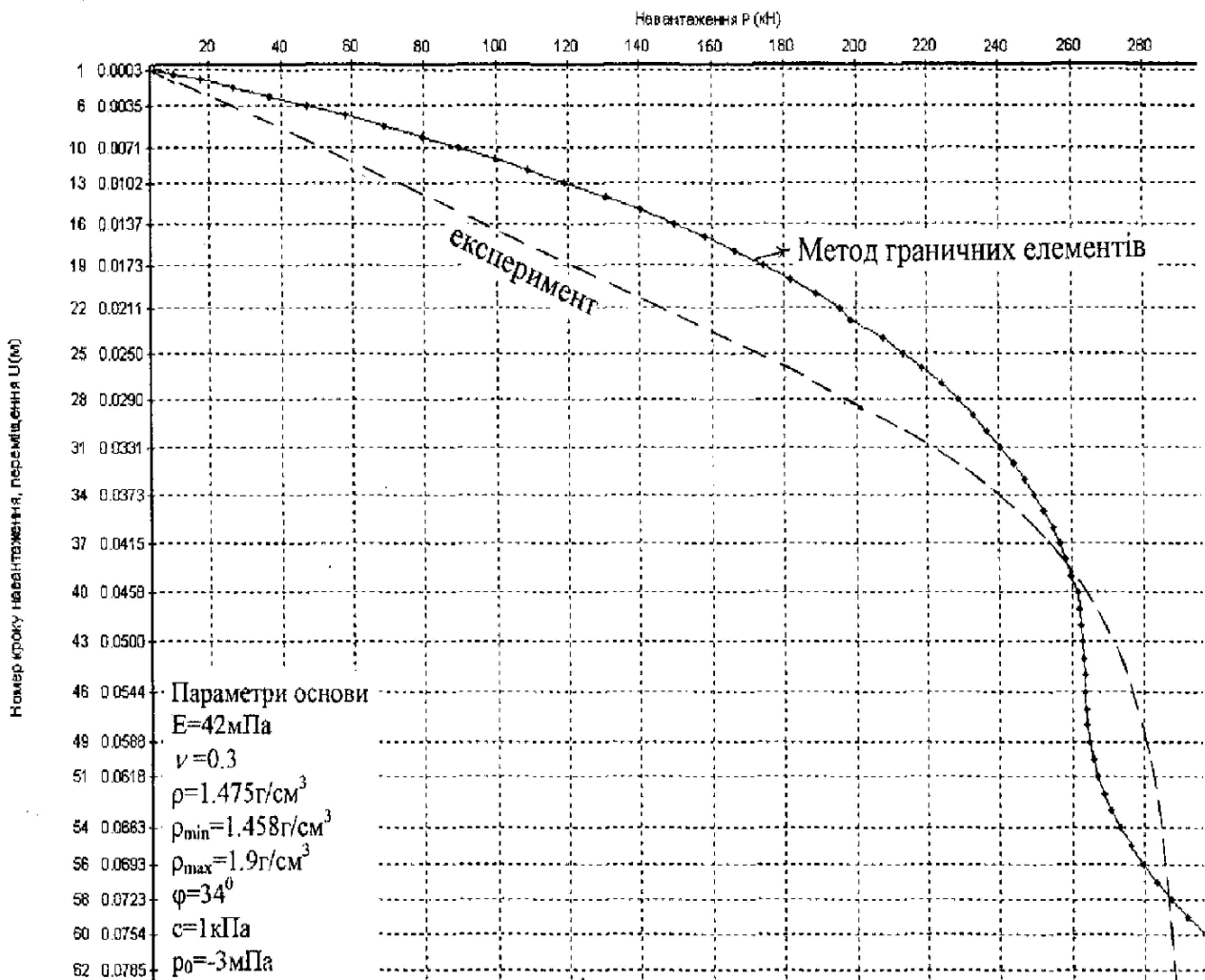


А. С. Моргун, І. М. Меть, І. А. Моргун

ГЕОТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НА ОСНОВІ МГЕ ДЕФОРМАТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ҐРУНТУ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

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

**ГЕОТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НА ОСНОВІ МГЕ
ДЕФОРМАТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ҐРУНТУ**

Монографія

ВНТУ
Вінниця
2025

УДК.519.635:624·044:624.15

M79

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 31.10.2024 р.)

