

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛТАВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА

На правах рукопису

ЛИТВИНЕНКО ТЕТЯНА ВАСИЛІВНА

УДК 624.131.4.136.138.22

**УЩІЛЬНЕННЯ ҐРУНТІВ ДОРОЖНЬОГО НАСИПУ ЗА
УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ ТРИВАЛОЇ МІЦНОСТІ**

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

ДИСЕРТАЦІЯ
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Винников Юрій Леонідович

Полтава – 2016

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	14
1.1. Головні принципи зведення ґрунтових дорожніх насипів.....	14
1.2. Природа ущільнення ґрунтів.....	18
1.3. Сучасні методи ущільнення ґрунтів.....	20
1.4. Можливості нових методів математичного моделювання процесів ущільнення ґрунтів.....	28
1.5. Сучасні уявлення про тривалу міцність ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	34
1.6. Аналіз причин деформацій земляного полотна в насипу.....	37
1.7. Недоліки нормативної бази визначення якості ущільнення ґрунтів.....	42
1.7.1. Проблеми лабораторних методів прогнозування ущільнення ґрунтів.....	42
1.7.2. Недоліки польових методів контролю якості ущільнення ґрунтів.....	51
1.8. Висновки. Мета і задачі дослідження.....	53
2. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ УЩІЛЬНЕНИХ ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ.....	55
2.1. Фактори, що впливають на закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	55
2.2. Лабораторні дослідження індикаційних показників дослідних глинистих ґрунтів.....	60
2.3. Методика проведення лабораторних досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	64
2.4. Результати впливу окремих чинників на параметри міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	71

2.4.1. Вплив фактору щільності скелету ґрунту.....	73
2.4.2. Вплив фактору висоти насипу.....	82
2.4.3. Вплив фактору часу.....	85
2.5. Висновки до розділу 2.....	90
3. КІЛЬКІСНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ МІГРАЦІЇ ВОДИ В ТОВЩІ УЩІЛЬНЕНИХ ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНОГО ФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ	92
3.1. Оцінювання закономірностей міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту.....	93
3.2. Оцінювання закономірностей міграції води в ущільненому глинистому ґрунті дорожнього насипу залежно від його висоти.....	99
3.3. Оцінювання закономірностей міграції води в товщі ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу залежно від фактору часу.....	100
3.4. Емпірична залежність оптимальної вологості пилюватих суглинків для їх ущільнення від проектної величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності ґрунту.....	101
3.5. Лабораторні дослідження міграції води в товщі ущільненого за оптимальної вологості глинистого ґрунту дорожнього насипу	104
3.6. Висновки до розділу 3.....	108
4. ПОЛЬОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ УЩІЛЬНЕНИХ ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ.....	110
4.1. Методика проведення польових досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	111
4.1.1. Польові дослідження міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	111
4.1.2. Лабораторні дослідження фізико-механічних властивостей ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	115
4.2. Результати польових досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	118

4.3. Кількісні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів за результатами польових досліджень.....	123
4.4. Висновки до розділу 4.....	125
5. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У ПРАКТИКУ ЗВЕДЕННЯ ГЛИНИСТИХ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ.....	127
5.1. Встановлення коректних умов моделювання МСЕ процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів.....	127
5.2. Пропозиції з удосконалення оптимальних критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожніх насипів.....	139
5.3. Пропозиції з удосконалення конструкції та технології зведення ґрунтових дорожніх насипів.....	146
5.4. Висновки до розділу 5.....	150
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	153
ГОЛОВНІ ДРУКОВАНІ ПРАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	160
ДОДАТКИ.....	180
Додаток А. Статистичні матеріали за результатами лабораторних досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, висоти насипу та фактору часу.....	181
Додаток Б. Блок-схеми програмного комплексу «PRIZ-PILE»	197
Додаток В. Довідки про впровадження результатів дисертації	201
Додаток Д. Довідка за результатами метрологічного забезпечення.....	209

ВСТУП

Актуальність теми. Дорожнє господарство – основний інфраструктурний елемент розвитку будь-якої держави. Саме з розвитку автомобільних доріг починався вихід з економічної кризи багатьох країн. Тому курс України на європейську інтеграцію вимагає випереджуючого розвитку її автодорожнього комплексу. Грунтові насипи – обов’язковий атрибут зведення автодоріг. Практиці відомі характерні випадки наднормативних деформацій і навіть руйнувань ґрунтових насипів не лише у несприятливих погодно-кліматичних, інженерно-геологічних і ґрунтово-гідрологічних умовах (гірські райони Криму й Карпат, схили з проявом зсувних процесів і т. ін.), але й у порівняно сприятливих умовах рівнини.

Сучасний підхід до зведення ґрунтових масивів у світі суттєво не відрізняється від прийнятого в Україні – нормують щільність скелету ґрунту ρ_d , еталонну величину якої визначають для кожного виду ґрунту в лабораторії за тестом Проктора чи його модифікацією. Однак, проблема полягає в тому, що вітчизняні нормативні вимоги призначають оптимальні параметри ущільненого ґрунту (максимальну щільність його скелету ρ_{dmax} і оптимальну вологість W_{opt}), виходячи з отриманих за лабораторних умов значень для конкретного виду глинистого ґрунту й параметрів динамічного навантаження без урахування фактичних особливостей механізмів.

Після ущільнення ґрунту, коефіцієнт водонасичення якого близький до $S_r = 1,0$, з часом вільна вода з нього звичайно випаровується, внаслідок чого відбуваються додаткові деформації осідання земляного полотна (ЗП), а при укочуванні ґрунту надто низької вологості складно досягти потрібної щільності скелету ґрунту навіть за можливостей сучасних катків, тому при замоканні такого дорожнього насипу проявляються додаткові деформації просідання. Норми також рекомендують за оптимальну вологість глинистих ґрунтів при його укочуванні приймати вологість на межі розкочування W_p .

проте цей параметр не має прямого відношення до того, скільки зв'язної води фактично міститься в ґрунті.

Тому для зведення ґрунтових споруд актуальним є не лише максимально досягнуте значення щільності скелету ґрунту, а й забезпечення їх тривалої міцності, тобто, коли за нормативний час експлуатації зберігаються отримані ущільненням величини механічних параметрів ґрунту, а наднормативні деформації не виникають. На стан ґрунту насипу в часі істотно впливає вологість, за якої його ущільнювали, й кількісне співвідношення окремих видів води в ущільненому ґрунті. Отже необхідно удосконалити критерії ущільнення ґрунту, апробувати їх у натурних умовах і ввести до державних дорожніх норм.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація спрямована на реалізацію «Концепції Державної цільової програми підвищення рівня безпеки дорожнього руху в Україні на період до 2016 р.» (постанова Кабінету Міністрів України (КМУ) від 8.08.2012, №771), «Транспортної стратегії України на період до 2020 р.» (розпорядження КМУ від 20.10.2010, №2174), «Концепції сталого розвитку населених пунктів України» (постанова Верховної Ради України від 24.12.99, №1359 – XIV), Указу Президента України «Про пріоритетні завдання у сфері містобудування» (13.05.1997, №422) та принципів сталого розвитку населених пунктів України (Закон України «Про основи містобудування», №2257-III). Задача пов'язана з держбюджетною та госпдоговірною тематикою кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель (АДГЗ та СБ) ПолтНТУ (державний реєстраційний номер 0114 U 000354), темами дипломних проектів, магістерськими програмами й спецкурсами.

Мета роботи – удосконалити оптимальні критерії ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу, за яких забезпечується їх тривала міцність.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- проаналізувати сучасні нормативні методи визначення оптимальних параметрів ущільненого глинистого ґрунту (максимальну щільність його скелету $\rho_{d \max}$ і оптимальну вологість W_{opt}) у складі дорожнього насипу;
- розробити нові оптимальні критерії ущільнення, за яких забезпечується тривала міцність пилюватих суглинків дорожнього насипу;
- шляхом лабораторних і польових досліджень встановити закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, висоти насипу та фактору часу;
- встановити коректні умови моделювання методом скінчених елементів (МСЕ) процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів.

Об'єкт дослідження. Ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу.

Предмет дослідження. Оптимальні критерії ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу, за яких забезпечується їх тривала міцність.

Методи дослідження. Методи: класичної та нелінійної механіки ґрунтів; визначення оптимальних параметрів ущільнення ґрунтів; лабораторні нормативні методи дослідження фізико-механічних властивостей ґрунтів зі статистичною обробкою їх даних; математичної статистики для обробки підсумків експерименту; МСЕ для моделювання процесу ущільнення ґрунту.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- за результатами лабораторних і польових досліджень отримано нові дослідні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від виду ґрунту, щільності його скелету, висоти насипу та фактору часу;
- удосконалено оптимальні критерії ущільнення пилюватих суглинків, за яких забезпечується тривала міцність дорожнього насипу, а саме – ущільнення ґрунту при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води;
- встановлено нові коректні умови моделювання МСЕ у фізично та геометрично нелінійній постановці процесу пошарового ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів, за якими проектувальник отримує щільність скелету ґрунту та модуль його деформації.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- встановлено, що для тривалої експлуатації дорожнього насипу важливі не лише максимально досягнуті значення щільності скелету ґрунту та його міцності, а й збереження їх протягом тривалого часу експлуатації; на стан ущільненого ґрунту в часі істотно впливає вологість, за якої проведено ущільнення, і кількісне співвідношення окремих видів води в ущільненому ґрунті; тому проектування процесу ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу за умови тривалої міцності зводиться до визначення параметрів, які дозволяють ущільнити ґрунт до максимально можливої щільності при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води;
- визначено оптимальну вологість пилуватих суглинків для їх пошарового ущільнення в залежності від проектної величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності ґрунту.

Результати роботи використані:

- ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК) при розробці розділів 10 і 11 ДСТУ-Н Б В.1.1-XX:201X «Настанова з проектування будинків, будівель і споруд на слабких ґрунтах»;
- ДП «Полтавський облавтодор» при лабораторному контролі якості ущільнення ґрунтів ЗП автодороги Полтава – Олександрія (М22);
- ТОВ «ЕКФА» при геотехнічному супроводженні пошарового ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу на об'єкті «Облаштування Хрестищенського ГКР. Реконструкція Хрестищенської ДКС» у Красноградському районі Харківської області;
- ТОВ «РСУ – 8» при капітальному ремонті проїзної частини по вул. Промислова (від вул. Гурамівлі до будинку №10) в м. Карлівка Полтавської області;
- кафедрою АДГЗ та СБ ПолтНТУ при викладанні курсу «Технологія будівництва земляного полотна» та виконанні 2 магістерських робіт «Удосконалення критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожніх насипів» і «Вологісний режим ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу».

Особистий внесок автора. Результати досліджень, включені в дисертацію, автор отримала самостійно. В публікаціях у співавторстві особистий внесок здобувача полягає в: [1, 3] – експериментальних випробуваннях ґрунтів статичною і динамічною пенетрацією, встановленні взаємозв'язку між питомим опором пенетрації, що є узагальненим показником міцності ґрунту, його питомим об'ємом скелету та вологістю, доведенні, що зміна вологості чи щільності скелету ґрунту суттєво змінює показники його міцності [4] – обґрунтуванні умови забезпечення довготривалої міцності ґрунтів ЗП і пропозицій здійснювати ущільнення до максимального значення щільності скелету ґрунту та вологості, яка відповідає максимальній кількості зв'язаної води; [5, 7, 11] – реалізації методики фізичного моделювання міграції води за висотою дорожнього насипу шляхом досліджень змін у часі вологості суглинку пилуватого, вміщеного в пластмасові труби висотою 1,5 м й ущільненого за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65$ г/см³; отриманні нових дослідних залежностей вологості ущільненого суглинку за висотою труби через два місяці «відпочинку» від кожної величини щільності скелету ґрунту; [8, 10] – встановленні нових експериментальних залежностей вологісного режиму ущільненого суглинку дорожнього насипу від часу його витримки до початку експлуатації, висоти та щільності скелету ґрунту, при якій проводилось ущільнення; [12] – доведенні експериментальним шляхом впливу часу на закономірності міграції води в ущільненому глинистому ґрунті ЗП.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дисертації доповідались і обговорювались на 6 міжнародних конференціях: I Міжнародному науково-практичному конгресі «Міське середовище – XXI сторіччя» – «Архітектура. Будівництво. Дизайн» (10 – 14 лютого 2014 р., Національний авіаційний університет, м. Київ), 8-ій Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (13 – 16 жовтня 2014 р., Національний університет водного

господарства та природокористування, м. Рівне), 5-й Міжнародній науково-технічній конференції по будівельним матеріалам, конструкціям і спорудам «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті» (23 – 24 квітня 2015 р., Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків), міжнародній інтернет-конференції «Ресурсосберегающие геотехнические конструкции и технологии» (березень 2016 р., Таразський державний університет імені М.Х. Дулаті, м. Тараз, Казахстан), II Міжнародному науково-практичному конгресі «Міське середовище – XXI сторіччя» – «Архітектура. Будівництво. Дизайн» (15 – 18 березня 2016 р., Національний авіаційний університет, м. Київ), V-й Міжнародній науково-практичній конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (м. Дніпро, 5-6 жовтня 2016 р.); 4 Всеукраїнських конференціях: Всеукраїнському науково-практичному семінарі за участю іноземних фахівців «Сучасні проблеми геотехніки» (2012 р., м. Полтава), Всеукраїнській конференції молодих учених і студентів (10 – 11 жовтня 2013, м. Полтава), 8-й Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування» (11 – 14 листопада 2013 р., м. Полтава), Всеукраїнській інтернет-конференції молодих учених і студентів «Проблеми і перспективи сталого розвитку та просторового планування територій» (18 березня 2015 року, м. Полтава), а також на щорічних конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів ПолтНТУ (2013 – 2016 рр., м. Полтава). Доповідь «Фактори впливу на міграцію води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів» відзначена дипломом I ступеня на II Міжнародному науково-практичному конгресі «Міське середовище – XXI сторіччя» – «Архітектура. Будівництво. Дизайн» (2016 р., Національний авіаційний університет, м. Київ). У повному обсязі дисертаційна робота була заслухана на семінарі спеціалізованої вченої ради К 26.062.12 (30 червня 2016 р., НАУ, Київ) та V-й Міжнародній науково-практичній конференції

«Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (5 – 6 жовтня 2016 р., ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна, м. Дніпро).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 24 праці, зокрема 10 статей у фахових виданнях, з них 3 статті у виданнях, що індексовано в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus, а також 2 статті англійською мовою в збірнику наукових праць у Польщі з індексом цитування Index Copernicus і науковому журналі в Казахстані з індексом цитування Information Service for Physics, Electronics and Computing (INSPEC DIRECT) Інституту Інжинірингу і Технологій Великобританії).

Структура і обсяг роботи. Дисертація містить вступ, 5 розділів, загальні висновки, список використаних джерел зі 177 найменувань (57 – англійською мовою) на 20 стор., 4 додатків на 30 стор., 51 рис. і 18 табл. Загальний обсяг дисертації – 210 стор., основного тексту – 126 стор.

Загальна структура досліджень показана на рис. 1.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан ефективних технологій зведення дорожніх насипів і виявлені недоліки методик їх проектування; сучасні методи ущільнення ґрунтів, причини деформацій земляного полотна в насипу; рішення МСЕ задач ущільнення ґрунту, виявлені недоліки нормативної бази контролю якості ущільнення ґрунтів тощо. Сформульовано мету та задачі досліджень.

У другому розділі описана методика та результати лабораторних досліджень міграції води в товщі ущільнених суглинків важких і легких пилуватих дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, висоти насипу та фактору часу й наведені результати впливу цих факторів на параметри міграції води.

У третьому розділі встановлено кількісні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів за результатами лабораторних досліджень та проведено їх оцінювання.

У четвертому розділі подано результати польових досліджень вологісного режиму ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів.

П'ятий розділ містить коректні умови моделювання МСЕ процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів, пропозиції з удосконалення оптимальних критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожніх насипів автодоріг, а також інформацію про впровадження результатів дисертації.

Загальні висновки відображають головні результати роботи.

Додатки містять: статистичні матеріали за результатами лабораторних досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, висоти насипу та фактору часу; блок-схеми програмного комплексу «PRIZ-PILE»; довідки про впровадження результатів дисертації та метрологічне забезпечення.

Автор щиро вдячна науковому керівнику, докт. техн. наук, професору Ю.Л. Винникову, завідувачу кафедри, докт. техн. наук, професору М.Л. Зоценку, канд. техн. наук, професору С.В. Біді та канд. техн. наук, доценту В.І. Коваленку за корисні поради в ході роботи над дисертацією.

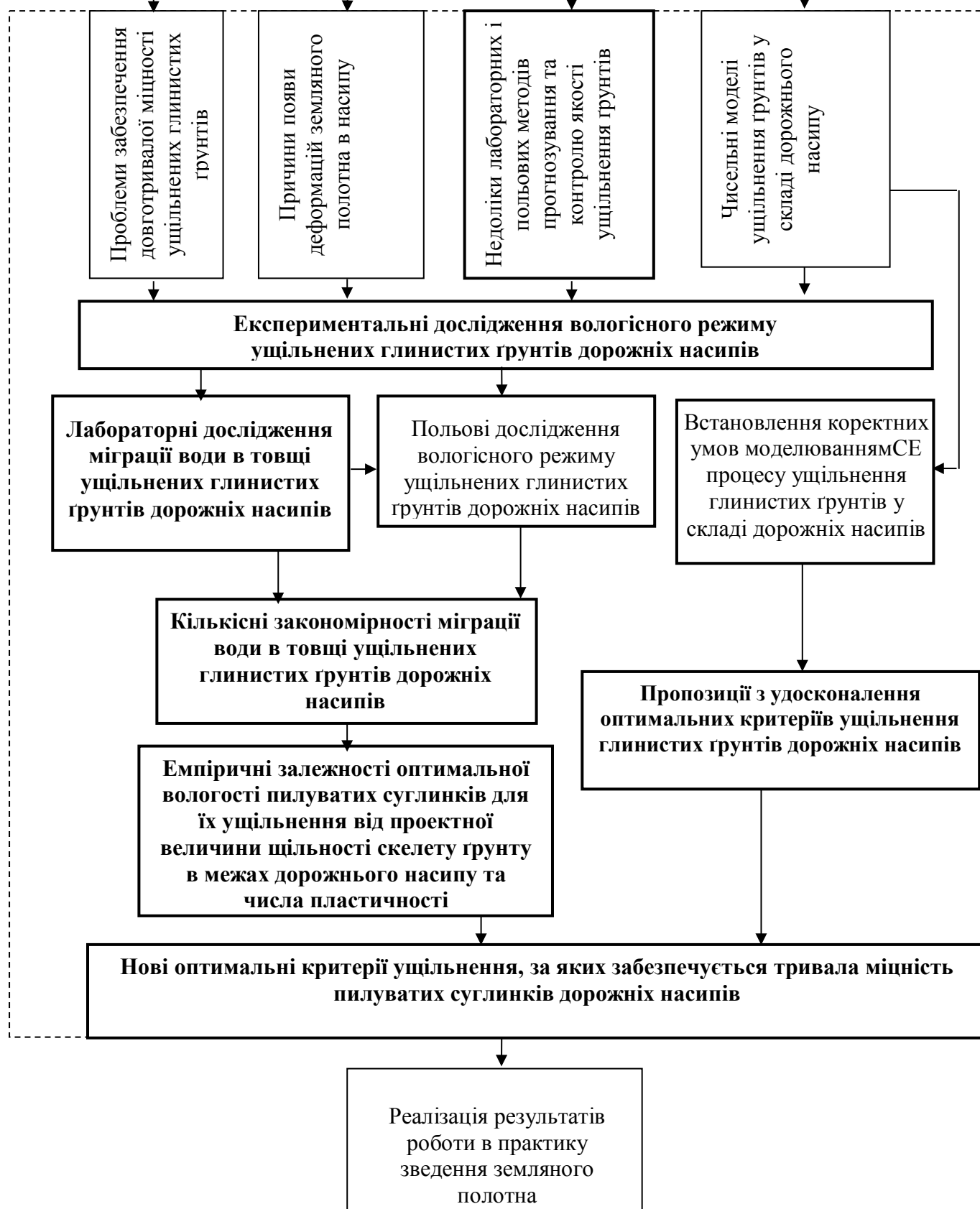


Рис. 1 Загальна структурна схема досліджень, викладених у дисертації

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Головні принципи зведення ґрунтових дорожніх насипів

Земляне полотно (ЗП) – один із головних конструктивних елементів автомобільної дороги. Воно повинно протягом терміну її експлуатації ефективно чинити опір різним впливам, не руйнуючись і не змінюючи своєї геометричної форми [3, 8, 23, 41, 58, 71, 86, 90, 101, 105, 112, 140, 157, 169]. Однією з умов довготривалої служби автомобільної дороги є регулювання водно-теплогового режиму ЗП. У ньому виникають і накопичуються дефекти й деформації, зокрема за невідповідності дорожньої конструкції автомобільним навантаженням або несприятливому впливі кліматичних та інженерно-геологічних факторів на ґрунт ЗП [40, 43, 46, 59, 64, 69, 100, 125, 139].

На ЗП впливають статичні та динамічні навантаження, його власна вага і сукупність природних чинників [44, 86, 100, 106, 120]. Так на ЗП діє декілька джерел зволоження (рис. 1.1): атмосферні опади 1 та капілярне зволоження 2, зволоження у вигляді пари 3, фільтрація води збоку кюветів. Узбіччя й укоси насипів зволожують переважно атмосферні опади 1 та поверхневий сток з оточуючої території 4. У зонах зволоження міцність ґрунту значно знижується, що може призводити до руйнування укосів та узбіч ЗП [59, 80, 120, 125, 141].

Міцність ґрунту ЗП залежить, головним чином, від його вологості W , щільності ρ та гранулометричного складу c

$$R = f_1(W, \rho, c). \quad (1.1)$$

У свою чергу, щільність також є функцією вологості та гранулометрії

$$\rho = f_2(W, c). \quad (1.2)$$

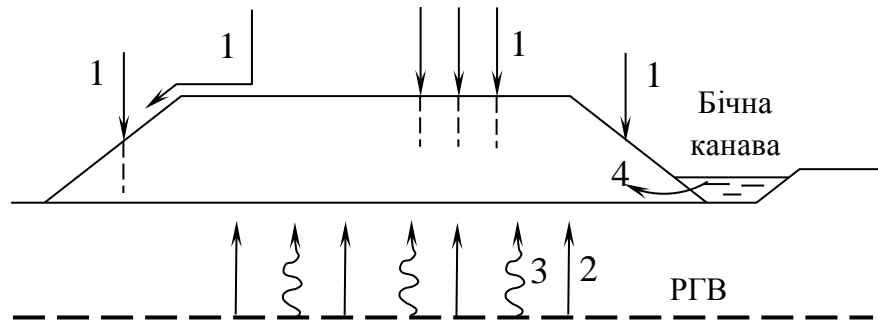


Рис. 1.1 Джерела зволоження ЗП: 1 – атмосферні опади; 2 – капілярне і плівкове зволоження; 3 – пароподібне зволоження; 4 – фільтрація води з бічних каналів

Залежно від рельєфу місцевості ЗП буває у вигляді насипу чи виїмки. Характерна особливість поперечних профілів дороги в насипу – розміщення брівки ЗП над поверхнею землі [86, 93, 105, 142, 143]. Насипи – інженерні ґрунтові споруди з ґрунту, в межах яких вся поверхня ЗП розташована вище рівня землі [35, 41, 45, 46, 51, 55, 59, 64, 89, 91, 97, 101, 121, 127, 142, 170]. Їх досліджували А.О. Афіногенов [3], А.О. Белятинський [5, 105], О.А. Білятинський [86], В.І. Біруля [6], Ю.Л. Винников [11– 17, 173, 174], І.П. Гамеляк, М.Н. Гольдштейн [22], С.А. Євтюков [35], М.Л. Зоценко [37, 176, 177], В.Д. Казарновський [40 – 43], В.І. Каськів [45], Ю.О. Кірічек [46], В.І. Коваленко [50, 51], М.В. Корнієнко [53], К.В. Краюшкіна [54], В.І. Крутов [55 – 57], Е.К. Кузахметова [58, 59], А.С. Литвиненко [62 – 65], М.М. Маслов [72], Д.О. Павлюк [81 – 83], В.Ф. Разорьонов [87], В.Я. Савенко [96, 97], В.М. Сиденко [100, 101], Н.Я. Хархута [112], D. Adam [121, 122], M. Conde [128, 129], C. Dobrescu [133], A. Hasan [139], B. Indraratna [140], M. Islam [142], B. Jean-louis [143], S. Lourenco [153], A. Nikolaidis [157], E. Olinic [160], N. Perez [162], R. Proctor [164], K. Tateyama [170, 171], W. Van Impe [172] й ін. [1, 2, 7, 18, 19, 23, 36, 44, 49, 66, 67, 71, 77, 79, 80, 90, 98, 102,

109, 110, 113, 114, 117–120, 123, 125–127, 130, 136–138, 141, 145, 148–152, 154, 156, 163, 165–169].

Влаштування насипу невеликого об'єму включає відсипання ґрунту безпосередньо з території вздовж насипу чи з відповідних виїмок. Для насипів великого об'єму використовують ґрунт з кар'єрів чи розроблених кюветів [93, 101, 106, 108, 157, 170]. Насип зводять за два етапи: на підготовчому – розбивають ЗП, знімають рослинний шар, розчищають поверхню від кущів, пнів, каміння; на основному – розробляють, переміщують, ущільнюють ґрунт. Умовою міцності ЗП є якість ущільнення ґрунту на всіх етапах зведення. Тому зміцнення насипу виконують з дотриманням правил: ґрунт ущільнюють безпосередньо після укладання; для ефективного ущільнення ґрунт розподіляють рівномірними шарами проектної товщини; для зменшення надлишкової вологи в насипу перед формуванням чергового шару ґрунт просушують.

Для насипів використовують водостійкі ґрунти – дрібнозернисті ґрунти, розмір частинок яких рідко досягає 2 мм [38, 44, 51, 56, 72], а ґрунти та породи, властивості яких значно змінюються за природних умов (легковивітрянні, розм'якшувальні породи, пилуваті й дрібні недренуючі піски, ґрунти з органічними домішками і т. ін.), застосовувати не рекомендується [17, 19, 27, 36, 76]. Фізико-механічні властивості ґрунтів суттєво залежать від кількості та властивостей глинистих частинок. Навіть їх невелика присутність істотно впливає на гідрофільність, міцність, водопроникність і набрякання ґрунтів.

