

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**А. С. Моргун, І. М. Меть, І. І. Шевченко**

**ЗАСТОСУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ  
ЧИСЛОВОГО МГЕ  
В ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ  
ПОВЕДІНКИ ПРАМІДАЛЬНИХ ПАЛЬ**

Монографія

Вінниця  
ВНТУ  
2022

УДК.519.635:624.044:624.15

М-79

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 30.09.2021 р.)

Рецензенти:

**І. П. Бойко**, доктор технічних наук, професор

**М. Ф. Друкований**, доктор технічних наук, професор

**Моргун, А. С.**

М-79 Застосування інструменту числового МГЕ в прикладних дослідженнях поведінки пірамідальних паль : монографія [Електронний ресурс] / А. С. Моргун, І. М. Меть, І. І. Шевченко – Вінниця : ВНТУ, 2022. – 98 с.

ISBN 978-966-641-906-7 (PDF)

В монографії знайшли відображення питання теорії та практики фундаментів із пірамідальних паль, рекомендації удосконалення методів їх розрахунку. Монографія розрахована на студентів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія», спеціалістів та наукових працівників, що працюють в області числових розрахунків фундаментних конструкцій.

Показано прикладання МГЕ до рішення нелінійних задач механіки ґрунтів. Приведено результати числового розв'язку нелінійних задач поведінки під навантаженням пірамідальних паль, а також порівняння цих результатів з експериментом та рішеннями за МСЕ.

УДК 519.642:624.044:624.15

ISBN 978-966-641-906-7 (PDF)

© А. Моргун, І. Меть, І. Шевченко, 2022

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	4
ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1 ВИХІДНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРАХУНКУ ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	8
1.1 Нелінійний характер деформування ґрунтів. Розрахункові моделі ґрунтової основи .....	8
1.2 До визначення величин нормативного тиску на ґрунт. Поняття критичних навантажень (критичних тисків).....	9
1.3 Закономірності зміни об'єму ґрунту. Дилатансія. Вибір моделі ґрунту .....	10
1.4 Особливості поведінки ґрунту під навантаженням.....	15
РОЗДІЛ 2 ОСНОВИ МГЕ. ПРИКЛАДАННЯ МГЕ ДО ПРОБЛЕМ МЕХАНІКИ ҐРУНТІВ .....	17
2.1 Теоретичні основи. Теорія пружності.....	17
2.2 Формулювання МГЕ для задач механіки ґрунтів .....	24
2.3 Чисельна реалізація задач механіки ґрунтів .....	28
2.4 Непружна поведінка матеріалів. Методика числового моделювання розвитку зон граничного стану ґрунту .....	30
РОЗДІЛ 3 СТАН ПИТАННЯ ІСНУЮЧИХ ПОЛОЖЕНЬ РОЗРАХУНКУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПІРАМІДАЛЬНИХ ПАЛЬ .....	39
3.1 Особливості поведінки під навантаженням пірамідальних паль.....	39
3.2 Мета та задачі досліджень.....	48
РОЗДІЛ 4 ПРИКЛАДАННЯ ЧИСЛОВОГО МГЕ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ ГЕОМЕХАНІКИ .....	51
4.1. Вибір раціональної форми пірамідальних паль для конкретних ґрунтових умов майданчиків будівництва.....	51
4.1.1 Моделювання впливу геометричної форми палі на її несучу спроможність за МГЕ .....	52
4.2 Пошук резервів несучої здатності пірамідальних паль за МГЕ .....	59
4.3 Пружно-пластичний прогноз за МГЕ несучої спроможності пірамідальних паль .....	68
4.4 Технологія розрахунку фундаментів у витрамбованих котлованах за МГЕ .....	77
4.5 Прогноз за МГЕ деформативності буронабивних паль .....	84
4.6 Робота пірамідальних паль в залежності від кута конусності.....	86
ЛІТЕРАТУРА .....	94

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

$\Gamma$  – границя досліджуваного елемента

ДБНіП – державні будівельні норми і правила

МСЕ – метод скінченних елементів

МГЕ – метод граничних елементів

НДС – напружено-деформований стан

$P_{ij}^*$ ,  $u_{ij}^*$  – напруження та переміщення в фундаментальних розв'язках Р. Міндліна

