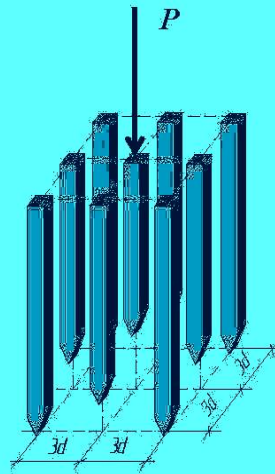
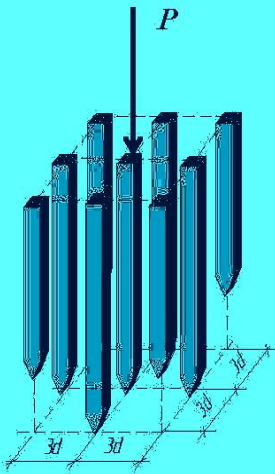


О. В. Титко

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ
ФУНДАМЕНТІВ
З ГРУПИ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ПАЛЬ**



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

О. В. Титко

***ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНДАМЕНТІВ
З ГРУПИ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ПАЛЬ***

Монографія

УНІВЕРСУМ – Вінниця
2007

УДК 624.131
Т 45

Рецензенти:

В. І. Снісаренко, доктор технічних наук, професор

І. Н. Дудар, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 25.11.2004 р.)

Титко О. В.

Т 45 **Оцінка ефективності фундаментів з групи взаємозалежних паль:** Монографія. — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007—114 с.

ISBN 978-966-641-222-8

Монографія присвячена питанням пошуку оптимальних параметрів пальової групи. Дослідженнями пальових фундаментів встановлено, що несуча здатність пальових груп з паль різної довжини (коротких і довгих) приблизно однакова з несучою здатністю пальових груп з паль рівної довжини (довгі палі). Це дозволило розробити нові раціональні моделі фундаментів із групи взаємозалежних паль різної довжини.

Розроблено нові методи розрахунку характеристик напружено-деформованого стану ґрунту в навколопальовому просторі з використанням числових методів і математичних моделей.

УДК 624.131

ISBN 978-966-641-222-8

© О. Титко, 2007

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. КОРОТКИЙ ІСТОРИЧНИЙ ОГЛЯД ТА СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ФУНДАМЕНТІВ З ГРУПИ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ПАЛЬ	9
1.1. Аналіз явищ, що виникають при улаштуванні фундаментів з групи взаємозалежних паль	10
1.2. Вивчення несучої здатності та сумісної роботи паль в групі при дії вертикальних навантажень	14
1.3. Методи розрахунку несучої здатності паль та пальових фундаментів	18
1.4. Методи прогнозу осадок паль та пальових фундаментів	22
1.4.1. Методи, що розглядають пальовий фундамент як умовний масив	25
1.4.2. Числові методи	25
1.4.3. Емпіричні методи	29
ВИСНОВКИ	31
2. ДОСЛІДЖЕННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ З ГРУНТОМ ЦЕНТРАЛЬНО НАВАНТАЖЕНИХ ПАЛЬОВИХ ФУНДАМЕНТІВ	33
2.1. Планування експерименту при визначенні основних факторів роботи фундаментів з групи взаємозалежних паль	33
2.2. Аналіз результатів модельних досліджень роботи пальових фундаментів в піщаних ґрунтах	40
2.2.1. Аналіз роботи фундаментів з групи паль однакової довжини	40
2.2.2. Аналіз роботи фундаментів з групи взаємозалежних паль різної довжини	53
2.3. Визначення деформацій фундаментів з групи паль методом наближеного моделювання	56
ВИСНОВКИ	62
3. АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ ТА ОСАДОК ФУНДАМЕНТІВ З ГРУПИ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ПАЛЬ РІЗНОЇ ДОВЖИНИ ПРИ ДІЇ ВЕРТИКАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ	64
3.1. Основні положення	64
3.1.1. Методика розрахунку осадки пальових фундаментів	64
3.1.2. Диференційне рівняння деформації плити, граничні умови	66
3.2. Вибір розрахункової моделі і коефіцієнта жорсткості основи	69

3.3. Застосування методу скінченних різниць для розрахунку пальових фундаментів	71
3.3.1. Розрахунок пальового фундаменту по деформаціях основи	73
3.3.2. Визначення повздовжніх сил в палях фундаменту	75
3.4. Розрахунок ущільнення ґрунту в навколопальовому просторі	78
3.5. Характеристика напружено-деформованого стану ґрунту підвалин пальових фундаментів	83
ВИСНОВКИ	89
4. СПІВСТАВЛЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА ТЕОРЕТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ СУМІСНОЇ РОБОТИ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ПАЛЬ	90
4.1. Порівняльний аналіз осадок пальових груп	90
4.2. Порівняльний аналіз розподілу зусиль між палями груп	94
4.3. Економічна ефективність запропонованих конструктивних схем пальових груп	98
ВИСНОВКИ	101
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	102
ЛІТЕРАТУРА	105
ДОДАТОК А. Рекомендації по улаштуванню фундаментів з групи взаємозалежних паль різної довжини при дії вертикальних навантажень	112

ВСТУП

Зростаючі об'єми будівництва висувають підвищені вимоги до зниження його вартості, підвищення продуктивності праці. В зв'язку з великим обсягом житлового, культурно-побутового та промислового будівництва доводиться все більше споруджувати будівлі у несприятливих ґрунтових умовах, що потребує застосування спеціальних засобів, які в більшості випадків ускладнюють та підвищують вартість процесу спорудження будівель. Тенденція зниження цих витрат, а також неперервний розвиток техніки будівництва приводять до все більш широкого запровадження пальових фундаментів, як основи подальшого удосконалення робіт нульового циклу.

