

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Вінницький національний технічний університет

А. С. Моргун

**МЕТОД ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
В РОЗРАХУНКАХ БУРОВИХ ПАЛЬ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2011

УДК 519.635:624.044:624.15

ББК 22.193:38.112:38.58

М 79

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 4 від 25.11.2010 р.)

Рецензенти:

І. П. Гамеляк, доктор технічних наук, професор

В. А. Огородніков, доктор технічних наук, професор

Моргун, А. С.

М 79 Метод граничних елементів в розрахунках буронабивних паль : монографія / А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 108 с.

ISBN 978-966-641-402-4

В монографії розглядаються актуальні питання прогнозування несучої спроможності паль, які широко використовуються в будівництві завдяки своїм безперечним перевагам – високій несучій спроможності при дії як вертикальних так і горизонтальних навантажень, технологією улаштування, що не спричиняє появу динамічних впливів на навколишні споруди. Наведено теоретичні основи дослідження взаємодії бурових паль з основою за МГЕ, результати числових досліджень та порівняння з експериментом. Робота основ досліджена як в лінійній, так і в нелінійній стадіях з використанням дилатансійної моделі пластичної течії. Монографія розрахована на науковий та інженерно-технічний персонал, а також для студентів інженерно-будівельних спеціальностей.

УДК 519.642:624.044:624.15

ББК 22.193:38.112:38.58

ISBN 978-966-641-402-4

© А. Моргун, 2011

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПОВЕДІНКИ БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ, ЇХ НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ.....	9
1.1. Область використання буронабивних паль.....	9
1.2. Експериментальні дослідження НДС буронабивних паль.....	13
1.3. Нормативні методики проектування буронабивних паль.....	28
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ОСНОВИ.....	35
2.1. Вступ.....	35
2.2. Сучасні уявлення про визначення фізико-механічних характе- ристик ґрунтів.....	38
РОЗДІЛ 3. ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ НДС БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ ЗА МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	47
3.1. Вступ.....	47
3.2. Пластична течія ґрунтових масивів.....	49
3.3. Методика досліджень. Дискретизація буронабивної палі та до- воколишнього ґрунту.....	56
3.4. Шляхи підвищення ефективності і якості фундаментів з буро- набивних паль.....	65
3.4.1. Аналіз експериментальних графіків $S=f(P)$ з метою пошуку резервів роботи буронабивних паль.....	65
3.4.2. Числове моделювання за МГЕ роботи буронабивних паль з урахуванням технологічних процесів їх улаштування.....	70
3.5. Обґрунтування можливості використання розв'язків Р. Міндлі- на для пружного півпростору до компонування матриці піддатли- вості (матриці впливу МГЕ).....	81
РОЗДІЛ 4. СТІЙКІСТЬ ГРУНТОВИХ МАСИВІВ.....	86
4.1. Основні положення.....	86
4.2. Критерії текучості Треска, Мізеса, Мора, Кулона Граничні круги Мора	87
4.3. Метод кругової поверхні ковзання.....	93
4.4. Визначення коефіцієнта запасу стійкості резервуара	99
ЛІТЕРАТУРА	103

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Г	– границя досліджуваного елемента
ДБНіП	– державні будівельні норми і правила
МСЕ	– метод скінчених елементів
МГЕ	– метод граничних елементів
НДС	– напружено-деформований стан
P_{ij}^*, u_{ij}^*	– напруження та переміщення в фундаментальних розв'язках Р. Міндліна
СЕ	– скінчений елемент
СПФ	– стрічковий пальовий фундамент
ξ	– точка прикладення сили
х	– точка нагляду

ВСТУП

За останні роки суттєво зросли навантаження на основу, використовуються ділянки зі складними інженерно-геологічними умовами, будівництво йде в умовах щільної міської забудови. Це викликало необхідність розробки та використання нових типів паль і технологій їх влаштування. Використання палебійних установок при заглибленні паль приводить до передачі на ґрунтові основи значних динамічних впливів, що негативно впливає на споруди довкола та може спричинити їх руйнування. Процес постукування, вібрації ґрунту знімає заборону на ковзання, тому особливо недопустимо використання забивних паль при наявності в основах існуючих будівель пісків та супісків, які здатні ущільнюватись під дією коливань та отримувати значні зміщення. Зважаючи на ці обставини увага будівельників сьогодні звернена до альтернативних видів фундаментів – буронабивних паль.

У зв'язку з розвитком будівництва споруд з великими зосередженими навантаженнями (на колону від 150 кН до 100 000 кН), а також із забудовою на незручних і затиснених будівельних майданчиках спостерігається тенденція до збільшення об'ємів буронабивних паль, які часто дозволяють найбільш просто і економічно розв'язати питання влаштування фундаментів без суттєвих динамічних впливів на існуючі будівлі.

Саме тому особливістю сучасного фундаментобудування є зміщення центра ваги на буронабивні та буроін'єкційні палі, які є ефективнішими за забивні. Використання буронабивної технології дозволяє використовувати заглиблення палі на конкретну позначку.

Прогноз поведінки під навантаженням бурових паль має важливе практичне значення при спорудженні і реконструкції будівель на складних ґрунтових умовах, особливо на просадкових ґрунтах (вони займають 70 % території України), в стиснених умовах забудови, при підсиленні фундаментів існуючих будівель, при глибинному ущільненні просадкових і насипних ґрунтів, при необхідності передачі на фундамент значних горизонтальних навантажень (внаслідок більшого діаметра бурові палі працюють краще від забивних на горизонтальні

впливи). Розв'язуючи питання вибору типу пального фундаменту, необхідно враховувати всі об'єктивні фактори: геологічну будову основи, схему і величину навантаження, можливості будівельної індустрії, кошторисну вартість фундаментів та терміни їх спорудження.

Буронабивні палі вперше були запропоновані в ХІХ столітті

А. Є. Страусом. Запропонований ним принцип виготовлення таких паль тепер розвинений світовою практикою фундаментобудування. Діаметр стовбура сучасних бурових паль складає від 10 до 200 см, а розширення – від 150 до 350 см. Глибина закладання нижніх кінців паль при значних потужностях слабких чи просадкових ґрунтів сягає 40–50 м. Натурні дослідження бурових паль показують наявність великого запасу їх несучої спроможності, такі палі можуть сприймати навантаження від 2 000 до 20 000 кН.

