

МЕХАНІКА ҐРУНТІВ ТА ФУНДАМЕНТИ

УДК 624.15

DOI: 10.31649/2311-1429-2026-1-59-69

О. Ю. Шмундяк

І. В. Масвська

ВПЛИВ ЖОРСТКОСТІ РОСТВЕРКА НА РЕАЛІЗАЦІЮ РОБОТИ РОСТВЕРКА І ПАЛІ У СКЛАДІ СТОВПЧАСТОГО ПАЛЬОВОГО ФУНДАМЕНТА

Вінницький національний технічний університет

У даній роботі пропонуються дослідження впливу товщини ростверка у сукупності з розмірами плити ростверка (основні параметри, що визначають його жорсткість) на характер перерозподілу зусиль між компонентами пальового фундаменту під колону. Шляхом моделювання у програмному комплексі ЛІРА САПР досліджено, як реалізують себе ростверк і палі при спільній роботі у пальовому фундаменті стовпчастого типу при зміні товщини h і розмірів в плані B (тобто жорсткості) ростверку, а також розміщення паль в плані, їх довжини, кількості і виду ґрунту. Програма досліджень дозволила аналізувати вплив на напружено-деформований стан елементів фундаментів таких параметрів: товщини ростверка, яка була прийнята 700, 1000 та 1300 мм; характеру розміщення і кількості паль в групі, включаючи розріджене розміщення паль, розмірів ростверка; довжини паль, відповідно 3 м та 10 м при поперечному перерізі 300х300 мм. Дослідженнями розглядається два варіанти ґрунтової основи: однорідний піщаний та однорідний глинистий ґрунт. Основна увага приділена варіюванню товщини ростверка при різних комбінаціях його інших параметрів.

Встановлено, що при збільшенні жорсткості ростверку зростає навантаження, яке сприймає паливий куц, але це збільшення несуттєве. Дослідження показали, що таке зростання несучої здатності куца по мірі збільшення товщини ростверка виникає в основному через збільшення навантаження, яке сприймають палі. Для збільшення ефективності роботи паль можна рекомендувати варіювати товщиною ростверка за умови, що початковий показник жорсткості ростверка $B/h > 6$. Жорсткість ростверка є головним чинником, що впливає на перерозподіл зусиль між палями групи. У паливих фундаментах, у яких початковий показник жорсткості $B/h > 6$ (гнучкі ростверки), найбільше навантаження припадає на палі в середині групи. Але вже при зменшенні показника жорсткості до $B/h = 4,7$ (більш жорсткі ростверки) перерозподіл зусиль призводить до більшого навантаження крайніх і кутових паль. При подальшому зростанні жорсткості ростверків найбільш навантаженими виявляються кутові палі, найменші – центральні. Отже при збільшенні товщини ростверку виникає перерозподіл зусиль між палями в бік зовнішнього контура. Аналіз величини осередженого навантаження на палю групи свідчить про його збільшення, але несуттєве у порівнянні із збільшенням навантаження на кутові палі.

В результаті збільшення жорсткості ростверків зростають згинальні моменти і поперечні сили в їх тілі. Кількісно це зростання незначне.

Ключові слова: забивні палі, ростверк, жорсткість, навантаження, несуча здатність, осідання, розподіл зусиль між палями, напружено-деформований стан.

Стаття надійшла до редакції / Received 13.02.2026
Прийнята до друку / Accepted 01.04.2026
Опубліковано / Published 29.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Шмундяк О.Ю., Масвська І.В.

Вступ

Попередні дослідження [9] підтвердили, що при врахуванні характеру розподілу зусиль у складі пальового фундаменту між палями та ростверком можна одержати збільшення несучої здатності фундаменту в цілому. На величину підвищення несучої здатності у порівнянні з визначеною за методикою норм впливають такі фактори: спосіб влаштування паль, їх розміри, кількість паль в групі, відстань між палями, ступінь піддатливості ґрунтової основи. Не дивлячись на доволі значну кількість досліджень, їх результати ще не дозволяють оцінити несучу здатність фундаменту кількісно з урахуванням всіх факторів, що впливають на результат. Слід відзначити, що не всі фактори, які впливають на роботу фундаменту, однаково детально досліджені. Одним з таких факторів, які потребують більш детального дослідження, є жорсткість ростверка куцового пальового фундаменту під колону.

З відомих робіт, які розглядали вплив жорсткості ростверка на роботу пальового фундаменту з низьким ростверком, не можна поки що виявити доцільність збільшення товщини ростверка у порівнянні з мінімальною товщиною при проектуванні (мінімальна товщина підбирається розрахунком на продавлювання і зріз). Якщо буде виявлено, що збільшення товщини ростверка

позитивно впливає на реалізацію несучої здатності паль або ростверка в складі групи, можна буде рекомендувати застосовувати ростверки підвищеної жорсткості при проєктуванні пальових фундаментів.

Метою даної роботи є виявлення впливу жорсткості ростверка (відношення розмірів плити ростверка в плані до його товщини) на величину його осідання та несучу здатність фундаменту, пов'язану з характером перерозподілу зусиль між його елементами.

Для підтвердження або спростування припущення про збільшення ефективності роботи пальового фундаменту при збільшенні жорсткості ростверку в роботі були поставлені такі задачі:

- виконати моделювання ростверків, забивних паль та їхніх груп у ґрунтового середовищі з використанням програмного комплексу ЛІРА-САПР 2024;

- виявити найбільш впливові фактори пальових груп, крім товщини і розмірів ростверків в плані, для варіювання при чисельному експерименті, метою якого є аналіз їх впливу на сумісну роботу ростверку і паль у складі групи. Додатковим фактором, який планувалось проаналізувати, є характеристики ґрунту основи;

- здійснення чисельного моделювання роботи стовпчастих пальових фундаментів, а також їх ростверків без паль при різній товщині і розмірах ростверків;

- на підставі одержаних результатів встановлення залежностей ступенів реалізації несучої здатності паль і ростверка від збільшення товщини ростверка та інших факторів.

Окремі дослідження впливу жорсткості ростверка на роботу пальового фундаменту виконувались як зарубіжними, так і вітчизняними вченими.

