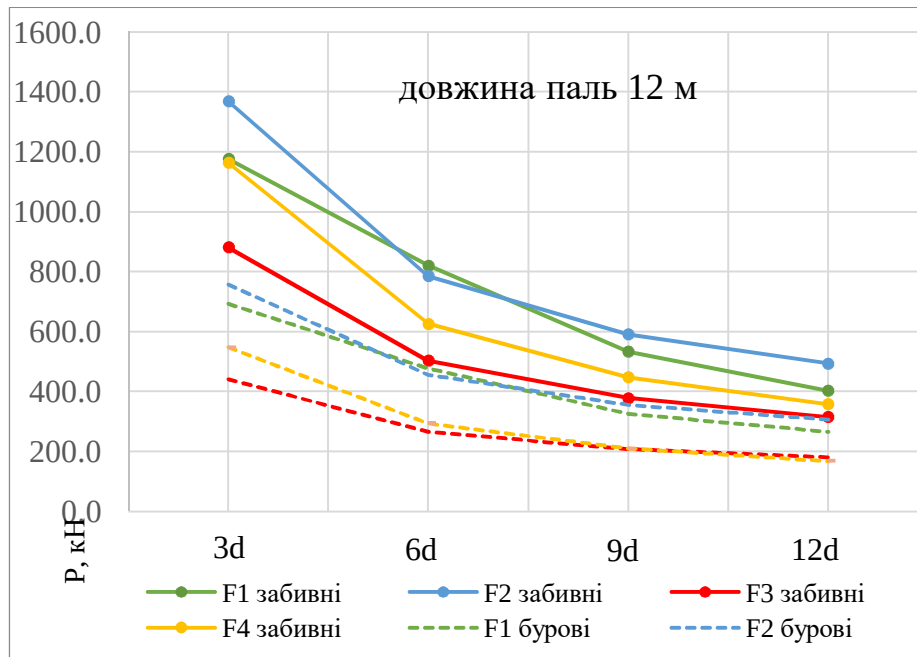


Рисунок 3.50 – Порівняння несучої здатності однорядного стрічкового пальового фундаменту на бурових та забивних палях, що визначена різними методами в залежності від кроку паль довжиною 12 м в глинистому ґрунті

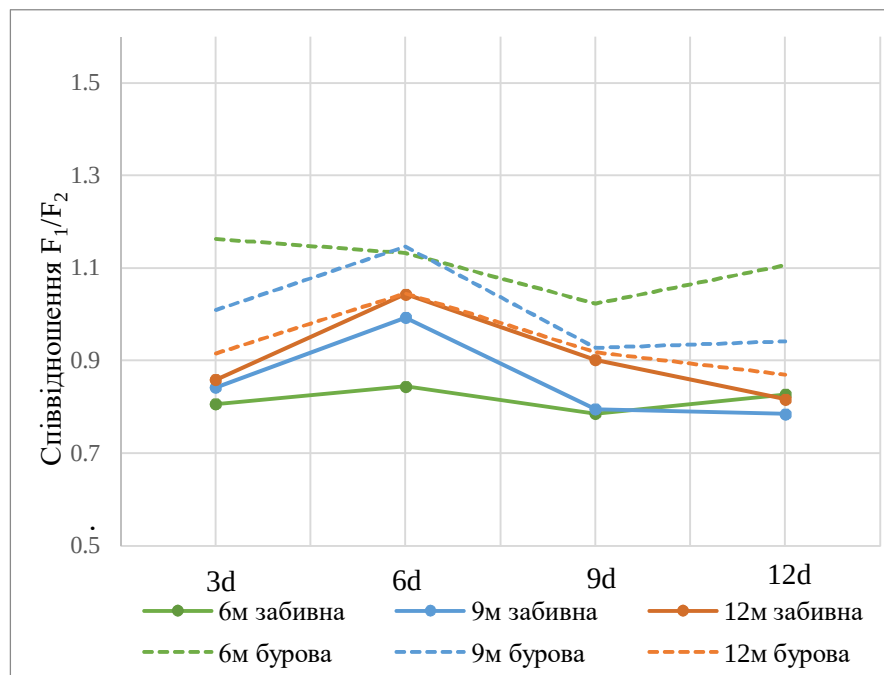


Рисунок 3.51 – Співвідношення F_1/F_2 для глинистого ґрунту (F_1 - навантаження, що сприймається стрічковим пальовим однорядним фундаментом за результатами чисельного моделювання; F_2 - алгебраїчна сума допустимого навантаження на поодинокі палі та стрічковий ростверк за результатами чисельного моделювання)