Гостра соціальна необхідність в об'єктах соціально-побутового призначення потребує збільшення об'ємів цивільного та промислового будівництва. Ріст об'ємів будівництва можливий при раціональному використанні нових видів фундаментів та сучасних технологій їх розрахунку та влаштування. Пальові фундаменти – найпоширеніші типи фундаментів – відзначаються надійністю при зведенні промислових та цивільних будівель.

Проблема оцінювання несучої спроможності фундаментної конструкції є визначальною в практичному проектуванні. Впровадження буронабивних паль є актуальним питанням сьогодення, та воно стримується недостатнім рівнем вивчення взаємодії буронабивної палі з ґрунтом основи за існуючими методами визначення їх несучої здатності. Це веде до прийняття проектних рішень, що не відповідають дійсній роботі буронабивних паль.

В літературі існує інформація суперечливого характеру щодо роботи буронабивних паль. Проведено велику кількість комплексних досліджень із встановлення характеру взаємодії цих видів паль з основою. Найбільш близькими до буронабивних паль є забивні палі. Тому модельні та числові дослідження їх зазвичай включають три задачі:

- 1) встановлення різниці в їх несучій здатності;

2) дослідження розподілу несучої здатності палі між її боковою поверхнею та вістрям;

3) визначення різниці в деформуванні ґрунту при статичному вдавленні палі та динамічній дії.

Як відомо, суттєве підняття граничного навантаження на зернисті ґрунти може бути досягнуто при попередньому додатковому їх ущільненні. Несуча спроможність щільних ґрунтів може виявлятися в 10 разів більшою, ніж несуча спроможність того ж ґрунту у пухкому стані. Опір палі зовнішнім вертикальним навантаженням залежить від процесів, що проходять в ґрунтах і на контакті між палею і ґрунтом. Найбільш суттєвий фактор – утворення зони ущільнення, яка сприяє збільшенню опору забивних палей зовнішнім навантаженням.

В механіці ґрунтів розглядаються теоретичні та практичні питання передбачення НДС ґрунтових основ при передачі на них навантаження від споруди. Процес навантаження основ будівлі можна віднести до квазістатичного. Такі процеси характеризуються нескінченно повільною течією. Протікання цього процесу відповідає термінам за будови будівлі.

Мінливість процесу деформування ґрунту в роботі досліджувалась за МГЕ. На основі цього числового методу в роботі напрацьовано методику розрахунку НДС буронабивних палей з визначення їх несучої здатності.

На основі напрацьованої моделі розроблено програмний комплекс поведінки буронабивних палей при дії вертикальних навантажень, який дає можливість ще на стадії проектування спрогнозувати НДС палей при конкретних ґрунтах, довжині та діаметрі палі. Проведено комплекс числових досліджень роботи буронабивних палей та порівняно результати з експериментальними даними з метою встановлення коефіцієнта кореляції. Здійснено порівняння нормативних методик визначення НДС та несучої здатності забивних і буронабивних палей згідно з СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» та новим нормативним документом ДБН В.2.1.-10-2009 «Основи та фундаменти будівель і споруд».

Основні рівняння теорії пружності, що описують поведінку невідомих функцій σ - ε в середині і на границі області в МГЕ, зводяться до

інтегральних рівнянь, які потребують дискретизації лише границі і значно зменшують число вузлових точок.

Числовий МГЕ потребує використання ЕОМ і, що є загальним для наближених числових методів, зводить систему розрахункових диференціальних рівнянь до розв'язків СЛАР високих порядків, що набагато спрощує задачу отримання числового розв'язку.

При компоновці матриці піддатливості МГЕ в якості фундаментальних розв'язків (ядра розрахункового граничного інтегрального рівняння) використано розв'язок Р. Міндліна для однорідного півпростору.

Застосування інтегральних перетворень дає корисний метод розв'язання просторової і плоскої задач як теорії пружності, так і лінійної механіки руйнувань. Суттєвим є те, що зменшується число невідомих.

Можливості побудови точних розв'язків задач теорії пружності обмежені. Як для просторових, так і для плоских задач точні розв'язки можна отримати для областей з геометрично простими границями. З цієї причини давно усвідомлена необхідність використання ефективних наближених числових методів.

Таким чином, в умовах сьогодення, при збільшенні тисків на основу необхідність розв'язання задачі розробки методики прогнозування НДС буронабивних паль стрімко зростає – це одна із актуальних проблем будівельної індустрії.

В дослідженнях монографії використані також матеріали магістерської дисертації О. Е. Тимошенка та бакалаврської роботи О. О. Єжова.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ПОВЕДІНКИ БУРОНАБИВНИХ ПАЛІ, ЇХ НАПРУЖЕНО-
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА НЕСУЧОЇ СПРОМОЖНОСТІ

1.1. Область використання буронабивних палі

Надійність роботи основ і фундаментів визначають довговічність і експлуатаційну придатність споруди в цілому.

Як відомо, на улаштування фундаментів витрачається близько 25 % від загальних матеріальних витрат бетону, що використовується при зведенні будівлі. Крім того, при виникненні складності улаштування фундаментів, особливо при несприятливих ґрунтових умовах, нерідко затримуються терміни будівництва всієї споруди. Збільшення складності і підвищення відповідальності сучасних споруд постійно піднімає вимоги, що висуваються до фундаментів, тому виникає потреба підвищення ефективності і якості цих фундаментів.

Все це говорить про те, що питання удосконалення конструкцій фундаментів і методів їх спорудження є актуальним. Як відомо, заглиблені фундаменти передають навантаження на основу тиском по подошві, а по бічній поверхні – силами навантажувального тертя (від’ємне тертя виникає через те, що при замоканні ґрунти, які просідають під власною вагою, нависають на палю і додатково навантажують її цими силами, спричиняючи додаткові осідання фундаментів). Для реалізації сил навантажувального тертя необхідно відносне переміщення палі і навколишнього ґрунту.

На відмінну від фундаментів, що споруджуються у відкритих котлованах, в буронабивних палях в роботу задіяна бокова поверхня, що сприймає частину вертикального навантаження і, головним чином, чинить опір горизонтальним зусиллям і моментам, суттєво покращуючи характер контактних тисків в горизонтальній площині фундаменту. Дослідження показали, що навантаження, які сприймають такі фундаменти, можуть бути в 1,5–1,6 разів більші, ніж у традиційних фундаментах такої ж площі. Буронабивні палі також використовуються

як фундаменти теплоенергоцентралей (ТЕЦ), для укріплень схилів до-ріг тощо. Перспективними є буроін'єкційні (коренеподібні) палі для підсилення фундаментів. При заглибленні забивних паль в ґрунтове середовище, що стискається, проходить послідовне формування:

- пружного поля;
- ущільнення активної зони навколо пального ґрунту, яке сприяє підняттю опору паль зовнішнім навантаженням;
- зсувів частинок ґрунту та ковзань.