В роботі [1] наводяться результати експериментальних досліджень, проведених з метою оцінки впливу відносної жорсткості ростверк-ґрунт на характер поведінки пальових фундаментів у піщаному ґрунті. Зафіксований ефект зменшення нерівномірності осідань в результаті збільшення відносної жорсткості ростверк-ґрунт.

Дослідники в роботі [2] розглядали зміну граничного навантаження і повного осідання пальових фундаментів, розміщених у органічній глині при зміні жорсткості ростверка. Ними було виявлено, що збільшення жорсткості ростверка призводить до збільшення несучої здатності і зменшення осідання системи палі-ростверк. Чисельне моделювання пальових фундаментів виконувалось за допомогою програмного продукту PLAXIS 3D.

У статі [3] представлені результати вивчення роботи пальових фундаментів, виконаних в пластичній глині. Аналізувався вплив кількості паль, їх довжини, а також відносної жорсткості ростверк-ґрунт на роботу пальового фундаменту. Особливістю проаналізованих фундаментів є наявність піщаної подушки під ростверком. Для підтвердження достовірності математичного моделювання авторами були проведені експериментальні випробування на маломасштабних моделях. В цій роботі також відзначено, що при збільшенні відносної жорсткості ростверк-ґрунт зменшується різниця осідань окремих точок підшови ростверка. Крім того, пальовий фундамент з високим значенням відносної жорсткості ростверк-ґрунт показав покращення розподілу навантажень між палями. Із збільшенням жорсткості ростверка незначно збільшувалось загальне навантаження на палі.

Результати дослідження у [4], виконаного шляхом скінчено елементного моделювання у PLAXIS 3D, довели, що відносна жорсткість ростверк-ґрунт є основним чинником, що впливає на нерівномірність осідань окремих точок підшови ростверку пальового фундаменту. Із збільшенням товщини плити ростверка (його жорсткості) максимальне осідання спочатку зменшується, а потім починає несуттєво збільшуватись після досягнення деякої граничної товщини плити. Автор пов'язує це із збільшенням ваги плити при надмірному збільшенні її товщини, що призводить до виникнення додаткового осідання.

У статі [5] досліджувався вплив товщини ростверка (в межах від 0,5 м до 3,0 м) на характер перерозподілу навантаження між палями в умовах ґрунтів з різною піддатливістю з використанням тривимірного 3D-моделювання в програмному комплексі ABAQUS. Досліджуваний фундамент складався з 16 паль. Дослідження показало, що ростверк незначної товщини працює як гнучка пластина, наслідком чого є нерівномірний розподіл навантаження між палями. Якщо ж ростверк має значну товщину, то розподіл зусиль між палями стає рівномірним. Товщина ростверку по різному проявляється у ґрунтах з різною піддатливістю. А саме, на щільному ґрунті ростверк може працювати як жорсткий, а на слабкому ґрунті – як гнучий. При збільшенні жорсткості ростверка має місце певна межа, коли подальше збільшення товщини вже не змінює розподіл навантажень між палями, яке стає рівномірним.

Дослідження, проведене у роботі [6], мало за меті порівняння несучої здатності трьох різних типів фундаментів, зокрема: фундаментів мілкого закладання з розмірами як у ростверків, пальових груп без ростверків та пальово-плитних фундаментів. Дослідження проводилось шляхом чисельного моделювання в програмних комплексах PLAXIS 2D та GEO5. При дослідженні варіювались: довжина та поперечний переріз паль, тип ґрунтів (піщані або глинисті), а також вплив додаткових навантажень. Кількість паль у куці 6 шт. Відслідковувався вплив товщини ростверка на осідання і структурну стійкість. Здійснювався вибір оптимальної товщини ростверка пальового фундаменту за критеріями довгострокової стійкості, а також експлуатаційних характеристик конструкцій. Одержано, що збільшення товщини ростверка на 50% призводить до зниження осідання на величину 13,88% з одночасним підвищенням міцності на 16,66%.

У роботі [7] розглядались дуже жорсткі і дуже гнучкі ростверки з точки зору перерозподілу зусиль між палями фундаменту. У програмному комплексі Plaxis 3D моделювався стовпчастий пальовий фундамент з 5 паль. Розглядались два варіанти відстані між палями (3d та 6d). Ростверк великої жорсткості рівномірно розподіляє навантаження між палями. Під гнучким ростверком найбільше зусилля сприймає центральна паля, а палі зовнішнього контуру погано включаються у роботу.

Вплив жорсткості ростверка на перерозподіл зусиль між палями вивчався і у роботі [8]. Дослідження проводилось шляхом математичного моделювання методом скінчених елементів. Розглядалась група з 5 паль при діаметрі 420 мм. В якості основи пальового фундаменту розглядався дрібний пісок середньої щільності. Варювалась відстань між палями та товщина ростверку (300 та 500 мм). Аналізувалась зміна навантаження на куц, а також різниця осідань кутових та центральної паль при зміні варіюваних параметрів. Зроблені висновки, що збільшення товщини ростверку призводить до зменшення осідання. Причиною є зростання жорсткості ростверку.

Робота, направлена на вдосконалення методик розрахунку пальового фундаменту з врахуванням включення у роботу низьких ростверків, проводиться науковцями кафедри БМГА ВНТУ. Для прикладу у статі [9] відзначено, що чинниками, які впливають на перерозподіл зусиль між палями фундаменту, є розвиток навантаження в часі і жорсткість ростверку. При жорстких ростверках на початкових етапах завантаження найбільше зусилля припадає на кутові палі, найменше на центральні. Поступове збільшення навантаження і наближення його до граничного значення спричинює перерозподіл зусиль з кутових і крайніх паль до центральної. Причиною цього є вичерпання несучої здатності кутових паль. При гнучких ростверках не спостерігається перевантаження кутових паль, навантаження розподіляється між палями групи спочатку рівномірно, а по мірі зростання навантаження найбільше зусилля бере на себе центральна паля.

Можна зробити висновок, що питання впливу жорсткості ростверка на роботу пальової групи вивчено ще не достатньо. Одержані різними авторами результати поки не дозволяють зробити висновки щодо доцільності збільшення товщини ростверка при проектуванні стосовно мінімальної товщини, визначеної граничними умовами на продавлювання і зріз.