Рецензенти:

Винников Ю. Л., доктор технічних наук, професор

Дудар І. Н., доктор технічних наук, професор

Моргун, А. С.,

M79 Геотехнічне обґрунтування на основі МГЕ деформативних процесів ґрунту: монографія [Електронний ресурс] / А. С. Моргун, І. М. Меть, І. А. Моргун. – Вінниця : ВНТУ, 2025. – (PDF, 102 с.)

ISBN 978-617-8163-28-0 (PDF)

В роботі з позицій механіки дисперсного пружно-пластичного середовища описано уявлення про особливості деформування фундаментних конструкцій під впливом навантажень.

Прикладання числового МГЕ до розв'язків практичних задач геомеханіки, процесу осідання основ та допустимих навантажень на них обґрунтовано теоретичними викладками, підкріплено та проілюстровано даними числового розрахунку, що полегшує розуміння та практичне прикладання теорії. Монографія розрахована на студентів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія», спеціалістів та наукових працівників, що працюють в області числових розрахунків фундаментних конструкцій та їх реконструкції.

УДК 519.642:624.044:624.15

ISBN 978-617-8163-28-0 (PDF)

© А. Моргун, І. Меть, І. Моргун, 2025

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА МЕХАНІКА КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ФУНДАМЕНТІВ З ҐРУНТОВОЮ ОСНОВОЮ	11
1.1 Питання розрахунку стійкості основ і фундаментів	11
1.2 Рівняння континуальної механіки	11
1.3 Введення в теорію пружності	14
РОЗДІЛ 2 НАПРАЦЮВАННЯ МЕТОДИКИ ПРОЦЕСУ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ В ҐРУНТАХ.....	16
2.1 Базові поняття досліджень нелінійної поведінки ґрунту під навантаженням	16
2.2 Дилатансія та контрактансія ґрунту. Дилатансія геоматеріалів. Механізми непружності і їх модельні представлення	18
2.3 Інноваційні рішення складних геотехнічних процесів	32
РОЗДІЛ 3 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ МЕТОДИКИ ЧИСЛОВОГО МГЕ.....	36
3.1 Основні закони континуальної механіки та методу зважених нев'язок.....	36
3.2 Основне розрахункове рівняння МГЕ.....	38
3.3 Фундаментальне рішення.....	40
3.4 Рівняння МГЕ для непружної поведінки ґрунту.....	44
3.5 Математичні моделі по врахуванню нелінійності ґрунту.....	46

РОЗДІЛ 4 ПРИКЛАДАННЯ МГЕ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАДАЧ ФУНДАМЕНТОБУДУВАННЯ.....	52
4.1 Числові дослідження несучої спроможності плитного фундаменту багатоповерхової будівлі	52
4.1.1 Характеристики ґрунту	55
4.1.2 Результати числових досліджень плити $h = 0.7$ м.....	60
4.2 Прогнозування за МГЕ впливу води на напружено – деформований стан лесової основи.....	63
4.3 Ідентифікація несучої здатності паль методами нечіткої логіки та методом граничних елементів	70
4.4 Прогнозування процесу деформативності буро набивних паль за МГЕ.....	80
4.5 Питання реконструкції споруд. Інноваційні технології розрахунку за МГЕ фундаментів глибокого закладання (паль-оболонки)	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	99

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Γ	–	границя досліджуваного елемента
ДБНіП	–	державні будівельні норми і правила
МСЕ	–	метод скінчених елементів
МГЕ	–	метод граничних елементів
НДС	–	напружено-деформований стан
σ_{ij}^* , u_{ij}^*	–	напруження та переміщення в фундаментальних розв'язках Р. Міндіна
СЕ	–	скінчений елемент
ГЕ	–	граничний елемент
ξ	–	точка прикладення сили $P = 1$
x	–	точка нагляду
САПР	–	системи автоматизованого проектування

ВСТУП

Основою любых будівель та споруд є фундаменти, тому будівельники мають особливу увагу приділяти раціональному їх проектуванню особливо в складних інженерно-геологічних умовах. Конструктивне призначення фундаменту складається з того, щоб акумулювати всі навантаження від будівлі і передати їх на основи. Звідси витікає, що при визначенні габаритних параметрів фундаментів (глибини закладання, висоти, розмірів підошви) мають враховуватись фізико-механічні характеристики ґрунтів основи.