У буронабивних палях ущільнення активної зони залежить від технології їх виготовлення і деколи відсутнє.

Розрахунок основ сьогодні проводиться за двома групами граничних станів, таким чином, щоб при експлуатації і спорудженні будівель була забезпечена придатність їх до нормальної експлуатації з точки зору міцності, стійкості наземних конструкцій, технологічних і архітектурних вимог. Ці вимоги забезпечуються розрахунком основ по деформаціях, який проводять для всіх видів нескельних ґрунтів і для ряду ґрунтів з особливими властивостями. Так, при осіданні лесових ґрунтів внаслідок замочування граничні деформації конструкції настають раніше втрати ґрунтом несучої спроможності. В особливих випадках основу розраховують за несучою спроможністю.

Із специфічними властивостями лесових ґрунтів будівельники зустрічаються часто. Уже в процесі будівництва споруда може отримати значні нерівномірні осідання, які не можна пояснити, виходячи із механіки звичайних ґрунтів. Проведені пошукові роботи та експерименти під керівництвом Ю. М. Абелева [1] – дослідження ґрунту методом поступового замочування – показали, що специфічною властивістю лесу є його властивість, находячись в напруженому стані від зовнішнього навантаження і власної ваги, при замочуванні, давати швидкоплинну додаткову деформацію, яку назвали просіданням. На відміну від осідання ця деформація пов'язана з корінними змінами в структурі, носить провальний характер і є великою небезпекою для споруди. Широке розповсюдження лесу на Україні примушує активно вирішувати та вивчати проблеми будівництва на просадкових ґрунтах. Вивчення цієї проблеми вимагає об'єднання пошукових, проектних, будівельних та науково-дослідних робіт. Удосконалення методів розра-

хунку вітчизняної школи механіки ґрунтів формувались на міркуваннях, що більшість будівель і споруд передають на ґрунт в основному вертикальне навантаження і, як правило, немає загрози у вигляді втрати несучої спроможності (стійкості) основи. Тому головним розрахунком для фундаментів став розрахунок осідань, як загальних, так і нерівномірних. Щоб відмовитись від так званих допустимих тисків, що не залежать від конкретного ґрунту та від розмірів фундаменту, і перейти до визначення тисків по допустимих осіданнях, необхідно було дати базу для їх визначення. Таку базу дав Н. М. Герсіванов – теорія лінійно-деформованого середовища. В. В. Соколовським в 40-х роках ХХ століття була розвинена статика сипучих середовищ, але практика змусила шукати нові, більш оптимальні моделі ґрунту, що враховують його нелінійну роботу.

Перспективне використання буронабивні палі мають: 1 – на лесових ґрунтах; 2 – в сухих глинистих ґрунтах, де заглиблення забивних паль неможливе (ускладнене); 3 – коли потрібно прорізати просадкові ґрунти, а забивні палі не можуть це зробити.

Пальові фундаменти знайшли широке використання, як при будівництві на слабких ґрунтах, де вони є традиційними конструкціями, так і при масовому будівництві у звичайних ґрунтових умовах. Як в цивільному, так і в промисловому сучасному будівництві значно підвились навантаження на фундаменти, використовуються забивні і збільшуються об'єми буронабивних паль. У низці випадків колони висотних будівель передають великі зосереджені навантаження на фундамент і тиски в ньому сягають 1 МПа.

Палі дозволяють:

- зменшити об'єми земляних і бетонних робіт;
- підняти рівень індустріалізації робіт нульового циклу;
- скоротити терміни і кошторисну вартість улаштування фундаментів;
- проводити роботу в будь-яку пору року;
- підняти надійність фундаментних конструкцій і експлуатаційні якості будівель і споруд.

Ці переваги стали реальними в результаті впровадження наукових досліджень і удосконалення методів розрахунку. Економічність і надійність пильових фундаментів залежить від якісного визначення їх несучої спроможності. Найбільш перспективними методами визначення несучої спроможності є: 1–статичне зондування; 2–дослідження моделей пиль безпосередньо на будівельному майданчику.

При статичному зондуванні використовується той фактор, що опір, який здійснює ґрунт в процесі заглиблення палі, може слугувати показником майбутньої несучої спроможності палі. Цей метод базується на виявленні залежностей несучої спроможності пиль від їх опору заглибленню (зондуванню). За своєю практичністю і простотою такий метод оцінки несучої спроможності використовується ширше, ніж інші методи. При зондуванні виникає питання інтерпретації отриманих за його допомогою результатів. Статистичне опрацювання результатів паралельних досліджень забивних пиль статичним навантаженням і моделей пиль статичним зондуванням дає можливість отримати перехідні коефіцієнти від опору ґрунту під конусом зонда до опору під нижнім кінцем палі і від опору ґрунту по боковій поверхні зонду до опору по боковій поверхні палі. При такому підході суттєво піднімається точність визначення несучої спроможності пиль.

Для успішного впровадження пиль потрібно створити нові методи їх розрахунку, перейти від розрахунку пиль по несучій спроможності до розрахунку їх по деформаціях, оскільки експериментальні дані свідчать про наявність резерву, тому що осідання споруд на палях, в тому числі і нерівномірні осідання, в декілька разів менші, ніж на фундаментах на натуральній основі. Основна вимога розрахунку основ по II граничному стану (деформаціях) складається в тому, що розрахункова деформація основи s_p не має перебільшувати його граничну величину s_{sp} , яка ще гарантує експлуатаційну придатність споруди $s_p \leq s_{sp}$. Забивні фундаменти при дослідженнях в польових умовах показують, що гранична величина осідання, при якій деформації затухають в об'ємі активної зони ґрунту рівна 8–12 см. Активна зона – зона впливу додаткового тиску від споруди.

1.2. Експериментальні дослідження НДС буронабивних паль

Впровадження сучасних методів розрахунку – один із шляхів зде-шевлення фундаментних конструкцій. Перевага буронабивних паль – можливість отримання рівної несучої спроможності, як по опору ґрунтів основи, так і по матеріалу стовбура палі. Основним критерієм для встановлення навантаження на бурові палі є величина розрахункового опору бетону стовбура палі.

