

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

А. С. Моргун

**ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ҐРУНТУ
ПРИ ПЛАСТИЧНІЙ ФОРМОЗМІНІ
ТА ДИЛАТАНСІЇ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК.519.635:624·044:624.15

M79

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 15 від 25.05.2017 р.)

Рецензенти:

О. А. Савицький, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

М. Ф. Друкований, доктор технічних наук, професор

Моргун, А. С.

M79 Деформативність ґрунту при пластичній формозміні та дилатансії : монографія / А. С. Моргун – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 95 с.

ISBN 978-966-641-712-4

В монографії розглянуто питання ущільнення ґрунтів як основну проблему, що виникає при прогнозі осідань споруд і прогнозі допустимого навантаження на ґрунт, зосереджено увагу на теоретичній роботі, де на основі узагальнення накопичених даних напрацьовуються можливі шляхи подальшого розвитку проблеми в цілому, з метою наблизити якомога ближче розрахункової схеми до реальних результатів.

Висвітлено механічну суть задач геомеханіки з позицій механіки дисперсного пружно-пластичного середовища та показано її на числових прикладах розв'язання крайових задач геомеханіки за числовим методом граничних елементів.

УДК 519.642:624.044:624.15

ISBN 978-966-641-712-4

© А. Моргун, 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
Розділ 1 ОПІР ҐРУНТІВ ЗСУВУ	10
1.1 Методи дослідження ґрунтів на зсув	10
1.2 Ефекти зміни пористості в ґрунті при зсуві	16
Розділ 2 СПІВВІДНОШЕННЯ ЛІНІЙНОЇ ТЕОРІЇ ПРУЖНОСТІ.....	24
2.1 Одновісний напружений стан	25
2.2 Одновісна деформація	26
2.3 Плоский напружений стан	26
2.4 Плоска деформація.....	28
2.5 Деформації чистого і простого зсуву	28
2.6 Двовимірні напруження.....	29
2.7 Тривимірні напруження.....	30
Розділ 3 РОЗРАХУНКОВІ МОДЕЛІ ҐРУНТУ	31
3.1 Фазова модель ґрунту, фізична та геометрична нелінійність ...	31
3.2 Модель суцільного середовища (квазіоднофазового).....	32
3.3 Модель лінійно деформованого середовища	33
3.4 Модель теорії граничної рівноваги	35
3.5 Моделі пружно-пластичного середовища	36
3.5.1 Уявлення про пружно-пластичне деформування ґрунту	36
3.5.2 Енергія руйнування.....	40
3.6 Основні закономірності деформування ґрунтів.....	42
Розділ 4 ПРИКЛАДНА ГЕОМЕХАНІКА В БУДІВНИЦТВІ.....	44
4.1 Види пластичних моделей.....	46
4.2 Визначальні співвідношення в теорії пластичності	46
4.3 Поверхні навантаження	48
4.4 Основна нерівність теорії пластичності	53
4.5 Асоційований та неасоційований закони пластичної течії. Постановка задач теорії пластичності	54

Розділ 5 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ МГЕ	61
5.1 Формулювання методу граничних елементів для задач теорії пружності. Рівняння Нав'є. Тотожність Сомільяни	61
5.2 Прикладання МГЕ до розв'язання нелінійних задач механіки грунтів.....	66
5.3 Числова реалізація методики розв'язання крайової задачі механіки ґрунтів	66
Розділ 6 ЧИСЛОВИЙ АНАЛІЗ ЗА МГЕ НЕЛІНІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ ҐРУНТІВ	69
6.1 Дослідження за МГЕ деформативності фундаментної плити 10-поверхової житлової споруди.....	70
6.2 Аспекти визначення несучої спроможності пального поля за МГЕ	77
6.3 Прикладання МГЕ до визначення осідань круглих в плані фундаментних конструкцій зерносковищ.....	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

Г – границя досліджуваного елемента

ГЕ – граничний елемент

ІГЕ – інженерно-геологічний елемент

МГЕ – метод граничних елементів

МСЕ – метод скінченних елементів

НДС – напружено-деформований стан

ПК – програмний комплекс

СЕ – скінчений елемент

СЛАР – система лінійних алгебраїчних рівнянь

*Ні одне дослідження ніколи не буває
до кінця завершеним. Найбільша перевага
добре виконаної роботи – та, що вона
відкриває інші шляхи, ще кращі....
А. Моруа*

ВСТУП

Для реальних будівельних конструкцій перебільшення бар'єра площадки текучості матеріалу означає наявність аварійних деформацій і переміщень. В сучасних ДБН практичне значення має лише пружна частина графіка «напруження–деформації».

Зараз подібного будівництва не може собі дозволити жодна держава в світі. Та це зараз і не потрібно, морально і функціонально будівлі старіють дуже швидко. Вихід – з мінімальними витратами на будівництво при прийнятому ступені надійності. Та саме це балансування «на краю прірви» потребує точного теоретичного апарату.

Уявлення Леонардо да Вінчі, якого можна назвати першим інженером-будівельником, про наукові знання є сучасними: «В науке не может быть никакой достоверности, если отсутствует почва для приложения математики. Всякая практика должна опираться на теорию. Наука – полководец, а практика – воин» [13].

В механіці ґрунтів задачі, пов'язані з реакцією основи на різке втручання в її природний режим, з поведінкою і властивостями ґрунту, що несуть на собі століттями тисячотонний вантаж будівель, далеко не все ясно, більш того, тут ще більше таємниць і ненадійності ніж в будь-якому іншому будівельному напрямку.

Механіка суцільних середовищ не розглядає мікропроцеси реальних тіл, а ґрунт як гранульоване середовище має свої характерні особливості роботи на мікрорівні.

Як матеріал для основи ґрунт за якістю дуже поступається будівельним матеріалам, і, як наслідок, – його можливості дуже обмежені. Його поведінку важко передбачити кількісно (а інколи і якісно). Деякі деформації в ньому неминучі, коли вони перевищують відомі межі – споруді загрожує аварія. Непередбачуваність в його поведінці, не будучи правилом, не є і винятком. Ми вимушені приймати всі його недоліки та примхи.