Планування та методи дослідження

Дослідження проводилось шляхом моделювання у програмному комплексі ЛІРА-САПР 2024 пальових фундаментів під колону. Розглядались забивні палі [10]. Враховувалась робота паль і фундаментів в лінійній фазі. В якості моделей паль розглядались багатовузлові стержні, які мають характеристики жорсткості такі самі, як палі.

Приймалось жорстке примикання стрижня палі до пластини (оболонки) ростверку. Включення у роботу ґрунту під «низьким» ростверком здійснювалось шляхом підключення «пружних стержнів» (за моделлю Вінклера-Пастернака). Для ростверків вводились коефіцієнти жорсткості C_1 та C_2 , для кінцевих елементів KE-51 для передачі тиску через систему Ліра "ҐРУНТ". В системі "ҐРУНТ" задавались характеристики ґрунтів по свердловинах з подальшим уточненням тиску під подошвою ростверку.

При плануванні дослідження передбачалось варіювання таких параметрів: товщини і розмірів ростверку, кількості паль, довжини паль, розміщення паль у ростверку. Додатковим параметром є тип ґрунтових умов (розглядались однорідний піщаний та однорідний глинистий ґрунти з різним модулем деформації).

При дослідженні розглядались такі параметри пальових груп:

- пальовий фундамент під колону з підколони́ком з розмірами в плані 0,5x0,5 м;

- товщина ростверків 0,7, 1,0 та 1,3 м;
- забивні палі з поперечним перерізом 300 x 300 мм і довжиною 3,0 та 10,0 м;
- бетон палі і ростверків С20/25 (В25).

У таблиці 1 наведені схеми розміщення палі у ростверках, задійсенні про моделюванні. Кожна схема розглядалась для двох довжин палі.

Характеристики прийнятого для моделювання піщаного ґрунту: пісок дрібний, $\gamma = 18,6 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,67$, $c = 2 \text{ кПа}$, $\phi = 32^\circ$, $E = 28 \text{ МПа}$. Характеристики прийнятого для моделювання глинистого ґрунту: суглинок, $\gamma = 18,5 \text{ кН/м}^3$, $e = 0,75$, $I_L = 0,25-0,5$, $c = 23 \text{ кПа}$, $\phi = 21^\circ$, $E = 14 \text{ МПа}$.

Таблиця 1

Програма математичного моделювання роботи пального фундаменту за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР 2024

Група дослідів	Довжина та поперечник палі	Розміщення палі у ростверку	Група дослідів	Довжина та поперечник палі	Розміщення палі у ростверку
1	L = 3 м, d = 0,3 м		5	L = 3 м, d = 0,3 м	
	L = 10 м, d = 0,3 м			L = 10 м, d = 0,3 м	
2	L = 3 м, d = 0,3 м		6	L = 3 м, d = 0,3 м	
	L = 10 м, d = 0,3 м			L = 10 м, d = 0,3 м	
3	L = 3 м, d = 0,3 м		7	L = 3 м, d = 0,3 м	
	L = 10 м, d = 0,3 м			L = 10 м, d = 0,3 м	
4	L = 3 м, d = 0,3 м		8	L = 3 м, d = 0,3 м	
	L = 10 м, d = 0,3 м			L = 10 м, d = 0,3 м	

Крім груп палі з різним розміщенням в плані передбачене моделювання окремих їх елементів:

- одиночних палі довжиною 10,0 та 3,0 м у відповідних ґрунтах;
- фундаментів мілко закладання з розмірами, що відповідають розмірам ростверків, у відповідних ґрунтах.

Результатами моделювання у програмному комплексі є: залежності навантаження-осідання, розподіл напружень і осідань по підшві ростверка, величини зусиль у палях, величини напружень у плиті ростверку.

Для прикладу на рис. 1 та 2 наведені розрахункові моделі пальових фундаментів для групи дослідів 2.

Змінення навантаження на моделі відбувалось від 0 до 10000 кН з покроковим збільшенням.

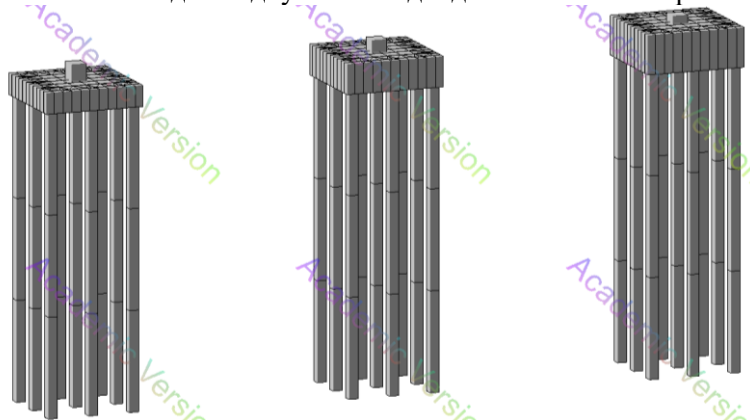


Рисунок 1 – Розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту при довжині палі 10 м

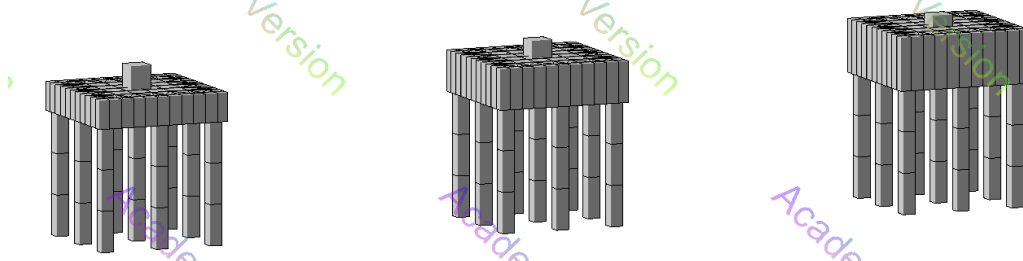


Рисунок 2 – Розрахункові моделі стовпчастого пальового фундаменту при довжині палі 3 м

Результати визначення напружено-деформованого стану фундаментів з 9 палі довжиною 3 м з розмірами ростверка 3,2x3,2 м (група дослідів 2) при навантаженні на куц 10000 кН для прикладу наведені на рис. 3, 4, 5.