При призначенні величини навантаження на бурову палю потрібно знати розрахунковий опір бетону стовбура цих паль і величину діаметра палі (0,6–1,2 м). Це питання виникає не лише при проектуванні конкретних об'єктів, але й при визначенні оптимальної області прикладання фундаментів із бурових паль. Основним критерієм для встановлення допустимого навантаження на бурові палі, що опираються на скельні і напівскельні ґрунти, є величина розрахункового опору бетону стовбура палі.

При розрахунку по матеріалу набивної палі ДБН передбачає коефіцієнт 0,6 для марки бетону 200, 300, які зазвичай використовуються при бетонуванні паль. Це складає відповідно 36 і 60 кг/см².

В японських стандартах допустиме напруження від постійних навантажень в бетоні бурових паль не перебільшує 1/4 міцності бетону на стиск при $t = 28$ днів, тобто для марки 200, 300 це відповідно 50 і 75 кг/см². Для набивних паль допустиме значення на бетон згідно з цими стандартами – 1/5 міцності бетону, тобто 40–60 кг/см², що узгоджується з ДБН.

За французькими нормами величини максимальних напружень в бетоні набивних паль можуть бути використані і для бурових паль. Для набивних паль максимальне напруження при бетонуванні сухої свердловини не має перебільшувати 50 кг/см² при відсутності арматури і 40 кг/см² при її наявності.

Таким чином, проведений огляд говорить про те, що величину розрахункового опору бетону стволів бурових паль великого діаметра можна приймати рівною 1/4 марки бетону, тобто має бути не меншою 200. При цьому потрібно враховувати, що повне навантаження на фу-

ндамент із бурових паль передається через деякий час, за який бетон набирає свою міцність. Потрібно відмітити, що біля 70 % бурових паль в побутових об'єктах мають напруження на бетон $53 - 62 \text{ кг/см}^2$ при марці бетону 300. При порівнянні техніко-економічних показників із бурових і забивних паль, що опираються на скельні і напівскельні ґрунти, потрібно враховувати оптимальні варіанти проектування, тобто, коли повністю використовується міцність бетону.

У сучасному будівництві на значних (порядку 20 м і більше) товщах лесових просадкових ґрунтів все частіше використовують саме буронабивні палі. Буронабивні палі великих (до 1,2 м) діаметрів дозволяють порівняно легко прорізати значні товщі просадкових ґрунтів, заглиблюватись в більш міцні ґрунти, передавати на них зосереджені навантаження від споруд, споруджувати фундаменти в стислі терміни і в будь-яку пору року. Доцільність використання буронабивних паль особливо яскраво проявляється при будівництві важких споруд з розвиненою підземною частиною і з широким діапазоном навантажень. Вони використовувались при будівництві Волго-донського заводу тяжкого машинобудування, фундамент якого залягає на суглинках золуво-делювіального походження II типу по просадковості з характеристиками: $\gamma = 1,73 \text{ г/см}^3$, $\gamma_{\text{ск}} = 1,52 - 1,68 \text{ г/см}^3$, $\gamma_d = 2,68 \text{ г/см}^3$, $e = 0,73$, $\varphi = 19 - 17^\circ$, $c = 0,015 - 0,03 \text{ МПа}$, $E = 10 - 12 \text{ МПа}$, $\omega = 13 - 17 \%$.

Навантаження від колон каркаса на фундамент сягають від 4 000 до 50 000 кН. При навантаженні в такому ґрунті перед проектувальниками виникають складні задачі. Тому при будівництві заводу було виконано під керівництвом А. А. Григоряна [15] значний об'єм натурних статичних досліджень буронабивних паль діаметром $d = 600 - 1000 \text{ мм}$ та довжиною $L = 12 - 26 \text{ м}$ з наявністю уширених п'ят діаметром $d = 1600 - 2200 \text{ мм}$ (табл. 1.1).

Результати досліджень (рис. 1.1) свідчать про дуже малі осідання майже до досягнення навантаженнями граничних значень крайніх навантажень і чітких «зривах» паль при незначному перебільшенні граничних навантажень.

Таблиця 1.1

Найменування об'єкта	Позначення площадок	Номер випроб. палі	Розміри паль			Довжина ділянок палі в межах товщі ґрунту, м			Граничне дослідне навантаження, Р _{гр} , кН	Осадка при Р _{гр} , мм	Пружний підйом палі, мм	Значення Р _{гр} за розрахунком, кН	Похибка розрахунку, %
			довжина l, м	діаметр, мм		1,2	3,4	5					
				стволо	уширення								
Промислова площа-дка	В-1	1	16	1000	2200	3	15	-	4480	9,65	4,17	3937,7	12,1
	В-1	2	16	1000	2200	3	15	-	4500	10,05	4,72	3937,7	12,5
	В-2	3	18	1000	2200	7	9	2	5030	7,00	3,03	4629,5	8
	В-2	4	18	1000	2200	7	9	2	5000	7,41	2,65	4629,5	7,4
	В-3	5	25	1000	-	4	19,4	1,6	6340	9,95	4,24	-	-
	В-3	6	25	1000	-	4	19,4	1,6	5650	10,69	5,12	4828,7	14,5
	В-4	7	25	1000	2200	14	7,5	3,5	6560	6,04	-	5632,1	14,1
	В-4	8	25	1000	2200	14	7,5	3,5	5880	12,19	не визначено	5632,1	4,2
	В-5	9	25	1000	-	3,6	15	6,4	5760	20,2	4	5020,9	12,8
	В-5	10	25	1000	-	3,6	15	6,4	5800	6,34	4	5020,9	13,4
Виробнича база	Б-1	11	18	1000	-	14	4	-	3000	3,94	не визначено	2866,9	4,4
	Б-1	12	18	1000	-	14	4	-	3000	9,6	5,22	2866,9	4,4
	Б-1	13	11	600	1600	11	-	-	1360	3,55	1,6	1543,4	13,5
	Б-1	14	11	600	1600	11	-	-	1360	4,16	2,97	1543,4	13,5
	Б-1	15	18	600	1600	14	4	-	2400	5,2	3,5	2159,4	10
	Б-1	16	18	600	1600	14	4	-	2560	5,73	3,3	2159,4	15,6
	Б-1	17	22	600	1600	14	8	-	2720	8,23	4,81	2462	9,5
	Б-1	18	22	600	1600	14	8	-	2720	12,33	6,23	2462	9,5

Провальне осідання паль при постійному навантаженні, що перебільшує граничне навантаження, є результатом багатьох зривів – послідовних порушень станів граничної рівноваги, що захоплює все глибші шари ґрунту. Після незначного перебільшення граничного навантаження настає «зрив» паль, і пластичні деформації ґрунту в основах паль нарастають лавиноподібно. Робота ґрунту в цьому випадку характеризується різким переходом від пружного стану до пластичного і для розрахунку граничного навантаження потрібна постановка задач граничної рівноваги.