Міцність та стійкість основ та земляних споруд визначається опором ґрунту зсуву, який є чи не основним фактором, що визначає умови роботи ґрунту під навантаженням. Для ґрунтів це змінна величина, не лише для різних видів, але й для одного й того ж ґрунту вона може істотно змінюватись в залежності від вологості, нормальних напружень. Руйнування основ будівель проходить в основному в результаті зсуву частинок ґрунту.

Мінливість деформування ґрунту залежить від багатьох чинників. За влучним висловом Д. Гільберта: «Головне – це із множини проблем вибрати найголовніші, вирішення яких дозволить напрацювати допустимі узагальнення і концепції» [60].

Природна «піддатливість» ґрунту приводить до більш повного включення в роботу слабо навантажених ділянок і основа використовується більш повноцінно. Це пов'язано з пластичними деформаціями. Основна задача при проектуванні – зведення до мінімуму осідання ґрунту під фундаментами, оскільки завдяки цьому зменшуються додаткові навантаження (і перевантаження) конструкції, які і без того мають сприймати низку постійних і тимчасових впливів. Конструктор повинен мати великі знання, досвід а також бачити, що може очікувати його витвір протягом всього періоду експлуатації, аби своєчасно убезпечити його від примх природи.

Вимоги сучасної прикладної геомеханіки викликали появу нових моделей, викладених в багатьох монографіях та статтях. Процес пластичного деформування дисперсного середовища ґрунту описується сучасними дилатансійними моделями [2, 25, 33], які відображають реальну поведінку ґрунту. В будь-якому випадку виникає потреба дослідження НДС ґрунту під дією зовнішніх впливів (сил). Найчастіше зовнішні сили зумовлені тяжінням Землі.

Широкий розвиток будівництва сучасних висотних будівель приводить до необхідності глибокого вивчення і наукового обґрунтування накопиченого досвіду поведінки деформованого пористого середовища ґрунту з метою створення більш досконалих теорій розрахунку і перспективних напрямів, підкріплених вимогами часу.

Актуальність і значимість цієї задачі очевидна. Дешевше забезпечити реальне непросідання будівель, ніж витратити кошти на нескінченні відновлення та ремонти від їх нерівномірного просідання.

Досвід досліджень в таких суміжних областях знань як будівельна механіка, теорія пружності і пластичності, механіка ґрунтів, числові методи, які математизовані «з голови до п'ят» і являють собою арену, на якій сучасна математика показує на що вона здатна, відкриває нові можливості перед наукою підземного будівництва вільною від умовностей і припущень загальноприйнятих укорінених прийомів, що часто приводять до розбіжностей з даними практики.

Стійкою тенденцією останніх десятиліть в світовій геотехніці є поступовий перехід нормативних документів на принцип проектування геотехнічних об'єктів за граничними станами. Основи розраховуються по другій групі граничних станів і цей розрахунок має забезпечити нормальну експлуатацію будівлі, обмеженість осідань ($S \leq S_{\text{допустиме}}$), прогинів, кутів повороту.

Сучасному етапу властивий напрям розвитку з використанням числових методів та ЕОМ. Зростаючі можливості сучасних ЕОМ потребують постійної ревізії наявних числових методів при дослідженнях нових класів задач, для яких з'явилась надія на розв'язання.

Однією із таких задач є нелінійна задача геомеханіки. Створені для неї на сьогодні математичні моделі адекватного описання процесів поведінки ґрунту та оцінки ефективності стратегії, управління цими процесами – це системи диференціальних рівнянь в частинних похідних – є досить складними для отримання аналітичних розв'язків.

Як відомо, абсолютна точність є зайвою для багатьох систем реального світу. Не є винятком і вищезгадана крайова задача геомеханіки, розв'язок якої можна отримати одним із потужних сучасних числових методів – МГЕ на швидкодійних ЕОМ.

В монографії запропоновано модель, на якій можна експериментувати, та отримувати оптимальні розв'язки. Моделі властивий чіткий фізичний зміст. Модель дозволяє відтворювати зміну вхідних параметрів в процесі деформування, оскільки, як відомо, рух веде до зміни структури системи. Модель задовольняє вимоги збіжності існування та стійкості розв'язків.

Із будівельної практики відомо, що на характер поведінки фундаментних конструкцій впливають властивості навколишнього ґрунту. Зони пластичних зсувів в основах викликають перерозподіл контактних тисків. Явище перерозподілу напружень між ґрунтом та будівлею в більшості випадків спричиняє зменшення зусиль.

Зміщення частинок ґрунту під навантаженням, в результаті якого ґрунт стає більш щільним, пов'язане з витисненням з них води, зайвої в їхньому новому стані. При цьому між мінеральними частинками, поровою водою та повітрям виникає тертя.

В процесі мобілізації сил внутрішнього тертя зерна незв'язного ґрунту переміщуються хаотично не дивлячись, що їх переміщення диктується граничними умовами і фактичним НДС, переміщення зерен приводить до їх більш пухкого чи більш щільного упакування в порівнянні з вихідним станом.

Аналітичні залежності такого переміщення можна встановити лише з дуже грубими наближеннями. З цієї причини висновки механіки суцільних середовищ для оцінки деформацій незв'язних ґрунтів можуть бути використанні з низкою обмежень.

Зв'язні ґрунти більш близькі до умов деформацій суцільного середовища, хоч би тому, що їх деформації нерозривні.

Розв'язання контактної задачі взаємовпливу наземної та підземної частини будівлі розглянуто у великій кількості публікацій [16, 69, 75, 77]. Якщо розглянути цю проблему в нелінійній постановці – число публікацій значно менше. Що пояснюється значними розрахунковими ускладненнями при врахуванні фізичної нелінійності основи.

Розділ 1 ОПР ГРУНТІВ ЗСУВУ

1.1 Методи дослідження ґрунтів на зсув

Будівельна діяльність людини потребує знання порід і процесів, які в них відбуваються при будівництві та інженерних впливах на земну кору. З дослідженням міцності ґрунтових порід пов'язане питання про опір ґрунтових порід зсуву.