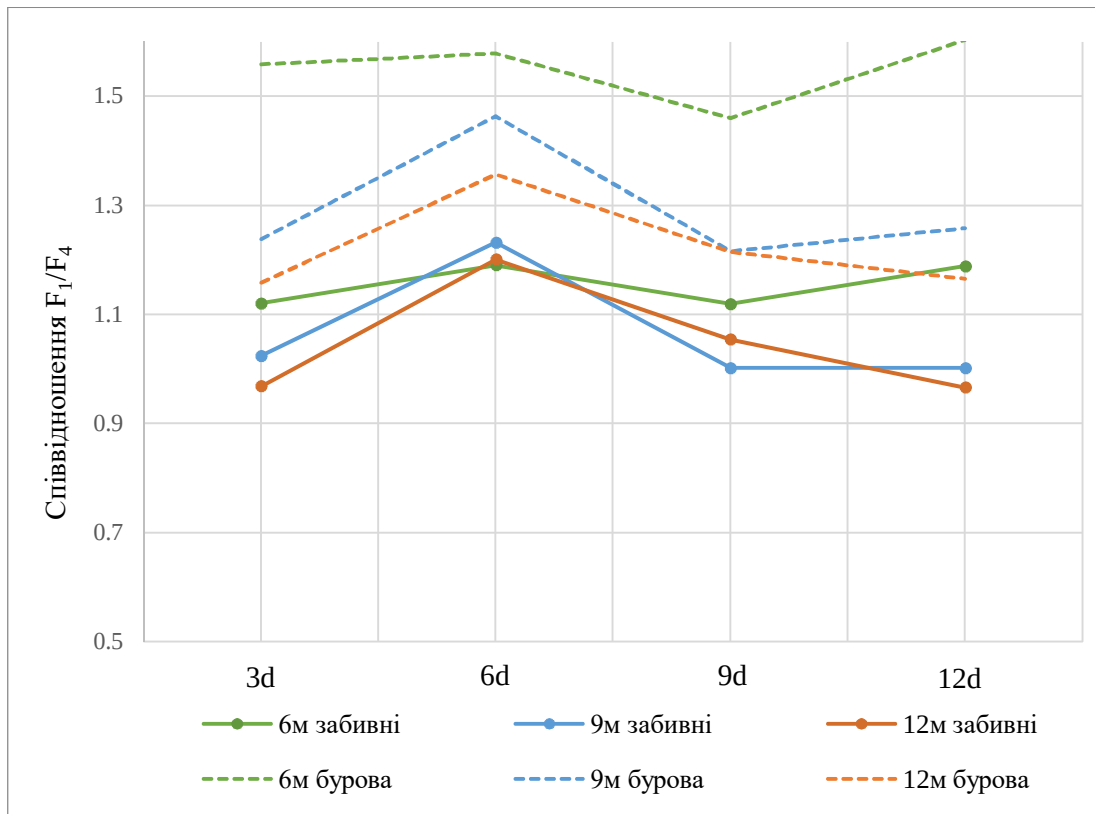


Рисунок 3.52 – Співвідношення F_1/F_4 для глинистого ґрунту (F_1 - навантаження, що сприймається стрічковим пальовим однорядним фундаментом за результатами чисельного моделювання; F_4 - алгебраїчна сума допустимого навантаження на поодинокі палі та стрічковий ростверк за теоретичним розрахунком)

На основі результатів дослідження роботи бурових та забивних палей в складі стрічкового пальового однорядного фундаменту на палях розроблено метод визначення допустимого навантаження на фундамент, який враховує ефект сумісної роботи палей. Метод полягає у включенні у розрахунок ступінь реалізації палей в складі стрічкового пальового однорядного фундаменту (α_p), який залежить від довжини, кроку та способу влаштування (з вийманням та без виймання ґрунту) палей в піщаних та глинистих ґрунтах (табл. 3.13, табл. 3.14). Коефіцієнт α_p прийнятий на основі кореляційного аналізу результатів чисельного моделювання, враховуючи коефіцієнт запасу 1,1.

Послідовність розрахунку за розробленим методом:

- оцінка інженерно-геологічних умов будівельного майданчика та визначення навантаження на фундамент;
- підбір типу та довжини паль, визначення несучої здатності палі за методикою рекомендованою норм [92];
- визначення кількості паль у ростверку з врахуванням ступеня реалізації палі:

$$n = \frac{(1,1 \dots 1,2) N_m}{\alpha_p \cdot N} \quad (3.4)$$

де : n - кількість паль на 1 м.п.;

α_p - ступінь реалізації палі, що приймається за табл. 3.13 та 3.14 відповідно для піщаних та глинистих ґрунтів;

N - допустиме навантаження на одиночну палю;

N_m – навантаження на пальовий фундамент.

- перевірка навантаження на найбільш завантажену палю з врахуванням власної ваги пальового фундаменту (з урахуванням α_p);
- перевірка за другою групою граничних станів (за деформаціями).

Таблиця 3.13

Значення коефіцієнту α_p для бурових і забивних паль в піщаних ґрунтах

піщані ґрунти		3d	6d	9d	12d
6м	забивна	1,60	1,90	1,70	2,35
	бурова	2,00	2,50	2,35	3,40
9м	забивна	1,20	1,85	1,25	1,60
	бурова	1,35	1,90	1,45	1,90
12м	забивна	1,15	1,45	1,15	1,37
	бурова	1,20	1,55	1,25	1,50

Таблиця 3.14

Значення коефіцієнту α_p для бурових і забивних паль в глинистих ґрунтах

глинисті ґрунти		3d	6d	9d	12d
6м	забивна	1,60	1,85	1,70	2,30
	бурова	1,50	1,90	1,85	2,85
9м	забивна	1,25	1,50	1,25	1,55
	бурова	1,10	1,45	1,25	1,65
12м	забивна	1,10	1,30	1,10	1,30
	бурова	1,05	1,25	1,05	1,30

Область застосування коефіцієнта α_p по табл. 3.13 та 3.14 обмежується розрахунком стрічкових пальових однорядних фундаментів при довжині паль до 12 м, оскільки при більшій довжині паль ступінь реалізації палі в складі стрічкового пальового фундаменту близький до 1,0 (рис. 3.34).

Приклад розрахунку стрічкового пальового однорядного фундаменту з врахуванням ступеню реалізації паль

Проект нового будівництва багатоквартирного житлового будинку з вбудованими нежитловими приміщеннями по вул. Пушкіна-Князів Коріатовичів, б/н в м. Вінниця.

Розробка фундаментів виконана на основі матеріалів інженерно-геологічних вишукувань, виконаних у 2017 р. МПВП "Інж-Агро" (табл. 3.14.). За відносну відмітку 0,000 прийнято рівень чистої підлоги першого поверху будівлі, що відповідає абсолютній відмітці 242,150 м за генпланом. Глибина залягання першого горизонту ґрунтових вод становить 2,4-3,1 м від поверхні землі. Схема розміщення паль і ґрунті показана на рис. 3.51.