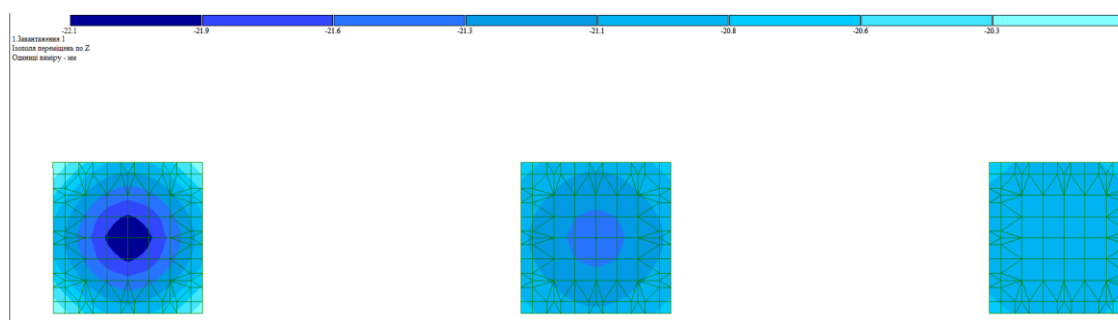


Рисунок 3 – Осідання ростверка при зміні його товщини

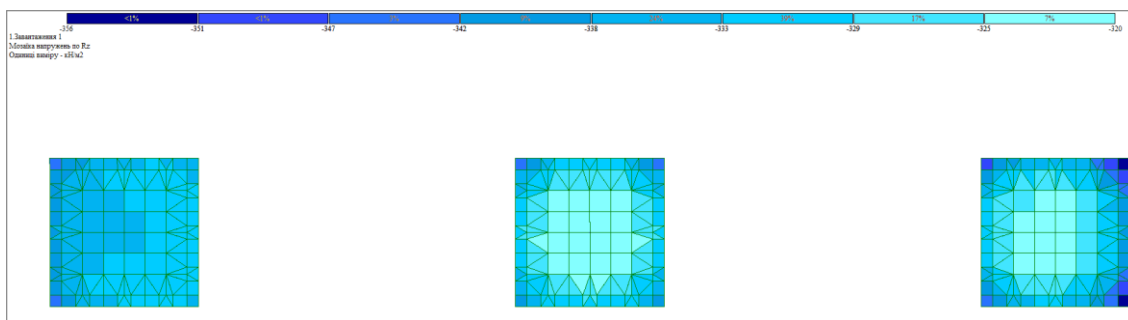


Рисунок 4 – Тиск під підшвою ростверка при зміні його товщини

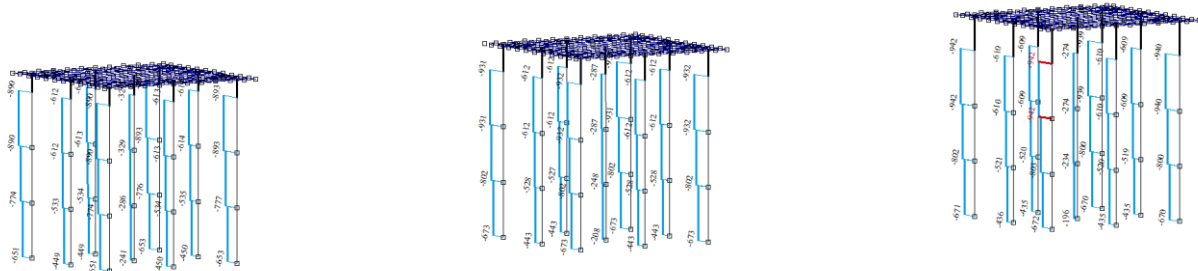


Рисунок 5 – Розподіл зусиль між палями для піщаного ґрунту при зміні товщини ростверка

Як бачимо, для гнучкого ростверка найбільше осідання має місце в центрі ростверка, що пояснюється прикладанням до нього зосередженого навантаження від колони. Збільшення товщини ростверка призводить до вирівнювання осідань по площі. Закономірно найбільші напруження під подошвою ростверка мають місце по його контуру. При збільшенні товщини ростверка концентрація зусиль підсилюється.

Що стосується зусиль в палях, то при жорстких ростверках, як і в досліді інших дослідників, найбільші зусилля припадають на кутові палі, найменші – на центральні. При гнучких ростверках навпаки: найбільші зусилля припадають на центральні палі, найменші – на кутові.

На рис. 6 показані діаграми згинального моменту в тілі ростверка, що виникає при зміні їх товщини для навантаження 10000 кН в піщаному ґрунті. Збільшення товщини ростверка призводить до збільшення згинальних моментів.

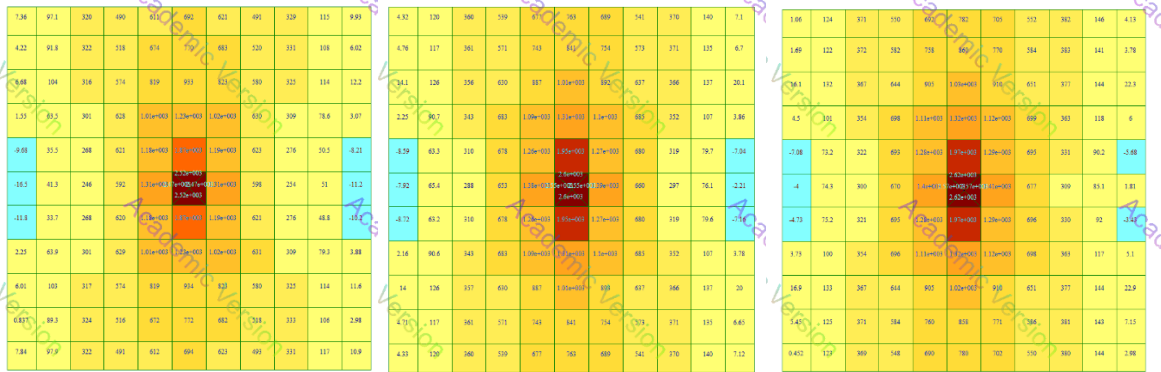


Рисунок 6 – Розподіл згинального моменту у плиті ростверку для піщаного ґрунту при зміні товщини ростверка

На рис. 7 та 8 можна бачити зміну зусиль в палях групи при зростанні навантаження для різної товщини ростверку. Бачимо, що при збільшенні товщини ростверку навантаження на палі перерозподіляється в бік зовнішнього контура для всіх досліджених груп палей.