Природна піддатливість ґрунтів спричиняє неминуче виникнення в них напружень та деформацій, які на стадії проектування необхідно передбачити та звести до мінімуму можливість виникнення аварійних ситуацій. Кількісною мірою прогнозування геологічних процесів є напруження та деформації. Зміни в НДС, що виникають в масі ґрунту, приводять до зміни об'єму цієї маси. Переміщення ґрунту в результаті зміни напружень здійснюють вплив на споруду. Одним із основних експлуатаційних вимог є обмеження осідання фундаменту. Очікуваний рівень осідань має бути скорочений до мінімуму, який регламентований ДБН.

Не дивлячись на уявну простоту, процеси що проходять в ґрунтах, дуже складні як об'єкти досліджень і контролю. До цього часу досліджено не всі аспекти механізму деформування основ під навантаженням.

Досліди показують, що міцність ґрунту різна при різних видах напруженого стану. Деформації ґрунту залежать від багатьох факторів, в тому числі і від виду напруженого стану, який характеризується параметром Лоде–Надаї μ_σ . Експериментально встановлено, що вплив виду напруженого стану на міцність ґрунту залежить від щільності його упаковки і траєкторії навантаження. Це пояснюється можливістю ґрунту дилатувати, тобто змінювати об'єм при зсуві.

Параметр Лоде є функцією другого інваріанта девіатора напружень $I_2(D_\sigma)$ та третього інваріанта девіатора напружень $I_3(D_\sigma)$ і характеризує вид напруженого стану. Інваріанти тензора напружень T_σ і тензора деформацій T_ε – основні характеристики напружено-деформованого стану (НДС) в точці, оскільки вони не залежать від вибору системи координат (інваріантні до перетворення координат, а T_σ і T_ε залежать від координат).

$$\mu_{\sigma} = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}. \quad (1.1)$$

За умови $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ параметр Лодє–Надаї приймає значення [16], що наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення μ_{σ} від виду напруженого стану

№ з/п	Вид напруженого стану	Значення головних напружень	Значення коефіцієнта Лодє
1	Одновісний розтяг	$\sigma_3 < 0, \sigma_1 = \sigma_2 = 0$	$\mu_{\sigma} = 1$
2	Одновісний стиск	$\sigma_1 > 0, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$	$\mu_{\sigma} = -1$
3	Асиметричний тривісний напружений стан	$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$	$\mu_{\sigma} = 1$
4	Тривісний симетричний напружений стан	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 > 0$	$\mu_{\sigma} = -1$
5	Чистий зсув	$\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau, \sigma_2 = 0$	$\mu_{\sigma} = 0$
6	Всебічне обтиснення кубкового зразка	$\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$	$\mu_{\sigma} = \text{від } -1 \text{ до } +1$

Міцність ґрунту може бути оціненою чи по граничній величині деформацій зсуву, чи по швидкості деформацій, при які деформація починає прискорюватись, чи по виникненні тріщин або поверхонь розриву. До фізичних особливостей опору ґрунтів зсуву можна віднести такі міркування.

Контактування частинок в масі ґрунту здійснюється в окремих точках. В силу малої площі контакту між частинками навіть при незначному зовнішньому тиску величина його на контактах може сягати граничних значень і результатом цього буде поява тріщин і роздроблення частинок.

Другою особливістю є наявність на поверхні мінеральних частинок плівок зв'язної води, гідроокислів різних металів, плівок кремнієвої кислоти та інших з'єднань, що грають роль проміжного матеріалу на контакті частинок.

Третьою особливістю є з'єднання частинок одна з одною твердими цементаційними містками.

Саме тому трифазові ґрунти (тверді частинки, пари, вода) сприймають зовнішнє навантаження по іншому ніж суцільні тверді тіла.

Розподіл навантаження в товщі незв'язних (зернистих) ґрунтів та їх опір зовнішнім навантаженням обумовлені силами тертя, що виникають на контактах частинок.

Опір деформації зв'язних ґрунтів, складених в основному глинистими мінералами (їм властива щільникова структура), обумовлюється міцністю водяних плівок, що оточують частинки глини.

В процесі мобілізації сил внутрішнього тертя зерна ґрунту вкладаються більш щільно, чи більш пухко порівняно з вихідним станом.

Середньостатистичне значення такого переміщення зерен у вигляді аналітичної функції від їх положення може бути встановлено лише з найгрубішим наближенням [50].

З цієї причини висновки механіки суцільних середовищ для оцінки деформацій незв'язних ґрунтів можуть бути використані лише з низкою обмежень. Зв'язні ґрунти більш близькі до умов деформації суцільних середовищ, оскільки їх деформації самі нерозривні.

Не дивлячись на такі обмеження висновки механіки суцільних середовищ широко використовуються в розрахунках, пов'язаних з оцінкою напруженого стану, міцності і деформацій ґрунтів.

Фізико-механічні властивості ґрунтів проявляються при впливі на них зовнішніх навантажень. В загальному випадку поведінка ґрунту під навантаженням складається із трьох процесів, що проходять послідовно, і які часто взаємно накладаються: зворотне чи пружне деформування, пластичне і руйнівне деформування [36].

Знання поведінки ґрунту на кожній стадії деформування, а також умови переходу від однієї стадії до іншої має практичне значення, тому що дозволяє передбачити поведінку ґрунту під дією тиску від споруди.

Зсув і розрив – два основних механізми втрати міцності тіла.

Опір ґрунту зсуву є важливою міцнісною характеристикою, знання якої необхідне для розв'язання інженерно-геологічних задач.

Під дією зовнішнього навантаження в деяких зонах ґрунту зв'язок між частинками руйнується і здійснюється зміщення (зсув) одних частинок відносно інших – ґрунт отримує можливість необмежено деформуватись під цим навантаженням. Руйнування масиву ґрунту здійснюється у вигляді переміщень однієї частини масиву відносно іншої (зсув відкосу, випирання ґрунту з-під споруди...).

Визначення опору ґрунту зсуву (лабораторне чи в польових умовах) моделює руйнування від нормальних тисків ґрунту в споруді, (рис. 1.1–1.4) і полягає у вимірюванні зусиль, необхідних для зсуву зразка чи деякого об'єму ґрунту, що знаходяться під дією відомого нормального тиску.

Найбільш розповсюдженими способами визначення міцності ґрунту є:

- 1 – прямий зсув по фіксованій площині;
- 2 – одновісне роздавлення;
- 3 – роздавлення при тривісному стисненні;
- 4 – зріз по циліндричній поверхні;
- 5 – втискування штампа, конічного чи шарового наконечника.