Щоб створити міцний і стійкий насип, його слід відсипати на всю висоту з однорідних за складом ґрунтів. За наявності у виїмці чи резерві придатних для зведення ЗП ґрунтів, але з різними геотехнічними властивостями, насип відсипають пошарово. У цьому випадку у верхні шари укладають більш стійкі ґрунти [75, 101, 112, 117, 133, 153, 166]. Ґрунт відсипають горизонтальними шарами для забезпечення сприятливого водно-теплового режиму (ВТР). Товщину шарів призначають такою, щоб за

фактичних технологічних можливостей досягти стандартної щільності [71, 93, 100]. При РГВ, близькому до земної поверхні (рис. 1.2, а), в нижню частину ЗП горизонтально відсипають дренауючий ґрунт з малою висотою капілярного підняття. Якщо ґрунтові води залягають глибоко, добре дренауючі ґрунти відсипають поверх зв'язних. Поверхню нижнього шару виконують з ухилом 2 – 4% вбік укосів для відведення дощової води (рис. 1.2, б). При застої поверхневих вод і зведенні частини ЗП зі зв'язних ґрунтів останні слід чергувати [93, 96, 100, 102] (рис. 1.2, в).

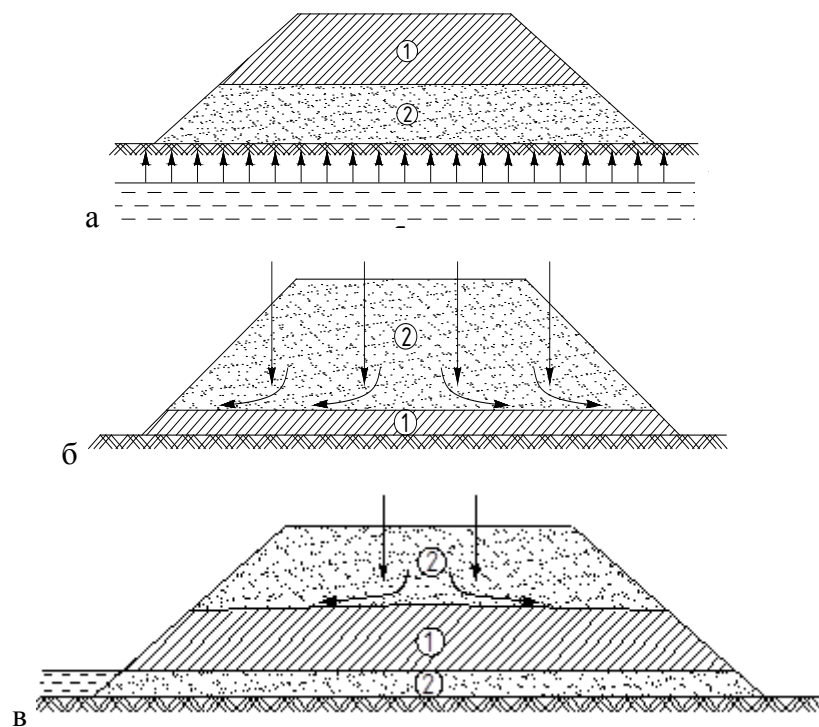


Рис. 1.2 Способи відсипки ґрунту в тіло насипу для забезпечення сприятливого ВТР:
а – при близькому заляганні ґрунтових вод; б – при глибокому РГВ; в – при застої поверхневих вод; 1 – зв'язні ґрунти; 2 – дренауючий матеріал

Ґрунт ЗП слід ретельно ущільнювати особливо в межах активної зони. Його щільність розраховують залежно від складу та інтенсивності руху, міцності дорожнього одягу, типу ВТР, який характеризується розрахунковою вологістю ґрунту ЗП (найнесприятливіша вологість за N років). Для доріг I категорії цей інтервал часу складає 100 років, а II – V категорії – 50 [10, 101, 103].

При виборі ґрунтів для ЗП норми вимагають комплекс лабораторних досліджень геотехнічних властивостей: мінералогічний і гранулометричний склад; вологість; питома вага скелету ґрунту; вологість на межі текучості та розкочування; вміст органічних домішок; показник текучості; коефіцієнт фільтрації; кут внутрішнього тертя та питома зчеплення; показники засоленості, розмокання, набухання, осідання; оптимальна вологість, максимальна щільність скелету ґрунту стандартним ущільненням; для скельних порід – тимчасовий опір стисненню та тріщинуватість [17, 19, 24, 26, 38, 140].

Отже, при влаштуванні ЗП доріг слід враховувати фізико-механічні властивості ґрунтів, їх стан і природні умови в районі будівництва дороги.

1.2 Природа ущільнення ґрунтів

Ущільнення – найдешевший і найефективніший спосіб підвищення міцності та стійкості ЗП, зменшення деформативності й фільтрації, ліквідації небажаних властивостей ґрунтів [3, 22, 38, 43, 44, 50, 57, 61, 65, 67, 71, 77, 82, 83, 88, 90, 101, 103, 105, 112, 119, 122, 127, 140, 142, 143, 145, 148, 151, 157, 169, 171, 173]. Зменшення кількості пор в одиниці об'єму ґрунту називають консолідацією чи ущільненням. Різниця між термінами – в тому, що консолідація – це відносно повільне зменшення пористості у часі від статичного тиску, яке може супроводжуватись витисненням води з пор (зменшення пористості ґрунту під спорудою), а до ущільнення звичайно відносять швидке зменшення пористості, виконане механічними засобами за кілька циклів, котре, як правило, має динамічний вплив на ґрунт (ущільнення ЗП катком, трамбівкою) [1, 22, 38, 44, 51, 67, 98, 134, 138, 148, 163].

Метою ущільнення є створення нової, більш досконалої, структури й текстури ґрунту. Зв'язні і незв'язні ґрунти ущільнюються по-різному. В зв'язних ґрунтах мінеральні частки й агрегати розділені між собою водними

плівками, в яких вода перебуває під впливом міжмолекулярних сил, що визначає їх підвищену в'язкість і опір зрушенню [51, 60, 109, 112].

Характерними особливостями штучно створеної структури ґрунту ЗП є багатоконпонентність і наявність агрегатів різних розмірів. Набуті показники фізико-механічних властивостей ґрунтової композиції, їх подальша змінність або стабільність у період експлуатації ЗП залежить від оптимальності укомплектування агрегатів, розмірів, стану (консистенції) і міцності агрегатів.

Принципове значення має стан самих агрегатів, їх щільність-вологість у природному заляганні, консистенція. При вологості, близькій за нормами [27, 30, 92, 144] до оптимальної, що відповідає твердій консистенції глинистих ґрунтів, виникають достатньо крихкі агрегати, легко подрібнювані робочими органами землерийних машин до досить малих розмірів, при ущільненні вони піддаються створенню оптимальних упаковок. З ростом природної вологості збільшуються розміри агрегатів, їх консистенція, виникають складнощі з формуванням в насипу штучної структури робочими органами ущільнюючих машин. Суттєво змінюється фазовий склад ґрунту. Це дає підстави говорити про можливі різноманітні варіанти штучної структури ґрунту із визначеними характерними ознаками залежно від щільності-вологості. Саме вони й повинні моделюватись при випробуваннях ґрунтів [9, 13, 21, 44, 58, 66, 146, 149, 176].

Коли тиск на ґрунт зростає, взаємно зміщуються агрегати часток, потім зміщуються частки всередині агрегатів, бо зчеплення всередині їх перевищує зчеплення між ними. При цьому частки і агрегати спочатку дотикаються один до одного водно-колоїдними плівками, які на контактах починають сприймати місцевий тиск, через що товщина плівок на контактах зменшується, тобто плівкова вода витискується з більш напружених місць у менш напружені (їх міцність зростає) [21, 60, 79, 100, 103, 110, 125, 139, 141, 153, 156]. Якщо зусилля на контактах між частками й агрегатами перевищують граничний опір плівок зрушенню, ґрунт руйнується. В товстих

плівках сили міжмолекулярної взаємодії слабші, через що плівки чинять менший опір. Тому граничний опір зрушенню, модулі пружності й деформації зменшуються зі збільшенням вологості [51, 60, 139, 153].

Таким чином, за тривалого тиску збільшиться кількість контактів між частками, а навантаження на кожний окремий контакт зменшиться. При збільшенні щільності зростає і опір ґрунту зрушенню, модуль пружності й деформації. Тому ущільнення сприяє зростанню міцності ґрунту ЗП.

1.3 Сучасні методи ущільнення ґрунтів

У дорожньому будівництві переважають три методи ущільнення ґрунтів (табл. 1.1): укочування; трамбування; віброущільнення. Найбільш популярне серед них для ущільнення ґрунтів ЗП – укочування. Тому проаналізуємо лише його сучасні види. Застосовують різні катки: вальцеві; кулачкові; ґратчасті; на пневмошинах, – які є найбільш поширеними [67, 78, 100, 101, 103, 105, 112, 113, 121, 123, 134, 148, 150, 160, 163].

Дія на ґрунт пневматичних і вальцьових катків різна. При навантаженні площа відбитку пневмоколеса значно більша, ніж вальця (рис. 1.3). Тому час дії на ґрунт у пневмокотків більший, тиск більш рівномірно розподіляється по площі контакту, а напруження в ґрунті поширюються на більшу глибину.

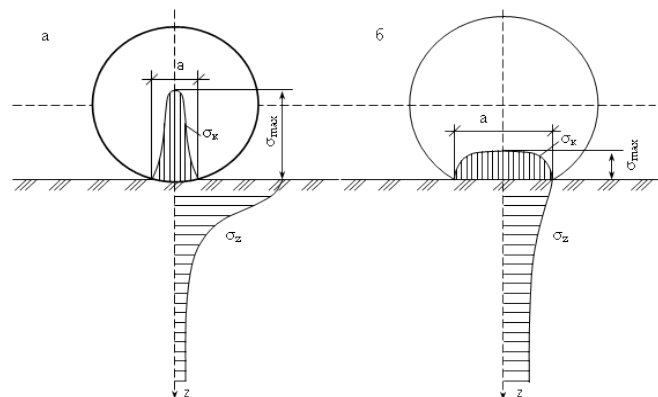


Рис. 1.3 Епюри напружень у ґрунті при укочуванні: а – жорсткобарабанним катком; б – катком на пневматиках; σ_k – контактні напруження у ґрунті по осі завантаження; а – довжина площі відбитка

Методи ущільнення ґрунтів у дорожньому будівництві

Таблиця 1.1

Метод ущільнення	Ущільнюючий механізм	Тип ґрунту	Принцип дії	Зовнішній вигляд
1	2	3	4	5
Укочування	<p>– самохідні катки на пневмоколісному ходу,</p> <p>– причіпні катки (кулачкові, гладко вальцеві, комбінованого типу),</p> <p>– завантажені скрепери, автомашини (самоскиди), трактори</p>	<p>для всіх видів насипних, піщаних, глинистих, великоуламкових ґрунтів</p>	<p>зусилля ущільнення досягається за рахунок високих контактних напружень, які створюються силою тяжіння катка та баластного привантаження на площині (лінії) кочення (до 8 МПа)</p>	

1	2	3	4	5
Віброущільнення поверхневе	вірокатки, вібратори площадочні	незв'язні та малозв'язні ґрунти (глинистих фракцій не більше 6%), а також піщано-гравелісті ґрунти	циліндричні вальці, які при русі катка здійснюють вертикальні віброючі рухи. За рахунок вібрації відбувається утрамбування та ущільнення поверхні ґрунту, по якому рухається віброкаток	
Поверхнєве ущільнення (трамбування)	трамбуючі плити вагою 20 – 30 кН, які скидають з висоти 4 – 6 м за допомогою крана	переважно зв'язні ґрунти з явно вираженою пластичною деформативністю	ущільнення виконують вільним скиданням за допомогою крана-екскаватора з висоти 5...10 м трамбівок діаметром 1,2...3,5 м і вагою 25...150 кН	
Глибинне ущільнення	глибинні вібратори	піщані ґрунти, особливо у водонасиченому стані	вібратор, підвішений до несучої конструкції установки, розміщений вертикально над місцем занурення під дією власної ваги занурюється на задану глибину	

Кулачкові катки можуть застосовуватися для ущільнення грудкуватих ґрунтів. Кулачки подрібнюють грудки й утворюють однорідну структуру ґрунту за товщиною шару. Верхню зону насипу ущільнювати цими катками недоцільно, бо кулачки розпушують ґрунт. Для такого випадку підходять вальцеві катки, що створюють рівну й гладку поверхню [78, 150, 166, 171].

При ущільненні необхідно створити міцну структуру ґрунту. Якщо напруження за укочування перевищують межу міцності ґрунту, його щільність зменшується, а структура руйнується [22, 35, 37, 44, 61, 70, 103, 112, 121, 138]. Спочатку (на прикочуванні) використовують легкі (до 12 т) катки, а після 3 – 4 проходів (остаточне ущільнення) – більш важкі (не легші за 25 т), бо спочатку опір ґрунту ущільненню менший. Легкі катки варто застосовувати в межах 30 – 40% загальної кількості проходів. Катки рухаються за круговою та човниковою схемами [44, 50, 68, 70, 101, 112, 150]. Ефективність ущільнення залежить від швидкості руху катка. Чим швидше він рухається, тим більше разів проїде за одним слідом, і зросте його продуктивність. Та коли швидкість укочування зростає, зменшується час впливу катка на ґрунт. Тому надмірна швидкість шкідлива. Останні проходи катка виконують на найменшій швидкості. При ущільненні слід забезпечити: однорідність ґрунтів у шарах різання та відсипки; однорідність вологості та товщини шарів при ущільненні; середню вологість, щільність і рівність шарів; водовідведення під час проведення робіт.

Контактний тиск протягом ущільнення повинен бути близьким до межі міцності ґрунту (табл. 1.2). При перевищенні цієї межі може виникати місцеве розущільнення (хвилеутворення перед колесами, витиснення ґрунту вбік від трамбівки). Якщо контактний тиск недостатній, високої щільності не досягти ні зменшенням товщини шару, ні збільшенням числа проходів одним слідом [8, 44, 50, 70, 96, 98, 101, 150].

Таблиця 1.2

Межа міцності ґрунтів, МПа, при їх укочуванні за оптимальної вологості

Ґрунт	Ущільнення катками		Трамбування, м
	з гладкими вальцями	на пневматичних шинах	
Піщаний, супіщаний, пилуватий	0,3 – 0,6	0,3 – 0,4	0,3 – 0,7
Суглинистий	0,6 – 1,0	0,4 – 0,6	0,7 – 1,2
Важкий суглинистий	1,0 – 1,5	0,6 – 0,8	1,2 – 2,0
Глинистий	1,5 – 1,8	0,8 – 1,0	2,0 – 2,3

При зведенні ЗП необхідне також ущільнення ґрунтів укісної частини насипів. Для цього використовують вальцьові трамбівки, ущільнюючі плити, віброкатки. Найпростіший спосіб – вальцьова трамбівка, її масу регулюють за допомогою баласту [68, 70, 78, 143, 144, 151].

Можливість і ефективність ущільнення різних видів ґрунту визначають за методом стандартного ущільнення [30, 65, 82, 164]. Для цього будують, так звану, криву ущільнення ґрунту – графік залежності щільності скелету ґрунту ρ_d від вологості w (рис. 1.4) і визначають максимальне значення щільності скелету ґрунту ρ_{dmax} , що досягається за його певної, так званої, оптимальної вологості W_{opt} [3, 18, 38, 43, 50, 64, 74, 103, 113, 119, 148, 155, 157, 169, 171, 172].

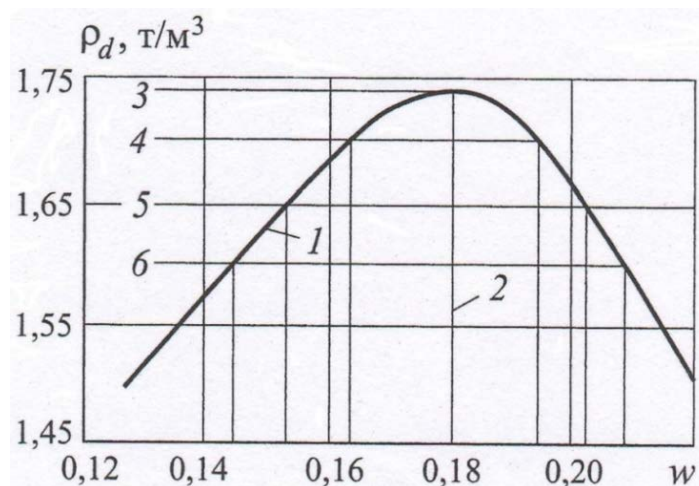


Рис. 1.4 Залежність щільності скелету ущільненого глинистого ґрунту від вологості: 1 – крива стандартного ущільнення; 2 – оптимальна вологість;

3 – максимальна щільність $\rho_{dmax} = 1,74 \text{ т/м}^3$ при $k_s = 1,0$; 4 – $k_s = 0,98$ при $\rho_d = 1,70 \text{ т/м}^3$; 5 – $k_s = 0,95$ при $\rho_d = 1,65 \text{ т/м}^3$; 6 – $k_s = 0,92$ при $\rho_d = 1,60 \text{ т/м}^3$

Оптимальну вологість глинистих ґрунтів за відсутності дослідних даних її визначення норми дозволяють орієнтовно приймати за табл. 1.3 чи з виразів:

- при ущільненні укочуванням

$$W_{opt} = W_p ; \quad (1.3)$$

- при ущільненні трамбуванням

$$W_{opt} = W_p - (0,01-0,03) , \quad (1.4)$$

Де W_p – вологість ґрунту на межі розкочування [19, 24, 32, 38, 103, 155].

Таблиця 1.3

Значення оптимальної вологості та щільності скелету ґрунту

Вид ґрунту	Діапазони	
	оптимальної вологості w_{opt} , %	щільності скелету ґрунту ρ_d , т/м ³
Пісок крупний та середньої крупності	8...12	1,75...1,95
Пісок дрібний	9...15	1,65...1,85
Пісок пилюватий	14...23	1,6...1,82
Суглинок важкий	15...22	1,6...1,8
Суглинок пилюватий	17...23	1,58...1,78
Глина	18...25	1,55...1,75

При ущільненні ґрунтів важкими трамбівками критерієм є її проектний відказ (осідання за один удар), який орієнтовно становить для пісків – 1 см, а глинистих ґрунтів – 1,5 см. Вважається, що подальше ущільнення ґрунту після досягнення проектних значень відказів неефективне [38, 53, 66, 103].

Для проектування В.І. Крутов [56] виділив такі параметри ущільнення ґрунтів: максимальну глибину ущільнення; товщину буферного шару; модуль деформації та умовний розрахунковий опір ґрунту при середніх величинах коефіцієнта ущільнення k_s (відношення фактичної щільності скелету ґрунту ρ_d до її максимального значення, отриманого в лабораторних умовах, ρ_{dmax})

Ущільнення ґрунту зазвичай обмежують певною мірою ущільнення ρ_d , яку виражають через коефіцієнт ущільнення k_s – відношення заданої чи

фактично отриманої величини ущільненого ґрунту ρ_d до його максимального значення за стандартним ущільненням ρ_{dmax}

$$K_s = \rho_d / \rho_{dmax} \cdot \quad (1.5)$$

Основні технічні параметри пошарового ущільнення ґрунтів, отримані шляхом натурних досліджень ЗП, наведені в табл. 1.4 [19, 38, 50, 70, 76, 103].

Таблиця 1.4

Основні технічні параметри пошарового ущільнення ґрунту

Машини та механізми	Глибина ущільнення, м, в ґрунтах		Кількість проходів або час ущільнення при κ_s		
	піщаних	глинистих	0,98	0,95	0,92
Пневмокатки вагою, кН:					
400	0,7	0,6	12	10	6
250	0,5	0,5	12	10	6
Навантажені автомашини					
«БелАЗ»	0,7	0,6	12	10	6
«КрАЗ»	0,5	0,5	12	10	6
«МАЗ»	0,4	0,4	12	10	6
«КамАЗ»	0,5	0,5	12	10	6
Віброкатки вагою, кН:					
50	1	-	3	2	2
20	0,7	-	3	2	2

Однак, до недоліків описаних методів ущільнення ґрунтів ЗП належать: необхідність «прив'язки» кривої ущільнення ґрунту до певних параметрів конкретного ущільнюючого механізму; достатньо широкі межі оптимальної вологості ґрунтів (це, зокрема, добре помітно з табл. 1.3); певна суб'єктивність у визначенні вологості ґрунту на межі розкочування (про це мова піде в п. 1.7) і т. ін. Тобто, найбільш поширена на сьогодні в дорожньому будівництві концепція ущільнення ґрунтів ЗП вирішує, головним чином, технологічний бік задачі – досягнення максимальної щільності ґрунту за найменшої кількості проходів механізму за одним слідом. Але ж відомо (А.Ф. Лебедев [60, 61], S. Lourenco, G.-H. Wang, T. Kawai [145], C. Dobrescu, E. Calarasu, I. Macarescu [133]), що для тривалої експлуатації ґрунтової споруди важливі не лише максимально досягнуті

значення щільності скелету ґрунту та його міцності, а й збереження (чи «стабільність») їх протягом тривалого часу експлуатації.

Схожі підходи до ущільнення ґрунтів ЗП і за кордоном. Так К. Tateyama у підсумковій доповіді японської «Working Group on the Earth Structure for Road, Railway and Airport» [171], а В. Indraratna та А. Correia у генеральній доповіді технічного комітету ТС 202 з транспортної геотехніки на XVIII-ій міжнародній конференції з механіки ґрунтів та геотехніки (Париж, 2013) [140] констатували, що стан ущільненого ґрунту залежить не лише від його виду й рівня вологомісткості, але і від методу його ущільнення та енергії ущільнення. Як видно з рис. 1.5, метод оцінювання оптимальної вологості й максимальної щільності скелету ґрунту аналогічний вітчизняному підходу.

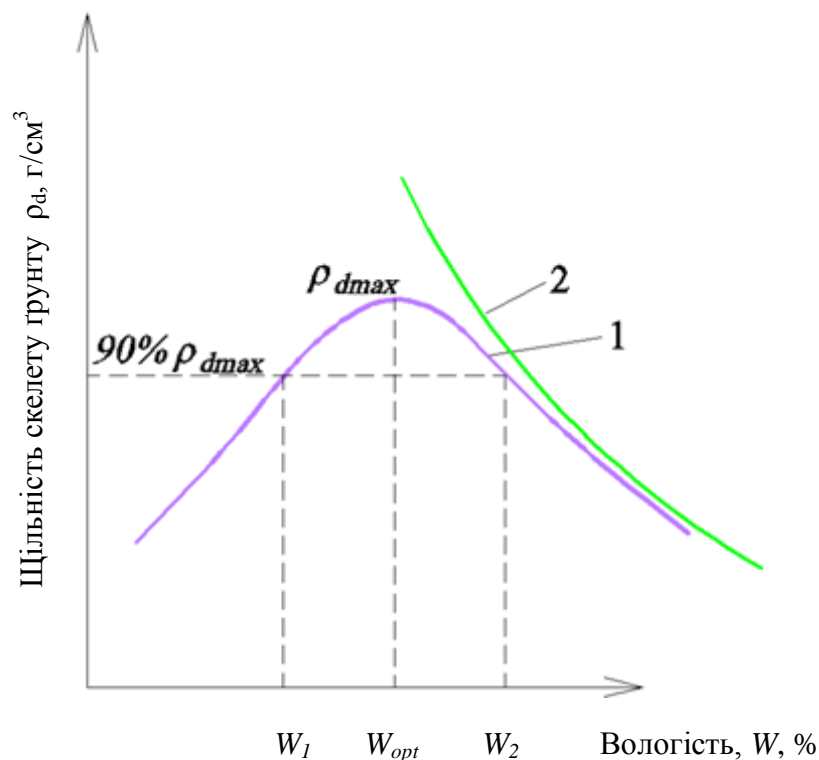


Рис. 1.5 Крива ущільнення ґрунту: 1 – трамбівкою; 2 – при нульовому вмісті пор з повітрям

Вважають [171], що ґрунт, ущільнений до ρ_{dmax} при W_{opt} , має мінімальну пористість за конкретних умов ущільнення та кількість повітря, що залишалось у порах, більше не видалити прикладеною енергією ущільнення. Властивості ґрунту мало змінюються внаслідок фільтрації після

ущільнення, оскільки порожнечі, які залишилися, ледь можуть поглинути воду. Якщо ґрунт ущільнили за вологості, значно вищій за оптимальну, в процесі експлуатації ЗП можливе подальше набухання глини чи важкого суглинку, а при зниженні вологості внаслідок міграції води в товщі ущільненого глинистого ґрунту – його усадка. Якщо ж вологість, за якої ущільнили ґрунт дуже низька, а фактична щільність його скелету значно менша за ρ_{dmax} , то також через міграцію води можливе просідання дорожнього насипу.

Суттєвий вплив на закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів і їх тривалу міцність за М.Н. Гольдштейном [22] можуть мати фазові співвідношення між вільною та зв'язаною водою в порах ґрунтів ЗП.

Отже, для експлуатації ЗП важливі не лише максимально досягнуті величини щільності скелету ґрунту та його міцності, а й збереження їх протягом нормативного часу експлуатації. На стан ущільненого ґрунту в часі істотно впливає вологість, при якій проведено ущільнення, й кількісне співвідношення окремих видів води в ущільненому ґрунті. Не досліджено кількісний вплив на закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів насипів ряду чинників: щільності скелету ґрунту; висоти насипу; фактору часу «відпочинку» насипу після його зведення й до початку експлуатації.

1.4. Можливості нових методів математичного моделювання процесів ущільнення ґрунтів

Можливість одержання наведених параметрів ґрунту масиву внаслідок його ущільнення при влаштуванні штучних основ, ЗП, фундаментів шляхом математичного моделювання швидкоплинних процесів, до яких належать і різноманітні технології ущільнення ґрунтів, у т. ч. й укочування, доведена в працях В.Н. Аптукова, І.П. Бойка, Г.Г. Болдирєва, Ю.Л. Винникова,

М.М. Дубини, С.Ф. Клованича, В.М. Парамонова, О.О. Петракова, А. Bakkari, К. Edip, Z. Fu, G. Heibrock, S. Henke і J. Grabe, М. Kelm, А. Pak, В. Schrefler, G. Tsitsas та ін. [13, 38, 48, 52, 66, 67, 84, 134, 137, 146, 159, 161, 176]. З аналізу цих робіт Ю.Л. Винников [13, 38], зокрема, встановив, що МСЕ добре підходить для задач із суттєвою неоднорідністю властивостей міцності. Порівняно з варіаційними методами він більш алгоритмічний, гнучкий при описі геометрії та граничних умов, фізично наочний, універсальний. Переваги, що забезпечують популярність МСЕ в геомеханіці такі: простота отримання рішень; можливість згущення сітки СЕ в місцях, де очікують високі градієнти певного параметру; можливість реалізації довільних механічних властивостей матеріалу, будь-якої траєкторії навантаження; оцінювання сумісної роботи основ і фундаментів без поділу на розрахунки за деформаціями та несучою здатністю. Ґрунт описують моделями пружно-пластичного середовища, теорії пластичної текучості й концепції їх критичного стану. При цьому найбільшою проблемою, але й перспективним напрямком підвищення точності розрахунків є урахування параметрів зон ґрунту з наведеними параметрами.