СЕ – скінченний елемент

ГЕ – граничний елемент

$\xi$  – точка прикладення сили  $P = 1$  в півплощині

$x$  – точка нагляду

САПР – системи автоматизованого проектування

БНП – буронабивні палі

## ВСТУП

Основа – це напластування ґрунтів, що сприймають тиск від споруди. Фундамент – підземна конструкція, яка передає тиск на ґрунти, що лежать на деякій глибині. Ґрунтам основи властиві в тисячу раз більша деформативність і в сотні раз менша міцність, ніж матеріалам, з яких зводяться наземні конструкції споруд. Тому благополучне існування споруди залежить від величини нерівномірності деформацій ґрунтів основи та характеру розподілення навантаження по подошві фундаменту.

Сучасний ріст промисловості потребує відповідного розвитку таких наук як інженерна геологія, механіка ґрунтів, фундаментобудування, постановки нових наукових досліджень. Є потреба в здійсненні капітального будівництва і в лесових ґрунтах. Раціональне будівництво має як народногосподарське, так і наукове значення.

Основою любих будівель чи споруд є фундаменти, тому будівельники мають особливу увагу приділяти раціональному їх проектуванню, особливо в складних інженерно-геологічних умовах.

Задача проектування зводиться до вибору несучого шару ґрунту, глибини закладання і конструкції фундаменту, визначення розмірів фундаменту, при яких гарантується надійне існування споруди, допустимі деформації.

Фундаментобудування займає важливе місце в будівництві нашої країни. В зв'язку з цим особливу актуальність набувають питання подальшого розвитку методів їх проектування. Специфікою дисперсних ґрунтових середовищ є те, що їх деформації в основному визначаються зміною об'єму пор між частинками, в той час, як деформацією безпосередньо частинок можна знехтувати [1].

Конструктивне призначення фундаменту складається з того, щоб акумулювати всі навантаження від будівлі і передати їх на ґрунти основи. Звідси витікає, що при визначенні габаритних параметрів фундаменту (глибина закладання, висота, розміри подошви) мають враховуватись фізичні і механічні властивості ґрунтів основи. В тілі фундаменту здійснюється розсіювання напружень і питомий тиск на ґрунт буде менший ніж питомий тиск на рівні обрізу фундаменту.

Розвиток техніки привів до гострої необхідності підняття точності інженерних розрахунків і переведення їх на більш складну основу. В інженерній практиці все більше прикладання знаходять диференційні рівняння в частинних похідних. При цьому на практиці часто є немо-

жливим отримання точних чи аналітичних рішень цих задач і приходить використовувати наближені числові методи.

Однією із провідних тенденцій сучасного будівництва є збільшення поверховості будівель, що потребує вирішення різнопланових будівельних задач з використання нових типів конструктивно надійних та економічно обґрунтованих будівельних конструкцій та фундаментів, втім числі в складних інженерно-геологічних умовах.

З метою промислового освоєння нових територій, складених лесовими просадковими ґрунтами, які характеризуються великою неоднорідністю характеристик із-за генетичних умов їх утворення, необхідно враховувати ці характеристики при розробці технічних рішень об'єктів будівництва.

В умовах лесових просадкових ґрунтів для забезпечення стійкості та надійності споруд приходить ліквідувати чи зменшувати просадкові властивості ґрунту, проводити пошук ефективних видів фундаментів, до них відносяться пірамідальні палі. Тому розширення теоретичних досліджень в області використання пірамідальних палей на просадкових ґрунтах як раціональних і ефективних є актуальною задачею. Споруди мають бути стійкими, надійними та довговічними.

Стійкість споруди досягається вірним використанням особливостей місцевих ґрунтів (інженерно-геологічних умов майданчика забудови).

Сучасне висотне будівництво підняло питання необхідності врахування в проектних розрахунках всієї складності ґрунтових умов, їх перерозподільних властивостей. Мета методів розрахунку основ і фундаментів по нормативних розрахункових граничних станах – максимальне використання несучої спроможності ґрунтових основ. Тому вимоги до достовірності і точності визначення розрахункових фізико-механічних характеристик ґрунту на сьогодні піднімаються.