Дослідження на прямий зсув проводиться в спеціальному приладі.

Основна його частина – циліндрична обойма (яка зрізає) – складається із нерухомої і рухомої частин. Зразок ґрунту закладається в обойму, через штамп завантажується заданим нормальним тиском, після чого піддається дії зсувного зусилля, яке прикладається до рухомої частини обойми. Зсувне зусилля збільшується до тих пір, поки не здійсниться ковзання однієї частини зразка по іншій, після чого величина потрібного для зсуву зусилля може або значно зменшитись, або залишитись незмінною, рис. 1.1, 1.2.

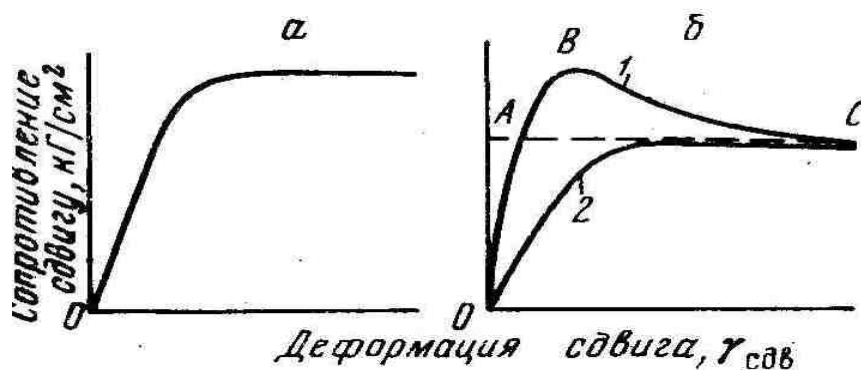


Рисунок 1.1 – Зміна зсувних зусиль з ростом деформацій зсуву ґрунту:
 а – при постійній швидкості навантаження;
 б – при постійній швидкості деформування: 1 – щільний пісок; 2 – пухкий пісок

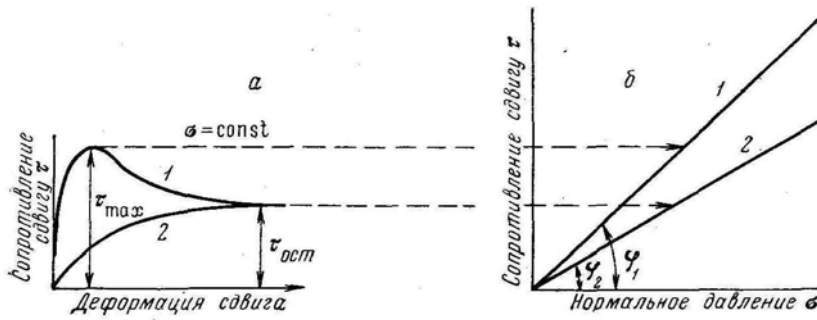


Рисунок 1.2 – Залежність опору зсуву від деформацій зсуву (а) та від нормального тиску (б) для піску: 1 – щільного; 2 – пухкого

На кривій $\tau - \gamma_{зсув}$ виділяються характерні ділянки: ОА – залежність $\tau - \gamma_{зсув}$ близька до лінійної і може мати зворотний характер; АВ – продовжується ріст зсувного зусилля до максимального значення, що викликає зсув ґрунту; ВС – зсувне зусилля зменшується до величини мінімального чи залишкового напруження, що забезпечує незатухаючі деформації зсуву.

За результатами низки дослідів при різних нормальних тисках будується графік в координатах $\tau - \sigma$, з якого визначаються параметри опору зсуву ϕ і C , які називають міцністними характеристиками і які є параметрами прямої $\tau = \sigma \cdot \text{tg} \phi + C$, рис. 1.3.

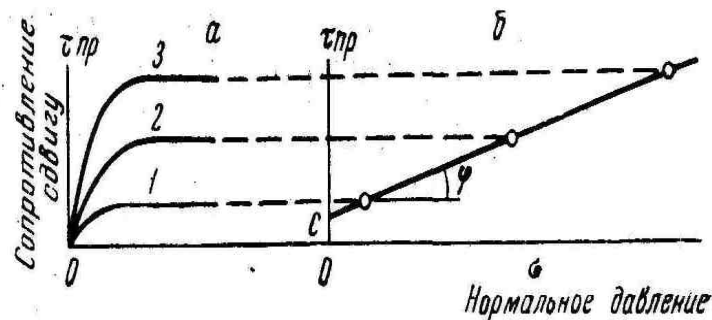


Рисунок 1.3 – Графік граничних опорів зсуву для зв'язного ґрунту: а – в залежності від деформацій зсуву; б – в залежності від нормального тиску; 1, 2, 3 – криві отримані для різних величин тисків

Компресійні дослідження введено в практику досліджень ґрунтів в 1923 р. К. Терцагі, вони являють собою класичний досвід для оцінки стискуваності і ущільнення ґрунтів.

При одновимірній консолідації без можливості бокового розширення циліндричний зразок ґрунту може деформуватись лише в

одному напрямку – по свої осі і лише в цьому напрямку з пор ґрунту можуть віджиматись повітря і вода.

Можливість радіальної деформації при компресійних дослідженнях відсутня. З цієї причини стискуваність ґрунту зазвичай оцінюється лише за величиною відношення осевого напруження, прикладеного до верхньої торцевої частини зразка, до його лінійної деформації. Ця величина отримала назву – модуля лінійного стискання.

Потрібно відмітити, що компресійні дослідження до цих пір широко використовуються для визначення експериментальних показників, що необхідні для проведення розрахунків прогнозу осідань споруд і ущільнення ґрунтів в часі.

Дослідження на міцність способом роздавлення при тривісному напруженому стані проводяться в стабілометрах.

Зразок ґрунту циліндричної форми у водонепроникній резиновій оболонці розміщують в камеру, в якій він піддається всебічному тиску за допомогою рідини. Потім до зразка прикладається вертикальний тиск аж до його руйнування.