Труднощі цих досліджень полягають у [13, 38]: значній фізичній нелінійності (переважно, стисливість) ґрунтів через необхідність урахування характеру та швидкості їх навантаження. Це ускладнює вибір адекватної моделі механічної поведінки середовища, а звідси й відносно простої (бажано лабораторної) методики визначення її параметрів; суттєвою геометричною нелінійністю (великі незворотні деформації й локальні зміщення ґрунтів), через яку числова реалізація задач супроводжується значним спотворенням СЕ сітки, звідси виникає необхідність її нерегулярної перебудови, що створює технічні труднощі та підвищує похибки числових рішень; невідомістю подекуди області контакту робочого органу (наприклад, катка) з ґрунтом.

Тому традиційні рішення, що базуються на мірі малих деформацій, здебільшого не коректні для моделювання швидкоплинних процесів.

Найчастіше їх моделюють МСЕ у межах вісесиметричної просторової задачі. Грунт імітують однофазним ізотропним пружно-пластичним середовищем. Методи моделювання стану пружно-пластичних основ МСЕ Ю.Л. Винников поділив на дві групи за використанням їх результатів для проектування. «Виходом» розрахунків першої є напруження та переміщення в масиві, а другої, безперечно більш важливої для проектування ЗП, – зміна щільності ґрунту навколо індентора (штампа, катка, трамбівки, палі) [13].

З нових рішень МСЕ моделювання окремих швидкоплинних процесів ущільнення ґрунту до групи 1 віднесені підходи В.М. Парамонова [84], К. Edir та ін. [159], Z. Fu та ін. [137], G. Tsitsas та ін. [134]. У першому з них параметри глинистих ґрунтів приймали за ідеально пружно-пластичною моделлю з граничною поверхнею за критерієм Мізеса. Реологічні властивості ґрунту не враховано. СЕ – трикутні першого порядку. При їх спотворенні сітка СЕ перебудовується. Переміщення вузлів сітки приймають за траєкторії руху часток у процесі вдавлювання палі чи напливу ґрунту в забій пробуреної свердловини. За розрахунками для вдавлених паль установлено, що частки навколо й нижче від їх вістря рухаються вбік і вниз, а вище вістря – вбік і вгору, що викликає піднімання денної поверхні; переміщення понад 1 см поширюються до 10 – 12 діаметрів палі; моделі однофазного ґрунту більш адекватні фактичним процесам у ґрунті, а двофазне середовище за швидкого навантаження має високу жорсткість, тому розраховані зусилля вдавлюванню набагато перебільшують натурні, навколо палі через випирання ґрунту утворюється ринва. На стійкість ґрунту в забої свердловини більше впливає питоме зчеплення та природний тиск, менше – діаметр свердловини. Для моделювання буронабивних паль, які розширюють за електрогідравлічним ефектом [113] використано модель типу «Cam-Clay». Задача має 2 етапи: формування п'яти палі заданням переміщень; навантаження палі. При введенні геометрії сітки СЕ ураховують координати її вузлів, отримані на першому етапі. Рішення базується на припущенні про

повну релаксацію напружень й остаточність деформацій, викликаних ЕГ-розрядами.

Дослідження впливу механічних властивостей ґрунту на деформування навколишнього ґрунту показали, що розміри області розвитку граничного стану визначає конкуренція параметрів міцності та деформативності ґрунту: для одного модуля E розміри області граничного стану тим вищі, чим нижче опір ґрунту зрушенню; при одному і тому ж опорі зрушенню розміри області граничного стану тим вищі, чим менша стисливість ґрунту [85].

З відносно нових підходів до другої групи включені методики Institute of Geotechnical and Constructional Engineering, University of Technology Hamburg (Kelm M. й ін.) [146], Sharif University of Technology, Iran (Ghassemi A., Pak A., Shahir H.) [161], Г.Г. Болдирєва [7], О.О. Петракова [66], ПолтНТУ (М.Л. Зоценко, Ю.Л. Винников) [13, 38, 52, 67, 176], які імітують утворення зон з наведеними властивостями ґрунту в масиві від занурення різних за геометрією трамбівок (паль, штампів), укочування масиву катками і т. ін. Так німецькі фахівці [146] моделюванням МСЕ забивання палі в ґрунт постійного поперечного перерізу за довжиною оцінили параметри зони ущільнення та дилатансії ґрунту навколо палі. Аналогічні дані отримали іранські геотехніки [161] щодо процесу витрамбовування в ґрунті котловану трамбівкою. Г.Г. Болдирєв [7] крім змін щільності піщаного ґрунту в розрахунковій області від різного вертикального переміщення штампів, отримав як зони ущільнення, так і дилатансії ґрунту.

За феноменологічною моделлю (метод ПолтНТУ) в задачах ущільнення масиву враховують як геометричну, так і фізичну нелінійність роботи ґрунту, а для наступного стану основи під статичним навантаженням лише фізичну нелінійність [13]. Після першого етапу напруження релаксуються, а наведені характеристики ґрунту зберігаються. Особливість моделі за значної геометричної й фізичної нелінійності – опис у явній формі зміни властивостей при незворотних об'ємних деформаціях ґрунту залежно від зміни пористості та швидкості передачі на нього тиску. Специфіка моделі за

малих деформацій – у тому, що загальні деформації включають лінійну і пластичну складові. Параметри моделі [13] встановлюють стисненням ґрунту в режимі відповідно швидкості передачі тиску на основу при її влаштуванні чи експлуатації (дані, зазвичай, описують логарифмічною функцією). Співвідношення дотичного та нормального напруження визначають за прямим зрушенням у діапазоні нормальних напружень, аналогічному стисненню.

Для оцінювання НДС середовища при утворенні фундаментів і основ з ущільненням ґрунту, у т. ч. й ущільненого ЗП, та їх наступній роботі С.Ф. Клованич і Ю.Л. Винников створили програмний комплекс «PRIZ-Pile» [13, 38, 48], у якому реалізоване рішення вісесиметричної задачі МСЕ кроково-ітераційними методами у фізично й геометрично нелінійній постановці. Застосування восьмивузлових ізопараметричних вісесиметричних СЕ, що мають властивості змінюватися за формою й об'ємом, дає можливість використання як прямокутної, так і криволінійної сітки СЕ, а врахування цих змін – визначення переміщень, напружень, наведених характеристик ґрунту на кожному кроці влаштування і навантаження фундаментів. Моделювання зведення чи попередньої роботи фундаментів полягає в завданні переміщень вузлів сітки СЕ з оцінкою НДС масиву. На етапі їх роботи враховується подальше ущільнення ґрунту, перехід його в пластичний стан, можливість проковзування бічної поверхні фундаменту за ґрунтом тощо.

Користуючись комплексом, Р.М. Лопан [67], зокрема, довів коректність відтворення у вісесиметричній задачі процесу укочування розкритих пісків. Маючи товщину відсипаного шару й щільність скелету ґрунту в ньому та параметри барабану катка і задаючись зниженням поверхні шару, отримують відповідну щільність скелету ґрунту (відносна похибка з натурним дослідженням не перевищує 2,4%), модуль його деформації, параметри міцності шару. Достовірність рішень забезпечують форма та властивості СЕ, розміри розрахункової області, вибір розрахункових схем укочування шарів і

їх наступної роботи, відповідність параметрів моделі дійсному стану ґрунту при влаштуванні та роботі основи. Відстань від осі симетрії розрахункової області до вузла СЕ, якому задають переміщення, приймають не меншою за дві довжини барабану, а на першому етапі за нижню межу зони приймають покрівлю вже ущільненого шару ґрунту (рис. 1.6).

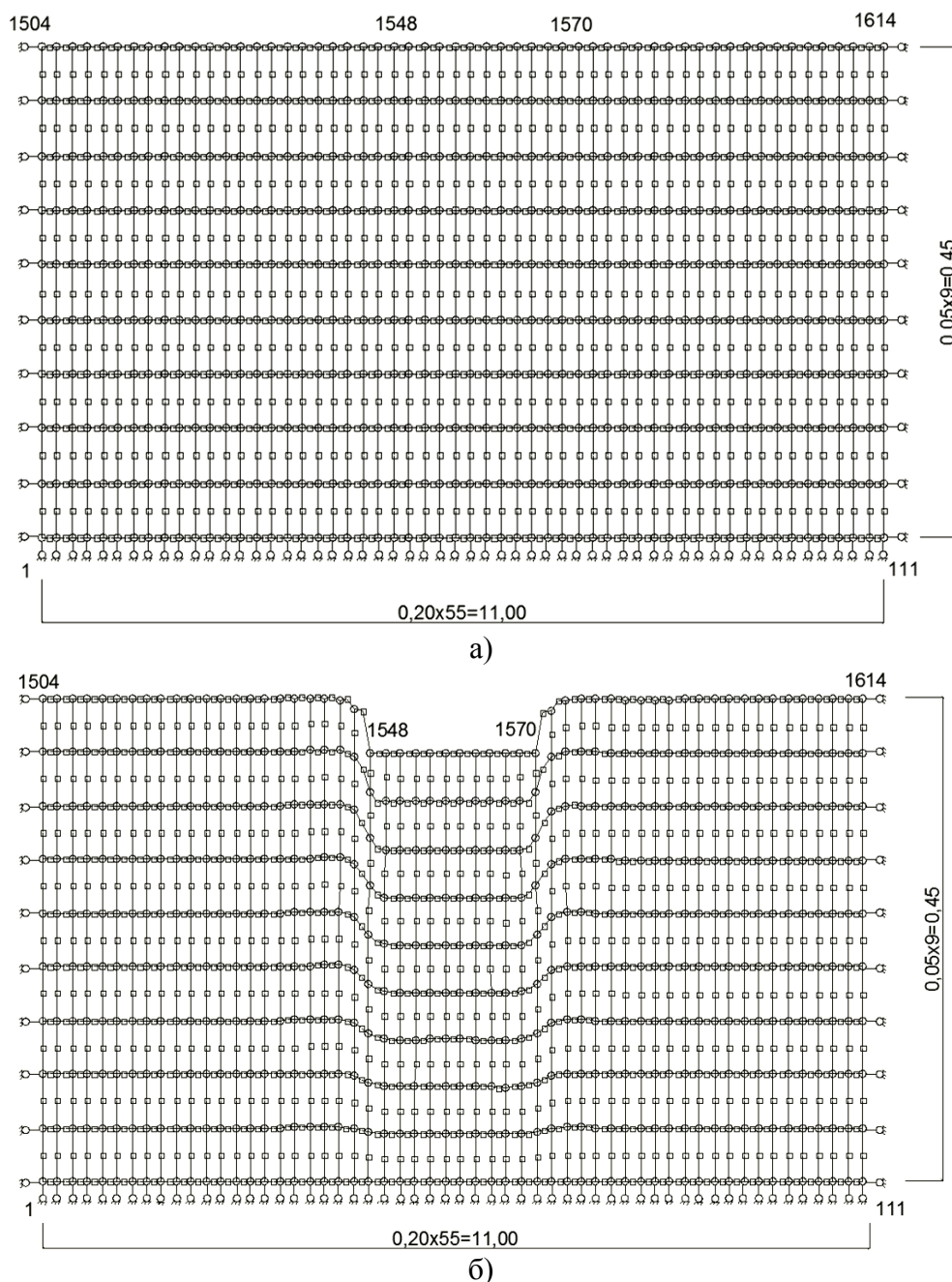


Рис. 1.6 Схеми розбивки прямокутної розрахункової зони на СЕ для моделювання процесу укочування шару насипного ґрунту [66]: а – вихідна; б – після проходки гладкого катка

Отже, проаналізовані рішення просторових задач МСЕ з використанням пружно-пластичних моделей ґрунту в цілому коректно

імітують ущільнення ґрунту, однак поки їх не апробовано для моделювання процесів ущільнення глинистих ґрунтів у складі ЗП за умови забезпечення їх тривалої міцності.

1.5. Сучасні уявлення про тривалу міцність ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів

Як вже визначено в п. 1.3, для надійної експлуатації ЗП важливі не лише максимально досягнуті при пошаровому укочуванні значення ρ_d та міцності ґрунту, а й збереження їх протягом тривалого часу використання. На стан ґрунту насипу в часі істотно впливає вологість, за якої його ущільнювали. Тому для зведення ЗП актуальне забезпечення тривалої міцності, тобто, коли за нормативний час експлуатації зберігаються отримані ущільненням механічні параметри ґрунту, а наднормативні деформації не виникають [2, 15, 49, 51, 60, 136, 139, 142, 155].

Відзначимо, що мінімальні напруження, за яких зразок руйнується через нескінченно тривалий проміжок часу, називають межею тривалої міцності. Напруження, за яких зразок ґрунту руйнується через деякий період часу після прикладання навантаження внаслідок розвитку деформацій сталої повзучості та прогресуючої течії, відповідають тривалій міцності ґрунту [38].

Насипи зводять із ґрунтів, природна структура яких при розробці вже порушена. З плином часу зв'язок між окремими частками й агрегатами ґрунту посилиться через процеси старіння та перекристалізації, які протікають у водно-колоїдних плівках на межі контакту окремих зернин і агрегатів. Зміцнення ґрунту в часі найбільш характерно для зв'язних ґрунтів [60, 61, 79, 80, 141, 147, 153, 156].

У глинистих ґрунтах, найрозповсюдженішому матеріалі ЗП, мінеральні частки і агрегати розділено водними плівками. В тонких плівках на воду

діють міжмолекулярні сили взаємодії з боку мінеральних часток. Властивості води в тонких плівках наближаються до характеристик пружно-пластичних тіл. Ці плівки, маючи пружність, чинять опір зрушенню. Здатність ґрунту втримувати воду завдяки молекулярним силам зчеплення між частками та молекулами води, називають молекулярною вологоємністю ґрунтів. У зв'язку з цим вологість ґрунтів, відповідну максимальному їх змочуванню, А.Ф. Лебедев [60] назвав максимальною молекулярною вологоємністю.

За інтенсивністю взаємодії з поверхнею мінеральних частинок воду в порах ґрунту поділяють на зв'язану, розміщену поблизу поверхні частинок, і вільну. Вільну воду ділять на гравітаційну, що може рухатись під впливом сили тяжіння (фільтраційний рух), і капілярну, яка через поверхневий натяг і явище змочування може рухатись у тонких порах ґрунту протилежно до дії сили тяжіння [60, 141, 153, 154]. В ущільнених глинистих ґрунтах капіляри тонкі, та через набухання глинистих частинок і за наявності на них плівок зв'язаної води проміжки між частками ніби закупорюються. Тому в щільних глинах і суглинках капілярне підняття не перевищує 2 м. Найбільша висота капілярного підняття характерна для проміжних між піском і глиною сухих піщаних і пилуватих ґрунтів з нещільним складом, в яких за кілька місяців капілярна вода може підніматися на 3 – 4 м. Висоту капілярного підняття враховують при визначенні висоти автодорожнього насипу [153, 156, 158]. Можлива схема впливу кількісного вмісту різних видів води на стан ущільненого ґрунту ЗП у часі подана на рис. 1.7.

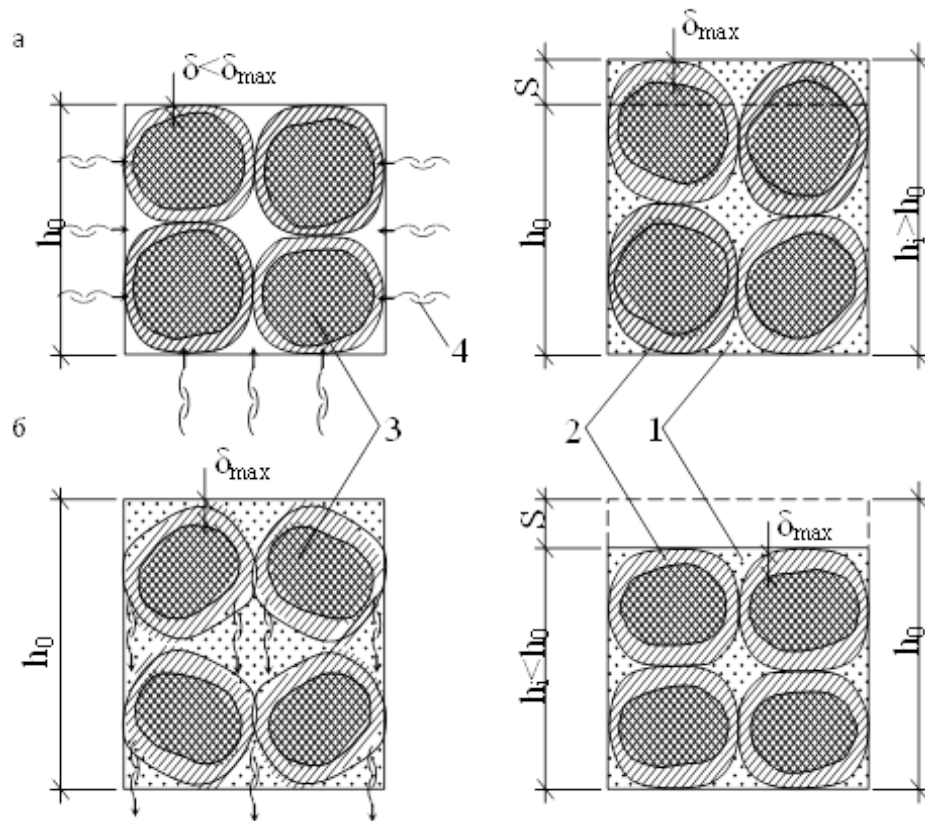


Рис. 1.7 Схема деформацій ущільненого ґрунту з часом:
 а – недозволожений ґрунт ($W < W_{mm}$); б – перезволожений ґрунт ($W > W_{mm}$);
 1 – вільна вода; 2 – зв'язана вода; 3 – тверда частинка ґрунту; 4 – напрям руху води

Якщо ґрунт ущільнено при вологості меншій за максимальну кількість зв'язаної води W_{mm} (рис. 1.7, а), то електричний потенціал поверхні частинок не використано, і вони здатні збільшити товщину плівок зв'язаної води δ до максимально можливого значення δ_{max} при додатковому зволоженні ґрунту під час експлуатації насипу [15, 38, 76, 153]. Збільшення товщини плівок зв'язаної води призводить до росту початкового об'єму ущільненого ґрунту та відповідно деформації споруди. Слід враховувати й те, що зволоження часто йде локально, викликаючи відповідну нерівномірну деформацію масиву. Якщо ущільнення ґрунту виконано за вологості, що значно перевищує максимальну кількість зв'язаної води (рис. 1.7, б), то електричний потенціал поверхні твердих частинок повністю використаний, система має нейтральний заряд, а товщина плівок зв'язаної води – максимальну величину [15, 38, 40, 60, 139, 153]. Наявність значної кількості вільної води призводить до того, що з часом ця вода під дією гравітації, власної ваги ґрунту й

зовнішніх навантажень витискається з пор. Це сприяє додатковому ущільненню ґрунту ЗП за рахунок перекомплектування частинок. Відповідно міцність цього ґрунту збільшується, проте мають місце нерівномірні деформації ЗП [15, 38, 60, 142].

Виходячи з даної гіпотези, найбільш сприятливою умовою забезпечення тривалої міцності глинистих ґрунтів ЗП і мінімальних деформацій під час його експлуатації є ущільнення ґрунту за вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води. Є окремі, але дослідно не перевірені, пропозиції [38] для зв'язних ґрунтів максимальну кількість зв'язаної води орієнтовно приймати як

$$W_{mm} = W_p - 0,02 \quad (1.6)$$

Дослідження у цьому напрямку, в т. ч. з урахуванням чиннику часу, вже почали дорожники Англії, Гонконгу, Китаю, Румунії, Японії [133, 139, 153, 160].

Отже, потребує дослідної перевірки робоча гіпотеза про те, що найбільш сприятливою умовою забезпечення тривалої міцності глинистих ґрунтів ЗП і відповідно мінімальних деформацій за нормативний час його експлуатації є пошарове ущільнення ґрунту за вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води. Тоді за даними дослідів можливо розробити нові оптимальні критерії ущільнення глинистих ґрунтів дорожніх насипів.

1.6. Аналіз причин деформацій земляного полотна в насипу

Практика зведення й експлуатації автодоріг дає характерні випадки наднормативних деформацій і навіть руйнування ґрунтових насипів не лише у несприятливих погодно-кліматичних, інженерно-геологічних і ґрунтово-гідрологічних умовах (як-то гірські райони Криму й Карпат, схили з проявом зсувних процесів і т. ін.), але й у порівняно сприятливих умовах рівнини [23,

45, 89, 166]. Деформації ЗП переважно зумовлені видом ґрунту, вологістю, ступенем його ущільнення, діючими навантаженнями та погодно-кліматичними умовами. Здимання, просідання ґрунтів, змиви й сповзання ділянок укосів насипу та інші деформації, зумовлені підвищеною вологістю, викликають порушення міцності й стійкості всієї ґрунтової споруди [23, 58, 89, 133, 155, 166, 169]. Крім того деформації ЗП можуть рости в часі, так звані реологічні процеси [38, 73, 112].

Моніторинг 23 областей країни [89] показав, що найбільша кількість насипів входить до складу доріг II категорії в діапазоні висот від 6 до 10 м, відсоток деформацій цих насипів склав 28,2%, в діапазоні висот від 10 до 12 м – 28,6%, від 12 до 15 м – 35,3% і від 15 до 20 м – 36,8%. Переважна частина наднормативних деформацій (52,2%) зафіксована в насипах висотою понад 21 м у дорожньо-кліматичній зоні У-II. Основний вид наднормативних деформацій (понад 70%) – розмиви укосів насипів, зрушення укосів й узбіч [45, 46, 89]. Діаграми співвідношення кількості деформованих насипів до їх загального числа наведені на рис. 1.8.

Поширені просідання насипу, викликані консолідацією ґрунтів, з яких його зведено (табл. 1.5). Просідання виникають, якщо ґрунти ущільнені недостатньо. Причина може бути й у різниці фільтраційних показників ґрунтів і через брили льоду та снігу в масиві мерзлого ґрунту [23, 58, 102, 167, 169]. Осідання ЗП (табл. 1.5) виникають за недостатньої міцності та високої деформативності основи, на якій влаштовано насип [47, 49, 102, 138]. Випинання ґрунту в нижній частині насипу (табл. 1.5) відбувається через інтенсивне капілярне зволоження. Тоді проїзна частина дороги втрачає рівність, спотворюються обриси укосів, узбіч, зменшується висота насипу та збільшується його ширина понизу [89, 91, 100, 155, 156].

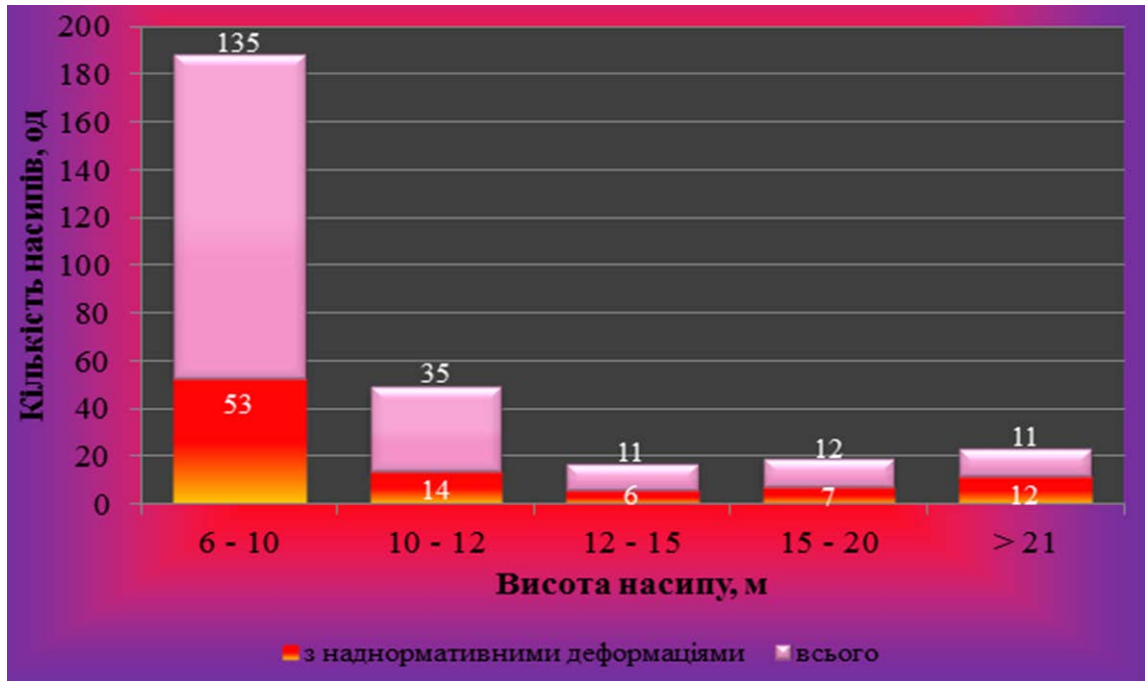
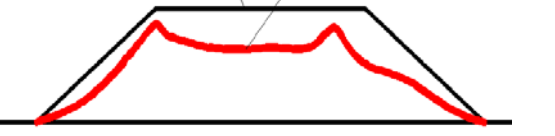

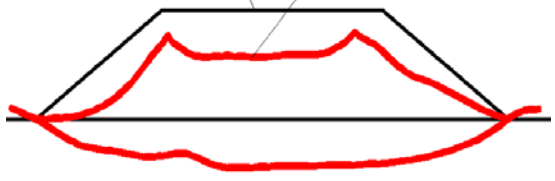

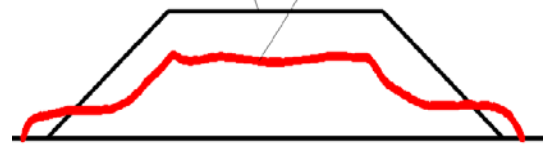

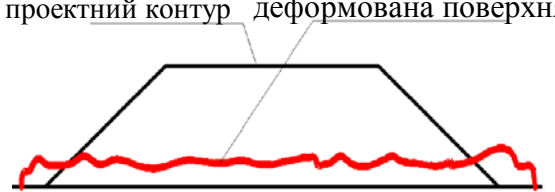



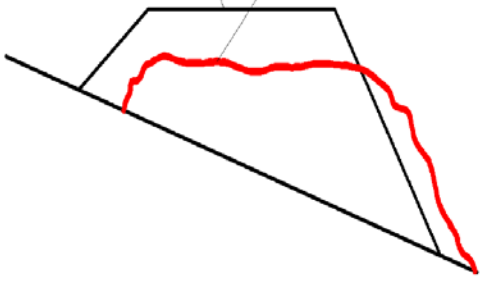

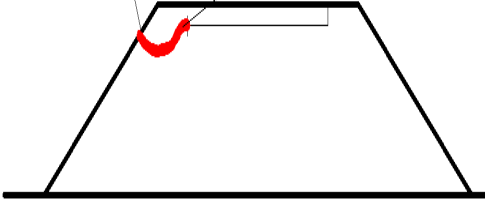

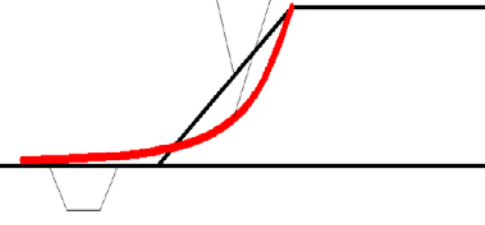

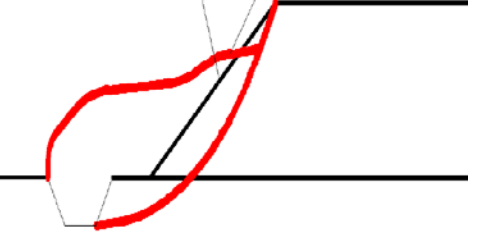

Рис. 1.8 Порівняння кількості деформованих насипів до їх загальної кількості

Розповзання насипу (табл. 1.5) виникає при застосуванні водонестійких ґрунтів, недостатньому ущільненні ґрунту, відсипанні його в глибоку калюжу, при зведенні насипу в зимовий період [68, 79, 156]. Сповзання насипу за косогором (табл. 1.5) чи на похилому мінеральному дні болота характерне при недостатньому зчепленні насипу з основою. Руйнування узбіч виникає (табл. 1.5) при русі транспорту перевозоженними узбіччями [59, 79, 125, 155, 169].