Проектом передбачено пальові фундаменти на висячих палях (рис.3.52.). Палі занурювати в ґрунт за допомогою задавлювання до проектної відмітки. Ростверки монолітні залізо-бетонні стрічкові під зовнішні та внутрішні стіни.

Таблиця 3.14

Фізико-механічні характеристики ґрунтів

№ шару	Найменування ґрунту	Питома вага кН./м ³	Модуль деформації, МПа	Кут внут. тертя, °	Питоме зчеплення, кПа
		γ	E	ϕ	c
1	Насипний ґрунт будівельне сміття сміття ґрунтово-рослинний шар, суглинок гумусований, з домішкою орг. речовин 1 ог = 0.09	-	-	-	-
2	Суглинок твердий, жовтий, просідний	17,20	11	16	15
3	Суглинок текучопластичний, жовтий	18,30	6	17	13
4	Суглинок тугопластичний, з прошарками м'якопластичного жовтий, сірий	18,70	9	18	16
5	Пісок мілкий середньої щільності жовтий, з лінзами гравіюватого та прошарками суглинка та супіску водонасиченими та домішками дресви	19,30	30	33	1
6	Кора вивітрювання скельних ґрунтів представлена дресвяно-щебенистим глибистим ґрунтом з піщано-глинистим заповнювачем	21,80	48	43	-

Розрахунок

1. Навантаження на фундамент складають 380 кН/п. м внутрішньої стіни по осі 4.

2. В проекті прийнято забивні призматичні палі С7 -35. По осі 4 передбачається однорядне розташування з кроком 1,25 м.

3. Визначаємо кількість паль у ростверку з врахуванням ступеня реалізації палі за результатами досліджень (при допустимому навантаженні на палю $N=520\text{кН}$) за формулою 3.4:

$$n = \frac{(1,1 \dots 1,2) N_m}{\alpha_p \cdot N} = \frac{1,1 \cdot 380}{1,41 \cdot 520} = 0,57 \text{ шт};$$