Розрахунки за ДБН для паль з розширенням відхилялися від 2 % до 133 %, без розширень – від 2 % до 8 %. Це свідчить про необхідність подальшої розробки розрахункової бази та її уточнення.

Таким чином, за результатами цих досліджень можна зробити такі висновки:

- поведінка буронабивних паль великих розмірів ($d = 1$ м із уширенням п'яти 2,2 м, довжиною до 25 м) під дією втискуючого навантаження, що зростає в товщі замоченого лесового ґрунту, характеризується, як і для паль меншого розміру, чітким переходом при малому осіданні (до 12 мм) від пружного стану до пластичного;

- осідання паль внаслідок стиснення ствола складає суттєву частину (0,6 см) загального осідання палі в діапазоні навантажень від 0 до $P_{\text{граничне}}$;

- розрахунки несучої спроможності паль у відповідності з наближеним розв'язком задачі граничної рівноваги збігаються з даними статичних досліджень паль;

- розрахунки несучої спроможності паль з розширеними п'ятами у відповідності з методикою ДБН потребують уточнень.

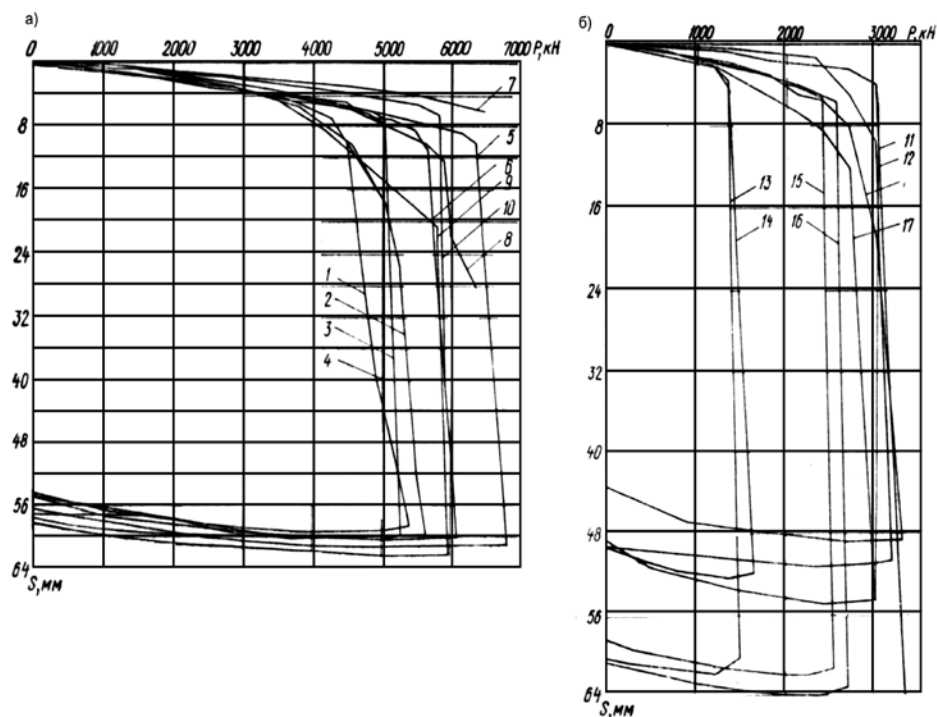


Рис. 1.1. Графіки залежностей «осідання-навантаження» для буронабивних паль, що випробовувалися: а – на промисловій площадці; б – на площадці виробничої бази

Об'єми використання паливних фундаментів в промисловому і цивільному будівництві України постійно збільшуються, із загального обсягу впровадження частка буронабивних палей складає біля 70 %.

При таких масштабах використання буронабивних палей стає особливо актуальним більш точне визначення їх несучої спроможності, що дозволяє ліквідувати зайву витрату матеріалів, тим самим знизити кошторисну вартість фундаментів, забезпечивши при цьому стійкість і міцність будівель і споруд.

Зараз найбільш повне визначення несучої спроможності досягається статичними дослідженнями на дію вертикальних і горизонтальних навантажень в конкретних геологічних умовах і зібрано великий матеріал про несучу спроможність буронабивних палей.

Як правило, дослідження рівних за розміром забивних палей, заглиблених в ідентичні ґрунти, давали однакову їх несучу спроможність. Це дозволило різко скоротити число досліджень забивних палей і сміливіше їх прив'язувати в проектах без попередніх досліджень.

Інша картина отримана в результаті статичних досліджень буронабивних палей. Розкид значень несучої спроможності рівних за розмірами палей, виготовлених на одній і тій же площадці [5] по одній технології, сягає близько 40 %. Якщо врахувати, що несуча спроможність палей, яка закладається в проект, приймається за мінімальними значеннями, отриманими в результаті досліджень, то втрати, як матеріальні, так і кошторисні, від зниження несучої спроможності значні.

Великий розкид результатів досліджень є однією із причин того, що несуча спроможність буронабивних палей використовується не повністю. Цей розкид не дозволяє прив'язувати буронабивні палі в проектах, що розробляються, без дорогих і трудомістких попередніх польових досліджень, проведення яких не завжди можливе до освоєння будівельного майданчика. Це суттєво стримує впровадження буронабивних палей в будівництві.

При проведенні польових досліджень [5] забезпечувалась відповідність заданих розмірів діаметра і довжини палей, тому цей фактор не міг вплинути на розкид результатів досліджень.

Не могло вплинути і замочування, бо дослідження забивних палей в таких умовах великого розкиду не давали. Для виявлення причин

розкиду проведено аналіз найвизначальніших факторів в отриманих експериментальних дослідженнях несучої спроможності буронабивних паль.

Можливою причиною розкиду міг бути стан забою свердловини перед бетонуванням, наявність на дні забою шару розпушеного ґрунту, який має зовсім інші фізико-механічні характеристики і суттєво впливає на несучу спроможність буронабивної палі. Для з'ясування цієї обставини були проведені експериментальні дослідження забою [5].

Огляд свердловин зафіксував наявність на її дні 5–30 см розпушеного ґрунту (3–10 см на дні уширення). Для визначення міцнісних властивостей розпушеного ґрунту с подальшим порівнянням було виконано досліди на компресію ґрунту з глибини 11–16 м . Характерні компресійні криві показані на рис. 1.2. При $p = 0,3$ МПа зразки замочувались, просадковість порушеної структури сягала 2,75 %.