Ці деформації не охоплюють усі випадки руйнування ЗП. Так характерні пошкодження укосів, змиви (табл. 1.5), які виникають за атмосферних опадів, періодичного промерзання-розмерзання ґрунту, недостатнього укріплення укосів, перевозоженні ґрунтів, порушень водовідведення. При розмерзанні верхнього шару насип утримує значну кількість води. Його вологість може перевищувати межу текучості, й ґрунт сповзає за укосом [138, 139, 141, 145].

Деформації земляного полотна в насипу

Вид деформації	Схема	Фото
1	2	3
Просідання	<p>проектний контур деформована поверхня</p> 	
Осідання	<p>проектний контур деформована поверхня</p> 	
Бічне випинання	<p>проектний контур деформована поверхня</p> 	
Розповзання	<p>проектний контур деформована поверхня</p> 	

<p>Словзання</p>	<p>проектний контур деформована поверхня</p> 	
<p>Руйнування узбічч</p>	<p>проектний контур деформована поверхня</p> 	
<p>Змиви поверхневих шарів укосів</p>	<p>проектний контур деформована поверхня</p> 	
<p>Словзання укосів</p>	<p>проектний контур деформована поверхня</p> 	

Сповзання укосів (табл. 1.5) пов'язане з локальним зміщенням верхніх шарів ґрунту товщиною 1 – 2 м зі збереженням загальної стійкості укосу. Такі деформації характерні для високих насипів. Їх причини – порушення принципу пошарової відсипки насипу та необхідного ущільнення, а інколи – циклічні промерзання-розмерзання масиву [46, 58, 89, 155].

Отже, деформації ЗП можна систематизувати як зміну форми та розмірів від впливу зовнішнього навантаження, власної ваги, процесів у ґрунтовому масиві, а також природних і техногенних факторів [39, 59, 104, 109, 169]. Для запобігання наднормативних деформацій в процесі експлуатації ґрунтових дорожніх насипів слід враховувати фізико-механічні властивості ґрунтів і їх стан, природні умови в районі зведення масиву, дотримуватись раціонального управління технологічного процесу їх укладання та ущільнення.

1.7. Недоліки нормативної бази визначення якості ущільнення ґрунтів

1.7.1 Проблеми лабораторних методів прогнозування ущільнення ґрунтів

Лабораторні методи стандартного ущільнення ґрунтів розроблялись ще з 30-тих років ХХ сторіччя. Вони спрямовані на прогнозування ρ_{dmax} і W_{opt} для конкретного ґрунту ще до початку його польового ущільнення. Сучасні норми використовують стандартний метод ущільнення в приладах СоюздорНДІ (для ґрунтів, у яких до 5% часток розміром більше 5 мм) або ЦНДІБ (для ґрунтів, у яких до 5% часток розміром більше 2 мм) [30, 43, 65, 74]. Для цього спершу визначають гранулометричний склад ґрунту, щільність частинок, межі пластичності, природну вологість, вміст органічної речовини. Якщо ґрунти неоднорідні [29, 32], лабораторні дослідження виконують на зразках, характерних для всього масиву. Коли неможливо виділити головну складову та відібрати зразки характерного складу,

лабораторні дослідження не виконують, адже отримані дані не характеризують весь масив.

Ґрунт ущільнюють 4 – 6 разів, систематично збільшуючи вологість [93, 135, 171]. Ущільнення починають при вологості, дещо більшій за вологість у повітряно-сухому стані, що відрізняється до 8 – 10% від W_{opt} . W_{opt} приймають для: пісків – 8 – 13%; супісків – 9 – 15%; суглинків – 12 – 22%; глин – 16 – 26%. У приладі СоюздорНДІ ущільнення виконують послідовно в 3 шари. Кожний з них ущільнюють скиданням вантажу масою 2,5 кг з висоти 300 мм. Кількість ударів призначають залежно від виду ґрунту. Якщо використовують прилад ЦНДІБ, ущільнюють одночасно весь зразок, який закладають у кільце, і насадку 5 шарами з ущільненням кожного з шарів пестиком [50, 59, 75, 83].

Вологість ущільненого ґрунту визначають відбором проб (15 – 20 г) з верхньої, середньої, нижньої частин зразка. Після визначення щільності й вологості розраховують ρ_d , будують криву стандартного ущільнення (рис. 1.9). Оптимальна вологість W_{opt} відповідає максимальній величині ρ_{dmax} .

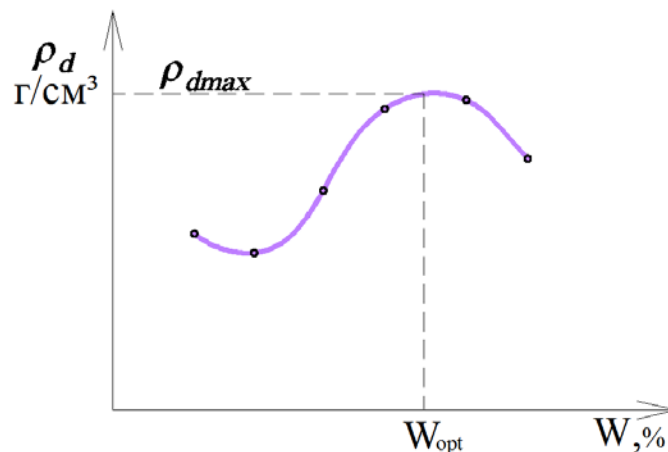


Рис. 1.9 Крива стандартного ущільнення ґрунту

Однак стандартним методом подеколи неможливо досягти проектних значень ρ_{dmax} , що за В.І. Коваленком [50] призводить до нераціонального використання міцності ґрунтів і можливостей ущільнювачів. Неможливо дослідити й сам процес зміни характеристик ґрунту в процесі ущільнення.

Порівняно зі стандартним динамічний метод ПолтНТУ [17, 37, 38, 177] дозволяє дослідити в приладі МДУ-1 закономірності зміни питомого об'єму скелету ґрунту при ущільненні й визначити оптимальні параметри з умови, коли прикладену роботу ефективно використовують для ущільнення ґрунту.

У СоюздорНДІ створено й метод підготовки зразків із заданою вологістю-щільністю [40, 43]. У навіску роздрібненого ґрунту додають розраховану кількість води. Після ретельного перемішування пастою заповнюють кільце, в якому досліджують ґрунт. Зразок пресом доводять до заданої щільності. Порівнянням з іншими методами доведено, що пресуванням моделює вихідну структуру ґрунту в насипу, його стан до процесу можливих деформацій.

З порівняння іноземних і вітчизняних стандартних методів ущільнення ґрунтів В.Д. Казарновський [40 – 43] зробив висновок про їх принципову близькість, зокрема до тестів Проктора (ASTM D 698-91, ASTM D 1557-91) і Д'єстерського методу. За АASHTO T 272-95 оптимальні параметри ущільнення при випробуванні зразка визначають з графіку «родина кривих – одноточковий метод Проктора» (в комбінації з пенетрацією ґрунту [43, 124, 130]). За стандартом США T180-93 діаметр зразка, маса вантажу, число ударів, товщина та кількість шарів залежить від максимального розміру часток. За Каліфорнійським методом водонасичений зразок випробовують штампом діаметром 5 см, а напруження виміряють при його осіданні 2,5 і 5 мм. Їх порівнюють з еталонними величинами 7 і 10,5 МПа, а зіставленням отримують «коефіцієнт несучої здатності» («число CBR») [166, 175]. Контроль ущільнення ґрунтів ЗП за радянськими [94] та діючими в Україні нормами [26, 27, 30] здійснюють за величиною коефіцієнта ущільнення.

Запропонований Р. Проктором в 1933 році [164] коефіцієнт ущільнення є не прямим показником придатності ЗП до влаштування шарів дорожнього одягу. Він показує лише, наскільки щільність конкретного ґрунту близька до його максимальної щільності, але кількісно не оцінює міцність ЗП. Можливе припущення про те, що, на думку Р. Проктора,

близькість фактичної щільності ґрунту до максимального значення є гарантією, що при експлуатації дороги ґрунт не буде доущільнюватись, а тому не матимуть місце просідання ЗП. Але максимальна щільність – відносна величина, яка залежить від ущільнюючого механізму. За К. Tateyama [170, 171] величини максимальної щільності одного і того ж ґрунту, отримані різними методами значно відрізняються (табл. 1.6).

Таблиця 1.6

Дані визначення максимальної щільності ґрунту різними методами

Максимальна щільність, г/см ³		
За методом стандартного ущільнення	За методом Проктора	За модифікованим методом Проктора
1,834	1,866	1,943

Слід відзначити також значну тривалість і трудоємкість визначення коефіцієнта ущільнення k_s , можливість отримання результатів через досить тривалий час випробувань (без урахування терміну транспортування зразків ґрунту до лабораторії, потрібно не менше двох робочих днів) [75, 93]. Це не дозволяє оперативно керувати процесом ущільнення на об'єктах.

Коефіцієнт ущільнення не дозволяє кількісно оцінити несучу здатність (міцність) ЗП, бо шар ґрунту з достатнім k_s може лежати на слабкій основі. Для оцінювання цього параметру ґрунту більше підходять модулі пружності чи деформації. Ці показники застосовують у розрахунках дорожніх конструкцій. Якщо їх величини задовольняють проектним або нормативним вимогам, то і ступінь ущільнення ґрунту чи основи у більшості випадків є достатнім для укладання наступних шарів. Якщо при досягнутому нормативному коефіцієнті k_s не забезпечені потрібні значення модулів, за нормативними документами західних країн ґрунт підлягає заміні чи зміцненню в'язучим [81, 118, 162].

Важливим є висновок Д.О. Павлюка [81] про те, що залежності між модулем деформації та коефіцієнтом k_s не однозначні: не завжди більші

величини k_s відповідають більшим модулям деформації та навпаки (рис. 1.10). Близькі за характером дані отримав і М.В. Шур'яков [118] (рис. 1.11).

Вимоги до ущільнення ґрунту земляного полотна залізниць в Німеччині [132] представлені у двох варіантах – як вимоги до коефіцієнту ущільнення, так і до модуля деформації E_{v2} (рис. 1.12), де E_{v2} – модуль деформації, отриманий при другому навантаженні.

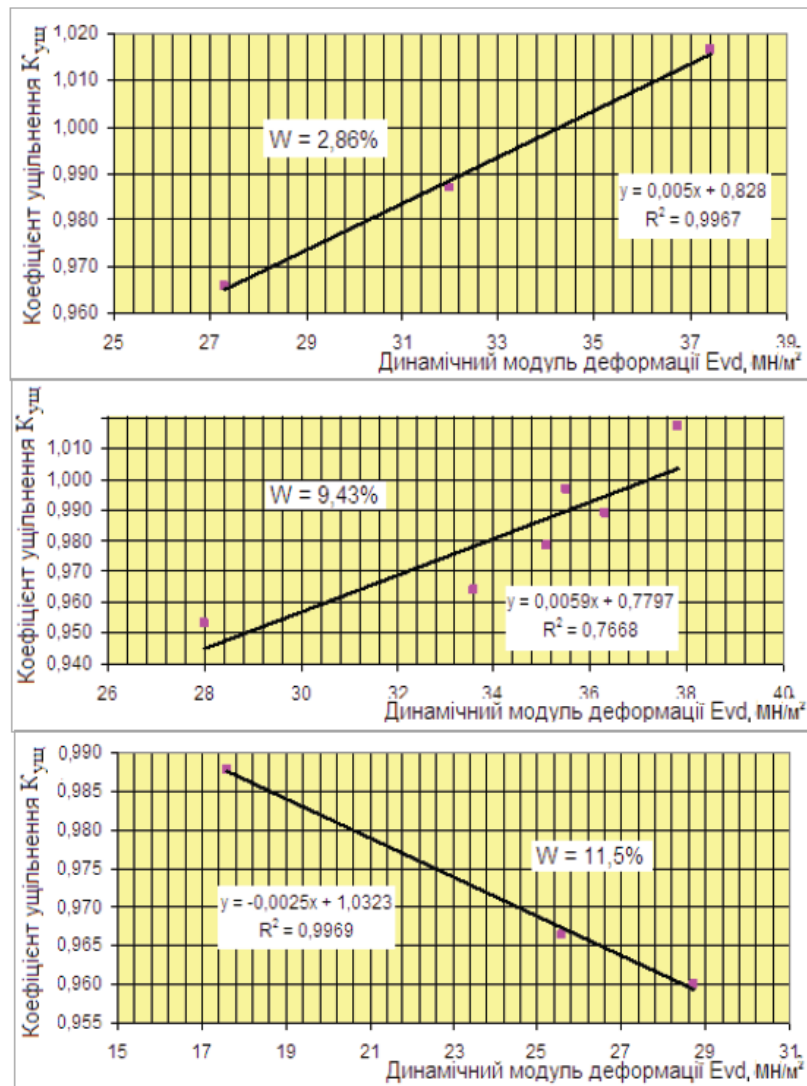


Рис. 1.10 Залежність між динамічним модулем деформації ґрунту та коефіцієнтом ущільнення при різній вологості ґрунту [81]

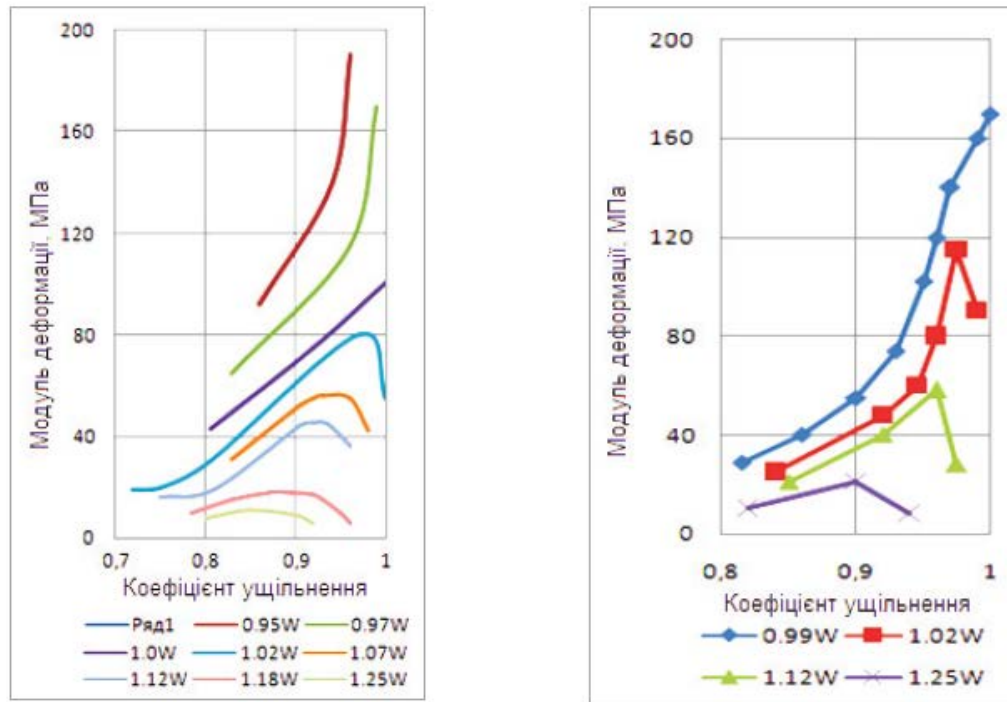


Рис. 1.11 Зв'язок між модулем деформації та коефіцієнтом ущільнення ґрунту [118]

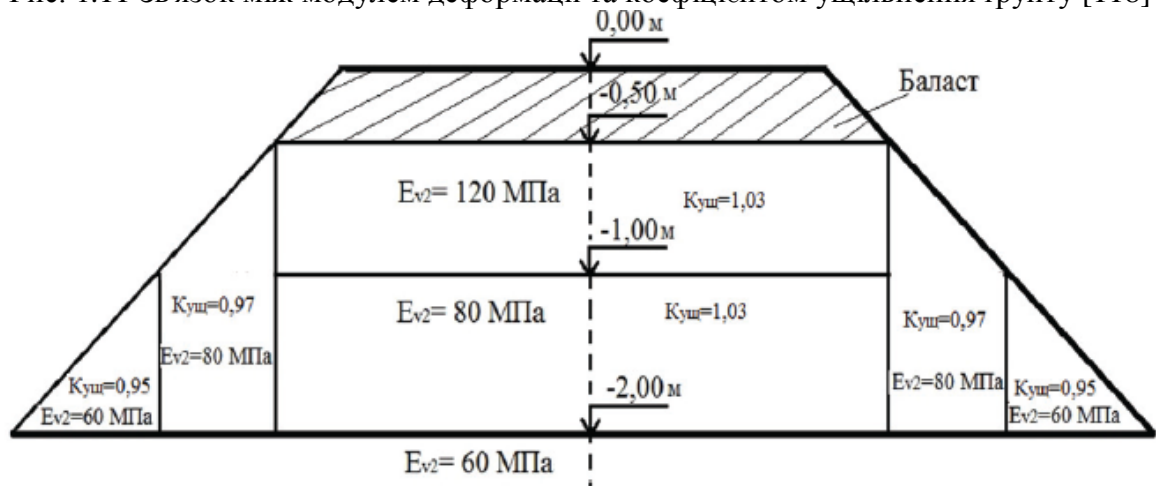
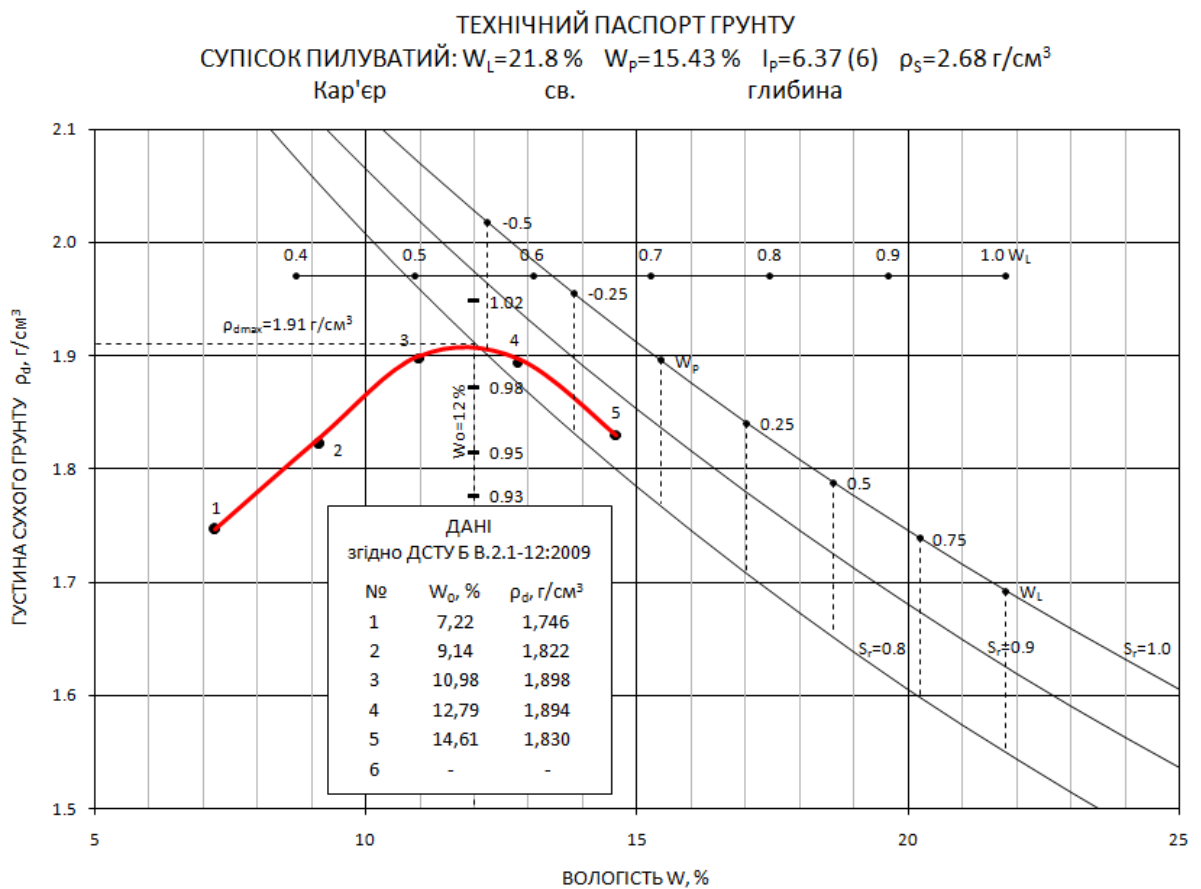


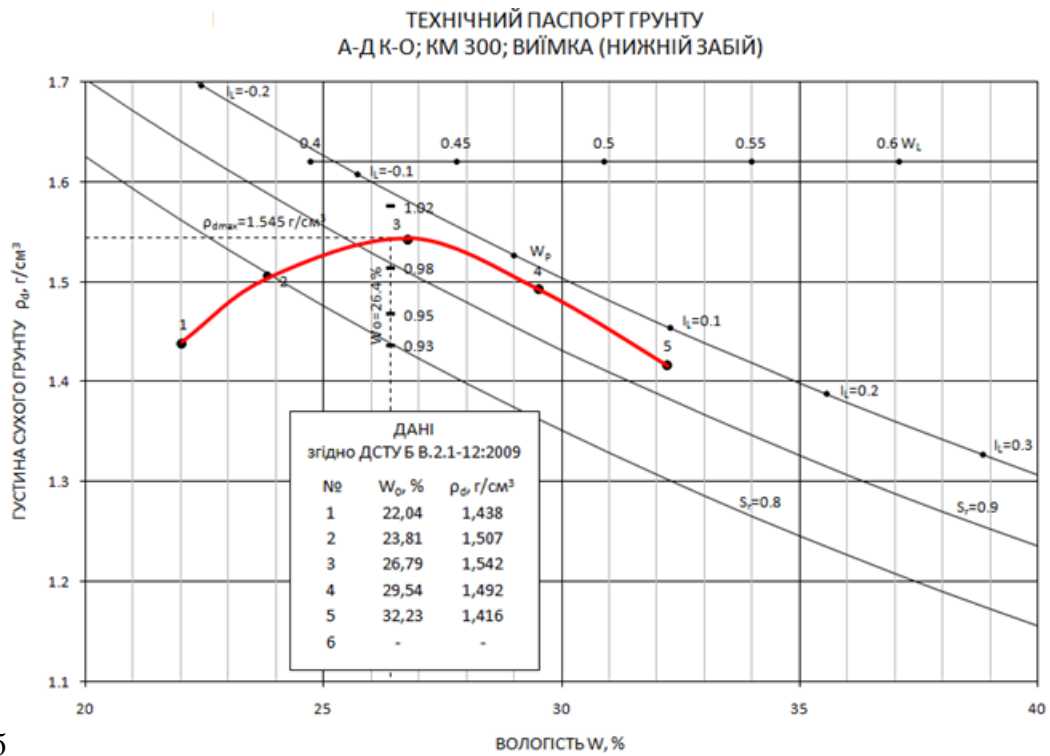
Рис. 1.12 Вимоги до ущільнення ґрунту [132]

Відсутність у закордонній та вітчизняній дорожній науці своєчасного комплексного аналізу стану зв'язних ґрунтів ЗП, що досягається в результаті стандартного лабораторного визначення «максимальної щільності» ґрунту призвела з одного боку до невизначеності про можливі стани таких ґрунтів при їх різних щільностях і вологостях, а з іншого боку – до певної «ідеалізації» самого методу стандартного досягнення цього стану як за ДСТУ Б В.2.1-12, так, особливо, і за «Методом Проктора» [30, 64, 164].

Як показано на рис. 1.13 і 1.14 для двох видів зв'язних ґрунтів (досліди А.С. Литвиненка) максимальна щільність ρ_{dmax} відповідає щільності скелету

грунту при їх вологості на межі розкочування W_p , а оптимальна вологість W_{opt} завжди є дещо меншою за вологість W_p . При цьому сам ґрунт одночасно знаходиться в твердому стані ($I_L < 0$) та є водонасиченим ($S_r \geq 0,85$). Водонасичення при цьому досягають не лише внаслідок додавання води, а в результаті витіснення з ґрунту вільного повітря та зближення твердих частинок між собою, через що ґрунт переходить у стан ґрунтової маси. Та можливість його подальшого водонасичення для досягнення начебто розрахункового стану $W_{роз}$, обмежена навіть при вакуумуванні в лабораторних умовах, не кажучи про реальні умови експлуатації в дорожніх насипах [64, 65]. Таким чином, можливі відносні розрахункові значення вологості $W_{роз} = nW_L$ при якісному ущільненні ґрунтів, не повинні дуже відрізнятись від оптимальної вологості і, зазвичай, не перевищують вологість ґрунтів на межі розкочування.