крок паль $l = 1/0,57 = 1,75 \text{ м.}$

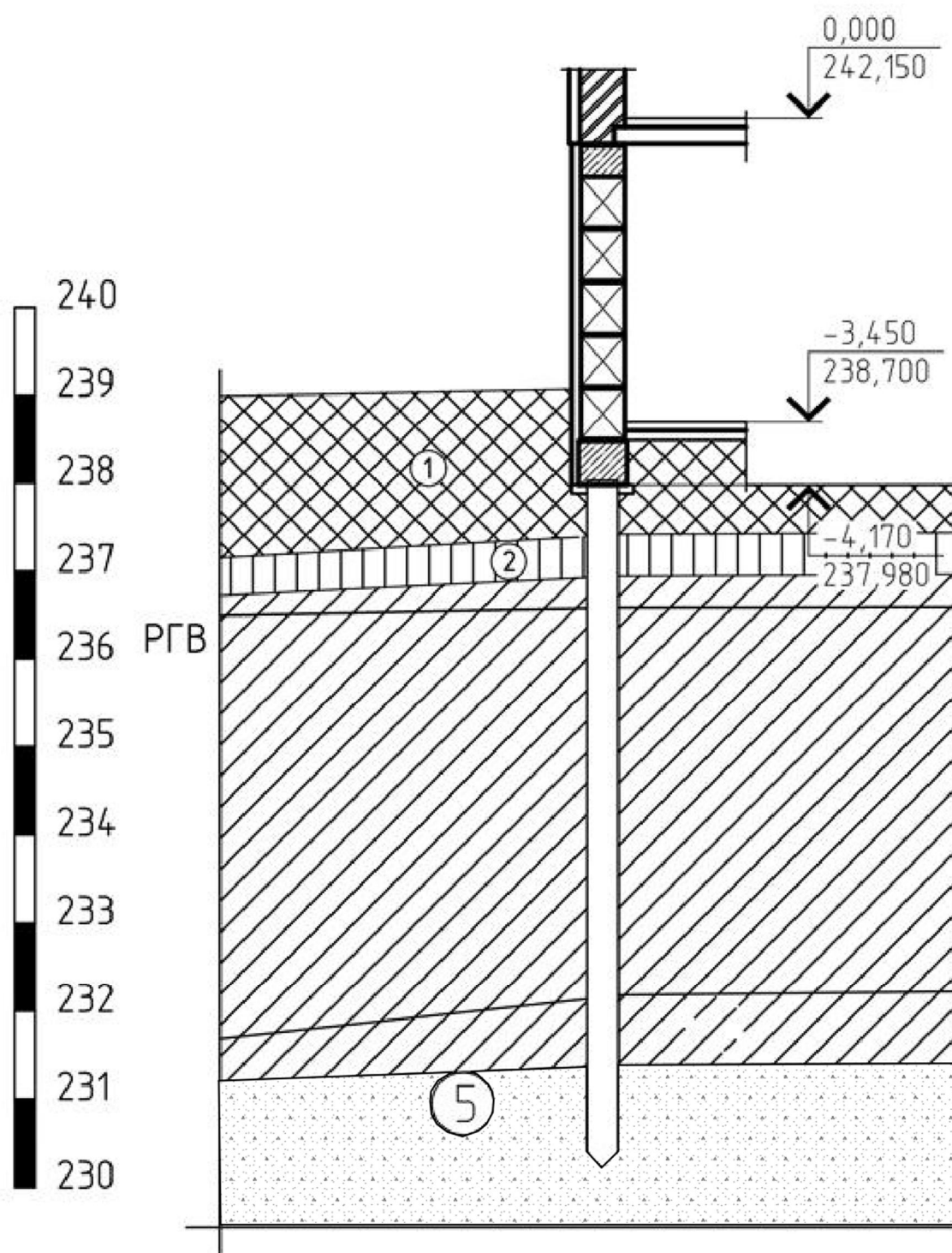


Рисунок 3.51 – Схема розташування паль в ґрунті

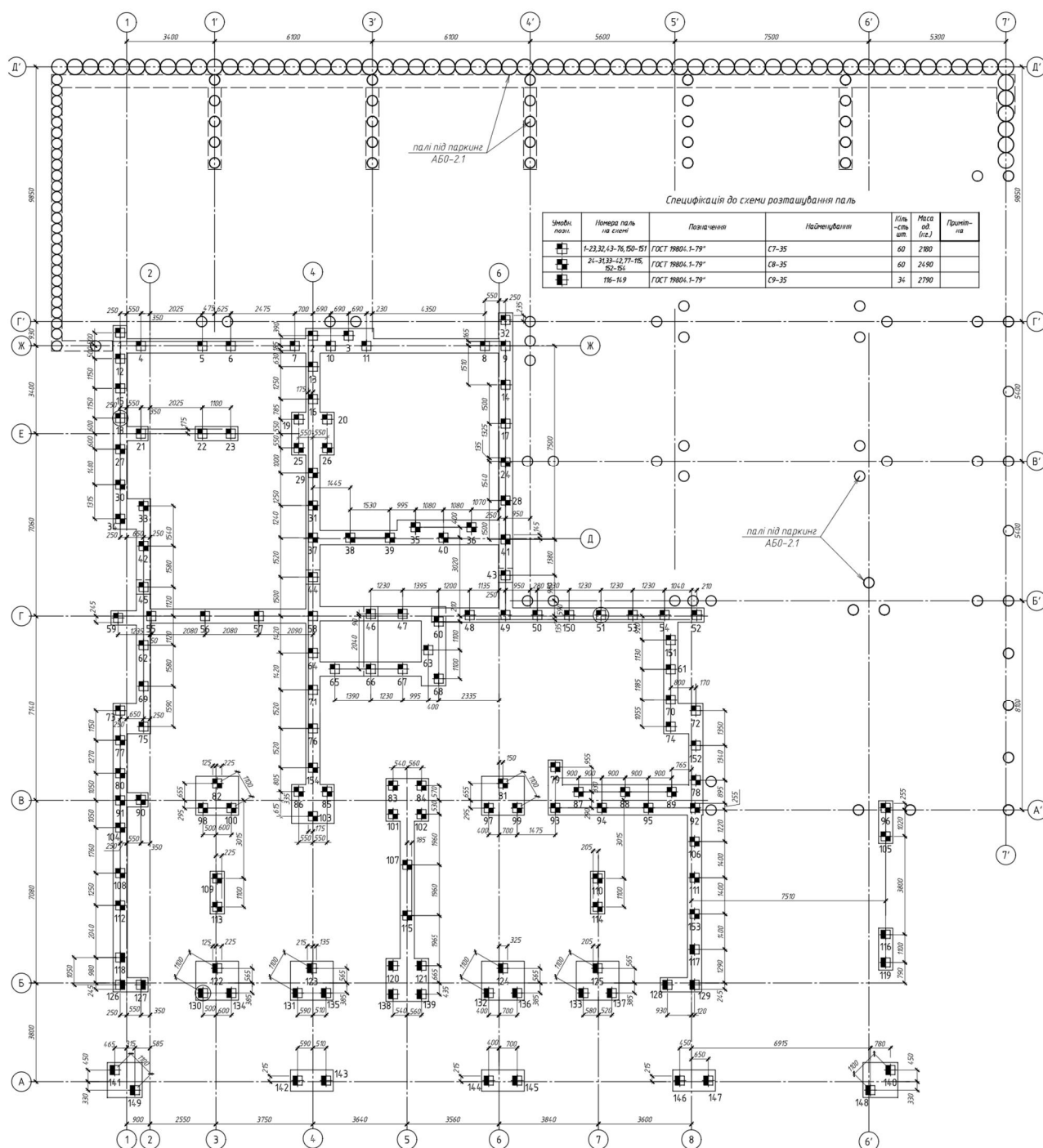


Рисунок 3.52 – План пального фундаменту по проекту

Отже, при врахуванні ступеня реалізації палі в складі стрічкового пального фундаменту за даних ґрунтових умов крок паль збільшився з 1,25 м до 1,75 м, кількість паль зменшилась в 1,4 рази, що підвищує економічну ефективність проектного рішення, але застосування такого рішення можливе лише при проведенні натурних спостережень на об'єкті.

3.5 Висновки до розділу 3

У розділі виконано комплексний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) системи «стрічковий пальовий ростверк – палі – ґрунтова основа» методом скінченних елементів у фізично й геометрично нелінійній постановці за допомогою програмного комплексу SOFiSTiK. Обрана розрахункова МКЕ-модель попередньо пройшла успішну верифікацію шляхом порівняння з даними натурних випробувань одиночних буронабивних і забивних паль, а також дворядного пальового фундаменту. Збіжність результатів моделювання з натурними даними в межах 10% підтвердила високу достовірність обраного розрахункового апарату.