Застосування пальових фундаментів у промислового та цивільного будівництві відкриває більше можливостей для підвищення рівня індустріалізації фундаментобудівництва. Пальові фундаменти мають ряд переваг перед фундаментами на природній основі, до яких відносяться: можливість спорудження в будь-яких ґрунтах, що стискаються, забезпечення зменшення загальних і нерівномірних осадок будівель та споруд, зниження ваги фундаментів, трудомісткості робіт, значне скорочення земляних і бетонних робіт.

Але влаштування пальових фундаментів поки що стикається з низкою недоліків, головним з яких є недостатній рівень та надійність методів розрахунку таких фундаментів.

Численні експериментальні дослідження показали, що визначення несучої здатності паль і пальових фундаментів проводиться наближеними методами, невраховуючи цілого ряду особливостей взаємодії паль з оточуючим ґрунтом. Окрім того, при проектуванні пальових фундаментів внаслідок невисокої надійності методу розрахунку несучої здатності паль за нормативними документами, проектні рішення не можуть бути прийняті економічними, тобто в них вже спочатку закладається перевитрата матеріалу, трудових ресурсів і фінансових засобів.

Такі ж недоліки як для визначення несучої здатності одиночної палі присутні і при визначенні несучої здатності палі у групі. Тут до того ж додається ефект спільної роботи паль, який досліджений далеко ще не в повній мірі. Існуючі норми не враховують і те, що розподілення навантаження між палями в групі відбувається нерівномірно.

Часто проектні рішення фундаментів з групи паль, виконаних згідно з вимогами, не можуть бути впроваджені на практиці через те, що неможливо занурити всі палі в куці на задану відмітку. Це приводить до більшого об'єму рубки голів паль і використання палдублерів, до великих додаткових енерго- та трудовитрат. Дане явище

спостерігається завжди при масовому забиванні паль і пояснюється переущільненням ґрунту навколо паль по мірі збільшення кількості забитих паль.

Подальше вдосконалення пальових фундаментів і зниження їх вартості можливі лише на основі більш повного врахування дійсної роботи паль у складі фундаментів, розробки нових методів розрахунку та проектування.

Роботи з дослідження основ та підвалин фундаментів різних конструкцій проводяться на секції “Підвалини та фундаменти” кафедри “Промислового та цивільного будівництва” Вінницького державного технічного університету з 1980 року. Багато уваги приділялося фундаментам мілкого закладення, фундаментам на штучних основах, пірамідальним та призматичним палям та пальовим групам.

Дана наукова робота є продовженням виконуваних на кафедрі досліджень і присвячена вивченню спільної роботи з ґрунтом фундаментів з групи взаємозалежних паль при дії вертикального навантаження. Проблема створення і відпрацювання оптимальної моделі фундаменту з групи паль різної довжини з максимальним опором вертикальному навантаженню у конкретних ґрунтових умовах і удосконалювання методів розрахунку таких фундаментів досить актуальна і цікава.

Мета написання книги полягає в удосконаленні конструкції фундаментів з групи взаємозалежних паль для більш повного використання їх несучої здатності та економії матеріалу і енерговитрат, пов’язаних з улаштуванням таких фундаментів, удосконалювання методів розрахунку напружено-деформованого стану в навколопальовому просторі.

Для досягнення бажаної мети були поставлені такі задачі:

- визначити характер розподілення навантаження між палями при широкому варіюванні параметрів пальових груп і ґрунтових умов при дії вертикального навантаження;

- дослідити характеристики напружено-деформованого стану в навколопальовому просторі;

- визначити характер, динаміку розвитку деформацій основи й опір вертикальному навантаженню найбільш ефективно працюючого на вертикальне навантаження конструктивного типу пальового фундаменту;

- запропонувати аналітичний метод визначення зусиль в палях в складі групи та визначення несучої здатності фундаментів з групи взаємозалежних паль різної довжини.

Аналіз умов будівництва показує, що піски є одним з найрозповсюдженіших типів ґрунтів. Різні за походженням, складом і станом

піски складають значну територію, будучи природними основами численних об'єктів і споруджень. За статистичними даними близько 20% усіх споруджуваних у країні будинків і споруд зводять на пісках. Незважаючи на це, вивченню взаємодії піщаних основ і пальових фундаментів приділяється зовсім недостатня увага. Виходячи з цього, дослідження проводилися в піщаній основі.

Об'єктом даних досліджень є група конструктивних форм фундаментів з висячих призматичних паль, в яких, з метою досягнення максимального економічного ефекту, змінювалися параметри групи, досліджувався характер розвитку деформацій основи та були запропоновані нові методи розрахунку таких фундаментів при дії вертикальних навантажень.

Предметом досліджень є несуча здатність фундаментів з групи взаємозалежних паль при дії вертикальних навантажень.

В якості методів дослідження використовувалися експериментальні випробування моделей одиночних та груп взаємозалежних паль за допомогою розроблених методик, аналітичні дослідження з використанням математичних моделей та розробленого розрахункового апарату.

Наукова новизна роботи складається у встановленні кількісних залежностей між факторами, що обумовлюють спільну роботу фундаментів з групи взаємозалежних паль і ґрунту, що дозволили запропонувати нові ефективні та економічні конструктивні рішення таких фундаментів і запропонувати методи їх розрахунку.