б

Рис. 1.13 Приклад технічного паспорту глинистого ґрунту:
а – № 1; б – № 2 (дослідні дані А.С. Литвиненка) [64, 65]

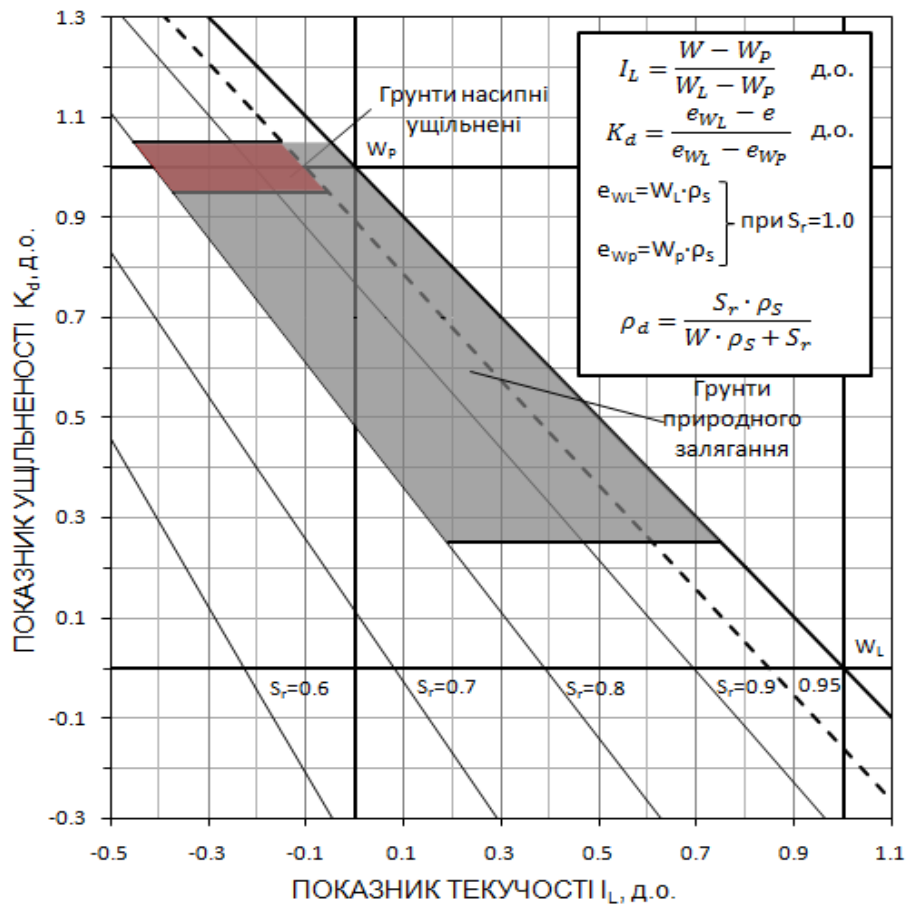


Рис. 1.14 Узагальнена номограма розрахункових станів зв'язних ґрунтів у природному заляганні (згідно [26]) та планомірно з ущільненням укладених в насип (згідно [30])

Коли представити стан, що досягається при стандартному ущільненні в лабораторії, і особливо за реальних умов будівництва порівняно з іншими можливими розрахунковими станами зв'язних ґрунтів, у т. ч. у природному заляганні, то згідно рис. 1.14 це буде лише невелика частина ґрунтів, що мають дуже велику щільність ($k_s \approx 0,95 - 1,05$) і твердий стан ($I_L = -0,75 - 0$), у чому саме і полягає суть ущільнення ґрунтів при зведенні насипів автодоріг [64, 65].

А.С. Литвиненко [62, 64, 65] з аналізу графіків, аналогічних рис. 1.14, для всіх інших проміжних видів ґрунтів, вважає, що відносна розрахункова вологість якісно ущільнених легких суглинистих і супіщаних ґрунтів зазвичай не повинна перевищувати $0,65W_L$, важких суглинків – $0,6W_L$, а глин навіть $0,5W_L$. Тобто, в усіх випадках $I_L \leq 0$. Дані стосовно відносних розрахункових вологостей ґрунтів $f(nW_L)$ є дуже суперечливими як в колишніх, так і чинних нормах. Недоліком, зокрема, є те, що значення цих вологостей пов'язують із різними умовами (тип місцевості за зволоженням і т. ін.). У багатьох випадках великі відносні розрахункові вологості за сучасних уявлень особливо вражають. Так для пілуватих супісків і суглинків у першій дорожньо-кліматичній зоні з третім типом місцевості за зволоженням така відносна розрахункова вологість становила $0,9W_L$. Аналізуючи рис. 1.13, де представлено дані по одному з пілуватих супісків, виходить, що при цій вологості показник текучості $I_L > 0,5$ і без розробки додаткових заходів, проектувати на цьому ґрунті, як занадто слабкому, не можливо. З рис. 1.14 видно, що при цьому $k_s < 0,90$ [62, 65].

У ВСН 46-83 розширені величини відносних розрахункових вологостей до менших значень $W_{роз} = 0,5 - 0,55W_L$, але додали значення $W_{роз} = 0,95W_L$. В той же час не передбачено розрахункові вологості як $0,5W_L$, так і $W_{роз} > 0,75W_L$. Та й відносна розрахункова вологість $0,75W_L$ згідно рис. 1.13 для більш легких ґрунтів відповідає коефіцієнту ущільнення $k_s < 0,95$. Є неузгодженість між вимогами [30] і відомчими нормами щодо розрахунку різного типу дорожніх одягів. Щоб узгодити ці норми А.С. Литвиненко

пропонує суттєво підвищити якість ущільнення ґрунтів, а це означає, що при ущільненні у виробничих умовах вологість зв'язних ґрунтів не повинна бути більше їх вологості на межі розкочування. Якщо вологість більша за W_p , то слід розробляти додаткові заходи, які збільшать вартість робіт, або зводити насипи лише в сприятливий період [64, 65].

Отже, проблема нормативних лабораторних методів прогнозування ущільнення ґрунтів ЗП полягає в їх відставанні від можливостей сучасної ущільнюючої техніки, бо з ростом питомої енергії ущільнення оптимальна вологість і максимальна щільність ґрунтів значно змінюються.

1.7.2 Недоліки польових методів контролю якості ущільнення ґрунтів

Польові дослідження властивостей ґрунтів значно дорожчі за лабораторні, але забезпечують більшу достовірність і відповідність стану ґрунту в складі ЗП та часто є єдиним коректним способом отримання значень механічних характеристик [43, 58, 70, 133, 139, 140]. Оптимальні параметри ущільнення досліджують не менш ніж на 3 ділянках шириною 5 – 6 м і довжиною 40 – 50 м. На одній ґрунт природної вологості розрівнюють бульдозером товщиною 40 – 50 см, на другій – його зволожують поливальною машиною, а на третій – ґрунт підсушують. Кожну ділянку за довжиною ділять на 4 карти, з яких на глибині 10 – 15 см у кільця відбирають ґрунт для отримання ρ_d , W і penetрації. З карти до укочування беруть по 3 зразки для визначення ρ_d і W , тобто, до ущільнення та після кожного контрольного проходу мають 12 проб для статистики. Дослідне укочування виконують безпосередньо робочим механізмом. Будують графіки залежності питомого об'єму скелету ґрунту від логарифму кількості проходів катка для кожної карти за методом динамічного ущільнення [84, 91, 133, 140, 160].

При влаштуванні ЗП систематично контролюють проектні параметри [83, 159]: 1) стан підстильного шару; 2) вид і стан матеріалу ЗП; 3) товщину шарів ґрунту, що відсипають; 4) вологість цього ґрунту; 5) характеристики та режими роботи механізмів; 6) кількість проходів механізмів; 7) коефіцієнт k_s . Якість ущільнення ґрунтів насипів визначають за ρ_d і W методами [30, 63, 93]: ріжучих кілець; penetрації та обертального зрізу, статичного (динамічного) зондування; радіоізотропним; нейтронним; сейсмоакустичним.

Найбільш поширено контроль якості ущільнення ґрунтів відбором зразків для визначення їх щільності й вологості методом ріжучих кілець. Для ґрунтів з включеннями крупних фракцій його модифікація отримала назву «лунковий» метод відбору зразків. При укочуванні шарів [91, 93, 117, 124] контролюють лише фізичні властивості ґрунту. По 3 зразки вирізають кільцями в одній точці на кожні 300 м². Середні величини ρ_d мають бути проектними, а зменшення не може перевищувати 0,05 г/см³ у не більш, ніж 10% проб від їх загальної кількості, хоча проект може містити й лабораторне чи польове дослідне ущільнення ґрунтів. З практики для ґрунтів оптимальної вологості $k_s = 0,92 - 0,98$ забезпечує стабільність насипу висотою до 12 м.

Модуль деформації ґрунту для відібраних у ріжучі кільця зразків звичайно визначають у компресійних приладах, а кут внутрішнього тертя та питоме зчеплення – в приладах одноплощинного зрушення [119, 138, 142].

Для об'єктивності контролю ущільнення ґрунтів разом із коефіцієнтом k_s є сенс малими штампами визначати модулі деформації, та використовувати прилади оперативного контролю якості ущільнення [3, 8, 26, 56, 66, 73].

Отже, метод ріжучих кілець – трудомісткий і не дозволяє оперативно визначити щільність скелету ґрунту й коригувати процес робіт, а експрес-методи поки не достатньо точні. До того ж оцінка якості ущільнення лише за фізичними властивостями ґрунту може призвести до хибних висновків.

1.8. Висновки до розділу 1. Мета та задачі досліджень

1. Для тривалої експлуатації ґрунтової споруди важливі не лише максимально досягнуті значення щільності скелету ґрунту та його міцності, а й збереження їх протягом тривалого часу експлуатації. На стан ущільненого ґрунту насипу в часі істотно впливає вологість, при якій проведено ущільнення, й кількісне співвідношення окремих видів води в ущільненому ґрунті. Однак, поки не досліджено кількісний вплив на закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів наступних чинників: щільності скелету ґрунту; висоти насипу; фактору часу «відпочинку» насипу після його зведення й до початку експлуатації.

2. Потребує перевірки гіпотеза, що найбільш сприятливою умовою забезпечення тривалої міцності глинистих ґрунтів ЗП і відповідно мінімальних деформацій за нормативний час його експлуатації є пошарове ущільнення ґрунту за вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води.

3. Рішення просторових задач МСЕ з використанням пружно-пластичних моделей ґрунту доводять можливість коректного моделювання ущільнення ґрунту. Невирішеним поки є питання апробації цих рішень для моделювання процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності.

4. Наднормативні деформації ЗП можна характеризувати як зміну його форми і розмірів під впливом зовнішнього навантаження, власної ваги та процесів, які відбуваються в масиві, природних і техногенних факторів. Ці чинники в результаті виконання земляних робіт можуть, у свою чергу суттєво змінити властивості ґрунтів та водно-тепловий режим дорожнього насипу.

5. Недолік норм лабораторних методів прогнозування ущільнення ґрунтів полягає в їх відставанні від можливостей сучасної ущільнюючої техніки, бо при збільшенні питомої енергії ущільнення величини оптимальної вологості та максимальної щільності ґрунтів значно змінюються.

Отримані висновки дозволяють сформулювати мету дисертаційної роботи – удосконалити оптимальні критерії ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу, за яких забезпечується їх тривала міцність.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати такі задачі:

- проаналізувати сучасні нормативні методи визначення оптимальних параметрів ущільненого глинистого ґрунту (максимальну щільність його скелету $\rho_{d \max}$ і оптимальну вологість W_{opt}) у складі дорожнього насипу;
- розробити нові оптимальні критерії ущільнення, за яких забезпечується тривала міцність пилуватих суглинків дорожнього насипу;
- шляхом лабораторних і польових досліджень встановити закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, висоти насипу та фактору часу;
- встановити коректні умови моделювання МСЕ процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі насипу.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ УЩІЛЬНЕНИХ ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ

Відповідно до поставленої у висновках до розділу 1 задачі щодо розробки нових оптимальних критеріїв ущільнення, за яких забезпечується тривала міцність пилюватих суглинків дорожнього насипу було сплановано лабораторний фізичний експеримент зі встановлення закономірностей міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів ЗП залежно від виду ґрунту, щільності скелету ґрунту в насипу, товщини (висоти) насипу та фактору часу.

Для цього використано обладнання лабораторії кафедри видобування нафти і газу та геотехніки ПолтНТУ. Нижче описана методика та результати лабораторних досліджень вологісного режиму ущільнених легких і важких пилюватих дорожніх насипів від перелічених факторів.

2.1 Фактори, що впливають на закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів

Як встановлено в першому розділі на його вологісний режим і відповідно на параметри тривалої міцності глинистого ґрунту в дорожньому насипу істотно впливають декілька чинників, які слід враховувати при його зведенні:

– вид глинистого ґрунту, тобто його індикаційні показники за ДСТУ Б В.2.1-2-96 [29]: вологість на межі текучості W_L ; вологість на межі розкочування W_p ; число пластичності I_p .

- щільність скелету ґрунту ρ_d в межах ущільненого ЗП;
- вологість ґрунту w , при якій проводиться його ущільнення;
- товщина (висота) ущільненого насипу;
- кількість діб, які ущільнений глинистий насип «відпочиває» після його зведення й до початку експлуатації.

Вивченню залежності міцності ґрунту від його щільності присвячені фундаментальні праці відомих фахівців у галузях автодоріг і геотехніки – професорів М.М. Маслова, Н.Я. Хархути, М.О. Цитовича та ін. Вони, зокрема, дослідили, що при заданій вологості зі збільшенням щільності питоме зчеплення зв'язного ґрунту зростає. Деформативність глинистого ґрунту зменшується (величина його модуля деформації зростає) при збільшенні його щільності (при постійній вологості ґрунту), однак в ряді випадків відзначається її зниження при перевищенні деякої щільності ґрунту (за Н.Я. Хархутою [112], так званий, «ефект переущільнення»). Це пояснюється появою структурних змін у ґрунті при спробі отримати щільність, яка перевищує деяку величину для даного ґрунту при певному рівні його зволоження.

Питання впливу щільності на капілярне підняття також вивчалось рядом вчених [51, 72, 91, 100, 153, 157, 161]. Загальний результат їх досліджень зводиться до того, що підвищення щільності ґрунту при заданій вологості його уповільнює підняття капілярної вологи аж до практичного припинення руху води в цій формі.

Від щільності глинистого ґрунту залежить і його водопроникність. А, як відомо, наявність в ґрунті вологи чи при її швидкому поглинанні ґрунтом (наприклад під час танення снігу), може призводити до його додаткового осідання, а також до збільшення об'єму з настанням морозів. При зростанні щільності глинистого ґрунту його водопроникність може бути суттєво знижена.

Здатність глинистого ґрунту вбирати воду в залежності від щільності вивчалась В.І. Рувінським [91], який показав, що зростання щільності ґрунту призводить до зниження його водопоглинаючої здатності.

Залежність величини здимання глинистого ґрунту при промерзанні від його щільності детально вивчалась фахівцями з проблем регулювання водно-теплогового режиму ЗП [43, 69, 91, 100, 112, 125, 139, 141, 145, 153]. Ними, зокрема, встановлена така загальна закономірність: підвищення щільності ґрунту призводить у цілому до зменшення його значення морозного здимання внаслідок міграції вологи в промерзаючому ґрунті, тобто зменшенню ступеню розущільнення ґрунту при промерзанні-відтаванні. Разом із тим відмічається, що величина розущільнення при морозному здиманні залежить від вихідної (початкової) щільності ґрунту, причому ця залежність може мати екстремум при деякій щільності [91, 100, 139, 141].

Також щільність скелету глинистого ґрунту та його зв'язність, які знаходяться в прямо пропорційній залежності, впливають на трудомісткість його розробки.

Аналізом у розділі 1 встановлено, що глинисті породи майже завжди містять зв'язану воду. Якщо в них присутня лише адсорбційна волога, то вони являють собою досить міцні породи твердої консистенції. При наявності в них осмотичної та капілярної води глинисті ґрунти набувають властивість пластичності, податливості, липкості, капілярної зв'язності, легко деформуються та, внаслідок зволоження, втрачають частину своєї міцності. При наявності в глинах вільної води вони набувають властивості текучості та подеколи проявляють себе як рідкоподібні тіла [19, 49, 112, 141, 145].

Великий вплив зв'язана вода чинить на процеси тепломасопереносу в породах. Оскільки вона міцно утримується в тонких порах і мікротріщинах та має підвищену в'язкість, «зрушити» цю воду надзвичайно важко. Вона не піддається звичайним законам фільтрації, яка здійснюється під впливом гідродинамічного напору. Для того щоб «зрушити» цю воду, втягнути її у фільтраційний потік, необхідно подолати її «опір», при цьому фільтрація

починається лише після перевищення напором, так званого, «початкового градієнта фільтрації» [60, 80, 125, 156]. Тому глини та важкі пілуваті суглинки є зазвичай водотривким шаром, який не пропускає ґрунтові води чи фільтрують крізь себе воду дуже повільно. Роль зв'язаної води в подібних глинистих екранах ще до кінця не вивчена.

Як було зазначено в першому розділі, вміст у ґрунті всієї зв'язаної води характеризується величиною максимальної молекулярної вологості. Цей параметр є вузловою точкою зміни фізичних властивостей і поведінки ґрунту. Так глинистий ґрунт при цій вологості переходить з пластичного стану в твердий; при вологості вище молекулярної зразок глинистого ґрунту у воді не розмокає, а при меншій вологості розмокає дуже швидко; деформації від постійного навантаження істотно зростають, якщо вологість глинистої маси перевищує молекулярну вологості, і т. ін. [6, 19, 79, 134, 139, 141, 153].

Визначення максимальної молекулярної вологості дає, на думку, А.Ф. Лебедева [60, 61] новий спосіб для характеристики ґрунтів за їхнім механічним складом. Проте, максимальна молекулярна вологості не дає уявлення про кількісне співвідношення різних фракцій механічних елементів ґрунту.

Як вже було відзначено в розділі 1, стійкість ЗП значною мірою залежить від вологості ґрунту. Зволожений ґрунт втрачає в'язкість, що може призвести до деформації ЗП і руйнування дорожнього покриття. Щоб запобігти цьому, слід забезпечити належні умови відведення води від ЗП та його осушення. Цим вимогам найкраще відповідає насип, з якого швидко, не проникаючи в ґрунт ЗП, стікає вода, яка попадає на дорожнє полотно зверху під час дощу [117, 127, 142, 149].

При достатній висоті насипу в верхній шар ґрунту ЗП, на якому лежить дорожній одяг, не попадає і ґрунтова вода. Отже, щоб запобігти попаданню води в ґрунт ЗП треба, щоб висота насипу була не менша певної величини. Висота насипу (висота піднесення брівки над поверхнею землі), яка є

достатньою для того, щоб не допустити перезволоження ґрунту ЗП, називається рекомендованою чи ведучою робочою відміткою [46, 55, 59, 71, 101, 112].

Висота насипу має значення також: для захисту дороги від снігових, а в деяких районах і піщаних завалів. Встановлено, що найбільше наносяться снігом неглибокі виїмки (глибиною до 200 см), нульові місця та невисокі насипи висотою 40 – 60 см [46, 102].

Підсилення структурних зв'язків ґрунтів із плином часу найбільш характерне саме для зв'язних ґрунтів. Вплив часу на величину структурної міцності при стисканні досліджено М.Н. Гольдштейном [22]. Пасті глинистих ґрунтів укладали в кільця компресійних приладів, поміщали в закриті судини та витримували впродовж значного часу, після чого проводили компресійні випробування. Виявлено, що після чотирьохмісячного відпочинку стисливість ґрунту різко зменшувалась у діапазоні тисків до 0,25 МПа. Після відпочинку впродовж шести місяців (з частковим осіданням) структурна міцність стиску склала 0,50 МПа. Таким чином, із часом «відпочинку» в пасті виникли зв'язки тиксотропного характеру, які порушувались при деформаціях і знову відновлювались після нетривалого часу [22, 117].

У механіці ґрунтів закономірності протікання деформацій ґрунту в часі називають реологічними властивостями [38, 52, 71, 73, 80, 103, 112, 142, 156, 157, 166], які проявляються у вигляді повзучості, релаксації та зниження міцності при тривалій дії навантажень [73]. Сучасні положення реології ґрунтів розробили В.М. Бронін, А.Я. Будін, С.С. Вялов, О.Л. Гольдін, М.Н. Гольдштейн, Ю.К. Зарецький, М.М. Маслов, С.Р. Месчян, П.А. Ребіндер та ін. У ПолтНТУ, наприклад, під керівництвом проф. М.Л. Зоценка була захищена дисертація «Напружено-деформований стан армованих за бурозмішувальною технологією слабких глинистих основ з урахуванням чиннику часу», у якій було досліджено проблеми визначення геотехнічних властивостей ґрунтоцементу та армованих ним основ з

урахуванням чиннику часу, описано реологічні властивості й враховано чинник часу в моделях природних і штучних основ фундаментів та методики їх реалізації при проектуванні [76].

Отже, для дослідження впливу вищеописаних факторів сплановано одночинниковий фізичний лабораторний експеримент.

2.2 Лабораторні дослідження індикаційних показників дослідних глинистих ґрунтів

В одночинниковому фізичному експерименті використано характерні для зведення ущільненого ЗП два види глинистих ґрунтів – суглинок важкий пілуватий і суглинок легкий пілуватий. Обидва види дослідних ґрунтів було відібрано (рис. 2.1, а) з шурфів і траншей з глибин 3 – 4 м у межах Полтавського лесового плато. В лабораторії їх зберігали в поліетиленових мішках [28].

На підготовчому етапі експериментальної роботи за ДСТУ Б В.2.1-17: 2009 [32] було визначено природну вологість дослідних ґрунтів, а також їх вологість на межі текучості та розкочування у вигляді таблиць 2.1 – 2.3.

Назву дослідних глинистих ґрунтів було встановлено шляхом стандартних [29, 32] лабораторних досліджень фізичних властивостей ґрунту (рис. 2.2). Їх індикаційні показники подано в п. 2.3.

Масу води та твердих частинок ґрунту визначали стандартним методом висушування при температурі 105°C у сушильній шафі (рис. 2.2, а).

Обидва дослідні ґрунти мають лесове походження, що також дуже характерно для зведення ЗП в умовах України, адже приблизно 70 – 75% її території вкрито саме такими осадовими породами [38].



Рис. 2.1 Відбирання та зберігання дослідного суглинку: а – відбирання дослідного суглинку з траншеї; б – зберігання дослідного суглинку в лабораторії ПолтНТУ

Таблиця 2.1

Визначення природної вологості та вологості на межі текучості й розкочування суглинку важкого пилуватого (дослідний ґрунт №1)

Вологість	№ бюкс, г	Маса бюкс, г	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом, г		Маса ґрунту, г		Вологість
			вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8
$W_{\text{прир.}}$	14	17,30	45,19	41,22	27,89	23,92	0,166
$W_{\text{прир.}}$	10	17,58	48,09	44,85	30,51	27,27	0,119
$W_{\text{прир.}}$	15	17,65	50,30	47,13	32,65	29,48	0,108
W_L	8	17,15	43,14	36,35	25,99	19,20	0,354
W_p	17	16,81	32,10	29,64	15,29	12,83	0,192

Таблиця 2.2

**Визначення природної вологості суглинку легкого пілуватого
(дослідний ґрунт №2)**

№ виробки	№ зразка	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом, г		Маса ґрунту, г		Вологість	Середня вологість ґрунту в мішку	Загальна середня вологість ґрунту
				вологим	сухим	вологого	сухого			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Wпр.верх	1	17	16,81	43,02	39,79	26,21	22,98	0,140	0,131	0,132
Wпр.сер.		13	17,10	40,40	37,69	23,30	20,59	0,132		
Wпр.низ		18	16,60	41,58	38,91	24,98	22,31	0,120		
Wпр.верх	2	14	17,30	38,05	35,66	20,75	18,36	0,130	0,134	
Wпр.сер.		15	17,65	41,89	38,98	24,24	21,33	0,136		
Wпр.низ		20	17,55	40,00	37,32	22,45	19,77	0,136		
Wпр.верх	3	2	17,26	41,08	38,36	23,82	21,10	0,129	0,128	
Wпр.сер.		12	17,11	42,62	39,65	25,51	22,54	0,132		
Wпр.низ		5	17,52	42,44	39,69	24,92	22,17	0,124		
Wпр.верх	4	1	17,61	42,24	39,31	24,63	21,70	0,135	0,136	
Wпр.сер.		19	17,11	42,51	39,40	25,40	22,29	0,140		
Wпр.низ		11	17,17	43,60	40,51	26,43	23,34	0,132		

Отже, в результаті стандартних лабораторних досліджень фізичних властивостей глинистих ґрунтів було встановлено, що дослідний ґрунт №1 – суглинок важкий пілуватий, а дослідний ґрунт №2 – суглинок легкий пілуватий.

Довідка за результатами метрологічного забезпечення лабораторних досліджень ґрунтів подана в Додатку Д.

Таким чином, для лабораторних досліджень закономірностей міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів маємо два дослідні глинисті ґрунти лесового генезису – суглинок важкий пілуватий

твердий та суглинок легкий пілуватий, які є характерним матеріалом для зведення пошаровим укочуванням дорожніх насипів.

Таблиця 2.3

Визначення вологості на межі текучості й розкочування суглинку легкого пілуватого (дослідний ґрунт №2)

Показник	№ Зразка	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець), г	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом, г		Маса ґрунту, г		Вологість	Середнє W_L	Середнє W_p	Число пластичності, I_p , %	Середнє число пластичності, I_p , %
				вологим	сухим	вологого	сухого					
1	2	3	4	5	6	7	8	10	11	12	13	14
W_L	1	2	17,26	33,7	30,09	16,46	12,8	0,283	0,279	0,191	9,0	8,75
W_p		12	17,11	30,4	28,32	13,33	11,2	0,189				
W_L	2	20	17,55	35,4	31,56	17,93	14,0	0,280				
W_p		15	17,65	26,4	25,03	8,79	7,38	0,191				
W_L	3	5	17,52	35,02	31,18	17,50	13,6	0,281				
W_p		18	16,60	24,2	23,02	7,64	6,42	0,190				
W_L	4	19	17,11	31,9	28,76	14,80	11,5	0,270				
W_p		1	17,61	29,6	27,71	12,05	10,1	0,193				



а



б



в

Рис. 2.2 Обладнання для визначення фізичних властивостей глинистого ґрунту
а – сушильна шафа; б – технічні ваги; в – конус А.М. Васильєва для визначення вологості на межі текучості глинистого ґрунту

2.3 Методика проведення лабораторних досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів

Протягом жовтня 2013 – грудня 2015 рр. досліджувалась закономірність міграції води за висотою дорожнього насипу у часі в глинистому ґрунті, вміщеному в пластмасові труби (тобто, імітується пошарово ущільнений глинистий ґрунт дорожнього насипу) [11, 12, 173].

Вид і стан дослідного ґрунту – є змінним параметром.

У лабораторному дослідженні №1 використано суглинок лесовий, важкий пілуватий, твердий з наступними індикаційними характеристиками:

- природна (початкова) вологість $w_0 = 0,131$;
- вологість на межі текучості $W_L = 0,354$;
- вологість на межі розкочування $W_p = 0,192$;
- число пластичності $I_p = 0,162$.

У лабораторному дослідженні №2 використано суглинок лесовий, легкий пілуватий, твердий з наступними індикаційними характеристиками:

- природна (початкова) вологість $w_0 = 0,132$;
- вологість на межі текучості $W_L = 0,279$;
- вологість на межі розкочування $W_p = 0,191$;
- число пластичності $I_p = 0,08$.