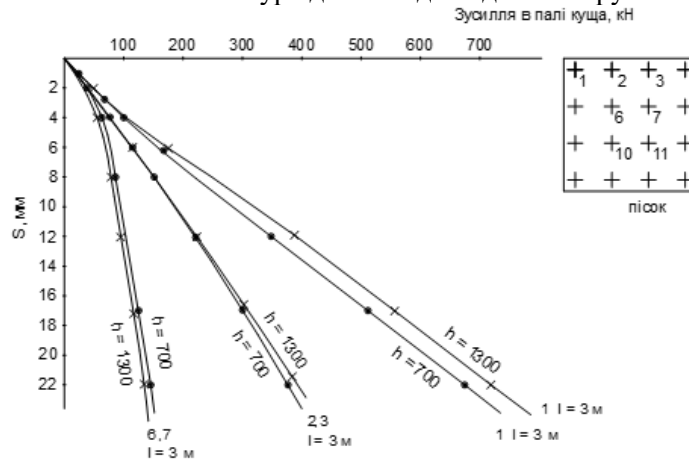


Рисунок 7 – Зміна зусиль в палях куца по мірі зростання навантаження для різної товщини ростверку (палі довжиною 3 м)

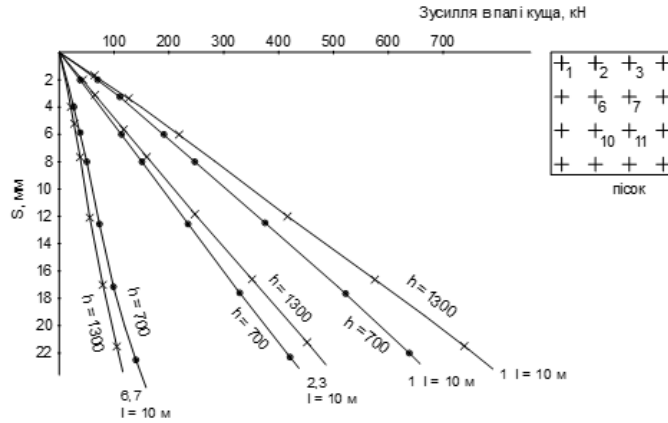


Рисунок 8 – Зміна зусиль в палях куца по мірі зростання навантаження для різної товщини ростверку (палі довжиною 10 м)

Результати дослідження

Для зручності аналізу розміри ростверків розділені на чотири групи: 1,4x1,4 м (група дослідів 7); 1,8x1,8 м (групи дослідів 5 та 6); 3,2x3,2 м (групи дослідів 1 – 3); 4,7x4,7 м (групи дослідів 4 та 8). Результати показали, що при збільшенні товщини ростверка спостерігається незначне збільшення несучої здатності фундаменту в випадку ростверків великих розмірів (4,7x4,7 м та 3,2x3,2 м) і практично не змінюється несуча здатність малих ростверків (1,8x1,8 м та 1,4x1,4 м).

Якщо характеризувати жорсткість ростверка співвідношенням його ширини і початкової товщини 700 мм (B/h), то можна відслідкувати відсоток збільшення навантаження на фундамент (при значенні осідання 15 мм) при зміні товщини ростверка (рис. 9).

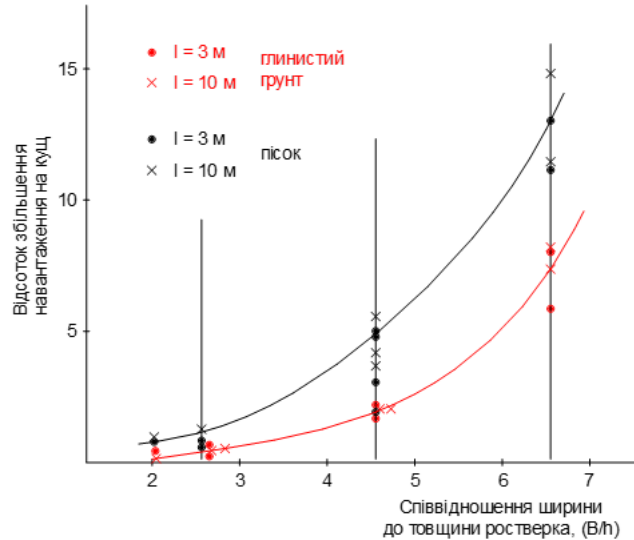


Рисунок 9 – Залежність відсотка збільшення навантаження на куц при зміні товщини ростверка з 700 мм до 1300 мм для палей різної довжини в різних ґрунтах

Отже, збільшення товщини ростверка практично не впливає на навантаження, яке він може сприймати, в випадку малих (жорстких) ростверків. Бачимо, що для ростверків при показникові початкової жорсткості $3,2/0,7 = 4,57$ відбувається підвищення несучої здатності на 3,5 – 5,7% для піщаних ґрунтів і на 2,5 – 3,0% для глинистих ґрунтів. Таке збільшення несучої здатності не буде мати економічного ефекту, оскільки збільшення товщини в таких же межах збільшує вартість конструкції. Для гнучких ростверків (показник початкової жорсткості $B/h = 4,7/0,7 = 6,7$) відбувається підвищення несучої здатності на 10,5 – 14,5% для піщаних ґрунтів і 5,7 – 8,7% для глинистих ґрунтів.

Довжина палей практично не впливає на процес підвищення несучої здатності при збільшенні товщини ростверка.

Великий показник початкової жорсткості при масовому проектуванні фундаментів означає ширину ростверка принаймні більше 4,0 м (при стандартному кроці палей 3d). Це фундаменти під

доволі значні навантаження або на слабких ґрунтах. Але область використання ростверків підвищеної площі може бути розширена за рахунок ростверків з розрідженим розміщенням паль, ефективність яких доведена дослідженнями [12, 13] і підтверджена моделюванням в програмному комплексі ЛІРА-САПР 2024, проведеним в даній роботі.

Для ростверків з початковим показником жорсткості $V/h > 6$ економічно доцільним є призначення більшої товщини ростверка у порівнянні з мінімальною, визначеною за міцністю тіла.