Із збільшенням нормального тиску опір ґрунту зсуву зростає по кривій, рис. 1.4. В області стискаючих тисків опір ґрунту в принципі зростає необмежено, а в області розтягуючих тисків для зв'язного ґрунту в наявності деяка величина опору і крива перетинає вісь абсцис, рис. 1.4.

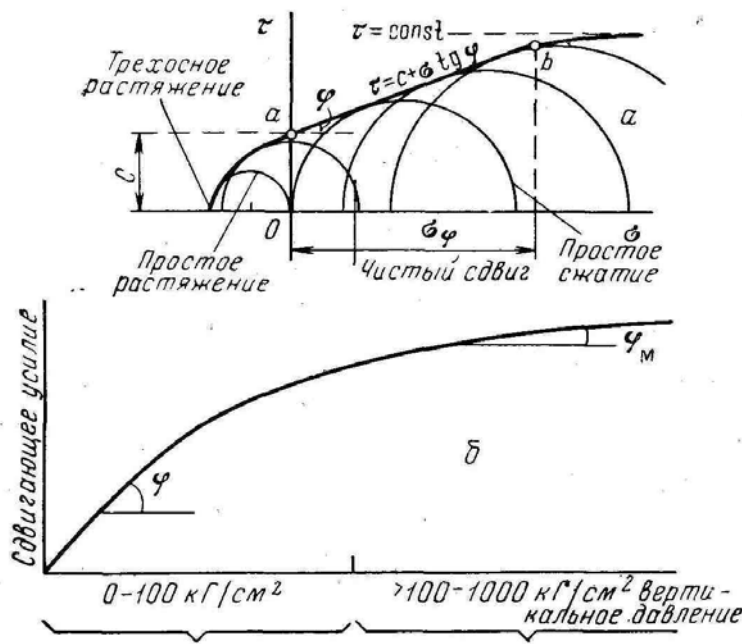


Рисунок 1.4 – Залежність опору зсуву зв'язного (а) і незв'язного (б) ґрунту від нормального тиску

Для отримання повної характеристики опору зсуву необхідно провести серію досліджень при різних значеннях всебічного тиску. Визначення параметрів опору зсуву проводять шляхом побудови кругів напружень і проведенням граничної згинаючої до них, рис. 1.4.

Таким чином, опір ґрунту зсуву – величина змінна. На основі даних про стисливість ґрунту та його опір зсуву визначаються межі можливого розвитку деформацій ґрунту та ступінь порушення його стійкості. Опір ґрунтів зсуву у визначеному діапазоні тисків (від одного до декількох десятків в кг/см²) може бути виражений лінійною залежністю (К. Кулон, 1773 р.)

$$\tau_{zp} = \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi + C, \quad (1.2)$$

де τ_{zp} – граничне зсувне напруження; σ – нормальний тиск; $\operatorname{tg} \phi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя; ϕ – кут внутрішнього тертя; C – зчеплення.

Величини C , ϕ необхідні для інженерних розрахунків, це параметри опору ґрунту зсуву. В умовах множини випадкових факторів (неоднорідність ґрунту, умов оцінки їхніх міцнісних властивостей) реально досяжна точність експериментів в механіці ґрунтів невелика, в кращому випадку вона відповідає похибкам $\approx 20\%$.

Введення в розрахунок завищених значень кута внутрішнього тертя ϕ і зчеплення C може спричинити значні деформації споруди, чи до повне їх руйнування.

1.2 Ефекти зміни пористості в ґрунті при зсуві

Принцип залежності пористих ґрунтів від тиску є основним положенням сучасної механіки ґрунтів. Опіраючись на результати механічного і фізико-механічного досліджень дисперсних ґрунтів в лабораторії і польових умовах, виведено пояснення цих процесів.

Під впливом навантаження ґрунти прямують до стану рівноваги. Всяка зміна умов ущільнення породи неминуче веде до переходу в новий стан рівноваги. Стиснення порід здійснюється під впливом сили тяжіння, що переборює дію сил тертя між частинками і зв'язності, яка виникає між ними за рахунок цементації.

Раціональні методи прогнозування поведінки ґрунтів можливі лише у випадку, коли механізм їх деформування встановлений, для цього необхідно залучити як механіку суцільних середовищ, так і урахування фізико-механічних процесів пористих тіл.

Реологія ґрунту дуже складна. Міцнісні характеристики ґрунту змінюються в процесі деформування. За межами пропорційності вплив поперечних деформацій на осідання суттєво зростає.

В дисперсних тілах, якими є ґрунти, відносне зміщення твердих частинок може здійснюватись лише в умовах одночасної зміни об'єму і форми (тобто, зміна об'єму супроводжується зсувними деформаціями).

Цей ефект перехресного впливу інваріантів тензора напружень та тензора деформацій один на другого (одночасність зміни об'єму і форми) в 1885 р. О. Рейнольдс назвав дилатансією.

Деформації зсуву в ґрунтах супроводжуються переорієнтацією частинок, що викликає зміни об'єму пор. Механізм зміни об'єму пор доволі складний, оскільки пов'язаний із випадковим переміщенням частинок ґрунту в зоні зсувів. На цей механізм впливає багато факторів:

- градація та розмір частинок;
- стан та тип їх упаковки;
- положення головних площадок;
- відношення головних напружень;
- історія напруженого стану і величини меншого головного напруження;
- конструкція приладів, методика досліджень та підготовки зразка.

Деформування гранульованого матеріалу ґрунту здійснюється при взаємному проковзуванні зерен, а в умовах великих тисків – при їх крихкому руйнуванні. При реалізації одночасного стиснення і зсуву в залежності від інтенсивності кожного з цих процесів піщаний ґрунт може:

- ущільнюватись;
- зберігати незмінну щільність;
- розущільнюватись, рис. 1.5–1.7.

Ці реологічні властивості піску пов'язані із явищем дилатансії. Опір ґрунту зсувним зусиллям – величина змінна, його числова величина має першочергове практичне значення, оскільки обумовлює точність інженерних розрахунків по виявленню граничного навантаження на ґрунти.

Під терміном дилатансія в механіці ґрунтів розуміють об'ємну деформацію, що викликана при постійних нормальних октаедричних напруженнях девіаторним компонентом тензора напружень. Ефект дилатансії відсутній в ідеальних тілах Гука. Ефект дилатансії можна

розглядати як прояв анізотропних деформаційних характеристик ґрунту. Принципова схема зміни об'єму ґрунту проілюстрована на рис. 1.5[50].