Щільність скелету ґрунту приймали за змінний чинник, а початкове значення коефіцієнта водонасичення ущільнених глинистих ґрунтів в усіх дослідях доводили до $S_r = 0,85$.

Відповідно вологість ґрунту в кожному досліді мала змінне значення, а саме при:

- щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3 - w = 0,250$;
- $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3 - w = 0,231$;
- $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3 - w = 0,214$;
- $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3 - w = 0,198$.

Для реалізації роботи, зокрема, використано: ваги; пульверизатор ручний; 40 ланок пластмасових труб розміром 50 мм (зовнішній діаметр) \times 150 мм (довжина кожної ланки); металева стійка; лоток для дренажу; ручна трамбівка; шпатель (рис. 2.3, а – в). Внутрішній діаметр труб склав 46,4 мм. Його приймали в розрахунках вихідної маси ґрунту для заповнення певного об'єму труб.

Заповнення ґрунтом труб здійснювали послідовно на висоту по 3 см. Задаючись щільністю скелету ґрунту та його вологістю, розраховували для відповідного об'єму масу ґрунту природної вологості ($w_0 = 0,132$) й масу води, яку слід до неї додати, щоб отримати задану вологість w при якій коефіцієнт водонасичення ґрунту складав $S_r = 0,85$.

Відібрано й зважено для чотирьох варіантів відповідні маси ґрунту (рис. 2.3, а).

Його зволожували до заданої вологості w за допомогою пульверизатора (рис. 2.3, б) та перемішували шпателем для рівномірного зволоження порції дослідного ґрунту (рис. 2.3, в).

Потім порціями його подавали в труби й рівномірно ущільнювали трамбівкою з відповідними позначками за її висотою (рис. 2.3, г, рис. 2.4, а) кожного разу до товщини 30 мм, після чого ланки труби (по 150 мм) з'єднували до загальної висоти 1,5 м (рис. 2.3, д).

Ці труби з пошарово ущільненим ґрунтом встановлювали на металеву стійку (рис. 2.4, б, в, г).

Нижні кінці всіх труб заводили у дренажний лоток, заповнений щебенем фракції 0 – 5 мм (гранвідсівом). Таким чином, вільна (незв'язана) вода мала можливість міграції за всією висотою ґрунту в трубі, що імітувало її міграцію у межах висоти дорожнього насипу.

Зверху всі пластмасові труби з пошарово ущільненим глинистим ґрунтом герметично закривали для запобігання випаровуванню води «вгору» [11, 12, 173].



Рис. 2.3 Етапи проведення лабораторних досліджень вологісного режиму ущільненого суглинку дорожнього насипу:

а – зважування певної порції дослідного ґрунту; б – дозволоження порції глинистого ґрунту до заданої величини w ; в – перемішування порції дослідного ґрунту для його рівномірного зволоження; г – пошарове (по 3 см) ущільнення кожної порції суглинку в трубі; д – монтування ланок труб до загальної висоти;



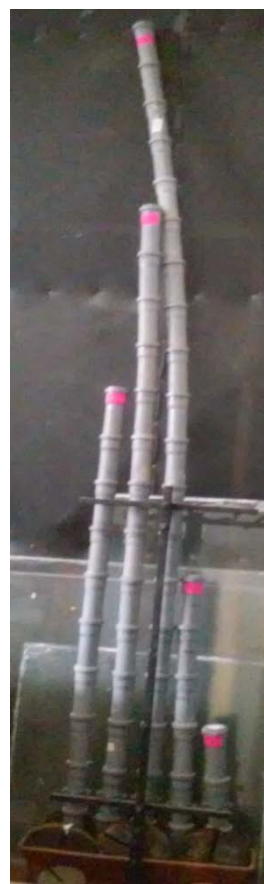
а



б



в



г

Рис. 2.4 Етапи проведення лабораторних досліджень вологісного режиму ущільненого суглинку дорожнього насипу: а – ручна трамбівка для ущільнення ґрунту; б – металева стійка для розташування труб з ущільненим глинистим ґрунтом; в, г – пластмасові труби заповнені ущільненим дослідним ґрунтом

На кожен трубу наклеювали дані щодо вихідної щільності скелету ґрунту ρ_d та його заданої вологості w (рис. 2.5).

Після цього пластмасові труби з пошарово ущільненим суглинком залишали на металевій стійці в спокої, на, так званий, «відпочинок».

Через заданий час «відпочинку» всі труби розбирали на окремі ланки. З кожної ланки відбирали по три зразки ґрунту в бюкси, за якими нормативним методом вагової вологості [31] визначали кінцеву (стабілізовану) вологість ущільненого глинистого ґрунту w_k .



Рис. 2.5 Етапи проведення лабораторних досліджень вологісного режиму ущільненого суглинку дорожнього насипу:

г, д – наклеювання вихідних даних на пластмасові труби щодо вихідної щільності скелету ґрунту ρ_d та його вологості

У першому розділі відзначена пропозиція щодо визначення максимальної кількості зв'язаної води за емпіричним виразом (1.6).

Точні значення максимальної кількості зв'язаної води визначали в лабораторних умовах методом вологомісткого середовища. Експеримент проводився за таким алгоритмом.

Брали 50 – 70 г повітряно-сухого ґрунту, розтирали у ступці, просіювали його крізь сито з розміром отворів 0,5 мм. Ґрунт, що пройшов крізь сито 0,5 мм, замішували у чашці до м'яко-пластичного стану.

На шматок батисту (полотна) клали шаблон – пластину товщиною 2 мм з отвором діаметром 50 мм. Шаблон заповнювали ґрунтовим тістом, надлишок тіста зрізали ножом. Шаблон знімали.

Приготований зразок зверху покривали тканиною, а з обох боків клали пакети фільтрувального паперу (по 20 аркушів). Зверху та знизу розміщували жорсткі пластинки, зразок установлювали під гідравлічний прес і доводили тиск до 6,5 МПа, який витримували протягом 10 хв [14, 15].

Після пресування зразок розбирали та визначали вологість, як і в попередньому методі «відпочинку» ґрунту в трубі.

Для реалізації даного експерименту був використаний той же ґрунт, що і в попередніх дослідах. Зокрема, було відібрано по 5 зразків суглинку важкого та легкого пілуватого.

Результати визначення максимальної молекулярної вологості (максимальної кількості зв'язаної води) суглинку важкого та легкого пілуватого представлені у вигляді таблиць 2.4 і 2.5.

Таким чином, розроблена та на практиці реалізована нова методика проведення лабораторних досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів шляхом досліджень змін у часі вологості суглинків, ущільнених за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ при щільності скелету ґрунту 1,50 – 1,65 г/см³, вміщеного в пластмасові труби. Змінними чинниками в лабораторному дослідженні були: вид ґрунту – суглинок важкий пілуватий і суглинок легкий пілуватий; висота труби – від 0,45 м до 2,85 м; час, так званого «відпочинку» насипу, – від 60 – 180 діб.

Таблиця 2.4

**Значення величин максимальної кількості зв'язаної води
дослідного ґрунту №1**

Число пластичності глинистого ґрунту, I_p	Максимальна кількість зв'язаної води ґрунту, w_k	Середнє значення максимальної кількості зв'язаної води ґрунту, w_k	Коефіцієнт варіації значень w_k , ν
0,162	0,169	0,160	0,040
	0,164		
	0,161		
	0,157		
	0,150		

Таблиця 2.5

**Значення величин максимальної кількості зв'язаної води
дослідного ґрунту №2**

Число пластичності глинистого ґрунту, I_p	Максимальна кількість зв'язаної води ґрунту, w_k	Середнє значення максимальної кількості зв'язаної води ґрунту, w_k	Коефіцієнт варіації значень w_k , ν
0,080	0,144	0,135	0,045
	0,140		
	0,134		
	0,131		
	0,127		

Значення кінцевої вологості (максимальної кількості зв'язаної води) за новою методикою суттєво не відрізняються від величин, отриманих за добре апробованим методом вологомісткого середовища, зокрема розбіжність середніх величин максимальної молекулярної вологоємності по методиці «відпочинку» ґрунту в трубі, порівняно з існуючим методом, не перевищувала 5%.

Розроблена автором і д.т.н., проф. Винниковим Ю.Л. та к.т.н., доц. Коваленком В.І. нова методика із визначення максимальної кількості зв'язаної води глинистих ґрунтів у складі дорожнього насипу апробована ТОВ «РСУ – 8» при капітальному ремонті проїзної частини по вул. Промислова (від вул. Гурамішвілі до буд. № 10) в м. Карлівка Полтавської області. Довідка про апробацію даної методики подана в Додатку В.

2.4 Результати впливу окремих чинників на параметри міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів

Для визначення параметрів тривалої міцності глинистого ґрунту в дослідях використано:

– суглинок важкий пілуватий твердий з такими індикаційними характеристиками: природна вологість ґрунту $w_0 = 0,131$; вологість на межі текучості $W_L = 0,354$; вологість на межі розкочування $W_p = 0,192$; число пластичності $I_p = 0,162$;

– суглинок легкий пілуватий з такими індикаційними характеристиками: природна вологість ґрунту $w_0 = 0,132$; вологість на межі текучості $W_L = 0,279$; вологість на межі розкочування $W_p = 0,191$; число пластичності $I_p = 0,08$.

В якості першого змінного чинника прийнято щільність скелету ґрунту (чи коефіцієнт пористості e) (табл. 2.6 і 2.7).

При цьому в обох дослідах початкове значення коефіцієнта водонасичення ґрунту доводилось до постійної величини $S_r = 0,85$ (див. табл. 2.6 і 2.7).

Таблиця 2.6

Вихідні дані для проведення експерименту із визначення максимальної молекулярної вологомісткості ущільненого суглинку важкого пілуватого

Задана щільність скелету ґрунту, ρ_d , г/см ³	Відповідний коефіцієнт пористості ґрунту, e	Задана вологість ґрунту w (при $S_r = 0,85$)	Маса порції сухого ґрунту, г	Маса порції ґрунту при $w=0,115$	Маса порції ґрунту при заданій вологості w	Відповідна маса порції води, яку слід додати до порції ґрунту
1,50	0,786	0,250	76,095	84,849	95,119	10,273
1,55	0,729	0,231	78,632	87,675	96,796	9,121
1,60	0,675	0,214	81,168	90,502	98,538	8,036
1,65	0,624	0,198	83,705	93,331	100,279	6,948

Відповідно вологість ґрунту в кожному досліді мала змінне значення, а саме:

– при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50$ г/см³ вологість складала $w = 0,250$;

– при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55$ г/см³ вологість складала $w = 0,231$;

– при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60$ г/см³ вологість складала $w = 0,214$;

– при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,65$ г/см³ вологість складала $w = 0,198$.

Таблиця 2.7

Вихідні дані для проведення експерименту із визначення максимальної молекулярної вологомiсткостi ущiльненого суглинку легкого пилуватого

Задана щiльнiсть скелету ґрунту, ρ_d , г/см ³	Вiдповiдний коефiцiєнт пористостi ґрунту, e	Задана вологiсть ґрунту w (при $S_r = 0,85$)	Маса порцiї сухого ґрунту, г	Маса порцiї ґрунту при $w = 0,115$	Маса порцiї ґрунту при заданiй вологостi w	Вiдповiдна маса порцiї води, яку слiд додати до порцiї ґрунту
1,50	0,786	0,250	76,095	86,139	95,119	8,98
1,55	0,729	0,231	78,632	89,011	96,796	7,78
1,60	0,675	0,214	81,168	91,88	98,538	6,65
1,65	0,624	0,198	83,705	94,75	100,279	5,52

2.4.1. Вплив фактору щiльностi скелету ґрунту

Вихiднi данi для побудови графiкiв змiни вологостi ущiльненого суглинку важкого пилуватого твердого та суглинку легкого пилуватого за висотою труби 0,45, 0,9, 1,50, 2,10 та 2,85 м при щiльностi скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65$ г/см³ представлено у виглядi таблиць Додатку А.

Графiк змiни вологостi ущiльненого суглинку важкого пилуватого за висотою труби при щiльностi скелету ґрунту 1,50 г/см³, вологостi $w = 0,250$ пiсля 62 дiб витримки представлено на рис. 2.6. Висота труби в усiх випадках склала 150 см.

Максимальне значення вологостi w згiдно графiку зверху труби склало 0,228, мiнимальне значення вологостi внизу труби склало 0,123, середня вологiсть за висотою труби за виключенням її верхньої та нижньої ланок склала 0,203.

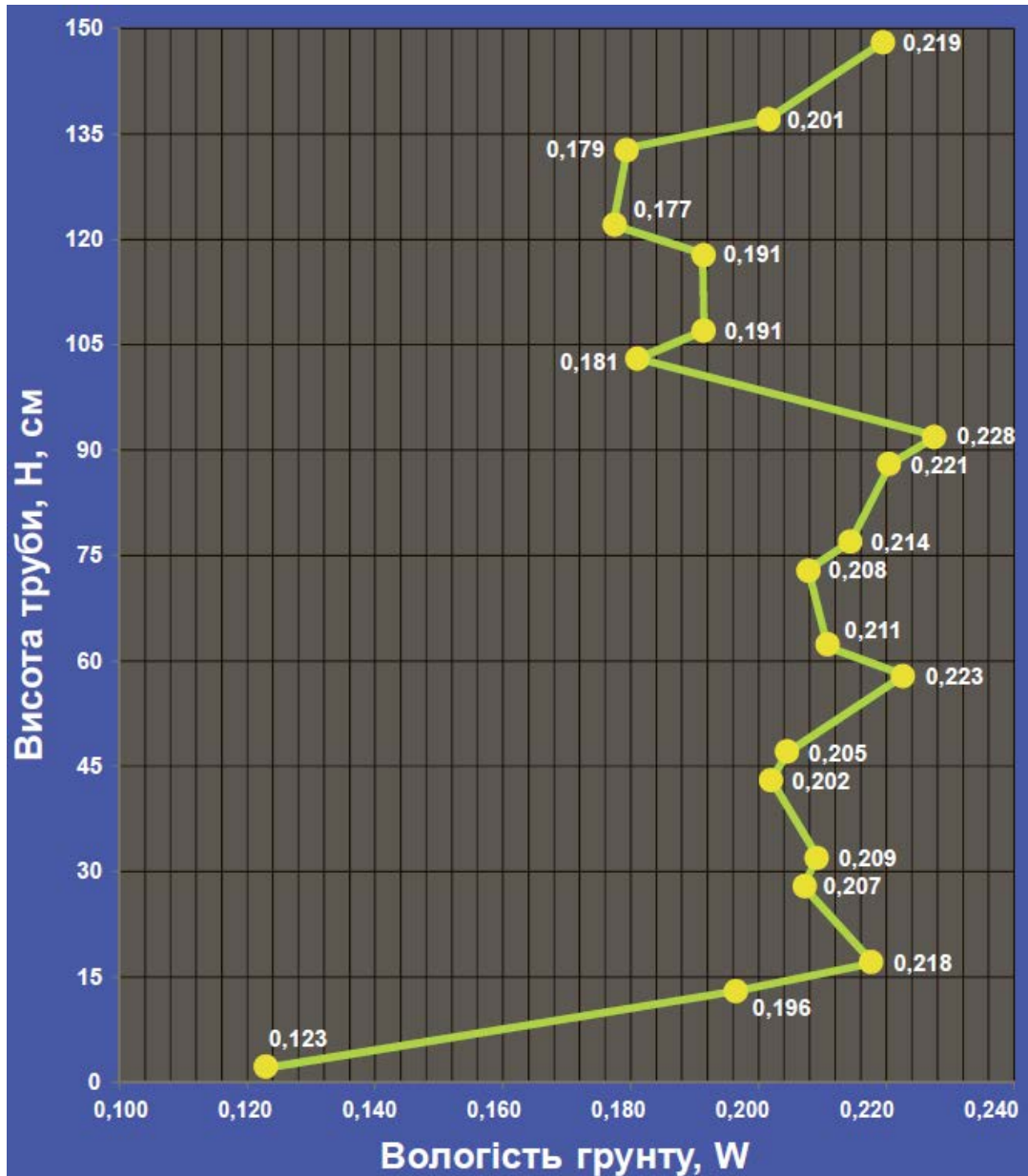


Рис. 2.6 Залежність вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 62 діб витримки представлено на рис. 2.7.

Максимальне значення вологості w згідно графіку зверху труби склало 0,218, мінімальне значення вологості внизу труби склало 0,114, середня вологість за висотою труби за виключенням її верхньої та нижньої ланок склала 0,190.

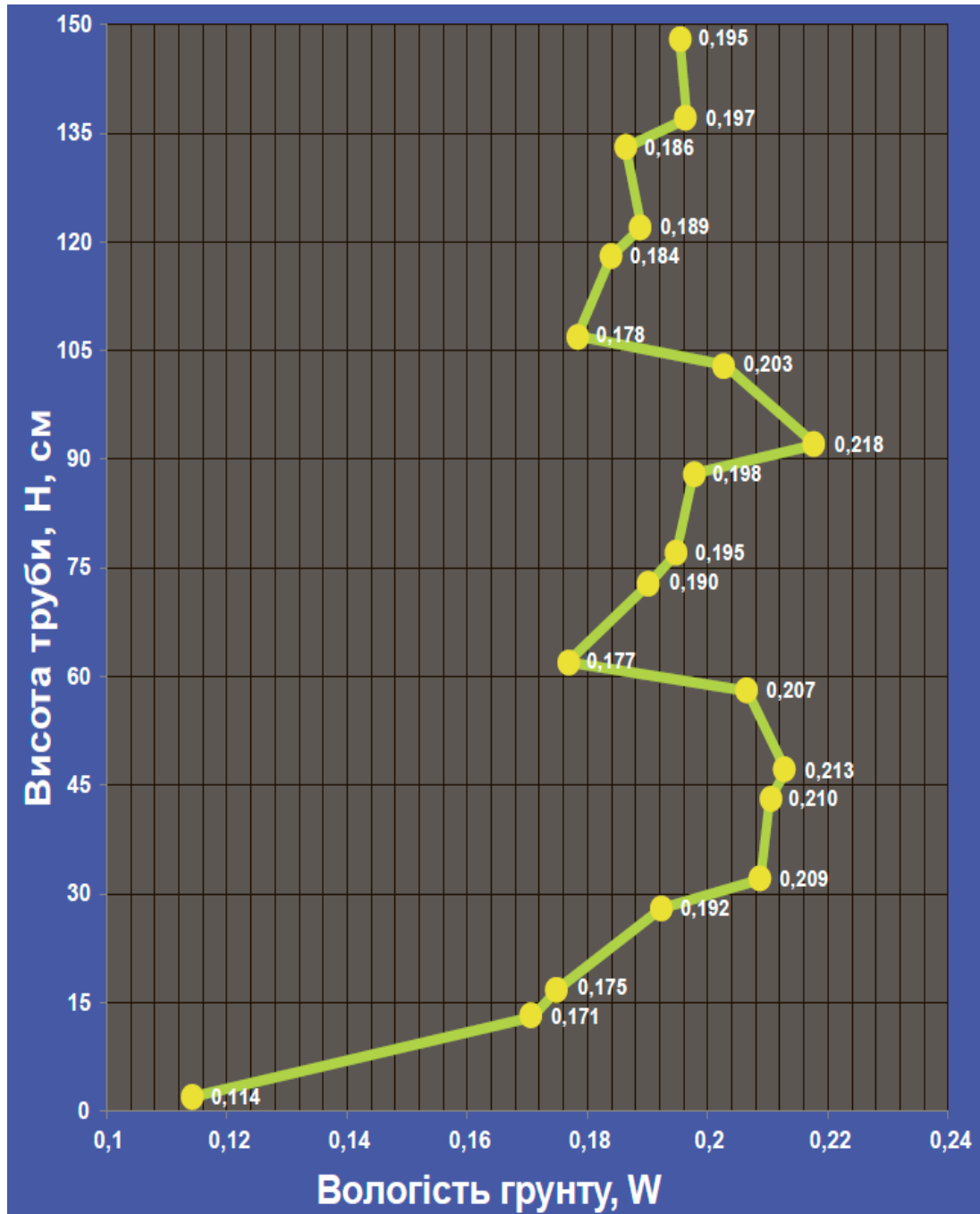


Рис. 2.7 Залежність вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,60 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,214$ після 62 діб витримки представлено на рис. 2.8.

Максимальне значення вологості w згідно графіку зверху труби склало $0,198$, мінімальне значення вологості внизу труби склало $0,109$, середня

вологість за висотою труби за виключенням її верхньої та нижньої ланок склала 0,176.

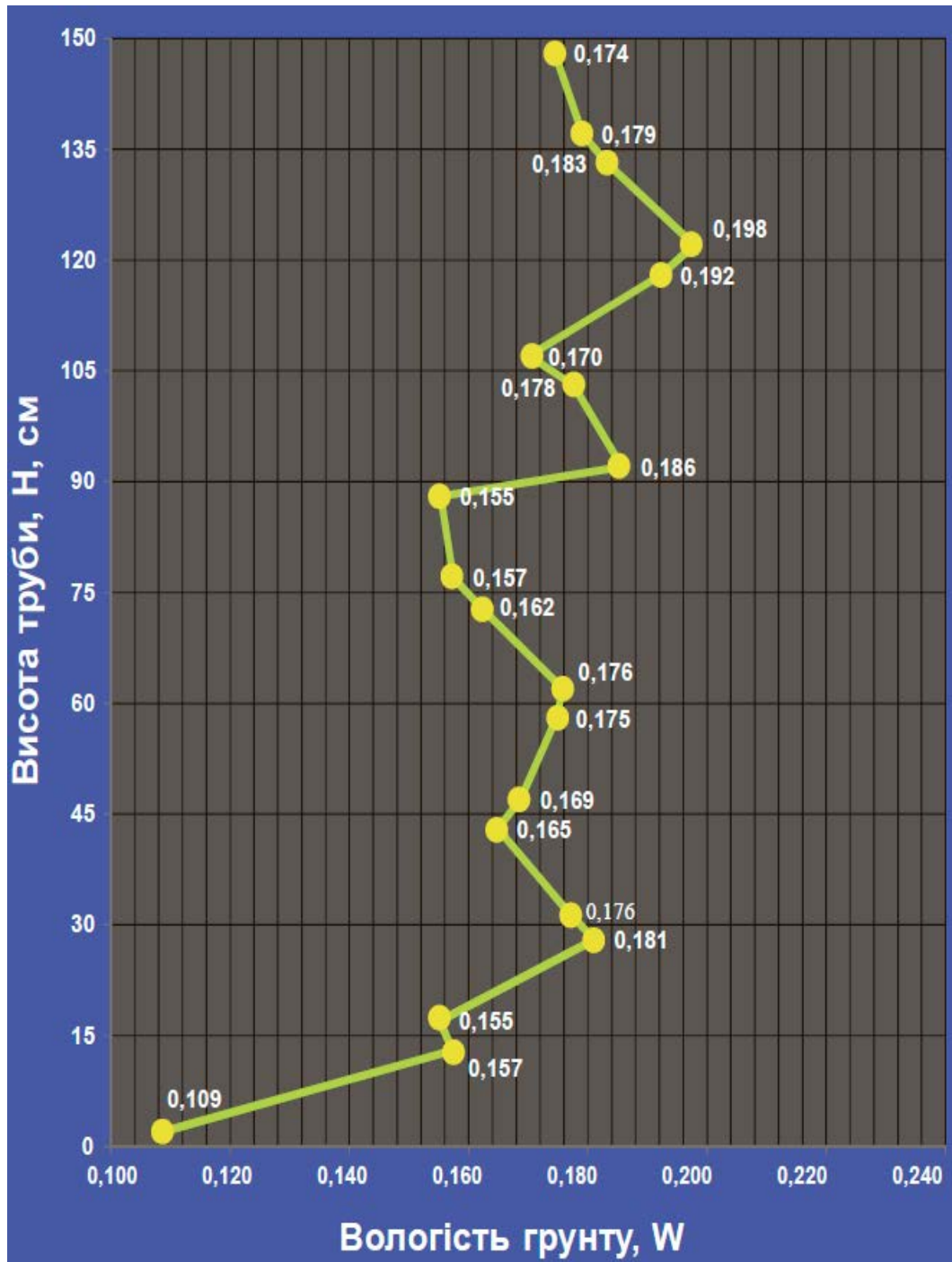


Рис. 2.8 Залежність вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,65 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,198$ після 62 діб витримки представлено на рис. 2.9.

Максимальне значення вологості w згідно графіку склало 0,183, мінімальне значення вологості внизу труби склало 0,099, середня вологість за висотою труби за виключенням її верхньої та нижньої ланок склала 0,167.

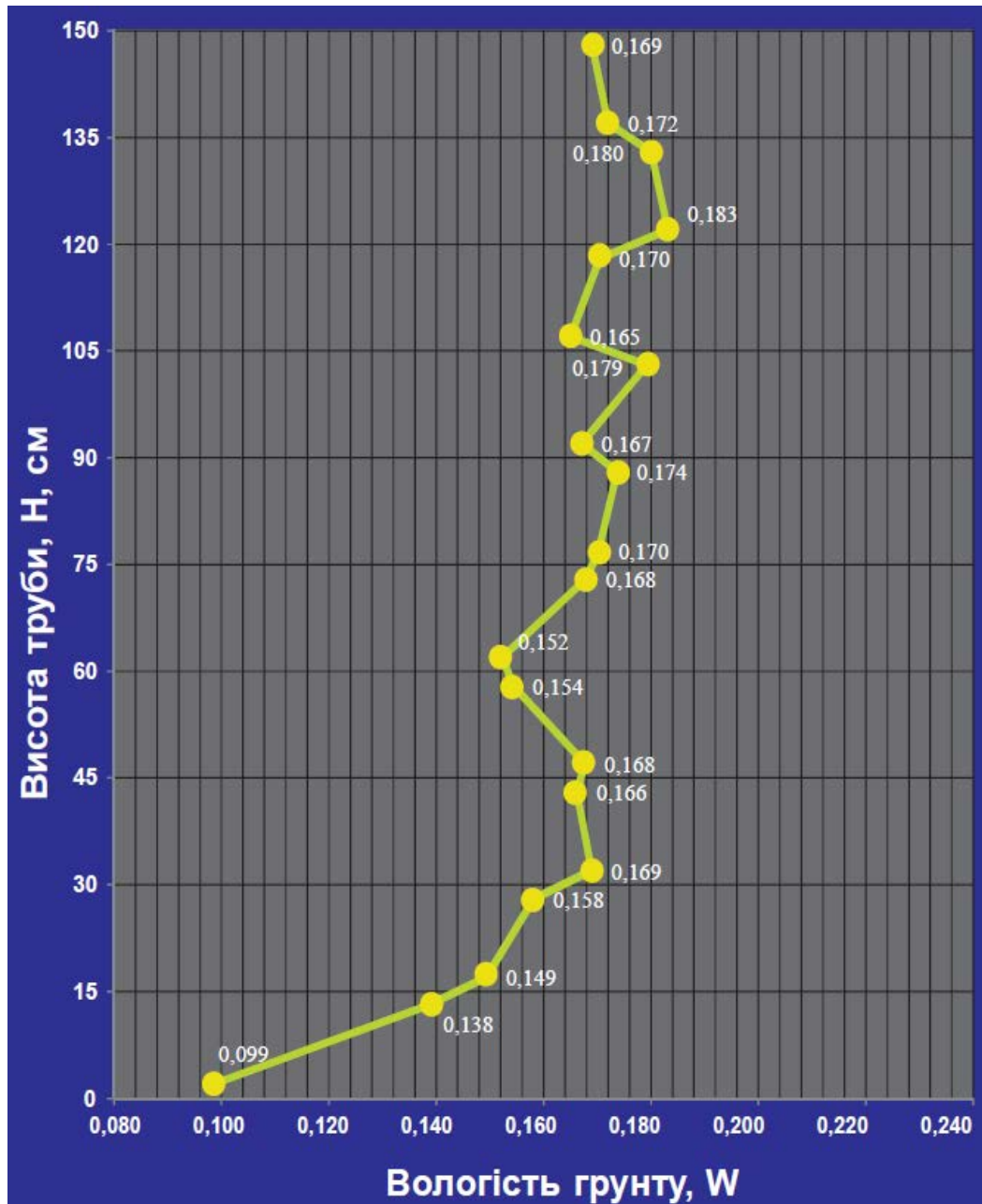


Рис. 2.9 Залежність вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,50 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,250$ після 62 діб витримки представлено на рис. 2.10. Висота труби в усіх випадках склала 150 см.