За результатами чисельного моделювання:

- досліджено та підтверджено кількісний характер перерозподілу вертикального навантаження між елементами однорядного фундаменту, що повністю узгоджується з якісними тенденціями фізичного експерименту на мало масштабних моделях. Доведено, що частка навантаження, яка сприймається стрічковим ростверком, закономірно зростає зі збільшенням кроку паль (через збільшення міжпальнової площі контакту з ґрунтом) і знижується зі збільшенням довжини паль ;
- встановлено закономірності роботи низького ростверку залежно від технології влаштування паль:
 - при використанні бурових паль частка навантаження, що припадає на ростверк, є вищою (наприклад, у піщаному ґрунті при коротких палях $l=6\text{м}$ та кроці $9d$ вона сягає 31,5%, а при $12d$ — 30,3% порівняно із забивними палями 29,9% та 28,5% відповідно;
 - зі збільшенням довжини паль до 12 м частка ростверку суттєво знижується (до 6,1%–15,2% для забивних та 6,7%–17,9% для бурових;
 - виявлено вплив ґрунтових умов на роботу системи: порівняльний чисельний аналіз показав, що в піщаних ґрунтах частка вертикального навантаження, яку сприймає низький ростверк, є дещо вищою, а тиск

під його подошвою розподіляється більш інтенсивно, ніж у зв'язних глинистих ґрунтах;

- виконано кількісну оцінку ступеня реалізації несучої здатності паль у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту: найбільший приріст несучої здатності окремої палі порівняно з одиночною спостерігається за максимального кроку паль 12d та мінімальної довжини $l=6$ м, де показник реалізації для бурових паль у піску досягає 3,82, а для забивних — 2,62. Зі збільшенням довжини паль до 12 м коефіцієнт реалізації наближається до одиниці (1,36–1,76 для бурових та 1,29–1,63 для забивних паль), змінюючись надалі несуттєво.

Також в даному розділі виконано оцінку способів визначення допустимого навантаження на стрічкових пальовий однорядний фундамент і запропоновано удосконалення методики розрахунку несучої здатності палі у складі стрічкового пальового однорядного фундаменту з урахуванням способу улаштування паль, кроку і довжини паль та ґрунтових умов. За результатами розрахунків для реального об'єкту будівництва підтверджена економічна доцільність такої методики.

ВИСНОВКИ

1. Доведено закономірність спільної роботи елементів стрічкового пальового однорядного фундаменту, яка полягає у тому, що низький стрічковий ростверк активно взаємодіє з основою та сприймає суттєву частину вертикального навантаження.

2. Встановлено характер перерозподілу зусиль залежно від геометрії пальового фундаменту: частка навантаження, що припадає на підшву ростверку, закономірно зростає зі збільшенням кроку паль (внаслідок розширення міжпальнової площі контакту з ґрунтом) та зменшується із зростанням їхньої довжини (через перерозподіл зусиль на бічну поверхню паль).

3. Виявлено суттєвий вплив технології влаштування паль на роботу системи: у фундаментах із забивними палями ростверк сприймає значно більшу частку навантаження (до 79–87% при кроці 6d, ніж із буровими 52–71%, що зумовлено початковим ущільненням та затисненням піщаного ґрунту в процесі забивання паль).

4. Кількісно оцінено ступінь реалізації несучої здатності паль у складі ряду: встановлено, що цей показник є вищим для бурових паль порівняно із забивними та досягає свого максимуму (коефіцієнт до 3,82 для бурових та 2,62 для забивних у піщаних ґрунтах) при максимальному кроці паль 12d та мінімальній довжині $l=6$ м.

5. Визначено вплив ґрунтових умов на напружено-деформований стан: у піщаних ґрунтах частка вертикального навантаження, яку сприймає низький ростверк, є вищою, а тиск під його підшвою розподіляється інтенсивніше, ніж у зв'язних глинистих ґрунтах.

6. Обґрунтовано достовірність математичного моделювання: розроблена скінченно-елементна модель системи у ПК SOFiSTiK у фізично й геометрично нелінійній постановці показала високу збіжність із натурними

випробуваннями (в межах 10%) та повністю підтвердила якісні закономірності фізичного експерименту.

7. Розроблено та впроваджено практичні рекомендації: запропоновано удосконалену методику розрахунку несучої здатності палі у складі стрічкового однорядного фундаменту, яка комплексно враховує спосіб улаштування, крок, довжину паль та ґрунтові умови, а її застосування на реальному об'єкті будівництва підтвердило високу економічну доцільність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Василенко А. Ю. Про розподілення навантаження між окремими палями в куці. Будівельник. Міжвідомчий науково-технічний збірник Будівельник. Київ, 1978 № 11.
- [2] Whitaker T. Experiments with model piles in groups. Geotechnic, London, 1977. Vol. 7. № 4, P.147–167.
- Козачок Л. Д. Распределения напряжений в основании моделей кустов свай. Міжвідомчий науково-технічний збірник Будівельник. Київ:, 1974. Вып.7: С. 47-51.
- [3] Титко О. В. Оцінка ефективності фундаментів з групи взаємозалежних паль : монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ. 2007. 114 с.
- [4] Burland J. B., Broms B. B., Demello V. Behavior of Foundation and Structures, in: Proc. 9th. ICSMFE, Tokyo, 1977, P.495–546.
- [5] Hanna T. H. Model Studies of Foundations Groups in Sand. Géotechnique. Volume 13 Issue 4, December 1963, P.334-351.
- [6] Katzenbach R., Arslan U., Moorman C., Reul O. Piled raft foundation: interaction between piles and raft. Darmstadt Geotech.: Darmstadt Univ. Technol., 4. 1998, P.279-296.
- [7] Poulos, H. G., Davis, E. H. Pile Foundation Analysis and Design. John Wiley and Sons, New York, 1980. P. 394.
- [8] Randolph M. F. Design method for pile groups and piled rafts. 13th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 5-10 January, New Delhi, 1994. Vol. 5. P. 61-82.
- [9] Nguyen, D. D. C., Jo S. B., Kim D. S. Design method of piled-raft foundations under vertical load considering interaction effects. Computers and Geotechnics. 2013. Vol. 47. P. 16-27.
- [10] Abdolrezayi A., Khayat N. Comparative Three-Dimensional Finite Element Analysis of Piled Raft Foundations. Computational Engineering and Physical Modeling. 2021. P. 19-36.