Аналіз результатів дослідження показав, що збільшення несучої здатності фундаментів при збільшенні товщини ростверка пов'язане з кращим включенням у роботу паль, при цьому тиск під подошвою ростверку практично не змінюється. Таким чином і ступінь реалізації несучої здатності ростверків змінюється незначно, а іноді навіть зменшується (група дослідів 8), ступінь же реалізації несучої здатності паль зростає, тобто підвищується ефективність їх використання.

Був проаналізований також процес перерозподілу зусиль між палями фундаменту в результаті збільшення товщини ростверка. Рис. 10 - 13 відображують перерозподіл зусиль між палями при збільшенні товщини ростверка для груп дослідів 1 ($V/h = 4,6$) та 4 ($V/h = 6,7$) (як найбільш чутливих, згідно з рис. 9, до зміни жорсткості ростверка). Відсотки показують зміну зусилля в палі у порівнянні з середнім навантаженням на палю у групі. Діаграми побудовані для етапу навантаження, коли реалізується несуча здатність паль, близька до передбаченої нормами [11].

У куцах з гнучкими ростверками ($V/h > 6$) при стандартній їх товщині найбільше навантаження сприймається середніми палями. Але збільшення жорсткості вже до $V/h = 4,7$ (товщина ростверку 1000 мм) спричинює перерозподіл зусиль в бік крайніх і кутових паль. У куцах з відносно жорсткими ростверками ($V/h < 5$) вже при стандартній їх товщині більше навантаження сприймають кутові палі і збільшення товщини призводить до все більшої концентрації зусиль на периферії ростверка.

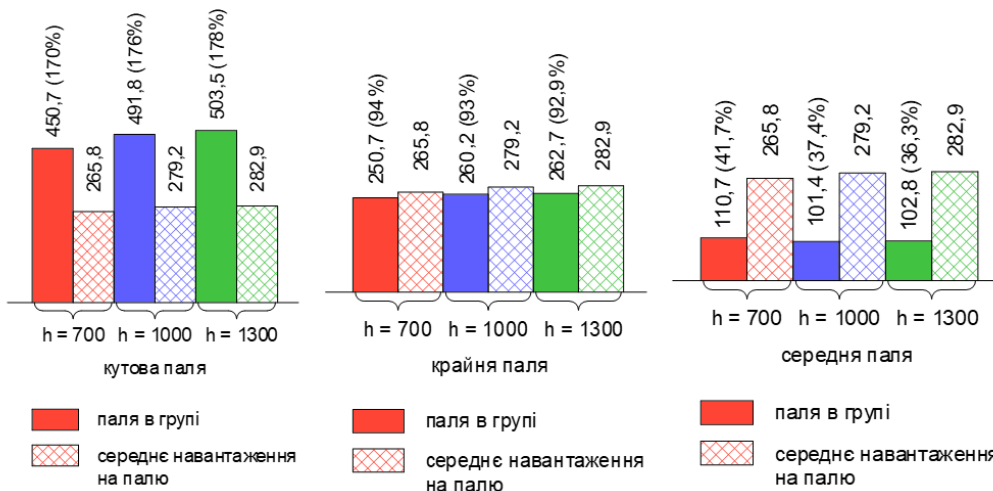


Рисунок 10 – Зміна навантажень, які сприймають палі довжиною 3 м куца за групою дослідів 1 у піщаному ґрунті при зміні товщини ростверка

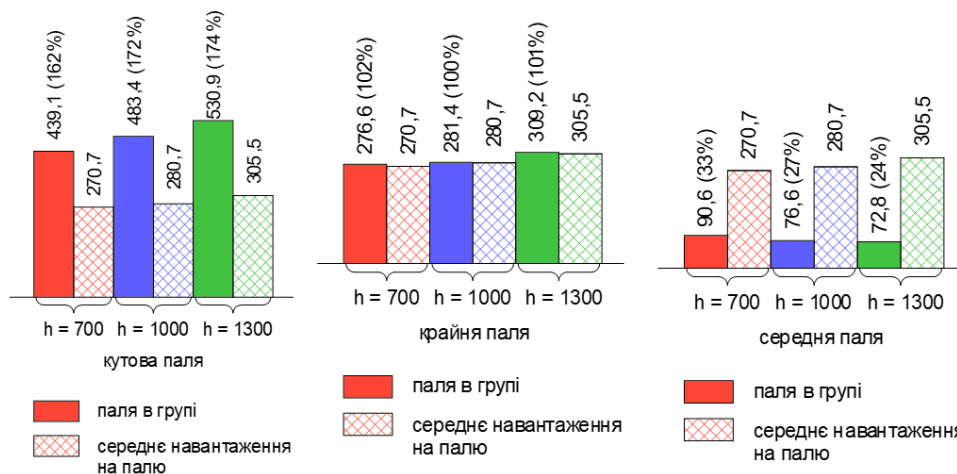


Рисунок 11 – Зміна навантажень, які сприймають палі довжиною 10 м куца за групою дослідів 1 у піщаному ґрунті при зміні товщини ростверка

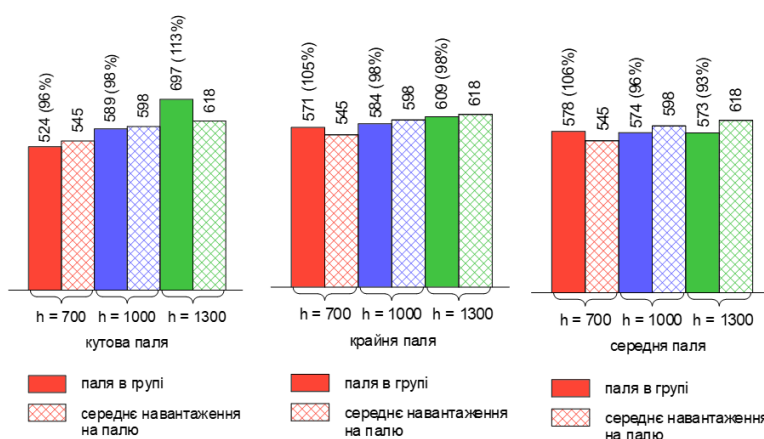


Рисунок 12 – Зміна навантажень, які сприймають палі довжиною 3 м куца за групою дослідів 4 у піщаному ґрунті при зміні товщини ростверка