Одна із основних задач прикладної геомеханіки – кількісне прогнозування механізму перебігу геомеханічних процесів шляхом математичного моделювання поведінки ґрунту, якому властиве *безперервне перегрупування* його частинок від дії поверхневих зовнішніх впливів і об'ємних сил.

Фундаментобудування займає важливе місце в будівництві любой країни. У зв'язку з цим особливу актуальність набувають питання подальшого розвитку методів розрахунку ґрунтової основи споруд і фундаментів та удосконалення наукової бази їх проектування.

Загальні механічні властивості ґрунтів нашої планети, які слугують основами будівель і споруд, з метою їх практичного прикладання мають бути сформульовані у вигляді визначальних законів (у вигляді рівнянь стану).

Ґрунтова основа – невід'ємна складова системи будівля – основа – фундамент, найбільш уразливий її елемент. 90% аварій будівель та споруд виникають саме через стан ґрунтів. Успішне будівництво та максимальна економія засобів потребують проникнення в таємниці неживої природи та серйозного знайомства з законами механіки. При появі зсуву в ґрунтовій основі значно зменшується її жорсткість, що викликає перерозподіл зусиль.

Геомеханіка – розділ механіки (і фізики в цілому), в якому числові методи отримали найбільше розповсюдження і дозволили розв'язувати багато практичних задач. Складні нелінійні задачі, що виникають в геомеханіці, було неможливо розв'язати аналітично. Експериментальні дослідження в цій області потребують великих об'ємів і кошторисної

вартості. Ці обставини сприяли тому, що інтенсивним напрямком стало рішення різнобічних проблем методами обчислювальної математики на базі ЕОМ.

Важливу роль при розв'язанні практичних задач геомеханіки грає вибір надійної математичної моделі явища, визначення відповідних рівнянь стану ґрунтового середовища. Проблема прогнозу НДС ґрунтової основи є актуальною і потребує свого вирішення, особливо для потреб висотного будівництва.

Міцність – проблема століття [1-3]. Руйнування будь-якого твердого тіла – процес поступового розкриття спочатку найслабкіших місць, а потім все менш і менш небезпечних дефектів. Практично всі матеріали, в тім числі і ґрунти, руйнуються в результаті розвитку деформацій форми.

При заглибленні палі ґрунт розштовхується в сторони і вниз. Це класичне поняття механізму формування граничного лобового опору запропоновано К. Терцагі. В основах проходять взаємно протилежні процеси ущільнення і розущільнення. Знаючи НДС ґрунту можна зробити попередній прогноз розвитку подій. Тріщина – туди тікає енергія.

Робота присвячена актуальному питанню сучасної механіки геоматеріалів – розробці та удосконаленню математичної моделі дисперсних ґрунтів з використанням методу граничних елементів (МГЕ) для достовірного визначення НДС фундаментних конструкцій та їх несучої здатності.

Неприйнятність до реальних задач геомеханіки принципу суперпозицій заставляє звертатись до перспективного та сучасного методу МГЕ. Метою роботи є подальше удосконалення методів проектування фундаментних конструкцій для підняття технічного рівня та рентабельності робіт будівельних організацій.

Сучасному етапу будівництва властивою є тенденція при проектуванні використовувати числові методи та ЕОМ. Зростаючі можливості сучасних ЕОМ потребують постійної ревізії існуючих математичних моделей для дослідження нових класів задач, для яких з'явилась надія на вирішення.

Однією із таких задач є нелінійна задача геомеханіки. Створені для неї математичні моделі описання процесів поведінки ґрунтів і оцінки ефективності стратегії, управління цими процесами – це система диференціальних рівнянь в частинних похідних, аналітичне рішення якої отримати доволі важко. Рішення цієї крайової задачі геомеханіки можна отримати числовими методами.

Ґрунти являють собою дисперсне середовище в порах якого знаходяться вода і газ. Ґрунти реагують на зовнішні сили як складна трифазова система. Деформації в цій системі продовжуються значний час, а механічні властивості змінюються в процесі ущільнення.