Саме просадковість порушеної структури суглинків під п'ятою палі при збільшенні вологості з 0,75 до 0,95 понизила міцнісні властивості ґрунту. Стисливість ґрунту порушеної структури ґрунту в декілька разів (до 3,4 рази) більша непорушеної, що і обумовлює велике осідання паль.

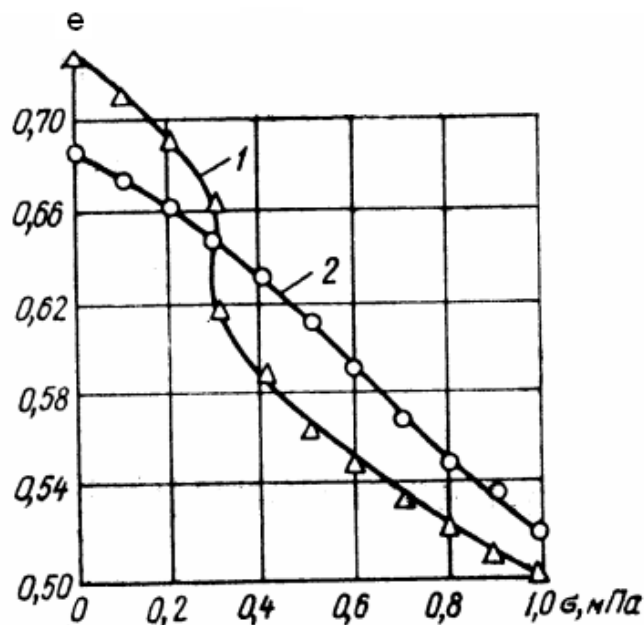


Рис. 1.2. Характерні компресійні криві суглинків:
1 – порушеної; 2 – непорушеної структури

Зазвичай бетонування буронабивних паль проводиться сумішами м'якої консистенції з осіданням нормального конуса 18–22 см, властивості яких вважають близькими до властивостей тяжких рідин.

Тиск цих сумішей мав би попередньо ущільнити розрихлений ґрунт, але результати експериментальних досліджень (рис. 1.2) свідчать, що цей тиск навіть для сумішей м'якої консистенції не відповідає тиску тяжкої рідини з лінійним законом зміни по глибині свердловини $p = \gamma H$ (де γ – об'ємна маса, H – висота стовпа рідини) – крива 1 на рис. 1.3.

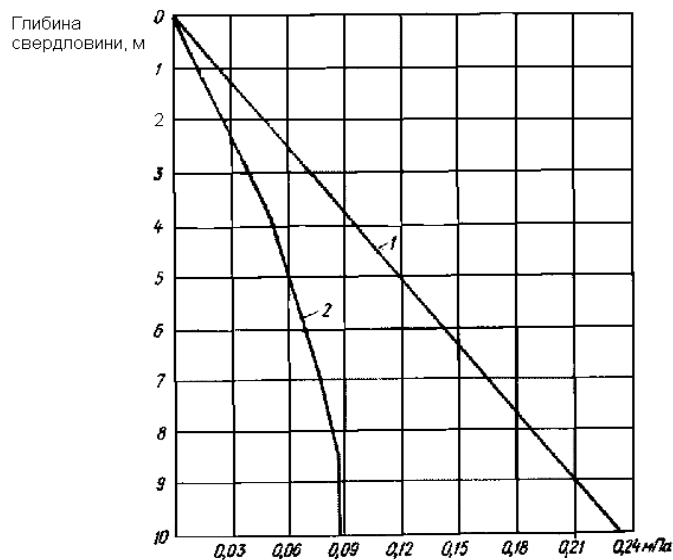


Рис. 1.3. Графік залежності тиску бетонної суміші від глибини свердловини

З характеру кривої 2 (рис. 1.3) можна передбачити, що із збільшенням глибини свердловини тиск бетонної суміші не перевищує 0,1 МПа, а цього зовсім недостатньо для попереднього ущільнення залишків розрихленого ґрунту.

Таким чином, ущільнення розпушеного ґрунту на дні свердловини під тиском бетонної суміші не проходить.

Не проходить також і зміцнення пухкого шару за рахунок проникнення в нього цементного молока. Відкопування більше 1000 паль [5] на глибину і скрупульозне дослідження контактного шару «бетон–ґрунт» показали, що цементне молоко в ґрунт не проникає, в наявності чітка границя бетону і ґрунту.

Поверхня відкопаних паль відповідає по чистоті і рівності поверхням бетонних елементів, виготовлених в сталевій опалубці.

Отже, в процесі бетонування і твердіння бетону, залишки розпушеного ґрунту на дні свердловин не змінюються.

Досліди в чотирьох свердловинах (табл. 1.2) з попереднім ущільненням показали результати, які наведені на рис. 1.4:

- залишки розпушеного ґрунту знижують несучу спроможність;
- ущільнення дна свердловини сприяє підвищенню опору палі.

Таблиця 1.2

№ палі	Розміри паль		Нормативне навантаження при осіданні 30 мм, кН	Примітки
	довжина, м	діаметр, мм		
14	12,3	600	1150	Пухкий ґрунт на дні свердловини товщиною 10 см
15	12	600	1620	Чисте дно свердловини
5	11,2	600	1580	Те ж саме
4	12,5	600	1650	Попереднє ущільнення пухкого ґрунту на дні свердловини

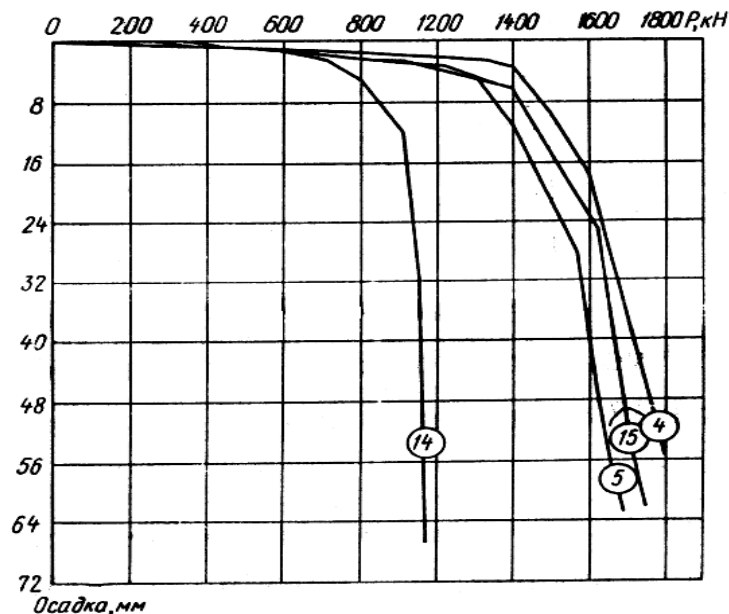


Рис. 1.4. Графіки «навантаження-осідання» для паль діаметром 600 мм (цифри на кривих відповідають номерам паль табл. 1.2)