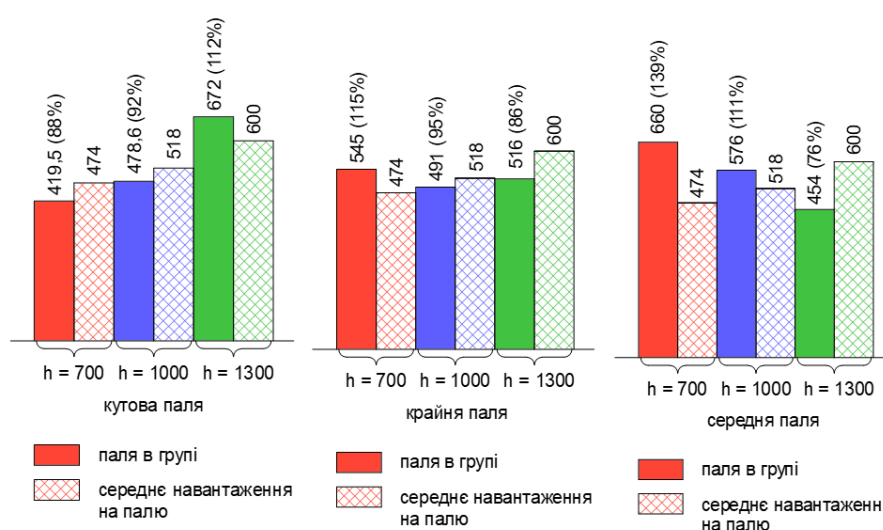


Рисунок 13 – Зміна навантажень, які сприймають палі довжиною 10 м куца за групою дослідів 4 у піщаному ґрунті при зміні товщини ростверка

Висновки

1. Результатом збільшення жорсткості ростверку є несуттєве збільшення навантаження на фундамент в цілому. Відчутне збільшення несучої здатності спостерігається для відносно гнучких ростверків. Отже покращення ефективності використання палей шляхом збільшення товщини ростверка можна рекомендувати при початковому відношенні ширини до товщини ростверка $B/h > 6$.

2. Для гнучких ростверків ($B/h = 6,7$) збільшення товщини у два рази може призвести до збільшення несучої здатності фундаменту на величину до 10,5 – 14,5% для піщаних ґрунтів і 5,7 – 8,7% для глинистих ґрунтів (ефективність збільшення товщини ростверка вища для піщаних ґрунтів).

3. Збільшення товщини ростверка призводить до кращої реалізації несучої здатності палей, реалізація несучої здатності ростверка не змінюється або незначно зменшується, при цьому такий характер впливу спостерігається незалежно від довжини палей.

4. Розподіл зусиль між палями стовпчастого палевого фундаменту визначається жорсткістю ростверка. Чим жорсткіше ростверк, тим більш навантаженими виявляються периферійні палі.

5. Збільшення товщини ростверків призводить до зростання внутрішніх зусиль в їх тілі (згинальних моментів і поперечних сил). Зростання згинального моменту відбувається на величину до 10,5% в піщаних ґрунтах і до 6,5% для глинистих ґрунтів. Поперечна сила зростає на величину до 6,5%. Результатом буде незначне зменшення потрібної кількості арматури (внаслідок більш швидкого зростання робочої висоти перерізу).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] El-Garhy B, Galil AA, Youssef AF, Raia MA. Behavior of raft on settlement reducing piles: experimental model study. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2013 Oct 1;5(5):389–399.
- [2] Thoidingjam D, Devi KR. Behavior of pile raft foundation in organic clay. *Indian J Sci Technol.* 2017 Aug 7;10(31):1–4.
- [3] Mostafa Elsawwaf, Marwan Shahien, Ahmed Nasr, and Alaaeldin Magdy The behavior of piled rafts in soft clay: Numerical investigation. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials* 2022; 31: 426–434.
- [4] Fekadu Melese Improved Performance of Raft Foundation Using Detached Pile Columns in Loose Subsoil Conditions. *Advances in Civil Engineering.* Volume 2022, Article ID 4002545, 18 page.
- [5] Soukayna El Hammouli, Adel Hanna, Lan Lin, Mahmoud Khalifa Role of Cap Thickness in Pile-Cap Foundation. *International Journal of Civil Infrastructure (IJCI)* Volume 4, 2021. Pages 100-108.
- [6] [Firanboni Fituma Chimdesa](#), et al. (2023) Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5. [Scientific Reports](#) volume 13, Article number: 15875 (2023).
- [7] Гембарська М. О. Робота паль у куці, об'єднаних ростверком з певною жорсткістю. Зб. наук. праць (галузево машинобудування, будівництва). Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 3 (38). Полтава: ПНТУ, 2013. С. 58-63.
- [8] Ручківський В. Взаємодія ґрунтової основи та групи паль, об'єднаних ростверком. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Вип. 43. Київ : КНУБА, 2021. С. 79-86.
- [9] Маєвська І.В., Блащук Н.В., Попович М.М. Перерозподіл зусиль між елементами стовпчастого пальового фундаменту. „Сучасні технології, матеріали та конструкції в будівництві”, н/т збірник ВНТУ, Вінниця. 2018. №1(24). С.36-44.
- [10] Булейко О. Л., Маєвська І. В., Шмундяк О. Ю. Вплив жорсткості ростверка стовпчастого пальового фундаменту на перерозподіл зусиль між його елементами. Збірник матеріалів ЛІІІ Науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету ВНТУ. Вінниця, 2025. 9 с. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/24317/20284>.
- [11] ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування зі зміною №1 та №2. [Чинний від 2012-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 161 с. (Об'єкти будівництва та промислова продукція будівельного призначення).
- [12] Ганущак Ю. В., Маєвська І. В. Математичне моделювання роботи комплексного стовпчастого пальового фундаменту. Збірник матеріалів ЛІІІ Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету ВНТУ. Вінниця, 2024. 10 с. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20500/17070>
- [13] Маєвська І.В., Блащук Н.В., Шмундяк О.Ю. Ефективність використання ростверку підвищеної площі у складі стовпчастого пальового фундаменту. Основи та фундаменти: науково-технічний збірник. Вип.50. Київ : КНУБА, 2025. С.123-138.