Підняття достовірності розрахунків та пошук найбільш економічних рішень являють невідкладну задачу, а це потребує необхідності більш детального документування ґрунтів для урахування геології будівельного майданчика. Умови формування ґрунту (генезис) здійснюють великий вплив на міцнісні та деформативні його показники.

Підняття точності розрахунку основ дозволяє знизити будівельну кошторисну вартість споруди за рахунок більшого використання несучої спроможності ґрунтів.

Процеси, що проходять в ґрунтах при їх навантаженнях, є дуже складні як об'єкти досліджень і контролю і, до цих пір, вивчено не всі аспекти деформування основи під навантаження.

Збільшення обсягів сучасного будівництва поставила перед проєктувальниками низку вимог щодо аналізу напружено-деформованого стану (НДС) основ будівель та споруд. Традиційні інженерні методи не дозволяють достатньо достовірно оцінити НДС основ без урахування незворотності їх деформацій, а також приймати ефективні проєктні рішення.

Розвиток нелінійної механіки ґрунтів та створення потужної комп'ютерної бази в проєктних і наукових організаціях стали поштовхом до напрацювання програмних комплексів, у яких реалізуються математичні моделі ґрунту з урахуванням їхньої пружно-пластичної поведінки.

Розрахунки основ споруд виконуються за двома ніяк не пов'язаними між собою групами граничних станів: за деформаціями (у всіх випадках), за несучою спроможністю (в особливих випадках). Під час визначення несучої здатності ґрунтів не визначають деформацію, під час визначення осідань напруження обмежується величиною, що не відповідає несучій здатності ґрунту. Сучасні задачі проєктування основ потребують аналізу НДС основи у всьому діапазоні «навантаження-осідання».

Для сьогодення математичне прогнозування — одне із головних і найбільш економічних прийомів теоретичних і прикладних досліджень актуальних проблем науки та народного господарства. Прогнозування осідань основ фундаментів являє одну із найбільш складних задач механіки ґрунтів.

На теперішній час відомі біля 20 методів розрахунку осідань фундаментів. Та в проєктній практиці в більшості випадків використовують лише декілька (пошарове підсумовування, метод лінійно деформованого шару, шару обмеженої товщі, еквівалентного шару, лінійно деформованого півпростору). Область застосування тих чи інших методів розрахунку обмежуються різними умовами, що витікають із урахування інженерно-геологічних умов будівельного майданчика, розмірів та форми фундаменту, розрахункових схем, деформативності ґрунтів.

На сьогодні, постає задача дослідження НДС споруд за допомогою ЕОМ та сучасних числових методів, що забезпечує економічне та надійне проєктне рішення. Тому тема пружно-пластичного розрахунку економічних пірамідальних паль є актуальна та має важливе як прикладне, так і наукове значення.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов. М.: Госиздат по строительству и архитектуре. 1952, 259 с.
2. Рейнер М. Деформация и течение. Введение в реологию / М. Рейнер. – М. : Гостехиздат, 1963. – 383 с.
3. Николаевский В. М. Определяющие законы механики грунтов. М.: Стройиздат, 1975, 230 с.
4. Николаевский В. Н. Дилатансия и законы необратимого деформирования грунтов / В. Н. Николаевский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1979. – № 5. – С. 29–31.
5. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики грунтов / В. М. Николаевский // Определяющие законы механики грунтов. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 210–227.
6. Ильюшин А. А. Труды (1946–1966). Т. 2. Пластичность; Составители Е. А. Ильюшина, М. Р. Короткина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с. – ISBN 5–9221–0364–4.
7. Ильюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 272 с.
8. Бойко И. П. Напряженно-деформированное состояние упруго-пластического, дилатирующего основания свайных фундаментов / И. П. Бойко // Основания и фундаменты. – К. : Будівельник, 1986. – Вып. 19. – С. 7–9.
9. 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.
10. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Телес, Л. Вроубел. – М : Мир, 1987. – 524 с.
11. Бреббия К. Применения МГЕ в технике / К. Бреббия, С. Уокер. – М. : Мир, 1982. – 247 с.
12. Телес Д. К.. Применение метода граничных элементов для решения неупругих задач. М.: Стойиздат. 1987, 160 с.
13. Mindlin R. D., Force at a point in the interior of a semi-infinite solid, *Physics* 7, 195-202 (1936).
14. Моргун А. С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів / А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ. – 2013 – 108 с.