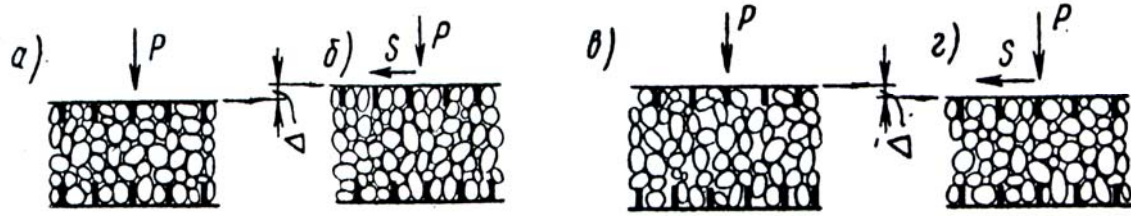


Рисунок 1.5 – Вплив зсуву на об'єм піщаного ґрунту –

- а) – щільний пісок перед зсувом; б) – щільний пісок, що розширився під час зсуву;
в) – пухкий пісок перед зсувом; г) – пухкий пісок, що ущільнився після зсуву

На рис. 1.5а наведено схему щільного упакування піску, при якому зерна так сильно зчеплені, що деформація зсуву неможлива без руйнування зерен, якщо тільки не здійсниться розпушення, що показано на рис. 1.5б.

В пухкому піску при деформації зсуву проходить переміщення зерен в поровий простір, що супроводжується зменшенням об'єму, рис. 1.5г.

В теорії пластичності зазвичай тензор напружень подають у вигляді суми двох складових: шарового тензора напружень та девіатора напружень, вони мають особливе значення і в механіці суцільного середовища.

Таким чином, характерною особливістю деформування ґрунтів є дилатансія – зміна об'єму за рахунок девіаторної складової тензора напружень. Це явище О. Рейнольдс пояснив переупаковкою частинок ґрунту при зсуві. Якщо при зсуві в результаті перебудови структури матеріал збільшується в об'ємі, то така об'ємна деформація називається дилатансія. Коли при зсуві об'єм матеріалу зменшується, це від'ємна дилатансія – контрактансія. Дилатансія – величина об'ємних деформацій, викликана при $\sigma_m = Const$ девіаторною частиною тензора деформацій [61].

Згідно з експериментальними дослідженням М. Н. Гольдштейна об'ємна деформація без формозміни здійснюється лише при гідростатичному тиску, а формозміна без об'ємної деформації проходить лише

при чистому зсуві. Наявність в матеріалі ущільнення вносить корективи в розрахунок процесів деформування, приводить до перебудови полів $\sigma - \varepsilon$. Результати дренажних досліджень на зсув піску приведені на рис. 1.6. Деформація ґрунту при мобілізації його пікової міцності τ_{\max} (рис. 1.6а) носить характер кутових перекосів [9, 10]. Після проходження піка цей перекоп поступово збільшується і починає зароджуватись поверхня зсуву.

При значних деформаціях ґрунту, коли його міцність зменшується до залишкового значення τ_f , виникають ясно виражені лінії ковзання та поверхня ковзання. Лінії ковзання – це лінії сильного дотичного розриву, по яких здійснюється проковзування. Вдовж ліній ковзання одночасно має виконуватись закон сухого тертя. В природних умовах абсолютна більшість зміщень масивів ґрунту пов'язана з мобілізацією пікової міцності ґрунту [9, 10].

Крива $\tau - \gamma$ для *пухкого стану* піску (рис. 1.6а) спочатку доволі різко піднімається вгору, та після осьової деформації в 1 % девіатор напружень зростає поволі, сягаючи пікового значення між деформаціями 10–15 %, потім поволі знижується. Порушення структури зразка зазвичай обмежується деформацією, при якій ще можна отримати надійні заміри (біля 25 % по відношенню до початкової висоти зразка).

Коефіцієнт пористості, на рис. 1.6б графік 1 (для *пухкого зразка*), швидко зменшується, сягаючи мінімального значення, а потім знов зростає до тих пір, поки не буде досягнуте пікове значення девіатора напружень.

В *щільному стані* (графік 2 на рис. 1.6а) девіатор напружень зростає при деформуванні значно швидше ніж у випадку пухкого ґрунту, сягаючи пікового значення приблизно при 5 % деформації, а потім порівняно швидко падає.

Після деякої початкової ділянки (графік 2 на рис. 1.6б) коефіцієнт пористості « e » швидко зростає, потім крива стає більш пологою і наближається до асимптоти.

В 1936 р. Казагранде запропонував ввести критичну пористість e^{cr} (асимптота – 3, до якої прямують криві 1 і 2 на рис. 1.6б), при $e = e^{cr}$ зсув ґрунту проходить при постійному об'ємі. Для конкретного зернистого ґрунту величини e^{cr} і ρ^{cr} не постійні:

$$\text{при} \begin{cases} e > e^{cr} \Rightarrow V \downarrow \\ e = e^{cr} \Rightarrow V = \text{Const}; \\ e < e^{cr} \Rightarrow V \uparrow \end{cases} \quad \text{при} \begin{cases} \rho > \rho^{cr} \Rightarrow V \downarrow \\ \rho = \rho^{cr} \Rightarrow V = \text{Const} . \\ \rho < \rho^{cr} \Rightarrow V \uparrow \end{cases} \quad (1.3)$$

Зсув ґрунту з щільним упакуванням частинок приводить до розпушування ґрунту (збільшення об'єму), а зсув ґрунту з пухким упакуванням – до ущільнення ґрунту, рис. 1.7. Саме в зв'язку з цим приріст пластичних деформацій описують сумою складових

$$d\varepsilon^P = d\varepsilon_{\text{шар.}} + d\varepsilon_{\text{девіат.}} \quad (1.4)$$