[11] Davids, A postcard from Dubai design and construction of some of the tallest buildings in the world. Proc. of the CTBUH 8 the World Congress. Dubai, 2008. P. 3-5.

[12] T.T. Abdel-Fattah, A.A. Hemada, Use of creep piles to control settlement of raft foundation on soft clay-case study. Eighth Alexandria Conference on Structural and Geotechnical Engineering. 2014. P. 13–14.

[13] J.A. Hemsley J. A. Design Applications of Raft Foundations Thomas Telford. London, 2000. P. 139

[14] Leung, Y. F., Soga, K., Lehane, B. M., Klar A.L. Role of linear elasticity in pile group analysis and load test interpretation. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 2010. Vol. 12. P. 686-694.

[15] Elwakil A. Z., Azzam W. R. Experimental and numerical study of piled raft system. Alexandria Engineering Journal. 2016. Vol. 55.P. 547-560.

[16] H.G. Poulos. The Piled Raft Foundation for the Burj Dubai - Design and Performance: Apresentaco Programa pos Graduacaoem Geotencia-Brasilia-DF. 2010.

[17] Маєвська І. В., Попов В. О., Блащук Н. В., Чорноскутова К. О., Кореляційний аналіз факторів, що впливають на частку несучої здатності старого стрічкового фундаменту у складі нового після підсилення палями . Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2011. – № 5. – С. 23–27.

[18] Аль-Хасауни Аднан Сакер Хусейн. Особливості роботи забивних паль різної довжини в кущі при дії вертикальних навантажень : автореферат дис. ... кандидата технічних наук: 05.23.02. Київський інж.-буд. ін-т. - Київ, 1990. 20 с.

[19] Маєвська І. В., Блащук Н. В. Урахування роботи ростверку у складі стрічкових пальових та підсилених палями фундаментів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 168 с.

[20] Маєвська І. В., Блащук Н. В., Чобанова К. А. Вплив виду ґрунту на сумісну роботу паль і ростверка в кущовому пальовому фундаменті. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Вінниця, 2013. № 2. С.40-47.

[21] Гембарська М. О. Робота паль у кущі, об'єднаних ростверком з певною. Зб. наук. праць (галузеве машинобудування, будівництво). Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Полтава, 2013. № 3. С. 58-63.

[22] Самородов А. В. Проектування ефективних комбінованих пальових і плитних фундаментів багатоповерхових будівель: монографія. Харків: «Типографія Мадрид», 2017. 204 с.

[23] Бойко І. П., Підлущий В.Л. Дослідження влаштування паль у фундаменті різної довжини. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). ПолтНТУ, 2012, № 4. С.42-48.

[24] Підлущий В.Л. Взаємодія фундаментної плити з палями різної довжини з ґрунтовою багатоповислою основою. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. Київ, 2013.

[25] Ковальський Р. К. Дослідження роботи ґрунту під низьким ростверком пального фундаменту. Світ геотехніки. 2007. №1. С. 17.

[26] Маєвська І. В., Блащук Н.В., Романов С. В. Вдосконалення методики визначення несучої здатності бурових паль. Міжвідомчий науково-технічний збірник Будівельні конструкції. НДІБК, 2016. Вип. 83. С. 616-625.

[27] Гаврилюк, О., Кашоїда, О. ., ЖУК, В. Моделювання взаємодії палі з ґрунтовим середовищем з використанням нелінійної математичної моделі з модифікованим критерієм міцності Кулона-Мора. Основи та Фундаменти. 2024 Вип. 49. С. 43–54.

[28] Бойко, І., Гаврилюк, О. Кашоїда, О., Жук, В. Взаємодія Фундаментів Із Бурових Паль З Основою. Основи Та Фундаменти. 2025. Вип. 50. С. 13–20.

[29] Pidlutskiy, V., Gavryliuk, O., Demidov, V. (2019). Дослідження зміни несучої здатності бурових паль в залежності від методів її визначення. Основи та Фундамент. 2019. Вип. 39. С. 33–40.

[30] Маєвська І.В., Романенко А.В. Аналіз достовірності визначення несучої здатності бурін'єкційних паль за діючими методиками СНіП. Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. КНУБА, 2011. – Вип. 75, кн.2. С. 164-169.

[31] Блащук Н. В., Підгорний О. С. Визначення несучої здатності фундаментів за результатами фізичного моделювання : Дисертація. ВНТУ, 2016.

[32] Пилипчук, М. Л., Капшієнко, Ю. Ю. Визначення несучої здатності паль тертя по боковій поверхні : Магістерська робота, Вінницький національний технічний університет. 2018

[33] Моргун А. С., Мойсеєнко Е. О. Вивчення перерозподілу зусиль в стрічкових пальових фундаментах методом граничних елементів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2019. № 3. С.7-12.

[34] ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти будівель та споруд. Основні положення проектування. [Чинні від 2009-07-01]. Мінрегіонбуд України, 2009. (Державні будівельні норми України).

[35] ДБН В.2.1-10-2009. Зміна 1. Основи та фундаменти будівель та споруд. Основні положення проектування. [2011-07-01]. Мінрегіонбуд України, 2011. (Державні будівельні норми України).

[36] ДБН В. 2.1-10-2018 Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. [Чинні від 2019-01-01]. Київ: Мінбуд України, 2018. (Державні будівельні норми України).