За результатами проведених досліджень розроблені рекомендації до впровадження нових ефективних конструкцій пальових груп на об'єктах промислового та сільськогосподарського будівництва Вінницької області, а також відпрацьована методика і програма розрахунку при проведенні проектних робіт. Запропонований метод найбільш повно враховує дійсну роботу паль в складі пальового фундаменту і дає змогу розрахувати несучу здатність з врахуванням фактичного навантаження, що приходить на палю у складі групи.

Книга складається з вступу, чотирьох розділів, містить таблиці, графіки, рисунки, загальні висновки, бібліографію з назв та додатки.

Перший розділ присвячений короткому історичному огляду надрукованих результатів експериментальних і теоретичних досліджень у практиці застосування пальових фундаментів. Розглянуто проблему складності системи "споруда-основа" і визначення навантажень на палі у складі групи при дії вертикальних навантажень.

Аналіз робіт з цієї проблеми, показав, що в даний час це питання вивчене ще недостатньо повно.

В другому розділі приводиться конструкція модельних випро-

бувань, представлені методика і результати дослідження несучої здатності пальових груп та одиночних паль при різних параметрах фундаменту та ґрунту при дії вертикальних навантажень.

У третьому розділі надані результати теоретичних досліджень, приводиться методика розрахунку фундаментів з групи взаємозалежних паль різної довжини при дії вертикального навантаження, визначаються характеристики деформації ґрунту в навколопальовому просторі.

Четвертий розділ містить в собі аналіз теоретичних та експериментальних досліджень, порівняльні графіки результатів аналітичних та модельних розрахунків, розрахунки ефективності нових конструкцій фундаментів з групи взаємозалежних паль.

У додатку містяться рекомендації до впровадження та улаштування фундаментів з групи взаємозалежних паль.

Автор висловлює щиру подяку своєму науковому керівнику професору, доктору технічних наук Друкованому Михайлові Федоровичу, науковому консультанту, професору, доктору технічних наук Чорному Гелію Івановичу, науковому консультанту, доценту, кандидату технічних наук Моргуну Анатолію Івановичу та іншим колегам за постійну увагу і допомогу.

1. КОРОТКИЙ ІСТОРИЧНИЙ ОГЛЯД ТА СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ ФУНДАМЕНТІВ З ГРУПИ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ПАЛЬ

Палі – одна з форм, яка найширше застосовується в рішеннях фундаментних конструкцій, що дозволяють у різних ґрунтових умовах створювати оптимальні варіанти фундування більшості будинків і споруд ефективних з технічної й економічної точок зору (при значних діапазонах зміни величини навантажень, переданих цими спорудами на ґрунт).

Саме ця обставина й обумовлює всезростаючу увагу вчених і інженерів до цієї форми фундаментних конструкцій і робить проведені роботи в сфері дослідження паль досить актуальними і цікавими [43, 54, 60, 71, 88].

Дослідження опору різного роду навантаженням паль і палювих фундаментів, особливостей роботи останніх із ґрунтом основи були початі в колишньому СРСР (країні, де вперше починалося становлення взагалі науки про підвалини і фундаменти) ще наприкінці дев'ятнадцятого сторіччя.

Першими вітчизняними вченими, що почали працювати в цій області були І. В. Лебединський, В. І. Курдюмов, Н. М. Герсєванов і В. К. Домоховський. Широкий обсяг прийняли дослідження з вивчення роботи паль, вибору їхніх оптимальних параметрів і створення нових конструкцій на початку 20-х років. Проведені вченими й інженерами важливі і принципово нові роботи з зазначених питань, а також в сфері удосконалення методів проведення палювих робіт і створення високопродуктивного, мобільного устаткування, привели до того, що в даний час палюві фундаменти широко застосовуються при будівництві будівель і споруд різного призначення в різноманітних інженерно-геологічних умовах.

Розвиток досліджень паль і палювих фундаментів, впровадження в будівництво нових і удосконалених конструкцій паль, стало можливим завдяки творчій і плідній праці великого колективу вчених і інженерів, у числі яких слід зазначити: М. Ю. Абелева, В. Г. Березанцева, А. А. Бірюкова, Б. В. Бахолдіна, А. А. Бартоломія, І. П. Бойко, В. Н. Голубкова, Б. І. Далматова, М. Л. Зоценко, В. Б. Шахирєва та багатьох інших [1, 2, 6, 7, 9, 10-12, 25-39, 59, 60, 63, 66, 67-69, 77, 78, 83, 88, 92-95].

Особливе місце серед інших палювих фундаментів займають фундаменти з забивних паль, перевагами яких перед іншими є високий ступінь індустріалізації й універсальність застосування. Рішення проблеми розширення області ефективного застосування в будівництві різних типів забивних паль тісно зв'язано з вивченням відмінностей

у їхній спільній роботі з ґрунтом основи, що виявляються у формі і величині об'єму, які створюються в навколишньому ґрунтовому масиві при зануренні палі, зони ущільнення, у ступені ущільнення ґрунту в різних її відмітках і в характері передачі палею навантажень на основу. Експериментальне вивчення зазначених відмінностей є складною, але завдяки науково-технічному прогресу здійсненою задачею, рішення якої дає можливість вибору раціональної форми палі та пально-вих груп й прийняття оптимальних параметрів для будь-якої галузі будівництва.

Відаючи належне багатьом перевагам пальових фундаментів із забивних паль, коло вчених і інженерів, що займаються експериментальними дослідженнями таких фундаментів неухильно розширюється. При цьому досліджувані питання пов'язані як з удосконалюванням старих конструктивних форм (підбір оптимальних параметрів, розкриття резервів опору паль навантаженням на основі вивчення спільної роботи паль з основою), так і зі створенням нових.