15. Моргун А. С. Деформативність ґрунту при пластичній формозміні та дилатансії : монографія / А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ, 2017. 103 с.
16. Цытович Н. А., Тер-Мартirosян З. Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве. М.: «Высшая школа», 1981.
17. Бахолдин Б. В., Игонькин И. Т. Исследование неушей способности пирамидальных свай. М.: Стройиздат, ОфиМГ № 3, 1978, с. 13–16.
18. Николаевский И. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: «Недра», 1984. 232 с.
19. Голубков В. Н., Догадайло А. И., Коган А. Р. Экспериментальные исследования работы пирамидальных свай в основании, сложенном насыпными и лёссовыми грунтами I типа просадочности / Сб. Киевского университета «Свайные фундаменты в просадочных грунтах». 1970. С. 36–40.
20. Голубков В. Н., Догадайло А. И., Тугаенко Ю. Ф. Экспериментальные исследования коротких свай различной конструкции в грунтах первого типа просадочности / Сб. Киевского университета «Свайные фундаменты в просадочных грунтах». 1970. С. 9–16
21. Голубков В. Н., Бовкун Ф. К. Полевые исследования коротких висячих свай в лёссовых просадочных грунтах/ Сб. Киевского университета «Свайные фундаменты в просадочных грунтах». 1970. С. 105–109.
22. Колесников Л. И., Синявский С. Д., Митюшов В. Н. Некоторые результаты исследований пирамидальных свай в сильнопросадочных грунтах. / Сб. Киевского университета «Свайные фундаменты в просадочных грунтах». 1970. С.117–119.
23. Зоценко Н. Л., Яковлев А. В. Примеры расчета оснований и фундаментов сельских зданий и сооружений./ К.: Будівельник. 1986 – 104 с.
24. Тербушко О. И. Основы теории упругости и пластичности. М.: Наука, 1984.–320 с.
25. Моргун А. С., Меть І. М., Шевченко І. І. Моделювання впливу геометричної форми палі на її несучу спроможність за МГЕ.
26. Матус Ю. В., Митюшев В. Н., Синявский С. Д., Натурные исследования пирамидальных свай в слое песка подстилаемого мощным слоем ила. Сб. основания и фундаменты ОИСИ, 1987 г. С 48–52.

27. Моргун А. С., Меть І. М. , Шевченко І. І. Пошук резервів несучої здатності пірамідальних паль за МГЕ.

28. В. И. Крутов, В. Л. Рафальзук, Ю. В. Власов. Фундаменты в вытрамбованных котлованах с уширенным основанием. М.: Стройиздат, ОФМГ № 3, 1978, с. 3–6.

29. А. А. Иллюшин А. А.. Пластичность. М.: Гостехиздат. 1947.

30. В. И. Крутов, В. Л. Рафальзук, Ю. В. Власов. Фундаменты в вытрамбованных котлованах с уширенным основанием. М.: Стройиздат, ОФМГ № 3, 1978, с. 3–6.

31. Сорочан Е. А., Ли Е. А. Исследование работы пирамидальных свай в набухающих грунтах. М.: Стройиздат. Сб. Основания, фундаменты и механика грунтов № 2. 1993, С 8–11.

*Наукове електронне видання  
комбінованого використання.  
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Моргун Алла Серафимівна  
Меть Іван Миколайович  
Шевченко Ігор Ігорович**

**ЗАСТОСУВАННЯ ІНСТРУМЕНТУ  
ЧИСЛОВОГО МГЕ  
В ПРИКЛАДНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ  
ПОВЕДІНКИ ПІРАМІДАЛЬНИХ ПАЛЬ**

Монографія

Редактор С. Сідак

Оригінал-макет підготовлено А. С. Моргун

Підписано до видання 20.04.2022 р.

Зам. № Р2021-007.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,  
редакційно-видавничий відділ.

Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,  
м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.  
**press.vntu.edu.ua**; *email: irvc.vntu@gmail.com.*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.