[37] ДСТУ-Н Б EN 1997-1:2010 Єврокод 7. Геотехнічне проектування. Частина 1. Загальні правила (EN 1997-1:2004, IDT). [Чинні від 2013-07-01]. Київ: Мінбуд України, 2013. . – 31 с. – (Державні будівельні норми України).

[38] Бойко І. П. Дослідження взаємодії багатоповерхових будівель як елементів системи «основа–фундамент–надземні конструкції» при статичних та динамічних навантаженнях. Будівельні конструкції. 2008. № 71. С. 69–75.

[39] Бойко І. П. Зміна напружено-деформованого стану основи існуючих фундаментів при зведенні поруч нових будівель в умовах міської забудови. Будівельні конструкції, 2008. № 71. С. 370–376.

[40] Бойко І. П. Напружено-деформований стан пальових фундаменті багатосекційних будинків. Будівельні конструкції. 2011. № 75. С. 159–163.

[41] Винников Ю. Л. До моделювання параметрів вертикально армованих масивів Будівельні конструкції. 2007. № 66. С. 128–135.

[42] Винников Ю. Л. Методики моделювання взаємодії фундаментів з ущільненою основою. Будівельні конструкції. 2008. № 71. С. 325–333.

[43] Винников Ю. Л. Моделювання процесів ущільнення ґрунту при вісесиметричному напружено-деформованому стані основ : дис. ... д. т. н. : 05.23.02. Полтавський нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Полтава, 2004. 440 с.

[44] Зоценко М. Л., Петраш Р. В., Лапін М. І. Порівняльне оцінювання ефекту армування основи за даними штампових випробувань і математичного моделювання. Будівельні конструкції, 2008, № 71. С. 443–451.

[45] Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Єрмакова М. Л. Числове моделювання ущільнення ґрунту важкою трамбівкою у шляховому будівництві. Вісник одеської державної академії будівництва та архітектури. 2001. № 4. С. 91–94.

[46] Петраков А. А. До питання удосконалення методів розрахунку основ та фундаментів. Будівельні конструкції. 2001. № 54. С. 534–539.

[47] Шапиро Д. М. Курс лекцій по розрахунку і моделюванню геотехнічних об'єктів. Будівельні конструкції. НДІБК, 2011. № 75. С. 643–647.

[48] Nguyen, N. V., Vinh, L. B., & Vo, T. T. Load-sharing mechanism of piled-raft foundation: a numerical study. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2022. № 26. P. 7916-7931.

[49] Reul O., Randolph M. Combined Pile-Raft Foundations: Design and Practice. CRC Press, 2024.

[50] Сорока П. Особливості використання бурових паль малого діаметру для ефективного вирішення геотехнічних задач. Основи та Фундаменти. 2024. № 48. С. 139-149.

[51] Сорока П. Порівняння несучої здатності бурової палі малого діаметру, отриманої за результатами натурних випробувань і числового моделювання. Основи та Фундаменти. 2023. № 47. С. 38-48.

[52] Бойко І. П., Гаврилюк О. В. Визначення несучої здатності бурових паль в піщаній основі. Основи та фундаменти. 2014. № 35. С. 60-67.

[53] Гоцуляк Є. О., Лорнієнко М. В., Шельменко А. М. Розрахунок осадки і несучої здатності паль при їх взаємодії в плитному фундаменті. 2010.

[54] Підлуцький В., О. Гаврилюк О., Демідов В. Дослідження зміни несучої здатності бурових паль в залежності від методів її визначення. Основи та Фундаменти. 201. № 39. С. 33-40.

[55] Bralović N., Despotović I., Kukaras D. Experimental Analysis of the Behaviour of Piled Raft Foundation Structures with a Group of Piles in Loose Sand. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 1.

[56] Бойко І., Сахаров В., Литвин О. Взаємодія несучих конструкцій будинку з палевою основою. Bases and Foundations. 2020. №. 40. С. 21-27.

[57] Poulos, H.G. Analysis of the settlement of pile groups. Géotechnique. 1968. Vol. 18. P. 449-471.

[58] Randolph M.F. Wroth C.P. Analysis of deformation of vertically loaded piles. Journal of Geotechnical Engineering Division. 1978. Vol. 104. P. 1465-1488.

[59] El Sharnouby, B. Novak, M. (). Stiffness constants and interaction factors for vertical response of pile groups. Canadian Geotechnical Journal. 1990. № 27. P 813-822.

[60] Southcott P.H. Small J.C. Finite layer analysis of vertically loaded piles and pile groups. Computers and Geotechnics. 1996. № 18. P. 47-63.

[61] Mylonakis G. Gazetas G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil. Géotechnique. 1998. № 48. P. 55-72.

[62] Cao M. Chen L. Z. Analysis of interaction factor between two piles. Journal of Shanghai Jiao Tong University. 2008. № 13. P. 171-176.

[63] Sales M. M., Curado T. D. S. Interaction factor between piles: limits on using the conventional elastic approach in pile group analysis. Soils and Rocks. 2018. № 4. P/ 049-060.

[64] Reul O., Randolph M. Combined Pile-Raft Foundations: Design and Practice. CRC Press. London, 2024. P. 270.

[65] Tran Q. K., Huynh T. M. L., Pan E., Lin C. P., Rasool Y., Ghaffar F. Semi-Analytical Solution of Time-Harmonic Soil–Pile Interaction Using Love Numbers in Transversely Isotropic and Layered Half-Spaces. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2026.

[66] Самородов О. В., Бондар О. Чисельні дослідження впливу моделі основи у вигляді шару скінченної розподільчої здатності на напружено-деформований стан пальово-плитного фундаменту висотної будівлі. *Науковий вісник будівництва*. 2025. № 113. С. 149-165.