1.1. Аналіз явищ, що виникають при влаштуванні фундаментів з групи взаємозалежних паль

Взаємовплив паль в складі фундаменту є предметом вивчення великого числа експериментальних та теоретичних дослідів. Цими дослідями встановлено, що функціональна залежність "навантаження - осадка" одиночної палі в більшості ґрунтових умов не відповідають тій самій залежності для групи паль. Гранична несуча здатність групи взаємозалежних паль не є простим підсумовуванням граничних несучих здатностей одиночних паль.

Одними з видів фундаментів з групи взаємозалежних паль є куц та поле. По результатах експериментальних досліджень пальових куців можна виявити характер впливу кожної палі на інші в складі групи та спрогнозувати поведінку фундаменту під навантаженням.

В процесі примусового занурення кожна паля закритим нижнім кінцем спочатку стискує ґрунт в напрямку її занурення, а потім розсовує в сторони, ущільнюючи його. В результаті цього навколо паль утворюється зона ґрунту з підвищеною, порівняно з природною, щільністю. Розміри та обриси характерних зон ущільнення можуть істотно змінюватись в залежності від властивостей ґрунтів, а також тривалістю перерви між закінченням занурення паль та передачі на них зовнішнього навантаження.

Експериментами встановлено, що палі краще розташовувати на відстанях, при яких епюри нормальних напруг відносно осі палі в ділянці її нижнього кінця взаємно не перехрещуються. Однак виконання цієї умови пов'язано з необхідністю значного збільшення площі

плити ростверку. Тому найчастіше вертикальні палі в фундаментах розташовують на зменшених відстанях, при яких епюри нормальних напруг накладаються, що приводить до зміни роботи паль в куці порівняно з одиночною палею.

Внаслідок великої віддачі товщі ґрунту, що лежить нижче з-під вістря заглибленої палі, ґрунт переміщується по криволінійних поверхнях в напрямку найменшого опору, тобто в сторони та вверх. В залежності від напрямку та величини переміщення частинок розрізняють три характерних зони деформації ґрунтів, а отже і їх ущільнення.

1. Ущільнений шар ґрунту товщиною $2 - 10$ м, який переміщується в напрямку руху палі.

2. Зона пластичної деформації ґрунту, зруйнованого вістрям палі (розрихлений ґрунт), товщиною $0,2 - 2d$ (d – характерний розмір палі).

3. Зона ущільненого в радіальному напрямку ґрунту товщиною $2 - 4d$.

Розподіл зон по глибині вздовж палі майже рівномірний, з деяким збільшенням на рівні вістря палі. Загальна ширина зони напруженого стану навколо вістря палі $3 - 6d$, глибина її нижче кінця палі $5 - 8d$.

В дослідях Г. В. Кузьменка в напівнатурному масштабі випробувались куці з 9 паль перерізом 15×15 см та довжиною 3м. Ростверк високий, жорсткий, відстань між палями $(2,5, 3,5, 5)d$. Ґрунт – лесовий суглинок з щільністю $1,61 - 1,91$ г/см³, вологістю $0,19 - 0,27$. Зона деформації ґрунту фіксувалася фіксаторами деформації та відбором проб ґрунту.

Зона деформації в одиночній палі, як і палі в групі при відстанях між палями, рівних $5d$, однакова $\approx 0,5d$ в бік від палі та біля $2d$ по глибині.

При відстанях між палями, рівних $2,5d$ та $3,5d$, враховується взаємний вплив паль в групі. Так глибина зони деформації під крайніми палями складає біля $6d$ від кінців паль, під проміжними палями крайніх рядів – $(6 - 7)d$ та під центральними палями $(7 - 8)d$. Таким чином, в групі паль при їх взаємному впливі глибина зони деформації в $3 - 4$ рази перебільшує глибину тієї ж зони в одиночній палі. Зі зменшенням відстані між палями збільшується також і ширина зони деформації до $(2,5 - 3)d$.

Величина осадки навколо пального ґрунту також залежить від відстані між палями. При відстані між палями, рівній $5d$, осадка відсутня, при відстані $3,5d$ складає $10 - 12$ см, при загальній осадці куша 30 см, а при відстані між палями $2,5d - 15 - 17$ см при тій же загальній

осадці.

Експериментальними дослідями виявлено, що дотичні сили опору (сили тертя) ґрунту включаються в роботу при зміщенні (осадці) палі на декілька мм. При осадці верху палі на 0,5-2 см відбувається її зсув відносно ґрунту і як наслідок цього - зрив паль. При цьому величина сили тертя незв'язних ґрунтів з палею після зриву майже не змінюється, зв'язних зменшується на 10-20 %, а в ряді випадків і більше.

В. Н. Голубков [15] приводить численні дані статичних випробовувань одиночних паль та груп з кількістю паль до 16 в різних ґрунтових умовах. За даними цих випробовувань осадки одиночних паль при рівних навантаженнях на палі були як правило в 4-9 раз менше осадок пальових груп. Недоліком цих випробовувань було те, що вони закінчувались при осадках як правило не більше 15 мм.

Багато дослідників займалися питаннями оцінки взаємовпливу паль на несучу здатність окремої палі та групи в цілому.

Б. С. Юшков [95] при натурних випробовуваннях залізобетонних паль перерізом 30х30 см та довжиною від 5 до 12 м на дослідному майданчику, складеному четвертинними суглинками та глинами м'якопластичної консистенції, визначав несучу здатність кущів з 4, 9 паль та одиночних паль. Випробовування проводилися через 6 та 45-50 днів після забивання паль. Через 6 днів після забивання несуча здатність куща паль була менше несучої здатності одиночної палі, через 45 днів несуча здатність і кущів і одиночних паль суттєво зростає, причому найбільший зріст спостерігається для кущів з 9 паль, так що несуча здатність паль такого куща стає вище несучої здатності одиночної палі.