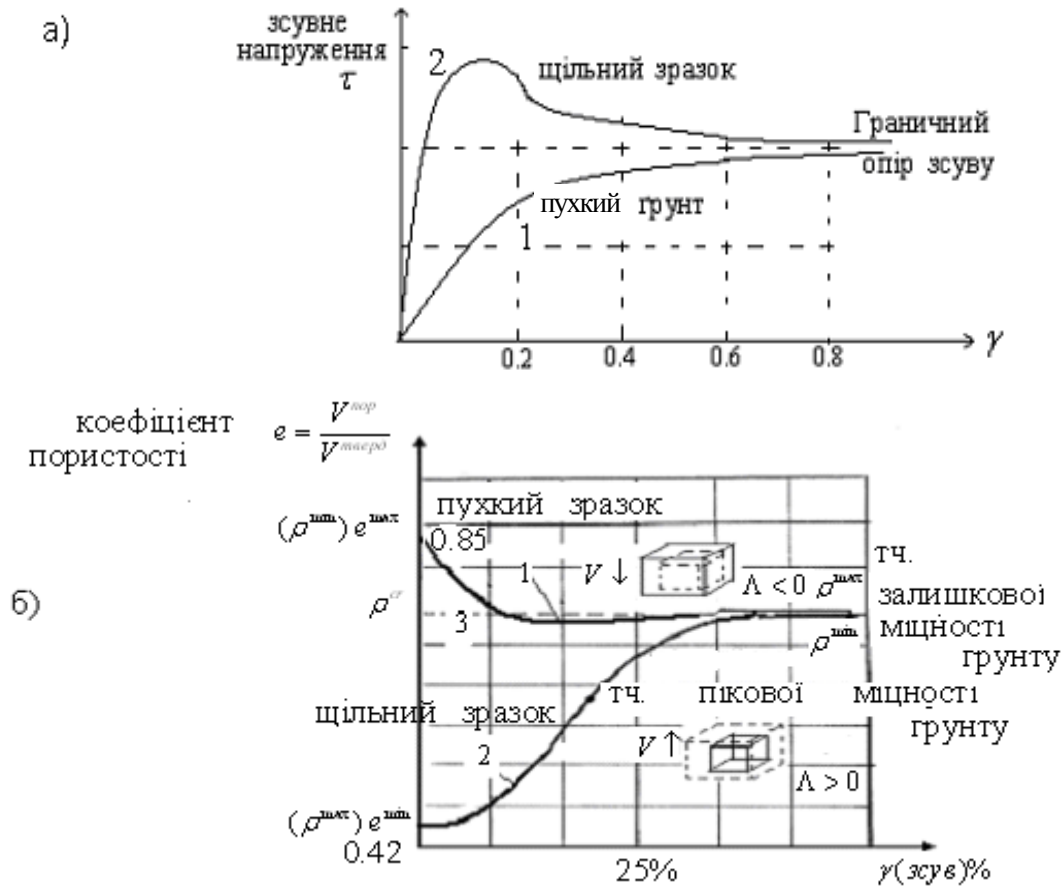


Рисунок 1.6 – Зміна девіатора напружень ($\tau = \sigma_1 - \sigma_3$) (а)
та коефіцієнта пористості e сипучого ґрунту (б)
в процесі дренажних досліджень на зсув (γ) піщаних ґрунтів: 1 – пухкий пісок;
2 – щільний пісок; 3 – неперервне деформування при постійному об'ємі

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алейников С. М. Метод граничных элементов в контактных задачах для упругих пространственно-неоднородных оснований / С. М. Алейников. – М. : АСВ, 2000. – 754 с.
2. 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.
3. 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.
4. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел. – М : Мир, 1987. – 524 с.
5. Бреббия К. Применения МГЕ в технике / К. Бреббия, С. Уокер. – М. : Мир, 1982. – 247 с.
6. Теллес Ж. Применение метода граничных элементов для решения неупругих задач / Ж. Теллес, К. Бреббия ; пер. с англ. В. Н. Сидорова. – М. : Стройиздат, 1987. – 160 с.
7. Бугров А. К. Исследование грунтов в условиях трёхосного сжатия / А. К. Бугров, Р. М. Нарбут, В. П. Сипидин. – Л. : Стройиздат, 1987. – 184 с.
8. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов / С. С. Вялов. – М. : Высшая школа, 1983. – 352 с.
9. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. – М. : Стройиздат, 1979. – 304 с.
10. Денисов Н. Я. Природа прочности и деформаций грунтов / Н. Я. Денисов. – М. : Издательство литературы по строительству, 1982. – 280 с.
11. Зарецкий Ю. К. К расчету ленточных фундаментов на нелинейно-деформируемом основании / Ю. К. Зарецкий // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1965. – № 1. – С. 10–14.
12. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти. / М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, А. В. Яковлев [та ін.]. – Полтава, 2004. – 562 с.

13. Ильюшин А. А. Труды (1946–1966) : в тт. Т. 2. Пластичность / сост. Е. А. Ильюшина, М. П. Короткина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с.
14. Косте Ж. Механика грунтов / Ж. Косте, Г. Санглера. – М. : Стройиздат, 1981. – 455 с.
15. Клепиков С. Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С. Н. Клепиков. – К. : НИИСК, 1996. – 202 с.
16. Кушнер С. Г. Расчет деформаций зданий и сооружений / С. Г. Кушнер. – Запорожье, 2008. – 496 с.
17. Колкунов М. А. Прикладная механика деформируемого твёрдого тела / М. А. Колкунов, А. С. Кравчук, В. П. Майборода. – М. : Высшая школа, 1983 – 352 с.
18. Ключников В. Д. Математическая теория пластичности / В. Д. Ключников. – М. : Изд-во Московского ун-та, 1979. – 208 с.
19. Леонардс Д. А. Основания и фундаменты / Д. А. Леонардс. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1968. – 505 с.
20. Мейз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред / Дж. Мейз. – М. : Мир, 1974. – 318 с.
21. Моргун А. С. Застосування МГЕ у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту / А. С. Моргун. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2001. – 64 с.
22. Моргун А. С. Метод граничних елементів в розрахунках паль / А. С. Моргун. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2000. – 130 с.
23. Моргун А. С. Пластична задача механіки руйнувань ґрунтової основи будівель за методом граничних елементів. / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич // Збірник НДІБК № 71, книга 1. – К., 2008. – С. 88–92.
24. Моргун А. С. Моделювання дилатансійного середовища ґрунту системи «паль–основа» за МГЕ / А. С. Моргун // Основи і фундаменти : міжвідомчий науково-технічний збірник. – К. : КНУБА, 2007. – Випуск № 27. – С. 84–89.
25. Моргун А. С. Застосування методу граничних елементів у розрахунках паль в пластичному середовищі ґрунту / А. С. Моргун. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2001. – 132 с.
26. Моргун А. С. Теорія пластичності в механіці ґрунтів / А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 108 с.