Максимальне значення вологості w згідно графіку зверху труби склало 0,195, мінімальне значення вологості внизу труби склало 0,120, середня вологість за висотою труби за виключенням її верхньої та нижньої ланок склала 0,162.

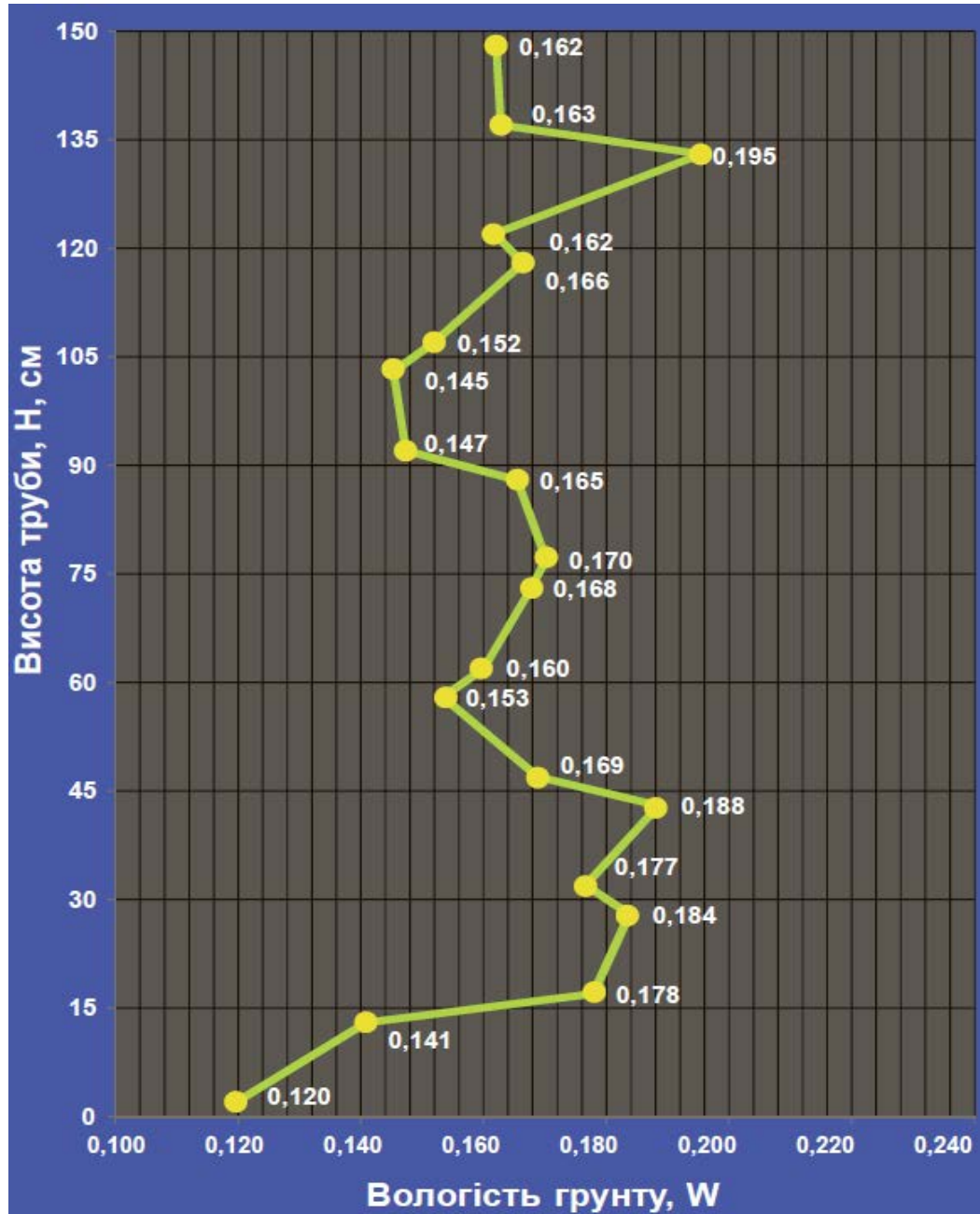


Рис. 2.10 Залежність вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 74 діб витримки представлено на рис. 2.11.

Максимальне значення вологості w згідно графіку зверху труби склало 0,164, мінімальне значення вологості знизу труби склало 0,128, середня вологість за висотою труби за виключенням її верхньої та нижньої ланок склала 0,143.

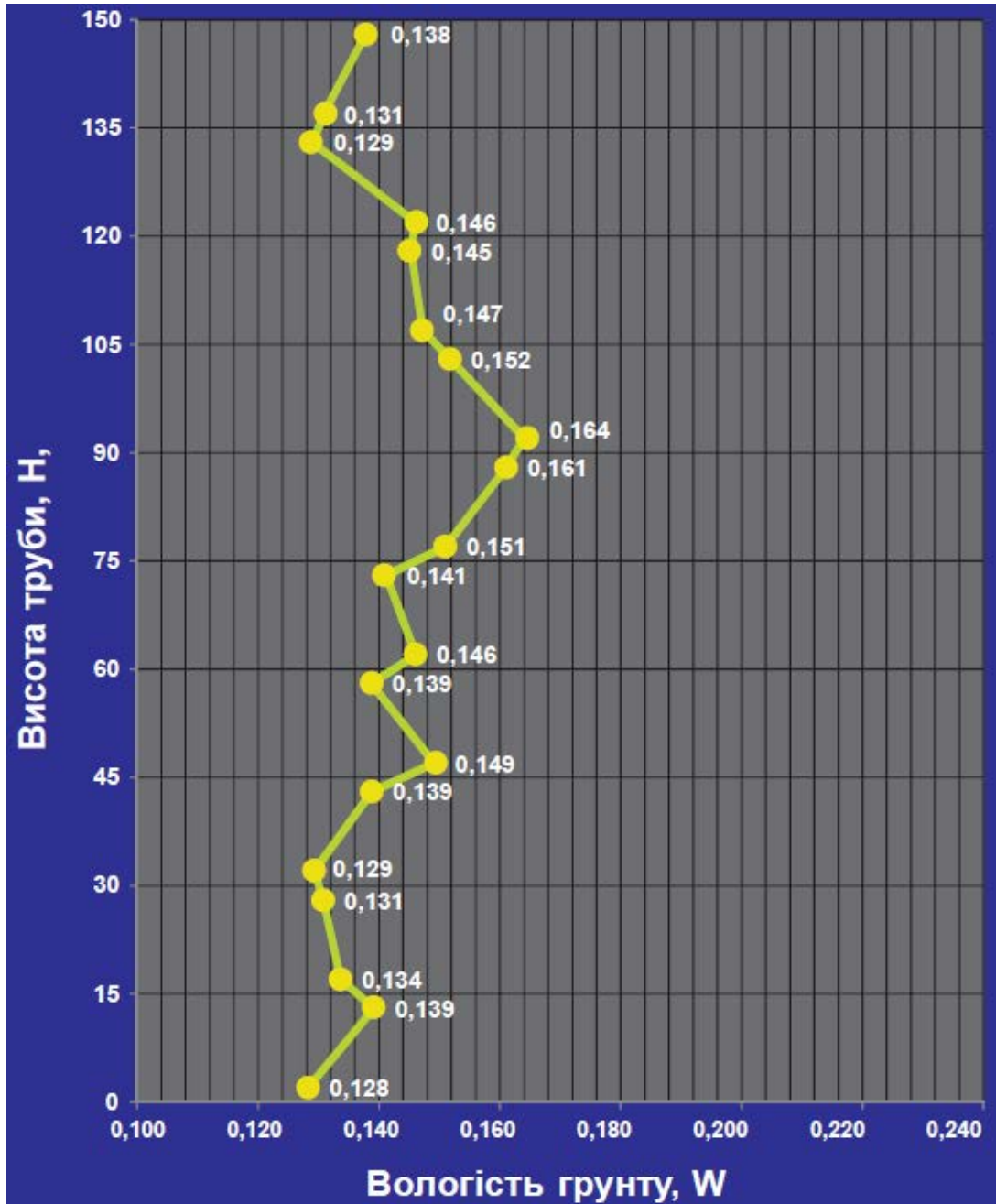


Рис. 2.11 Залежність вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,60 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,214$ після 77 діб витримки представлено на рис. 2.12.

Максимальне значення вологості w згідно графіку зверху труби склало 0,149, мінімальне значення вологості знизу труби склало 0,113, середня вологість за висотою труби за виключенням її верхньої та нижньої ланок склала 0,130.

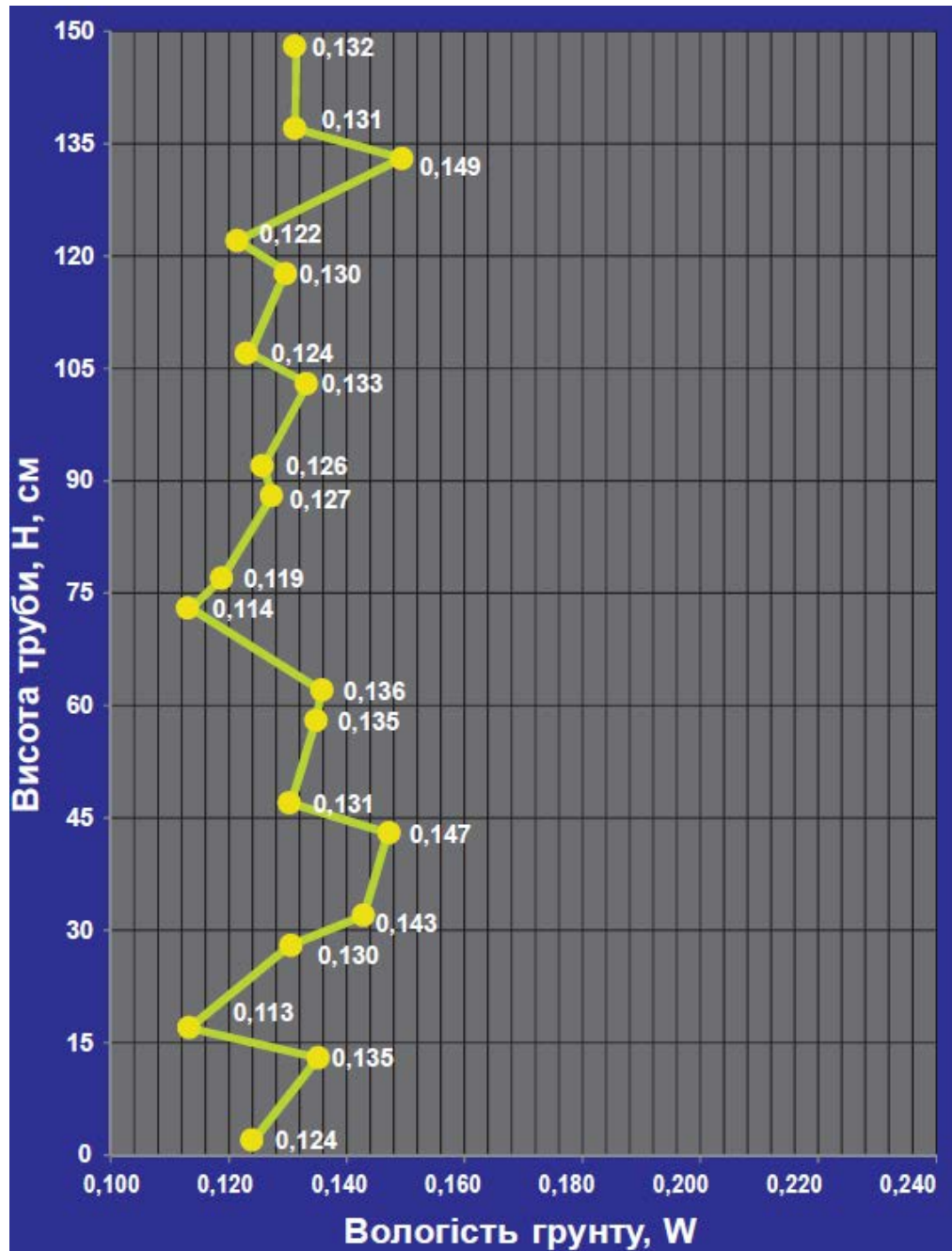


Рис. 2.12 Залежність вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,65 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,198$ після 75 діб витримки представлено на рис. 2.13.

Максимальне значення вологості w згідно графіку зверху труби склало 0,129, мінімальне значення вологості знизу труби склало 0,076, середня вологість за висотою труби за виключенням її верхньої та нижньої ланок склала 0,114.

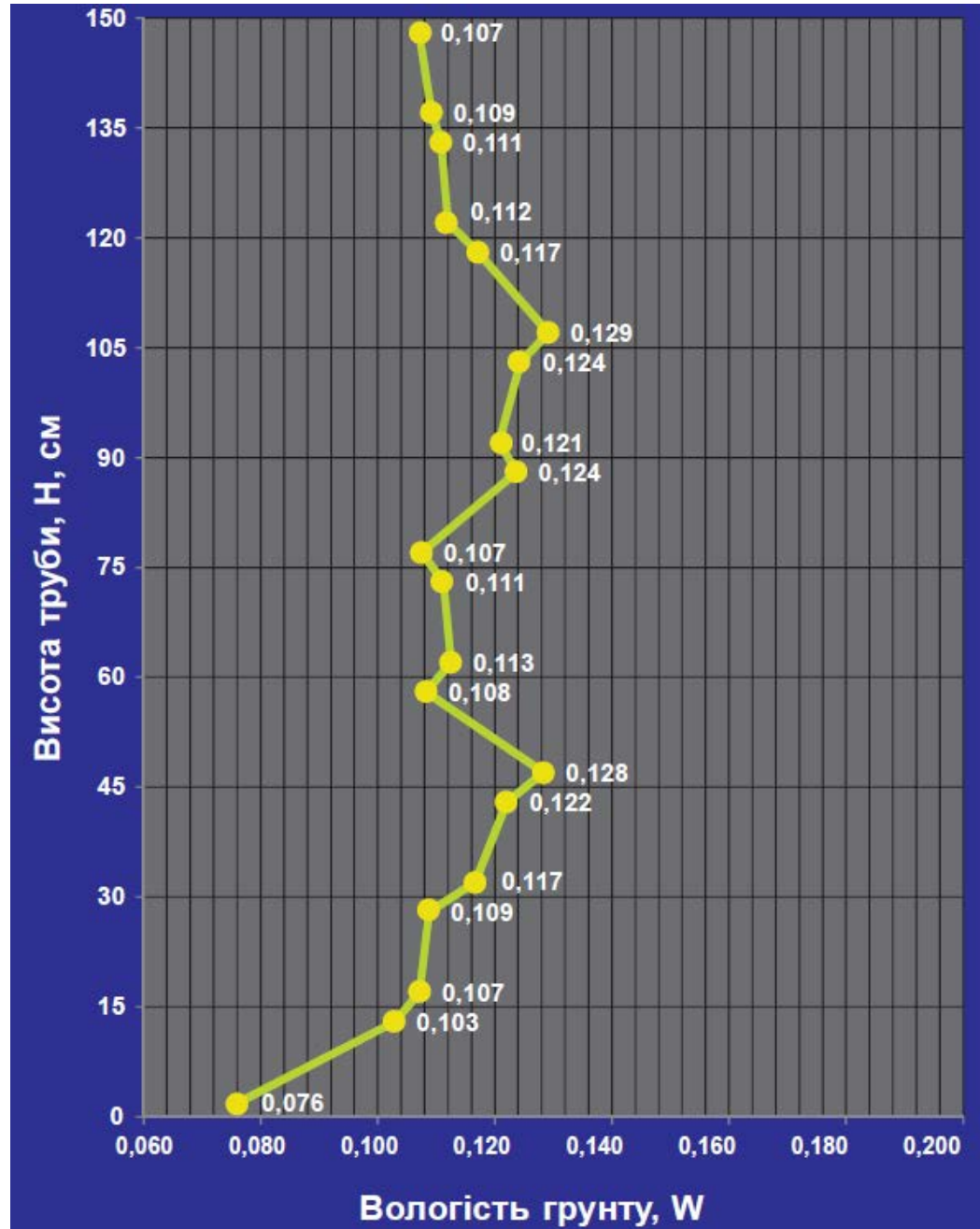


Рис. 2.13 Залежність вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

2.4.2. Вплив фактору висоти насипу

Висота труби у дослідях складала: 45; 90; 150; 210; 285 см.

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 0,45 м при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 59 діб витримки представлено на рис. 2.14.

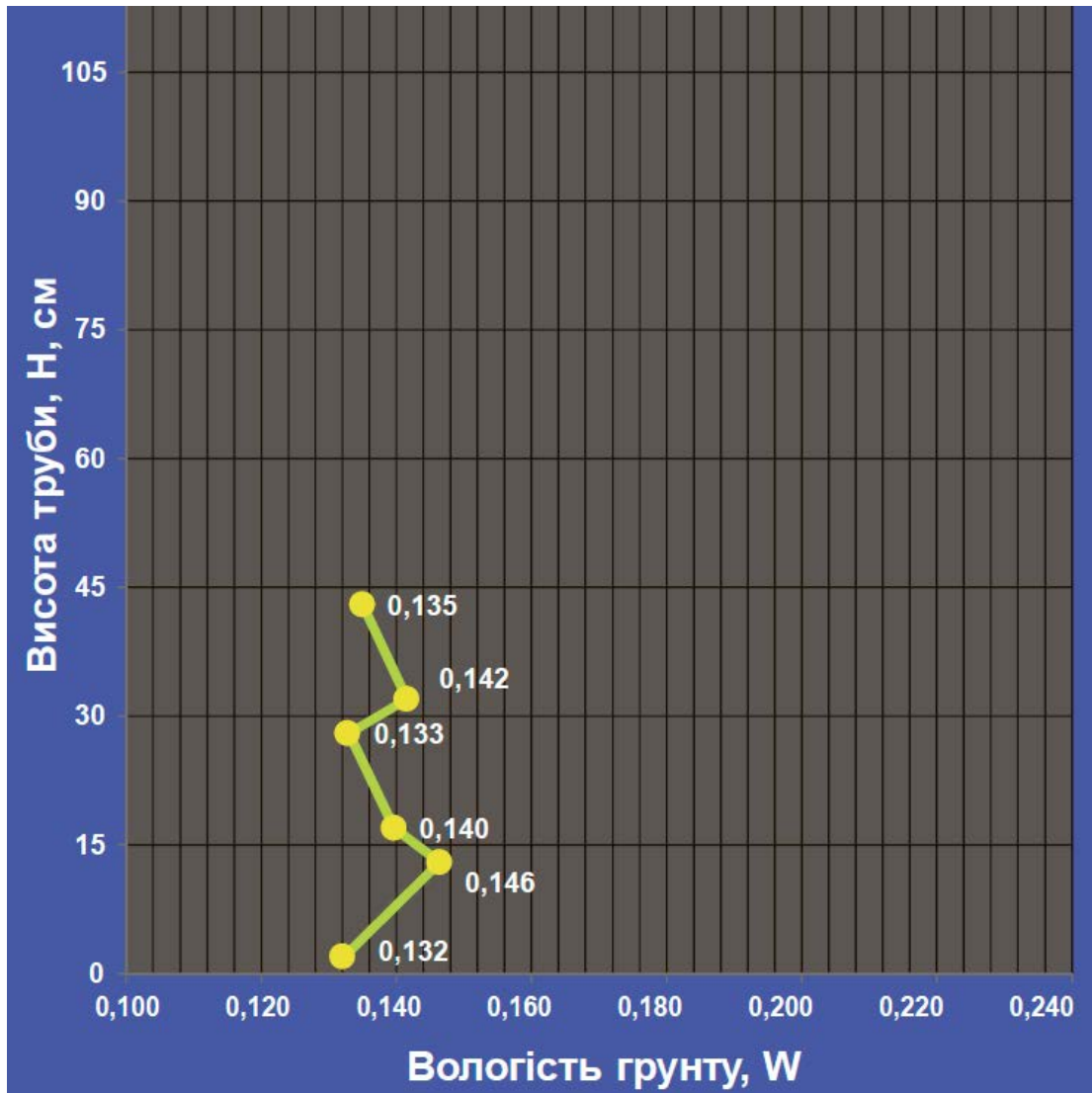


Рис 2.14 Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 45 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 0,9 м при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 59 діб витримки представлено на рис. 2.15.

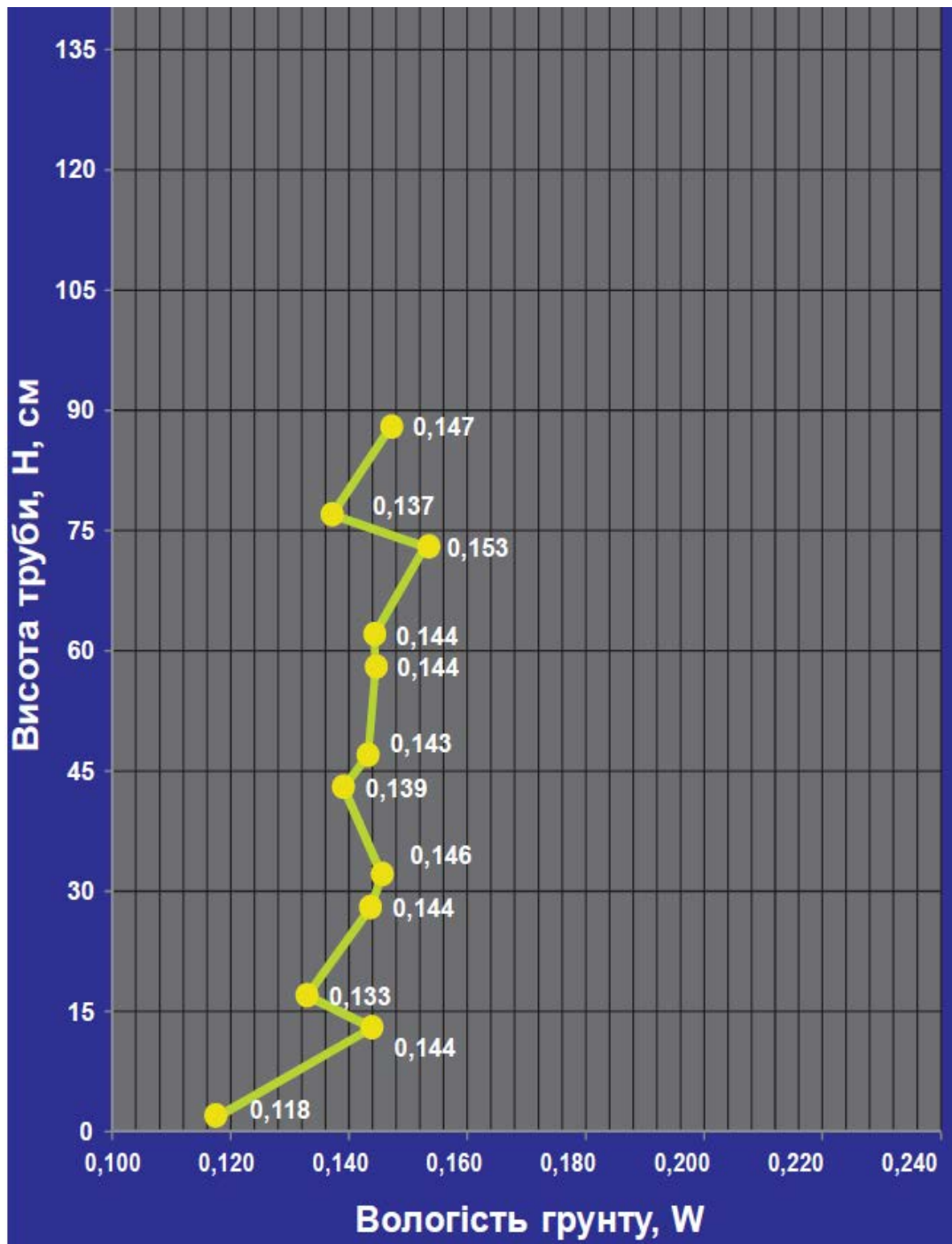


Рис. 2.15 Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 90 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 2,1 м при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 62 діб витримки представлено на рис. 2.16.