А. А. Фурманавічюс [84] на основі проведених модельних випробовувань на морених ґрунтах прийшов до висновку, що несуча здатність пального куща більше, ніж одиночної палі, помноженої на число паль в кущі. Для палі, що працює в групі, було виявлено підвищення значення бічного тертя та зафіксовані осадки навколо пального ґрунту навіть при відстані 3d між палями.

До аналогічних висновків прийшов Ю. Ю. Вайчайтіс по результатах маломасштабних статичних випробовувань на піщаних ґрунтах середньої крупності та щільності. Випробовувались залізобетонні палі перерізом 5х5см та довжиною 135 см та зонди таких розмірів (що дозволяли досліджувати розподіл навантажень між вістрям та бічною поверхнею). По даних випробовувань несуча здатність паль в кущі у всіх випадках була більше, ніж одиночних паль. Збільшення несучої здатності палі в кущі відбувається не тільки за рахунок збільшення бічного тертя, але й за рахунок збільшення опору ґрунту під ві-

страм.

Огляд польових та модельних дослідів груп паль, проведених за кордоном, зробив Вітакер [98]. У випадках, які він приводить, несуча здатність груп паль в глинах завжди менша, а в пісках як правило більша, ніж добуток гранично несучої здатності одиночної палі на число паль в групі.

Слід відмітити, що різноманітність ґрунтових умов та методів випробувань, а також відсутність загального критерію при визначенні величини несучої здатності групи взаємозалежних паль та одиночної палі часто роблять висновки різних авторів у відношенні взаємовпливу паль невідповідними, а в багатьох випадках прямо протилежними одне одному.

Це призводить до порушення умов подібності при порівнянні результатів випробувань одиночних паль та пальових фундаментів з групи взаємозалежних паль, оскільки їх робота при цьому розглядається в різних фазах деформування основи.

Більша кількість дослідів з палями була проведена Весичем [97] та Мейерхофом [42]. Мейерхоф показав, що в пальових кушах, занурених в рихлий пісок або в пісок нормальної щільності, з відстанями між палями 2-4d несуча здатність кожної палі збільшується на 50-80%, тоді як для кущів забитих в щільний пісок, вона знижується на 20-30%. Мейерхоф досліджував також й вплив розміру пальового куща на його несучу здатність. Так, наприклад, його досліди показали, що використання в кущі 9 паль замість 4 сприяє підвищенню ефективності куща паль.

Ханна [86] представив методику та результати модельних випробувань поведінки груп паль в сухому піску різної щільності. Досліди були проведені з групами до 49 паль в лотку розміром 762x1016x635мм. Довжина паль була рівна 30,5см, діаметр 0,79-0,98см. Випробовувались моделі з різного матеріалу (дерево, латунь, скло) з різною шорсткістю поверхні. Випробовуючи палі з гладкою та шорсткою поверхнею, Ханна встановив, що опір поверхні ствола палі по глибині може складати важливу частину загального навантаження. Для груп паль при збільшенні шорсткості ствола гранична ефективність збільшується. Під граничною ефективністю Ханна вважає відношення граничного навантаження на одну палю в групі до граничного навантаження на одиночну палю. Груповий ефект, на його думку, обумовлений, головним чином, перехресненням граничних зон сусідніх паль, що ускладнює розвиток поверхні руйнування. Інші фактори будуть змінювати механізм лише в деталях: щільність піску, відстань між палями, властивості піску та паль, порядок забивання паль,

глибина та масштаб груп.

Досліди Стюарта та Ханна [73] показали, що найбільше значення коефіцієнта ефективності отримано при оптимальній відстані між осями паль біля (2-3)d. Вважається, що можливо прийняти лінійну зміну коефіцієнта ефективності при збільшенні відстані між палями від 3d до 8d. В цілому вплив відстані між палями на ефективність їх використання в групі визначається декількома факторами. Найбільш суттєвим з них є щільність ґрунту. Коефіцієнт ефективності в середньому рівний 1,5, тоді як відносна щільність ґрунту невелика і зменшується до 0,7 із збільшенням щільності.

Кезді [32] досліджував граничний опір груп взаємозалежних паль, в залежності від відстані між палями та числом паль в складі групи. Досліди проводились в піщаних ґрунтах на моделях паль діаметром 33мм та довжиною 500мм. Було виявлено, що граничний опір та коефіцієнт ефективності збільшуються із збільшенням числа паль в групі та із зменшенням відстані між палями, якщо ця відстань більша ніж 3d. Коли ж відстані між палями були менше ніж 3d, то несуча здатність зменшувалась із зменшенням відстані між палями. Автор також встановив, що граничне навантаження залежить від форми групи паль та від відстані між ними.

Лу Вон [32] показав, що опір ґрунту зростає не тільки від ущільнення міжпального ґрунту в куші, але й за рахунок збільшення вертикального тиску в основах суміжних паль за рахунок перехрещення напружених зон. Крім того відбувається збільшення опору по бічній поверхні, оскільки збільшується горизонтальний опір в ґрунті між палями по мірі збільшення числа паль в куші. Досліди показали, що збільшення несучої здатності, викликане ущільненням міжпального простору, відбувається зі значно більшим ступенем, ніж за рахунок перехрещення напружених зон. Тому взаємодія паль найчастіше відбувається в тому випадку, коли несуча здатність визначається тертям ґрунту по бічній поверхні паль, ніж у випадку, коли основне значення має опір під їх нижніми кінцями.