ЛІТЕРАТУРА

1. Алейников С. М. МГЕ в контактных задачах для упругих пространственно-неоднородных оснований / С. М. Алейников. – М. : АСВ, 2000. – 754 с.
2. Абелев М. Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах / Абелев М. Ю. – М. : Стройиздат, 1983. – 247 с.
3. Бахолдин Б. В. Методика контроля несущей способности буронабивных свай по результатам их динамических испытаний / Бахолдин Б. В., Драницын А. В. // ОФ и МГ. – 2007. – №1. – С. 26–30.
4. Бахолдин В. В. Совершенствование норм проектирования буронабивных свай / Бахолдин В. В., Мамонов В. Н. // ОФ и МГ. – 1972. – № 6 – С. 21–23.
5. Совершенствование методов расчета буронабивных свай и экспериментальное обоснование несущей способности буронабивных свай на строительстве Камского автомобильного завода /Бахолдин Б.В., Мамонов В.М., Осколков А.Г. Буронабивные сваи в промышленном строительстве. – М. : Стройиздат, 1974. – 214 с.
6. Бенерджи П. Методы граничных элементов в прикладных науках / Бенерджи П., Баттерфилд Р. – М. : Мир, 1984. – 494 с.
7. Бойко І. П. Вплив розташування паль на НДС захисних підпорних стінок / І. П. Бойко, В. М. Ключка // Будівельні конструкції : міжвідомчий науково-технічний збірник, вип. 61, т. 2. – 2004. – С. 283–286.
8. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при прибудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, В. О. Сахаров // Основи і фундаменти : міжвідомчий науково-технічний збірник. – К. : КНУБА, вип. 28, 2004. – С. 3–10.
9. Бойко И. П. Напряженно-деформированное состояние упруго-пластического, дилатирующего основания свайных фундаментов / И. П. Бойко // Основания и фундаменты ; вып. 19. – К. : Будівельник, 1986. – С. 7–9.
10. Бойко И. П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упруго-пластическом основании / И. П. Бойко // Основания и фундаменты. – К. : Будівельник, 1985. – № 18. – С. 11–18.
11. Бреббия К. Методы граничных элементов / Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л. – М : Мир, 1987 – 524 с.
12. Бреббия К. Применения МГЕ в технике / Бреббия К., Уокер С. – М. : Мир, 1982. – 247 с.

13. Проектування основ і фундаментів / [Ваганов І. І., Маєвська І. В., Попович М. М., Тітко О. В.]. – Вінниця : ВДТУ, 2003. – 131с.
14. Єжов О.О. Підземний паркінг в м. Вінниця розміром 81,2×78,7 : бакалаврська робота. ВНТУ. – 2010.
15. Гарагаш Б. А. Надежность пространственных регулируемых систем «сооружение–основание» при неравномерных деформациях основания / Б. А. Гарагаш. – Сочи : Кубанькино, 2004. – 908 с.
16. Гричаном А. А. Буронабивные сваи с уплотненным грунтом в забое скважены на строительстве завода «Атоммаш» / А. А. Гричаном, Ю. А. Чименков. // ОФ и МГ–1980.– № 6. – С. 10–14.
17. Догадайло А. И. Исследование и внедрение эффективной технологии устройства скважин набивных свай // Збірник наукових праць НД і БК «Будівельні конструкції» (за матеріалами VI НТК по МГіФ). – 2008.– № 71. – С. 12–18.
18. Основи та фундаменти будівель і споруд ДБН В.2.1-10-2009.
19. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація : ДСТУ Б В.2.1-2-96 (ГОСТ 25100-95). – ПНІИИС: НПО «Стройизыскания», 1996.
20. Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення : ДСТУ Б В.2.1-3-96 (ГОСТ 30416-96) – К. : Будівельник, 1997. – 38 с.
21. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості : ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96) – К. : Будівельник, 1997. – 32 с.
22. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань : ДСТУ Б В.2.1-5-96 (ГОСТ 20522-96), – К. : Будівельник, 1996. – 41 с.
23. Ґрунти. Методи польового визначення характеристик міцності та деформованості : ДСТУ Б В.2.1-7-2000 (ГОСТ 20276-99)– К. : Будівельник, 2000. – 45 с.
24. Жемочкин Б. М. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. М. Жемочкин, А. П. Синицин. – М. : Стройиздат, 1962. – 239 с.
25. Зарецкий Ю. К. Вязко-пластичность грунтов и расчеты сооружений / Ю. К. Зарецкий. – М. : Стройиздат, 1988. – 320 с.
26. Ильюшин А. А. Труды (1946–1966). Т. 2. Пластичность / Составители Е. А. Ильюшина, М. Р. Короткина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с.
27. Клепиков С. Н. Расчет конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. – К. : Будівельник, 1967. – 285 с.

28. Плитно-свайный фундамент для здания повышенной этажности / [Мангушев Р.А., Игошин А.В., Ощурков Н.В., Фадеев А.Б.] // ОФ и МГ. – 2008. – №1. – С.15–19.

29. Миронов В. А. Прочность и деформируемость грунтов при сложном напряженном состоянии / Миронов В. А., Софьин О. Е., Гудий А. Н. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 4. – С. 5–9.

30. Моделювання за МГЕ процесу підсилення стрічкового фундаменту палями / [А. С. Моргун, І. В. Маєвська, А. В. Ніцевич, Н. В. Блащук] // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2008. – № 3. – С 4–8.

31. Моргун А. С. Моделювання взаємодії ефективних видів фундаментів з пружно-пластичною багатошаровою основою : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. техн. наук. : спец. 05.23.02 «Основи і фундаменти» / Моргун Алла Серафимівна ; Київський національний університет будівництва та архітектури. – К. 2005. – 478 с.

32. Моргун А. С. Застосування МГЕ у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту / Моргун А. С. – Вінниця : Універсум – Вінниця, 2001. – 64 с.

33. Моргун А. С. Метод граничних елементів в розрахунках паль / А. С. Моргун. – Вінниця : Універсум-Вінниця, 2000. – 130 с.