В сучасних висотних будівлях тиски на ґрунтову основу сягають 0,3 – 1 МПа, і ґрунт давно вже працює в нелінійній стадії. Тому виникає гостра потреба зробити розвитку ситуації НДС ґрунтів сучасними числовими методами з урахуванням роботи ґрунтів в граничному стані, визначити резерви міцності.

Деформації ґрунтового середовища характеризуються одночасним протіканням великої кількості складних фізико-механічних процесів (як пружних, так і пластичних). Теорія пластичної течії засновується на принципі та швидкості дисипації механічної роботи (принципі максимуму Мізеса), визначає приріст компонентів тензора пластичних деформацій пропорційно градієнту деякої функції, що називається пластичним потенціалом і ототожнюється з функцією навантаження.

Для моделювання процесів ущільнення ґрунту в роботі використано систему нових уявлень проф. В. Н. Ніколаєвського, проф. І. П. Бойка [1-5] про дилатансійну теорію ґрунтового середовища – гідростатичний тиск здійснює вплив на формозміну, а дотичні напруження впливають на ущільнення. Цей факт був відкритий Рейнольдсом у 1885 році та названий дилатансією.

Ефект перехресного впливу інваріантів тензора напруги і швидкостей деформацій один на другого в класичних моделях відносився до ефектів другого порядку і не характеризував класичні моделі. Та він в значній мірі властивий поведінці ущільненого ґрунту. Саме явище дилатансії робить параметри НДС ґрунту суттєво нелінійними.

Найбільш важливими задачами прикладання числового МГЕ – це задачі математичної фізики, розрахунковими рівняннями стану яких є класичні задачі Лапласа, Пуассона, що описують постійну потенціальну течію. Задачі механіки ґрунтів відносяться до задач Лапласа. При розв’язку задач механіки ґрунтів, рівняннями стану яких слугують диференціальні рівняння в частинних похідних, використовується та обставина, що для більшості цих задач існують сингулярні (фундаментальні) рішення, які відповідають одиничним силам збурення в півпросторі.

Підняття ефективності розвитку будівельної галузі можливо на основі нових наукових досягнень та нового індустріального та організаційного рівня. Надійність роботи основ та фундаментів визначають довговічність та експлуатаційну придатність будівель та споруд.

Збільшення поверховості сучасних будівель потребують підняття якості роботи фундаментів. Вирішення цієї проблематики вимагає об’єднання пошукових, проектних та науково-дослідних робіт. Тому удосконалення видів фундаментних конструкцій та методів їх проектування є актуальною темою сьогодення.

Розробка нових методів розрахунку фундаментних конструкцій при нелінійному їх проектуванні дає можливість достатньо повно використовувати переваги розрахунку основ за деформаціями, адже сучасні висотні будівлі передають тиски на основу до 1 МПа, і ґрунти вже працюють в нелінійній стадії.

Вірний вибір та проектування економічного фундаменту залежить від якості інженерно-геологічних вишукувань, адже фундаменти заглиблюються у виключно різномірне ґрунтове середовище. Питання ущільнення ґрунтів під навантаженням – основна проблема, що виникає при прогнозі осадок споруди і прогнозі допустимого навантаження на дисперсні трифазові ґрунти.

Частину об’ємної деформації, що супроводжується розрихленням ґрунту, називають дилатансією. Частину об’ємної деформації, спричинену ущільненням (дотичними напруженнями), які додатково ущільнюють ґрунт, називають контрактансією, чи від’ємною дилатансією.