[67] Самородов О. В., Дитюк О. Є., Табачніков С. В. Натурні дослідження початкових осідань паль, які не з'єднані з плитою, у складі комбінованого плитно-пального фундаменту. *Український журнал будівництва та архітектури* 2022. № 6. С. 90-98.

[68] Самородов О. В., Табачніков С. В., Дитюк О. Є., Муляр, Д. Л. Методика моделювання початкових осідань паль у складі комбінованого плитно-пального фундаменту в програмному комплексі «Plaxis 3d Foundation». *Науковий вісник будівництва*, = 2021. № 105. С. 106-114.

[69] Самородов О. В., Табачніков С. В. Метод визначення сил опору по бічній поверхні паль. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. №151. С. 49-55

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

· **матеріали дисертаційної роботи, викладені у виданнях, що внесені до переліку фахових для захисту дисертацій з технічних наук:**

[1] Блащук Н. В. Маєвська І. В. Шмундяк О. Ю. Перебийніс М. В. Різниця в роботі бурових і забивних паль у складі стрічкового пальового фундаменту. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. 2023. №35, вип. 2. С.89-97. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2023-2-89-97>

[2] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. Різниця в роботі бурових і забивних паль за результатами фізичного моделювання. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. 2025. №39, вип. 2. С. 65-69. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2025-2-65-69>

[3] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. Різниця в роботі бурових і забивних паль в складі стрічково-пальового фундаменту за результатами фізичного моделювання. *Основи та фундаменти*. 2025. №51, С.36-42. DOI: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.51.2025.36-42>

[4] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. Ступінь реалізації паль в складі стрічкового фундаменту за результатами випробувань на маломасштабних моделях. *Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві*. 2026. №40, вип. 1. С. 76-82 DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2026-1-76-82>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[5] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. «Різниця в роботі бурових і забивних паль в складі стрічкового фундаменту» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 21 – 23

листопада

2023

р.,

URI:

<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/818/1427/2698-1>

[6] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. «Фізичне моделювання на маломасштабних моделях стрічкових пальових фундаментів під дією вертикального навантаження» на Всеукраїнській наук.-техн. Конференції «Енергоефективність в галузях економіки України», Вінниця, Україна, 19 – 21 листопада 2025 р.,

URI: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/view/939/1636/2956-2>

[7] Перебийніс М. В. Блащук Н. В. «Ступінь реалізації бурових паль в складі стрічкового однорядного пальового фундаменту» на Всеукраїнській наук.-практ. інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2026)», Вінниця, Україна, 22-26 червня 2026 р., URI:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2026/paper/viewFile/29566/24651>

ДОДАТОК Б

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної роботи та організації освітнього процесу



Вінницького національного технічного університету

«20» травня 2026 р.

Олександр ПЕТРОВ

АКТ

**про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Перебийноса Михайла Володимировича
на тему: «Різниця в роботі бурових і забивних паль у складі пальового
фундаменту»**

Члени комісії у складі: зав. кафедрою будівництва, міського господарства та архітектури к. т. н., доцента Швеця В. В., заступника декана з навчальної роботи і соціальних комунікацій, к. т. н., доцента Христича О. В., к. т. н., доцента Маєвської І. В., склали цей акт про підтвердження того, що результати дисертаційних досліджень аспіранта Перебийноса М. В. впроваджено у навчальний процес (лекції, практичні заняття) за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», а саме:

- проектування однорядних стрічкових пальових фундаментів з врахуванням сумісної роботи паль та ростверку в різних ґрунтових умовах (для підготовки магістрів - дисципліна «Проектування основ та фундаментів в складних умовах»);

- числове моделювання пальових фундаментів методом скінчених елементів (для підготовки докторів філософії - дисципліна «Удосконалення наявних і розробка нових ефективних будівельних процесів, конструкцій та матеріалів з використанням нових засобів механізації і будівельної техніки»).

Результати впровадження у навчальний процес матеріалів дисертаційного дослідження забезпечують підвищення ефективності навчання здобувачів, а також якості підготовки фахівців з будівництва та цивільної інженерії.

Голова комісії

Члени комісії

Віталій Швець

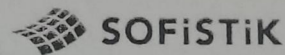
Олександр Христич

Ірина Маєвська

ДОДАТОК В

Копії ліцензії на програмне забезпечення SOFiSTiK

E-1e EDU



End-User Licence Agreement (Educational)

between Licensor	and Licensee	
SOFiSTiK AG Flataustraße 14 90411 Nürnberg Germany	Vinnytsia National Technical University Khmelnyske shose 95 21021 Vinnytsia Ukraine	
("SOFiSTiK")	("Customer")	
Date: 29.05.2023	ID: 214426/002P	Cust.-No.: 3165

SOFiSTiK agrees to license to the Customer the software products identified in the table below on a permanent basis (software purchase) for non commercial use in the field of research and teaching. SOFiSTiK's End-User Licence Terms (current as of: 01-08-2021) apply accordingly. SOFiSTiK is not the seller of the software.

Item	Software Product	Version	Quantity
1	UNIVERSITY-CL	2023	1
2	UNIVERSITY-TL	2023	2

Attachments: SOFiSTiK's End-User License Terms - current as of: 01-08-2021 (all attachments are available under <https://www.sofistik.com/disclaimer>)

Nürnberg, date 01.06.2023
v. A. Follert *ppa. S. Rühl*

Vinnytsia, date 31.05.2023

SOFiSTiK
 Signature (SOFiSTiK AG)

Flataustr. 14 · D-90411 Nürnberg
 Tel: +49 (0)911 39901-0
www.sofistik.de · info@sofistik.de

Signature (Customer)
 Rector Viktor BILCHENKO