REFERENCES

- [1] El-Garhy B, Galil AA, Youssef AF, Raia MA. Behavior of raft on settlement reducing piles: experimental model study. *J Rock Mech Geotech Eng.* 2013 Oct 1;5(5):389–399.
- [2] Thoidingjam D, Devi KR. Behavior of pile raft foundation in organic clay. *Indian J Sci Technol.* 2017 Aug 7;10(31):1–4.
- [3] Mostafa Elsawwaf, Marwan Shahien, Ahmed Nasr, and Alaaeldin Magdy The behavior of piled rafts in soft clay: Numerical investigation. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials* 2022; 31: 426–434.
- [4] Fekadu Melese Improved Performance of Raft Foundation Using Detached Pile Columns in Loose Subsoil Conditions. *Advances in Civil Engineering.* Volume 2022, Article ID 4002545, 18 page.
- [5] Soukayna El Hammouli, Adel Hanna, Lan Lin, Mahmoud Khalifa Role of Cap Thickness in Pile-Cap Foundation. *International Journal of Civil Infrastructure (IJCI)* Volume 4, 2021. Pages 100-108.
- [6] [Firanboni Fituma Chimdesa](#), et al. (2023) Numerical analysis of pile group, piled raft, and footing using finite element software PLAXIS 2D and GEO5. [Scientific Reports](#) volume 13, Article number: 15875 (2023).
- [7] Gembarska M. O. Work of piles in a bush, united by a grillage with a certain rigidity. Collection of scientific works (industry mechanical engineering, construction). Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. Issue 3 (38). Poltava: PNTU, 2013. Pages 58-63.
- [8] Ruchkivskiy V. Interaction of the soil base and a group of piles united by a grillage. Bases and foundations: scientific and technical collection. Issue 43. Kyiv: KNUCEA, 2021. Pages 79-86.
- [9] Maievska I. V., Blaschuk N. V., Popovych M. M. Redistribution of forces between elements of a columnar pile foundation. "Modern technologies, materials and structures in construction", scientific and technical collection of VNTU, Vinnytsia. 2018. №1(24). Pages 36-44.
- [10] Buleyko O. L., Maievska I. V., Shmundiak O. Y. The influence of the rigidity of the grillage of a columnar pile foundation on the redistribution of forces between its elements. Collection of materials of the LIII Scientific and Technical Conference of the divisions of Vinnytsia National Technical University of VNTU. Vinnytsia, 2025. 9 page. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2025/paper/view/24317/20284>.
- [11] National Building Codes V.2.1-10-2009. Foundations and structural bases. Basic design provisions with amendments No. 1 and No. 2. [Current from 2012-07-01]. Kyiv: Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2009. 161 page. (Construction objects and industrial products of construction purpose).
- [12] Hanushchak Y. V., Maievska I. V. Mathematical modeling of the performance of a columnar pile foundation. Collection of materials LIII Scientific and technical conference of divisions of Vinnytsia National Technical University VNTU. Vinnytsia, 2024. 10 page. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20500/17070>.
- [13] Maievska I. V., Blaschuk N. V., Shmundyak O. Y. Efficiency of using a grillage of an enlarged area as part of a columnar pile foundation. Foundations and structural bases: scientific and technical collection. Issue 50. Kyiv: KNUCEA, 2025. Pages 123-138.

Шмундяк Олександр Юрійович - аспірант, факультет будівництва цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: shmund@ukr.net.

Маєвська Ірина Вікторівна — кандидат технічних наук, доцент кафедри "Будівництва, міського господарства та архітектури". Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com. ORCID: 0000-0001-5999-6824.

O. Shmundyak
I. Maievska

INFLUENCE OF GRATING RIGIDITY ON THE IMPLEMENTATION OF THE WORK OF GRATING AND PILES AS PART OF A COLUMN PILE FOUNDATION

Vinnitsia National Technical University

This work proposes a study of the influence of the thickness of the grillage in combination with the dimensions of the grillage plate (the main parameters that determine its rigidity) on the nature of the redistribution of forces between the components of the pile foundation under the column. By modeling in the LIRA CAD software package, it was investigated how the grillage and piles work together in a columnar pile foundation when changing the thickness h and dimensions in the plan B (i.e., its stiffness) of the grillage, as well as the location of the piles in the plan, their length, number and type of soil. The research program made it possible to analyze the influence on the stress-strain state of the foundation elements of the following parameters: the thickness of the grillage, which was taken as 700, 1000 and 1300 mm; the nature of the location and number of piles in the group, including the sparse placement of piles, the dimensions of the grillage; the lengths of the piles, respectively 3 m and 10 m with a cross section of 300x300 mm. The research considers two variants of the soil base: homogeneous sandy and homogeneous clay soil. The main attention is paid to varying the thickness of the grillage with different combinations of its other parameters.

It was found that with increasing grillage stiffness, the load perceived by the pile bush increases, but this increase is insignificant. Research has shown that such an increase in the bearing capacity of the bush as the grillage thickness increases occurs mainly due to an increase in the load perceived by the piles. To increase the efficiency of piles, it is recommended to vary the thickness of the grillage, provided that the initial rigidity of the grillage is $V/h > 6$. The rigidity of the grillage is the main factor affecting the redistribution of forces between the piles of the group. In pile foundations with an initial rigidity of $V/h > 6$ (flexible grillages), the greatest load falls on the piles in the middle of the group. But already when the stiffness index is reduced to $B/h = 4.7$ (more rigid grillages), the redistribution of forces leads to a greater load on the edge and corner piles. With a further increase in the rigidity of the grillages, the corner piles are the most heavily loaded, and the central ones are the least loaded. Therefore, with an increase in the thickness of the grillage, a redistribution of forces occurs between the piles towards the outer contour. Analysis of the magnitude of the concentrated load on the pile of the group indicates its increase, but insignificant compared to the increase in the load on the corner piles.

As a result of the increase in the rigidity of the grillages, bending moments and shear forces within their body increase. Quantitatively, this increase is insignificant.

Keywords: driven piles, grillage, stiffness, load, bearing capacity, settlement, distribution of forces between piles, stress-strain state.

Oleksandr Shmundyak — Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, email : shmund@ukr.net

Irina Maievska – PhD in engineering, associate professor of the Department of "Building, Urban and Architecture". Vinnitsa National Technical University, Vinnitsia, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com ORCID: 0000-0001-5999-6824