Тому значна увага в роботі приділена методам дослідження цих процесів дисперсних ґрунтів з метою їх практичного прикладання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ніколаєвський В. Н. Дилатансія та закони незворотнього деформування ґрунтів / В. Н. Ніколаєвський // Зб. Основи, фундаменти та механіка ґрунтів. – 1979. – № 5. – С. 29-31.
2. Ніколаєвський В. Н. Сучасні проблеми механіки ґрунтів / В. Н. Ніколаєвський // Визначальні закони механіки ґрунтів. 1975. С. 210-227.
3. Ніколаєвський В. Н. Механіка пористих та тріщиноватих середовищ, «Надра», 1984, 232 с.
4. Бойко І. П. Теоретичні основи проектування пальових фундаментів на пружньо-пластичні основи / І. П. Бойко // Зб. Основи та фундаменти. – К. : Будівельник, 1985. № 18. – С. 11–18.
5. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при побудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, О. В. Сахаров // Основи і фундаменти : Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 2004. – Вип. 28. – С. 3-10.
6. Моргун А. С. Теорія пластичної течії в механіці ґрунтів // А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ. – 2013. – 108 с.
7. Brebbia, K. Boundary element methods / K. Brebbia, J. Telles, L. Wroubel. 1987. – 525 p.
8. Brebbia K. Applications of MGE in engineering // K. Brebbia, S. Walker. – 1982.
9. Mindlin R. D. Force at a point in the interior of a semi – infinite solid, Physics 7, 196-202, 1936.
10. Моргун А. С. Нелінійні проблеми механіки ґрунтів. Монографія / А. С. Моргун // Вінниця, ВНТУ, 2016. – 122 с.
11. Хілл Р. Математична теорія пластичності. 1956.
12. Роботнов Ю. Н. Повзучість елементів конструкцій. 1966, 752 с.
13. Гольдштейн М. Н. Механічні властивості ґрунтів. 1952. 259 с.

14. Далматов Б. І. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти. Будвидат, 1981.
15. Ільющин А. О. Пластичність. 1947.
16. Ротштейн О. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, нейронні сетки, генетичні алгоритми. Вінниця: Універсум-Вінниця, 1999. – 320 с.
17. Мітюшкін Ю. І., Мокін Б. І., Ротштейн А. П. Soft Computing: Ідентифікація закономірностей нечіткими базами знань. Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця. – 2002. – 145 с.
19. Шукле Л. Геологічні проблеми механіки ґрунтів / Шукле Л. – Будвидат, 1976. – 485 с.
20. Зоценко М. Л., Яковлев А. В. Приклади розрахунку основ і фундаментів сільських будівель і споруд. Київ: “Будівельник”, 1986 – 104с.
21. ДБН В.1.2 – 2 :2006 “Навантаження та впливи”, К.: МІНБУД України, 2006. – 60 с.
22. ДБН В.2.1-10-2009. Основи і фундаменти будівель та споруд «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК) Київ-2010.
23. Mindlin R.D. Force at a point in the interior of a semi – infinite solid, Physics 7, 196-202, 1936.
24. Григорян А. А., Хабібুলін І. І. Експериментальні дослідження розподілу напружень в буронабивних палях значних розмірів // Зб. Основи, фундаменти та механіка ґрунтів. – 1980. – № 3. – С. 11-13.
25. Бішоп А. У. Параметри міцності при зсуві непорушених і перем’ятих зразків ґрунту. Зб. Механіка. Нове в зарубіжній науці. Визначальні закони механіки ґрунтів. 1965, с. 7-75.
26. Харр М. Е. Основи теоретичної механіки ґрунтів. 1971. – 320 с.
27. Надаї А. Пластичність і руйнування твердих тіл. 1969. 863 с.
28. Рейнер М. Деформація і течія. 1963. 382 с.

29. Швецов Г. И. Основы и фундаменти, 1991. – 357 с.
30. 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 / 1998. – P. 307 – 311.
31. Drucker D. C. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly Applied Mathematics / D. C. Drucker, W. Prager. – 1952. – 10. – № 2.
32. Drucker D. C. Soil mechanic and work – hardening theories of plasticity / D. C. Drucker, R. E. Gibson, D. S. Henkel. – Trans. Amer. Soc. Civ. Eng., 1957.

Електронне наукове видання

Моргун Алла Серафимівна

Меть Іван Миколайович

Моргун Іван Анатолійович

**ГЕОТЕХНІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ НА ОСНОВІ МГЕ
ДЕФОРМАТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ҐРУНТУ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Рукопис оформив І. М. Меть

Оригінал-макет підготовлено у РВВ ВНТУ

Підписано до видання 10.01.2025.

Гарнітура Times New Roman.

Зам. № P2025-007.

Видавець та виготовлювач

Вінницький національний технічний університет,

Редакційно-видавничий відділ.

ВНТУ, ГНК, к. 114.

Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021.

press.vntu.edu.ua;

E-mail: rvv.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.