1.2 Вивчення несучої здатності та сумісної роботи паль в групі при дії вертикальних навантажень

В нинішній час в нормативній літературі зміна несучої здатності паль в групі пояснюється зниженням опору ґрунту по стовбуру палі та збільшенням опору ґрунту під вістрям в результаті забивки паль.

Однак, проведені Л. Д Козачком досліди на моделях паль, на піщаному ґрунті показали, що переміщення паль при великих навантаженнях випереджають осадку міжпального ґрунту і це випереджен-

ня по величині цілком достатньо для того, щоб повністю мобілізувати сили опору по бічній поверхні паль. Л. Д. Козачком проведені досліді по навантаженню одиночних паль та паль в складі групи з 9 паль, випробовуваних як одиночні, підтверджуючи вплив ущільненого ґрунту, при забивці паль, на підвищення їх несучої здатності. Але сумарний граничний опір всіх групових паль, випробовуваних як одиночні, виявився менше опору куща з 9 паль із високим ростверком.

Велика робота по оцінці несучої здатності груп взаємозалежних паль була виконана Е. С. Девальтовським [19]. Ним були проведені модельні випробовування груп паль в лотку розміром 800x800x1000мм. В якості основи був прийнятий сухий дрібнозернистий пісок (середньої щільності та рихлий). Моделі паль - круглі сталеві стержні діаметром 10мм, довжиною 200мм з гладкою та шорсткою поверхнею. Було виконано також випробовування групи з 25 паль в глинистих ґрунтах м'якопластичної консистенції. Палі являли собою металічні труби із оцинкованої сталі діаметром 75мм, довжиною 3м.

Проведені випробовування дозволили зробити такі висновки:

1. Переміщення піску при втисканні моделей групи з 16 паль, з відстанями між палями 3 та 6d відрізняється. При втисканні групи з 16 паль, з відстанями між палями 6d розвивались в основному деформації зсуву під вістрям паль, деформації ущільнення основи незначні. При втисканні груп з 16 паль з відстанями між палями 3d розвивались значні деформації ущільнення основи, а також, на останніх стадіях втискання, спостерігалися декотрі переміщення ґрунту разом із кущем. Втискаючі навантаження, при однакових глибинах занурення кущів, більше у куща з відстанями між палями 3d.

2. При втисканні моделі групи з 49 паль яскраво виражена зона ущільнення. Чітко фіксується переміщення міжпального ґрунту разом із кущем на останніх стадіях втискання. Група з 49 паль, з відстанями між палями 3d, та групи з 16 паль, з відстанями між палями 6d мають однакову площу спірання і, відповідно до існуючої розрахункової моделі, яка розглядає паливий фундамент як умовний масив, в ґрунтах активної зони цих фундаментів повинні розвиватися ідентичні процеси. Група з 16 паль з відстанями між палями 6d взаємодіє з ґрунтом як сума окремих паль з деяким взаємним впливом, тоді ж як поведінка групи з 49 паль в певній мірі подібна поведінці фундаменту глибокого закладання.

3. Взаємодія з ґрунтом одиночної палі та паль в складі групи суттєво відмінна, що виявляється в збільшенні частки вістря групової палі в передачі навантаження, на відміну із взаємодією з ґрунтом стовбуру одиночної палі (стовбур групової палі активно взаємодіє з ґрунтом лише своєю нижньою частиною). В різних протіканнях процесу

сковзання по ґрунту стовбуру одиночної та групової палі (процес сковзання стовбуру одиночної палі розвивається від поверхні ґрунту до вістря, групового - від вістря до голови палі). Це призводить до відмінних залежностей “навантаження-осадка” та до суттєвої відмінності їх несучих здатностей.

Гранична несуча здатність групової палі завжди вище, ніж одиночної, але її величина пов'язана з розвитком значних осадок, частоту недопустимих для будівель та споруд.

4. Наявність низького ростверку ще більше ускладнює процес взаємодії паль з ґрунтом та робить поняття "граничної несучої здатності" паль невизначеним. Вплив низького ростверку починає суттєво відбиватися лише при значному розвитку процесів сковзання стовбурів паль по ґрунту. При однакових осадках пальові фундаменти з низьким ростверком здатні сприймати більше навантаження, ніж з високим ростверком.

5. Проведені експерименти підтвердили, що взаємодія бічної поверхні групових паль з міжпальним ґрунтом суттєво впливає на взаємозалежність паль у групі.

Важливим для оцінки роботи паль в групі є питання про розподіл навантаження між ними. Факт нерівномірного розподілу навантаження між палями був експериментально встановлений цілою низкою дослідників.

Дослідження Б.С. Юшкова [95] в глинистих ґрунтах на палях перерізом 30x30см та довжиною від 5 до 12м показали, що несуча здатність групи з 9 паль через 6 діб після забивання складає 1080кН та розподіляється між палями групи нерівномірно: кутові палі сприймають по 140кН, середні палі крайніх рядів - 110кН, середні палі - 80кН. Через 45 діб після забивки несуча здатність групи з 9 паль зросла на 75% і складала 1890кН. Навантаження розподілилось між палями також нерівномірно: кутові палі - 260кН (збільшення склало 85%), середні палі крайніх рядів - 180кН (збільшення 60%), середні палі - 120кН (збільшення 33%).