34. Моргун А. С. Моделювання дилатансійного середовища ґрунту системи «паль–основа» за МГЕ / А. С. Моргун // Основи і фундаменти. – К. : КНУБА, випуск 27, 2002. – С. 84–89.

35. Моргун А. С. Аналітичне рішення крайової задачі втиснення жорсткого штампа в пружну ізотропну півплощину / Моргун А. С., Бікс Ю. С., Тимошенко О. Е. // Сучасні технології, матеріали, конструкції в будівництві. – Вінниця : ВНТУ – № 3 – 2007. – С. 87–92.

36. Визначення основних параметрів геологічної ситуації основи / [Моргун А. С., Ніцевич А. В., Меть І. М., Тимошенко О. Е.] // Сучасні технології, матеріали, конструкції в будівництві – Вінниця : ВНТУ – № 4 – 2008. – С. 57–61

37. Моргун А.С. Взаємодія буронабивних паль з ґрунтом за методом граничних елементів / Моргун А. С., Тимошенко О. Е. // Вісник ВПІ – 2009. – № 5.

38. Моргун А.С. Пружно-пластичний аналіз несучої спроможності системи «основа–буронабивна паль» методом граничних елементів [Електронний ресурс] / Моргун А.С., Тимошенко О.Е. // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 2.– Режим доступу до журн. : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2>.

39. Моргун А. С. Прогнозування взаємодії паль пальового поля будівлі за методом граничних елементів / Моргун А. С., Ніцевич А. В., Меть І. М. // Тези студентських доповідей, рекомендованих до опублікування оргкомітетом XXXVI науково-технічної конференції. – Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця – 2007. – С. 83.
40. Моргун А. С. Ідентифікація несучої здатності паль методами нечіткої логіки й методом граничних елементів [Електронний ресурс] / Моргун А. С., Кательніков Д. І., Моргун І. А. // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 2. – С. 1–7. – Режим доступу до журн. : <http://www.nbuu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2>.
41. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / [В. Н. Гордеев, А. И. Лантух-Лященко, В. А. Гашинский и др.] – К. : АСВ, 2008. – 482 с.
42. Николаевский В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред / Николаевский В.Н.–М. : Недра, 1984. – 232с.
43. Расчет осадок зданий и сооружений на слабых глинистых грунтах с учетом деформаций сдвига во времени / [М. А. Лучкин, В. М. Улицкий, А. Г. Шаликин, К. Г. Шаликин] // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 2. – С. 13–17.
44. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения : СНиП 1.02.07-87. – М. : Стройиздат, 1988.
45. Основания зданий и сооружений : СНиП 2.02.01-83. – М. : Стройиздат, 1985. – 41 с.
46. Свайные фундаменты : СНиП 2.02.03-85. – М. : Стройиздат, 1985.
47. Соколовский В. В. Теория пластичности / Соколовский В. В – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.
48. Тейлор Д. Основы механики грунтов / Тейлор Д. – М. : Госстройиздат, 1960. – 597 с.
49. Тер-Мартirosян З. Г. Взаимодействие свайного фундамента с грунтом / Тер-Мартirosян З. Г., Нгуен З. Н., Динь А. Н. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 2. – С. 2–7.
50. Тимошенко О.Е. Моделювання взаємодії буронабивних паль з ґрунтовою основою за методом граничних елементів : магістерська дисертація, ВНТУ. – 2009.
51. Филатов А. В. Применение свай-колонн на строительстве Карагандинского металлургического комбината / Филатов А. В., Швец Б. Я. // ОФ и МГ – №2. – 1971. – С. 35–37.

52. Федоровский В. Г. Предельное давление на ряд ленточных фундаментов и эффект «непродавливания» / В. Г. Федоровский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006. – № 3. – С. 9–14.
53. Федоровский В. Г. Прогноз осадки фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит / В. Г. Федоровский, С. Г. Безволев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2000. – № 4. – С. 23–25.
54. Харин Р. Е. Техничко-экономическое обоснование выбора конструкций свай и свайного фундамента / Харин Р. Е. // ОФ и МГ–2006. – № 1.– 1976, – С. 13–16.
55. Харр М.Е. Основы теоретической механики грунтов / Харр М. Е. – М. : Из-во литературы по строительству, 1971. – 320 с.
56. Цитович Н.А. Механика грунтов / Цитович Н. А. – М. : Высшая школа, 1968. – 258 с.
57. Шапиро Д. М. Упруго-пластичный анализ несущей способности оснований реконструируемых объектов методом конечных элементов / Д. М. Шапиро, Н. Н. Мельничук // ОФ и МГ . – 2007. – № 2. – С. 18–21.
58. Швецов Г.И. Основания и фундаменты / Швецов Г.И. – М. : Высшая школа, 1991. – 357 с.
59. Шукле Л. Геологические проблемы механики грунтов / Шукле Л. – М. : Стройиздат, 1976. – 485 с.
60. Abovskiy N. P. Energy principle and its application for the creation of controlled structures/ Abovskiy N. P// Spatial structures in new and renovation projects of Building and construction. Proceeding international congress ICSS – 98 / June 22 – 26, Moscow. Russia. 1998. – P. 307–311.
61. Drucker D. C. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. / D. C. Drucker, W. Prager. // Quarterly Applied Mathematics – 1952. – V. 10, № 2.
62. Drucker D. C. Soil mechanic and work – hardening theories of plasticity / D. C. Drucker, R. E. Gibson, D. S. Henkel. – Frans. : Amer. Soc.Giv. End., 1957
63. Timoshenko S., Resistance des materiaux, t. 1, – Paris : Librairie Polutechnique Beranger, 1949.
64. Melan E., Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im innern beanspruchten Halbscheibe, Z. Angew. Math. Mech. 12, 343–346 (1932).
65. Mindlin R. D., Force at a point in the interior of a semi-infinite solid / R. D. Mindlin // Physics. – 1936. – № 7. – P. 195–202.
66. Reisner H. Initial stresses and sources of initial stresses. / H. Reisner. ZAMP, 1931. BdII, S. 1–8.

Наукове видання

Моргун Алла Серафимівна

**МЕТОД ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
В РОЗРАХУНКАХ БУРОВИХ ПАЛІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська

Оригінал-макет підготовлено А. Моргун

Підписано до друку 01.03.11 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. Арк. 6,24
Наклад 100 прим. Зам № 2011-065

Вінницький національний технічний університет,
КІВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.