27. Моргун А. С. Метод граничних елементів в розрахунках схилів / А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 95 с.
28. Моргун А. С. Нелінійні проблеми механіки ґрунтів / А. С. Моргун. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 122с.
29. Моргун А. С. Застосування інструменту числового МГЕ в прикладних дослідженнях поведінки плитно-пального фундаменту висотної будівлі / А. С. Моргун, А. В. Ніцевич // Основи і фундаменти : міжвідомчий науково-технічний збірник. – К. : КНУБА, 2011. Випуск № 32 – С. 62–71.
30. Моргун А. С. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі методу граничних елементів / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. – Вінниця : ВНТУ, 2009.– 162 с.
31. Николаевский В. Н. Дилатансия и законы необратимого деформирования грунтов / В. Н. Николаевский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1979. – № 5. – С. 29–31.
32. Николаевский В. М. Механика пористых трещиноватых сред / В. Н. Николаевский. – М. : Недра. 1984. – 232 с.
33. Навантаження і впливи: ДБН В 1.2-2-2006.– [Чинний від 2007-01-01].– К. : МІНБУД України, 2006.- 60 с.
34. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М. : Наука, 1988. – 712 с.
35. Рыжов А. М. Определение прочности и деформативности грунтов в строительстве / А. М. Рыжов. – К. : Будівельник, 1978. – 136 с.
36. Сергеев Е. М. Грунтоведение / Е. М. Сергеев. – М. : Из-во Московского университета, 1971 – 595 с.
37. Седов Л. И. Механика сплошной среды : Т. 1. / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1972. – 492 с.
38. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М. : Наука. Главная редакция физ.-мат. литературы, 1979. – 552 с.
39. Свайные фундаменты: СНиП 2.02.03-85. – М. : Стройиздат, 1985.
40. Соколовский В. В. Теория пластичности / В. В. Соколовский. – М. : Высшая школа, 1969. – 608 с.

41. Соломин В. И. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций / В. И. Соломин, С. В. Шматков. – М. : Стройиздат, 1986. – 209 с.
42. Сахаров В. О. Моделивання багатопверхового будинку на нелінійній основі в умовах прибудови / В. О. Сахаров // Світ геотехніки. – 2006. – № 4. – С. 25–28.
43. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
44. Тейлор Д. Основы механики грунтов / Д. Тейлор. – М. : Госстройиздат, 1960. – 597 с.
45. Тер-Мартirosян З. Г. Взаимодействие свайного фундамента с грунтом / З. Г. Тер-Мартirosян, З. Н. Нгуен, А. Н. Динь // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 2. – С. 2–7.
46. Терцаги К. Теория механики грунтов / К. Терцаги. – М. : Госстройиздат, 1961. – 508 с.
47. Флорин В. А. Основы механики грунтов / В. А. Флорин. – М. : Стройиздат, 1961. – 372 с.
48. Харр М. Е. Основы теоретической механики грунтов / М. Е. Харр. – М. : Мир, 1971. – 320 с.
49. Хоу Б. К. Основы инженерного грунтоведения / Б. К. Хоу. – М. : Изд-во литературы по строительству, 1966. – 460 с.
50. Шукле Л. Реологические проблемы механики грунтов / Л. Шукле. – М. : Стройиздат, 1976. – 485 с.
51. Цытович Н. А. Основы прикладной геомеханики в строительстве / Н. А. Цытович, З. Г. Тер-Мартirosян. – М. : Высшая школа, 1981. – 317 с.
52. Дослідження технічного стану будівель та споруд при небезпечних геологічних процесах / Я. Й. Червинський, О. О. Петраков, М. Л. Зоценко [та ін.]. // Наука та будівництво : збірник наукових праць. – К. : ДП НДІБК, 2014. – С. 17–24.
53. 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.
54. Abovskiy N. P. Energy principle and its application for the creation of controlled structures / N. P. Abovskiy // Spatial structures in new and

renovation projects of Building and construction. Proceeding international congress ICSS June 22 – 26. – Moscow, 1998. – P. 307–311.

56. Drucker D. C. Soil mechanics and plastic analysis or limit design / D. C. Drucker, W. Prager. // Quarterly Applied Mathematics. – 1952. – V 10, № 2.

57. 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.

58. Timoshenko S. Resistance des materiaux : t. 1 / S. Timoshenko. – Paris : Librairie Polytechnique Beranger, 1949.

59. Melan E. Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im innern beanspruchten Halbscheibe / E. Melan // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik – 1932. – № 12. – S. 343–346.

60. Mindlin R. D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid / R. D. Mindlin // Physics. – 1936. – № 7. – P. 195–202.

61. Reisner H. Initial stresses and sources of initial stresses / H. Reisner // ZAMP. – 1931. – BdII. – P. 1–8.

Наукове видання

Моргун Алла Серафимівна

**ДЕФОРМАТИВНІСТЬ ҐРУНТУ
ПРИ ПЛАСТИЧНІЙ ФОРМОЗМІНІ ТА ДИЛАТАНСІЇ**

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет – А. Моргун

Підписано до виготовлення 9.11.2017 р.

Системні вимоги:

процесор Pentium; 512 Mb RAM;

Windows XP,7,8,10; Acrobat Reader 6.0+.

Один електронний оптичний диск (CD-ROM); Обсяг даних 2,6 Мб.

Наклад 100 (1-й запуск 1–30) прим. Зам. № E2017-04

Видавець та виготовлювач – Вінницький національний технічний університет,

Інформаційний редакційно-видавничий центр.

Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, к. 114,

м. Вінниця, 21021, тел.: (0432) 59-85-32, 59-81-59.

press.vntu.edu.ua; *email*: kivc.vntu@gmail.com.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.