Моделльні досліди Б. С. Юшкова [186] на глинистих ґрунтах з показником текучості 0,75 також показали, що при випробовуванні в день забивки розподіл навантаження між палями відбувається нерівномірно. Найбільше навантаження сприймають кутові палі, а найменшу - центральні. По мірі відпочинку паль, за рахунок тиксотропного ефекту, відбувається збільшення несучої здатності палі. В цілому збільшення склало 71%, при цьому найбільш інтенсивно зростав опір центральних паль (96% проти 57% для кутових). При цьому відбулося деякий перерозподіл несучих здатностей паль. Так, якщо в день забивки несуча здатність кутової палі перевищувала на 106% несучу здат-

ність центральної, то через 28 діб різниця зменшилась і складала 65%.

В модельних дослідах Віткер [98] досліджував розподіл навантажень між палями в групах при відстані між осями паль 2d та 4d. На крайні палі передаються навантаження в 3-5 раз більші, ніж на центральні. Ця різниця зменшується при навантаженнях, близьких до граничних. Із збільшенням відстані між палями різниця в розподілі навантажень зменшується.

В доповіді Ханна та Гріна [86] вказується, що палі на периферії фундаменту з групи взаємозалежних паль розміром 33,8x32,6 м, зведеного на щільних глинах, сприймали навантаження 0,69мН, яке приблизно в три рази перевищувало навантаження на центральні палі (0,24мН). Інші ж дослідники, показали що розподіл навантажень між палями залежить також від довжини паль, їх кількості, розташування в плані, жорсткості паль та ростверку,

В дослідах Стюарта та Нейлора [73] на піщаних ґрунтах навпаки, центральні палі сприймали більше навантаження, ніж крайні. Нейлор показав також, що розподіл навантаження залежить також від технології забивки паль. Оскільки опір забиванню збільшується по мірі збільшення числа паль в групі, то палі, які були забиті пізніше, будуть сприймати більшу частину навантаження.

В роботі А. А. Бартоломія [3] описуються результати випробовувань пального фундаменту з 15 паль в слабких глинистих ґрунтах, де найбільше навантаження сприймають кутові палі та палі, розташовані в крайніх рядах, а найменшу – палі в середині групи.

Розподіл навантаження між взаємозалежними палями в групі докладно досліджувався й Е. Є. Девальтовським [19]. Ним були отримані такі результати: розподіл зусиль по довжині центральної та кутової паль відмінні одне від одного; робота кутової палі, певно, більш близька до роботи одиночної палі, але збільшується частка вістря в передачі навантаження на ґрунт; кутова паля сприймає значно більше навантаження, ніж одиночна і, певно, тільки на останніх етапах навантаження відбувається сковзання її стовбура по ґрунту, на перших етапах навантаження майже все навантаження на центральну палу передається через її вістря. По мірі навантаження фундаменту, все більша частка навантаження на центральну палу починає передаватися її бічною поверхнею; значна частка навантаження, яка передається міжпальному ґрунту стовбуром центральної палі, особливо на останніх етапах навантаження, свідчить про активну участь міжпального ґрунту в сприйнятті навантаження.

Дослідження, які проводились З. В. Бабічевим [2] на фундаментах жилих будинків, показують, що навантаження розподіляються між палями нерівномірно та фактичні навантаження значно менші

розрахункових. На одному з експериментальних будинків навантаження складали 267 кН замість 420 кН по розрахунку.

Так в статті А. А. Луга [31] відмічається, що в практиці проектування всі палі в пальовому ростверку проектуються однакового перерізу та довжини, хоча відомо, що навантаження на крайні палі більше, ніж на центральні. В зв'язку з цим автор пропонує зменшити кількість центральних паль або проектувати їх коротшими та приводить приклад з проектної практики по використанню ефекту взаємозалежності паль в складі групи. Наприклад, для мостової опори замість запроєктованих 83 паль діаметром 47,5см та довжиною 18м, розташованих рівномірно по всій площі ростверку, було запропоновано застосувати 45 паль такого самого діаметру і довжиною 24м, розташованих по периметру ростверку в два ряди. Зниження вартості фундаменту склало при цьому 28%.

Приведені А. Ю. Василенком [12] теоретичні та експериментальні дослідження показали, що при однаковій величині осадки паль в групі, навантаження між ними буде розподілятися нерівномірно: найменше навантаження буде нести центральна паля, найбільше – кутові.

Проведені експерименти показали зниження несучої здатності паль в групі, де палі мають однакову довжину та занурені по існуючій технології, при відстанях між палями $3d$, в порівнянні з несучою здатністю одиночної палі.

Дослідження показали, що при однаковій несучій здатності групи взаємозалежних паль різної довжини мають меншу матеріалоемність (на 10-12%) та енергоемність занурення (на 18 - 20%) в порівнянні з групами з паль однакової довжини. Аналіз показує, що несуча здатність паль довжиною 700мм в дослідних моделях в деякій мірі перевищує несучу здатність паль довжиною 800мм, а для паль 600мм перевищення складає 27%, тобто несуча здатність коротких паль була не нижча несучої здатності паль максимальної довжини. В цьому випадку, на думку автора, проявився ефект направленої ущільнення, оскільки в центрі групи ґрунт виявився настільки ущільненим, що довжина центральної палі могла бути навіть менше прийнятої, зі збереженням середньої для всіх паль несучої здатності.

1.3. Методи розрахунку несучої здатності паль та пальових фундаментів

Першим за часом виникнення методом розрахунку опору вертикально завантажених призматичних паль є динамічний метод (Етельвейн, 1820р.), над удосконалюванням якого працювали багато закордонних і вітчизняних вчених та інженерів (Брихе, Вейсбах, Веллінг-

тон, Вольтман, Ротенбахен, Хиллей, Челлис, Г. Пулос, Н. М. Герсеванов, А. В. Паталеев, Б. П. Попов, П. Р. Тикунов і ін.).

Суть методу полягає в тім, що “динамічний опір чи опір ґрунту швидкому навантаженню паль під дією ударів пального молота ні в якій мірі не тотожно статичному навантаженню, необхідному для досягнення незначного занурення палі” (К. Терцаги) [75, 76].

У цьому факті позначається кардинально різна природа динамічного і статичного опору палі. “Тому судження про величину статичного опору по величині динамічного опору може виявитися в кращому випадку лише зразковим, а іноді просто привести до грубих помилок”. (Д.Тейлор, [74]). Отже, для рішення поставленої задачі необхідно “...установити шляхом систематичних польових дослідів залежність між динамічною і статичною несучою здатністю при різних видах ґрунту”. Таким чином, динамічний метод є непрямим, сугубо наближеним методом оцінки статичної несучої здатності палі, тому що в самій його ідеї закладена неможливість врахування всього різноманіття закономірностей реального процесу деформації ґрунту під статичним навантаженням.

В даний час існують два самостійних, рівнобіжних шляхи теоретичного рішення питань, що висвітлюють роботу паль із ґрунтом основи.

Перший шлях виходить з врахування міцності і несучої здатності ґрунту, що сприймає навантаження від паль (А. В. Паталеев, А. А. Луга, С. М. Рак) [46, 31, 57]. При цьому припускають, що прикладене до палі вертикальне навантаження врівноважується реакцією ґрунту, що діє на нижній кінець палі, і його опором, розподіленим по бічній поверхні стовбура. Визначення несучої здатності виконується на момент вичерпання міцності ґрунту навколо палі, тобто при досягненні зазначеними вище опорами граничних величин, що встановлюються за допомогою статистичної обробки результатів численних польових випробувань.

У залежності від глибини забивання палі і властивостей наволишнього ґрунту співвідношення величин розглянутих видів опорів різне, крім того воно змінюється й у процесі навантаження палі, у міру збільшення її осадки [31]. Здійснити визначення цього співвідношення дуже складно, але необхідно для запитів практики будівництва. Рішення зазначеної проблеми пов'язано, як і у всякій статично невизначеній задачі, з вивченням деформації палі і наволишнього ґрунту.

Саме з цим напрямком теоретичного рішення питань спільної роботи паль і їхніх основ пов'язаний другий шлях, що виходить з врахування процесу деформації, що розвивається в ґрунті основи під дією зовнішнього навантаження.

У зв'язку з тим, що метод теорії пружності при застосуванні до ґрунтів, як лінійно-деформованим середовищам, дає у відомих межах задовільні результати, були зроблені спроби використати його й у розрахунках одиночних паль і пальових фундаментів.

Останнім часом з'явилися роботи, присвячені визначенню осадок одиночних паль і засновані на результатах узагальнення кількості даних статичних випробувань паль у різних ґрунтових умовах (А. А. Луга, Х. Р. Хакимов).

В. Н. Голубков встановив залежність осадки паль і пальових фундаментів від навантаження на базі аналізу спільної роботи їх із ґрунтом основи. В зміст цього аналізу покладені результати польових досліджень, проведених у натуральну величину, що дозволили виявити принципову схему взаємодії між зовнішніми і внутрішніми силами, що діють у межах зони деформації, що формується під палями і пальовими фундаментами [13 - 15].

До нинішнього часу визначення несучої здатності паль та пальових фундаментів проводиться наближеними методами, які не враховують цілий ряд особливостей взаємодії паль з навколишнім ґрунтом. Визначення несучої здатності паль в польових умовах при статичному навантаженні має в більшості випадків недолік, вона визначається по критерію граничної деформації будівель.

Такі ж недоліки, які мають місце при визначенні несучої здатності одиночної палі, присутні і при визначенні несучої здатності паль в групі. Тут до того ж додається ефект сумісної роботи паль, який також досліджений ще далеко не в повній мірі. Існуючі норми не враховують також і те, що розподіл навантажень між палями в групі відбувається нерівномірно.

В. Б. Швець [92] розглядав моделюючий алгоритм, який використовує результати статичних випробувань паль в піщаних ґрунтах. В основі їх методики розрахунку лежить відома аналітична залежність (1.1) для визначення несучої здатності висячої забивної палі перерізом $b \times b$, при дії вертикального навантаження:

$$\hat{O}_n^{\delta} = Rb^2 + 4b \sum_{i=1}^m f_i l_i. \quad (1.1)$$

За результатами обробки вхідного статичного матеріалу автор робить висновки про те, що реальна несуча здатність палі Φ_C пропорційна розрахунковій \hat{O}_n^{δ} :

$$\hat{O}_n^{\delta} = \delta \hat{O}_n^{\delta}, \quad (1.2)$$

де δ – коефіцієнт пропорційності є випадковою величиною, його характеристики визначаються шляхом статистичної обробки.

Дослідженнями, проведеними Б. В. Бахолдіним та Н. Т. Ігонкі-

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-222-8>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-222-8>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-222-8>

Наукове видання

Титко Олег Васильович

**ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНДАМЕНТІВ З ГРУПИ
ВЗАЄМОЗАЛЕЖНИХ ПАЛЬ**

Монографія

Редактор Т. Ягельська

Оригінал-макет підготовлено О. Титком

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний
Гарнітура Times New Roman
Друк різнографічний Ум. др. арк.
Наклад 100 прим. Зам № 2007-100

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95
ВНТУ, ГНК, к. 114
Тел. (0432) 59-81-59