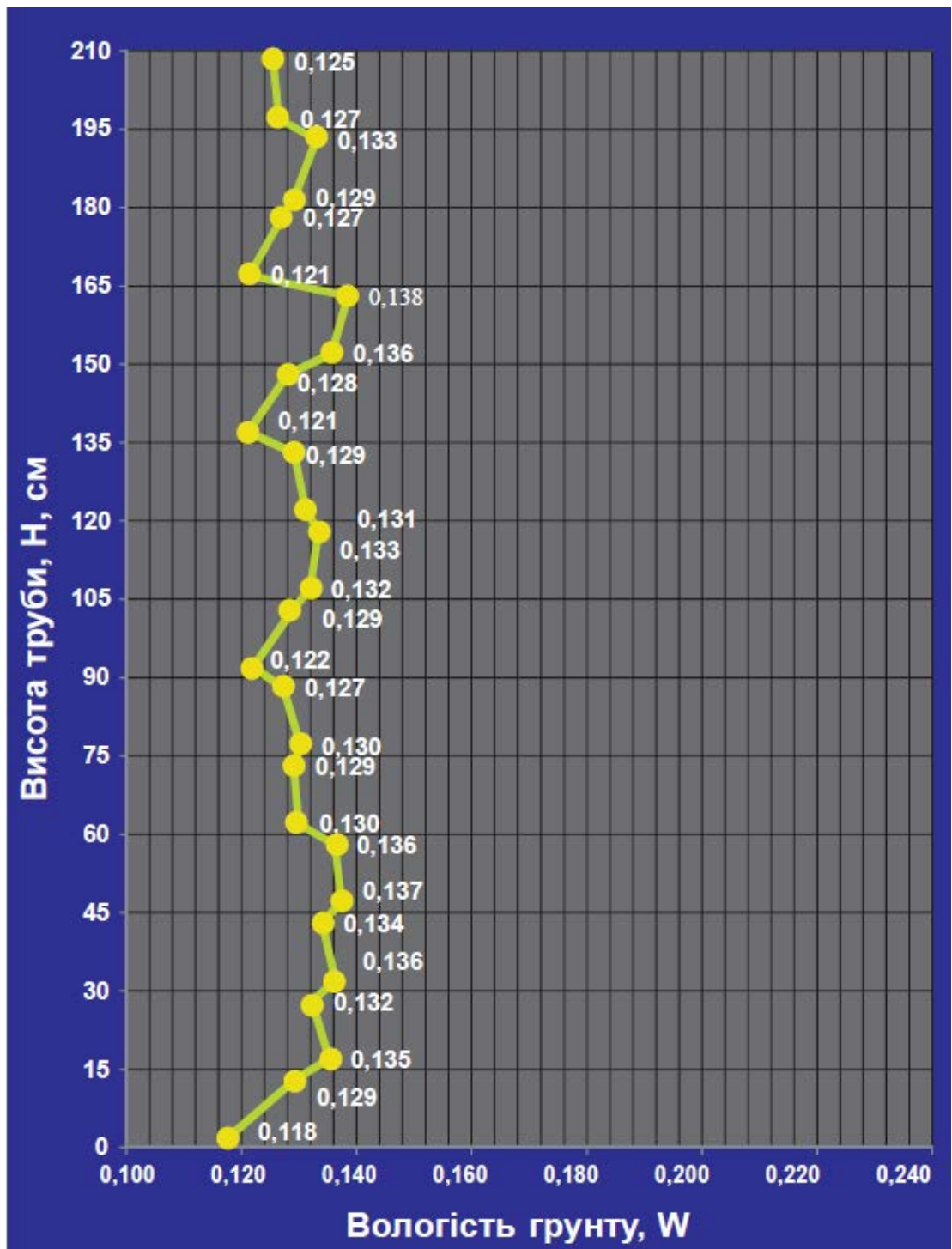


Рис. 2.16 Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 210 см

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 2,85 м при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 66 діб витримки представлено на рис. 2.17.

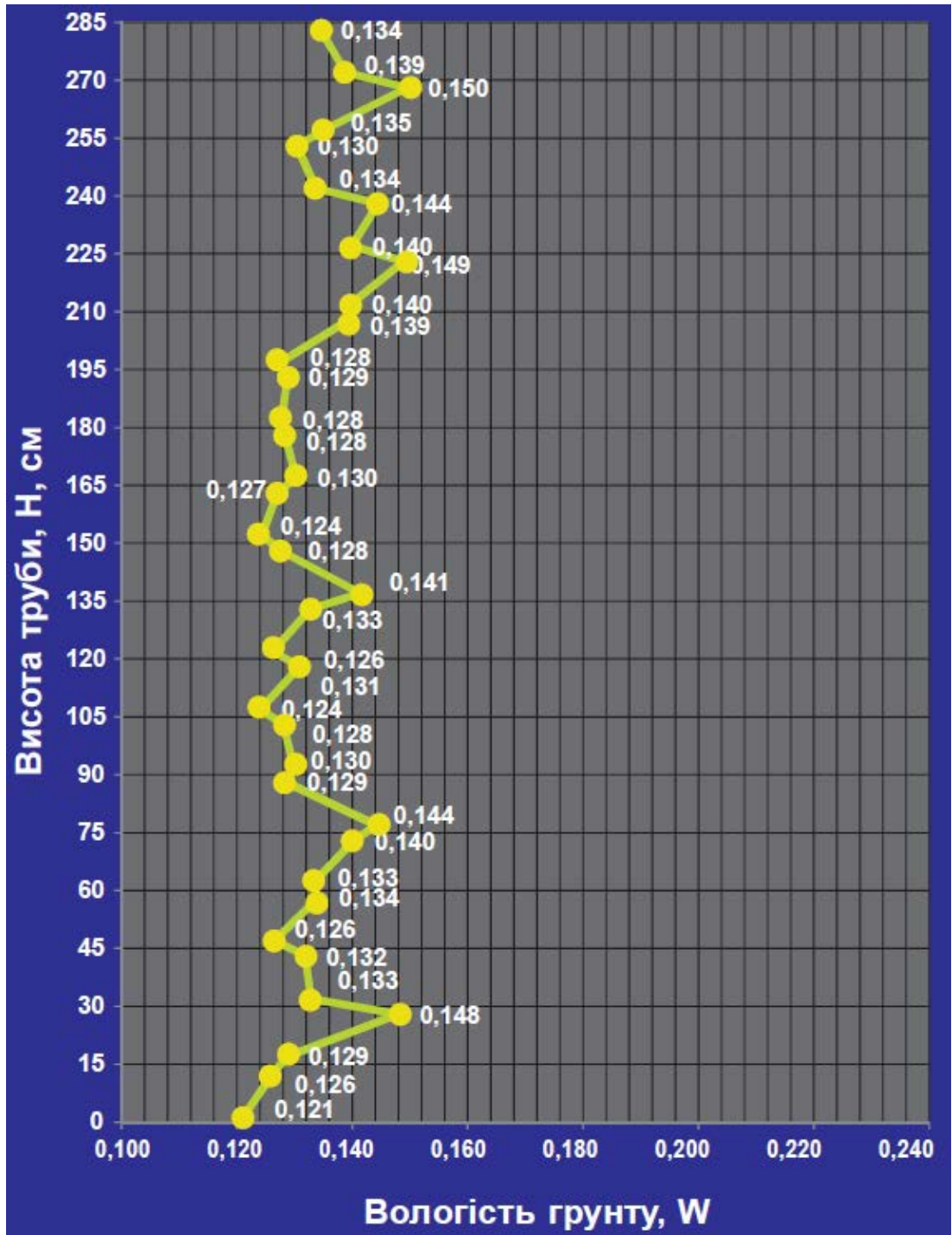


Рис. 2.17 Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 285 см

2.4.3. Вплив фактору часу

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 74 діб витримки представлено на рис. 2.18. Висота труби – 150 см.

Максимальне значення вологості w згідно графіку склало 0,164, мінімальне значення вологості в нижній ланці труби склало 0,128, середня вологість за висотою труби становила 0,143.

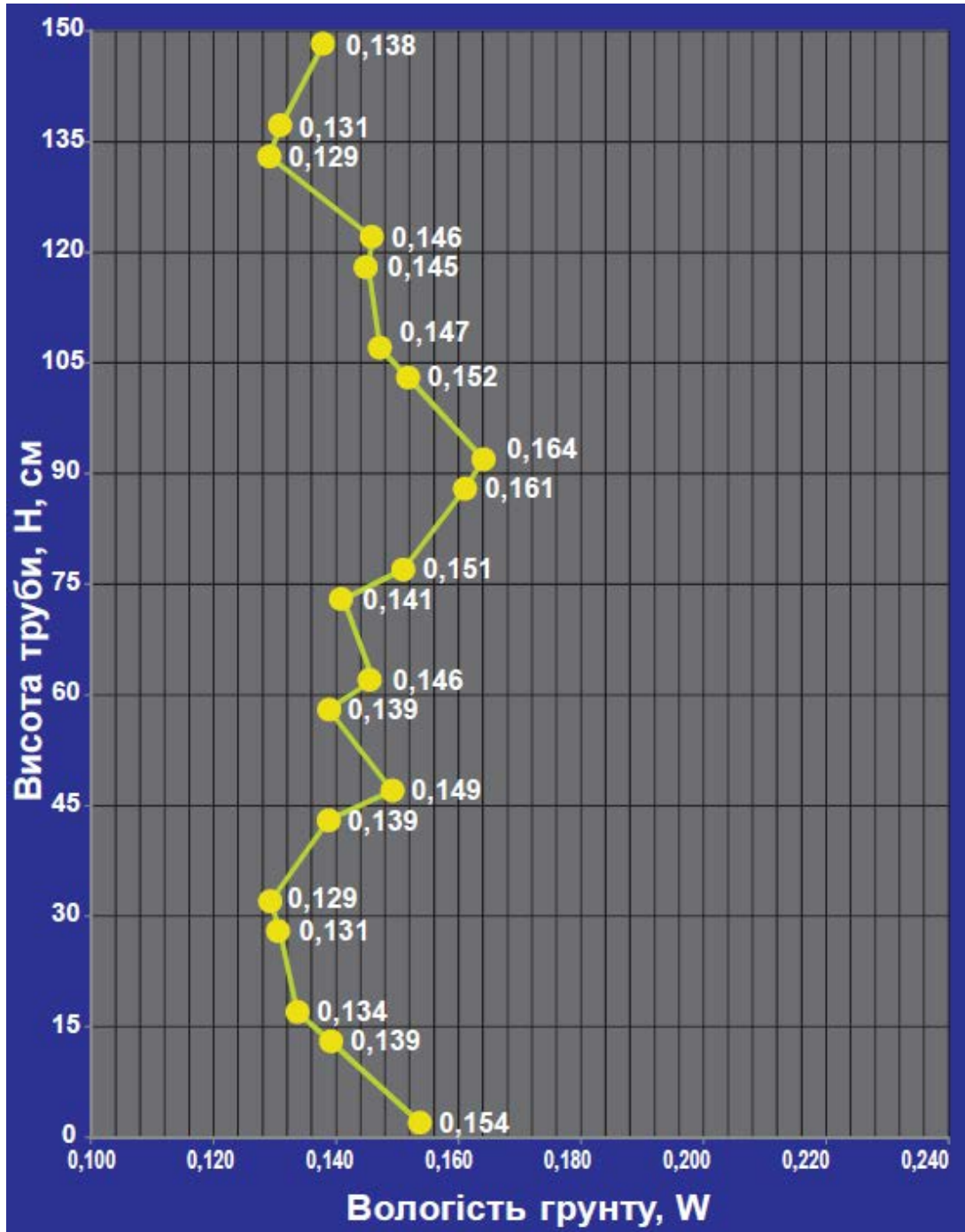


Рис. 2.18 Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 150 см (час «відпочинку» 74 доби)

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 120 діб витримки представлено на рис. 2.19.

Максимальне значення вологості w згідно графіку склало $0,148$, мінімальне значення вологості в нижній ланці труби склало $0,121$, середня вологість становила $0,134$.

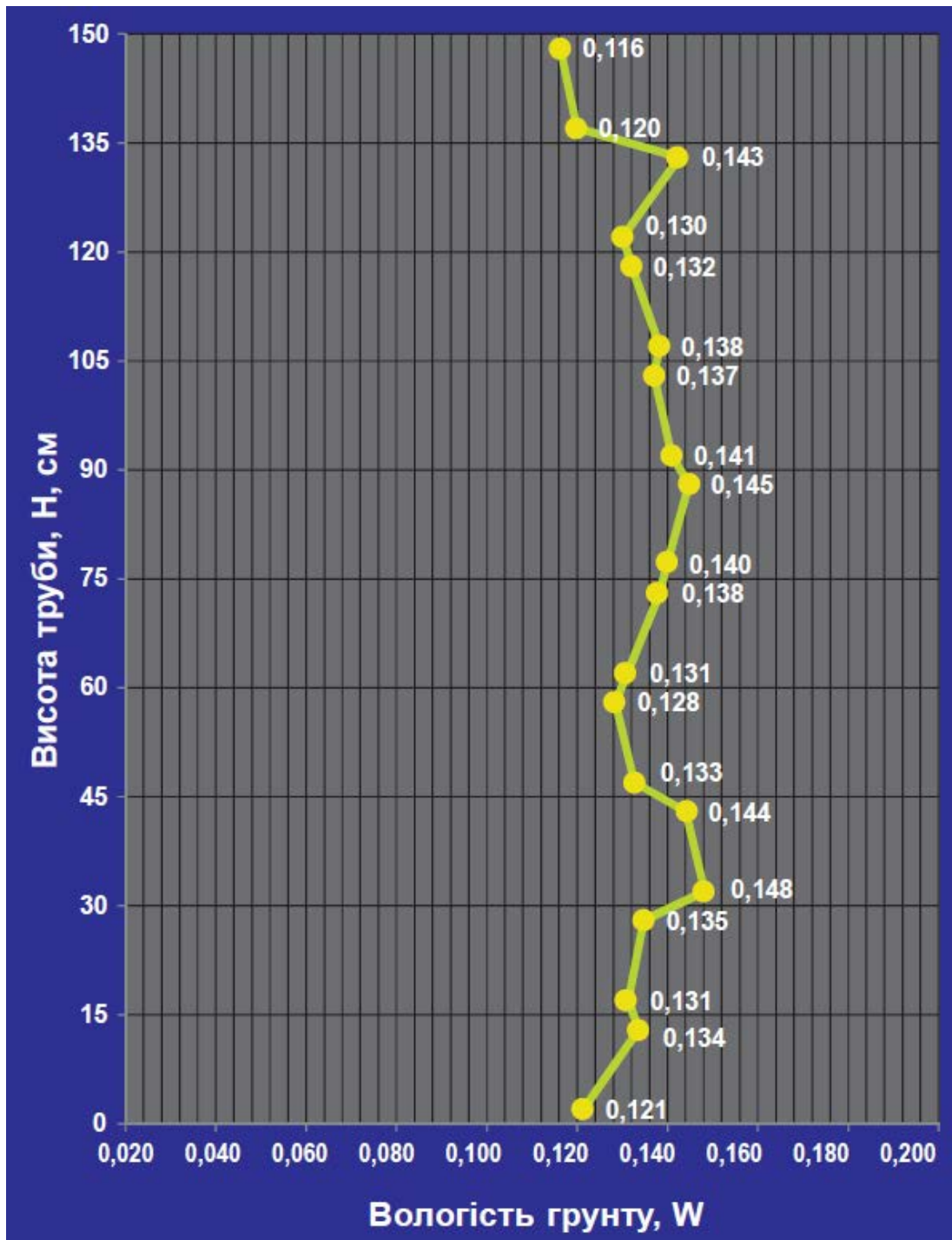


Рис. 2.19 Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 150 см (час «відпочинку» 120 діб)

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,231$ після 180 діб витримки представлено на рис. 2.20.

Максимальне значення вологості w згідно графіку склало 0,141, мінімальне значення вологості в нижній ланці труби склало 0,117, середня вологість за висотою труби становила 0,131.

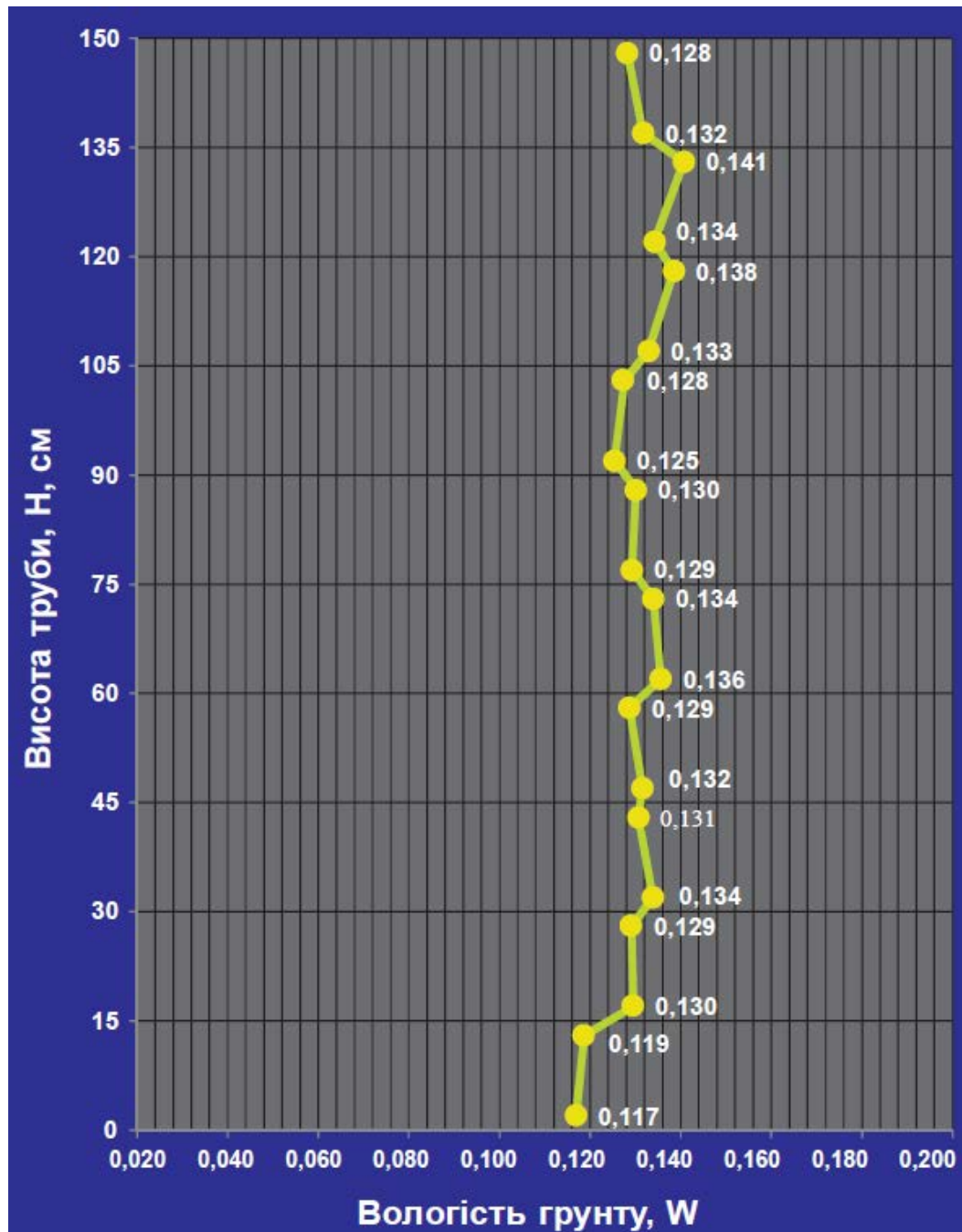


Рис. 2.20 Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 150 см (час «відпочинку» 180 діб)

Таким чином, в межах одночинникового лабораторного експерименту зі встановлення закономірностей міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів ЗП залежно від виду глинистого ґрунту, щільності скелету ґрунту в насипу, висоти насипу та фактору часу було проведено:

- 4 серії дослідів для встановлення залежності кінцевої вологості ущільненого дослідного ґрунту № 1 (суглинок важкий пілуватий) від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см;

- 4 аналогічні серії експериментів із дослідним ґрунтом № 2 при $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 150 см;

- 5 серій дослідів для встановлення залежності кінцевої вологості ущільненого дослідного ґрунту № 2 (суглинок легкий пілуватий) залежно від висоти труби 45, 90, 150, 210 та 285 см при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$;

- 3 серії дослідів для виявлення залежності кінцевої вологості дослідного ґрунту № 2 залежно від часу його витримки 74, 120 та 180 діб при $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$;

- 2 серії експериментів (котрі включені до розділу 3) для встановлення залежності кінцевої вологості ущільненого легкого суглинку від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 150 см при зміні його вихідної вологості та за можливого капілярного підняття води.

У більшості дослідів спостерігається тенденція до збільшення вологості суглинку важкого та легкого пілуватого у верхній ланці труб та її зменшення у нижній ланці. Тому при розрахунку середніх значень вологості та коефіцієнта варіації цього параметру за висотою труби величини вологості у верхній та нижній ланках труб не брались до уваги.

Із побудованих за результатами лабораторного фізичного експерименту графіків видно, що:

- зі збільшенням щільності скелету глинистого ґрунту ρ_d кінцева вологість глинистого ґрунту зменшується;

- висота насипу істотно не впливає на вологісний режим ущільнених глинистих ґрунтів насипу;
- час витримки дещо впливає на міграцію води в ньому, при збільшенні часу витримки із 74 до 120 та 180 діб вологість зменшувалась в межах близько 1%;
- число пластичності I_p глинистого ґрунту істотно впливає на вологісний режим ущільненого ґрунту, а саме, чим більше значення цього показника (тобто чим більший відносний вміст глинистих часток у ґрунті), тим вища його кінцева вологість за всією висотою труби.

Таким чином, для подальшого аналізу отримано нові експериментальні дані залежності вологісного режиму ущільнених глинистих ґрунтів дорожнього насипу від виду глинистого ґрунту, щільності скелету ґрунту, висоти насипу та часу їх витримки до початку експлуатації.

2.5. Висновки до розділу 2

Результати лабораторних досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від виду глинистого ґрунту, щільності скелету ґрунту, висоти насипу та фактору часу дозволяють зробити такі висновки.

1. Для обґрунтування нових оптимальних критеріїв ущільнення, за яких забезпечується тривала міцність глинистих ґрунтів ЗП розроблено нову методику фізичного лабораторного експерименту зі встановлення закономірностей міграції води в товщі дорожнього насипу, в якості факторів якого прийнято: вид глинистого ґрунту; вологість, при якій його ущільнювали; щільність скелету ґрунту в насипу; висота насипу; час «відпочинку» після зведення й до початку експлуатації насипу.

2. У лабораторних дослідах використано два глинисті ґрунти лесового походження – суглинок важкий пилуватий та суглинок легкий пилуватий, які є характерним матеріалом для зведення дорожніх насипів.

3. На практиці реалізовано нову методика проведення лабораторних досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів шляхом досліджень змін у часі вологості суглинку легкого пилуватого, ущільненого за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ при щільності скелету ґрунту $1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$, вміщеного в пластмасові труби. Змінними чинниками в лабораторному дослідженні були: вид ґрунту – суглинок важкий пилуватий і суглинок легкий пилуватий; висота труби – від 0,45 м до 2,85 м; час, так званого «відпочинку» насипу, – від 60 – 120 діб.

4. Значення кінцевої вологості (максимальної кількості зв'язаної води) за новою авторською методикою суттєво не відрізняються від величин, отриманих за добре апробованим методом вологомісткого середовища.

5. Для подальшого аналізу отримано нові експериментальні дані залежності вологісного режиму ущільнених глинистих ґрунтів дорожнього насипу від виду глинистого ґрунту (числа пластичності), щільності скелету ґрунту, висоти насипу та часу їх витримки до початку експлуатації.

РОЗДІЛ 3

КІЛЬКІСНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ В ТОВЩІ УЩІЛЬНЕНИХ ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНОГО ФІЗИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Відповідно до поставлених у дисертації задач слід кількісно проаналізувати отримані результати (розділ 2) фізичного лабораторного експерименту зі встановлення закономірностей міграції води в товщі ущільненого важкого та легкого пилюватого суглинків дорожнього насипу, зокрема величини стабілізованої (чи кінцевої) вологості ущільненого глинистого ґрунту w_k в залежності від наступних чинників:

- виду глинистого ґрунту (числа пластичності I_p);
- щільності скелету ґрунту ρ_d , г/см³;
- висоти насипу, м;
- часу його витримки до початку експлуатації, діб [16].

Така величина стабілізованої (кінцевої) вологості ущільненого глинистого ґрунту w_k в цілому відповідає значенню вологості, близької до максимального вмісту зв'язаної води у цьому ґрунті, за яких забезпечується його тривала міцність. Як відзначено в п. 1.5, О.Ф. Лебедев [60] саме таку вологість визначив як максимальну молекулярну вологоємність.

Тому з позицій забезпечення тривалої міцності (також див. п. 1.5) ущільненого глинистого ґрунту w_k ЗП саме цей параметр доцільно прийняти за оптимальну вологість ущільнення цього ґрунту W_{opt} .

Нижче встановлено деякі кількісні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів за результатами їх лабораторних досліджень залежно від виду глинистого ґрунту (числа

пластичності I_p), щільності скелету ґрунту ρ_d , висоти насипу та часу «відпочинку» ЗП.

Також наведено й проаналізовано (п. 3.5) закономірності міграції води в легкому суглинку, ущільненому при встановленій автором оптимальній вологості w_k цього ґрунту дорожнього насипу, в т. ч. за умов можливого капілярного підняття води.

3.1 Оцінювання закономірностей міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту

Графіки зміни вологості ущільненого суглинку лесового, важкого пілуватого, твердого та суглинку лесового, легкого пілуватого, твердого до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$ у межах дорожнього насипу потужністю (за висотою пластмасової труби) 1,50 м подано на рис. 2.6 – 2.13 розділу 2 дисертаційної роботи.

Результати визначення середніх величин стабілізованої (кінцевої) вологості ущільненого глинистого ґрунту w_k за всією висотою труби, виключаючи її верхні та нижні ланки (причини цього вказано в п. 2.4) для кожного заданого значення щільності скелету ґрунту:

$$\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3, \text{ – вміщено в табл. 3.1 і табл. 3.2.}$$

В останній колонці обох таблиць подані величини коефіцієнта варіації параметру w_k , за якими ґрунт в усіх дослідах можна прийняти як однорідний.

Таблиця 3.1

Значення середніх величин кінцевої вологості w_k ущільненого важкого пилуватого суглинку (дослідний ґрунт №1) за всією висотою труби

Задана щільність скелету ґрунту, ρ_d , г/см ³	Відповідний коефіцієнт пористості ґрунту, e	Задана вологість ґрунту w (при $S_r = 0,85$)	Кінцева вологість ґрунту, w_k	Коефіцієнт варіації значень w_k , v
1,50	0,786	0,250	0,203	0,071
1,55	0,729	0,231	0,190	0,068
1,60	0,675	0,214	0,176	0,063
1,65	0,624	0,198	0,167	0,065

Таблиця 3.2

Значення середніх величин кінцевої вологості w_k ущільненого легкого пилуватого суглинку (дослідний ґрунт №2) за всією висотою труби

Задана щільність скелету ґрунту, ρ_d , г/см ³	Відповідний коефіцієнт пористості ґрунту, e	Задана вологість ґрунту w (при $S_r = 0,85$)	Кінцева вологість ґрунту, w_k	Коефіцієнт варіації значень w_k , v
1,50	0,786	0,250	0,162	0,072
1,55	0,729	0,231	0,143	0,070
1,60	0,675	0,214	0,130	0,072
1,65	0,624	0,198	0,114	0,068

За даними табл. 3.1 та табл. 3.2 побудовано графіки (рис. 3.1 і рис. 3.2) залежностей:

– графік 1 – вологості ґрунту w , при якій обидва види дослідних глинистих ґрунтів ущільнювали, від щільності скелету ґрунту ρ_d в дорожньому насипу (пластмасовій трубі);

– графік 2 – стабілізованої (кінцевої) вологості ґрунту w_k вже ущільнених суглинків після «відпочинку» ЗП від щільності скелету ґрунту ρ_d в межах висоти труби.

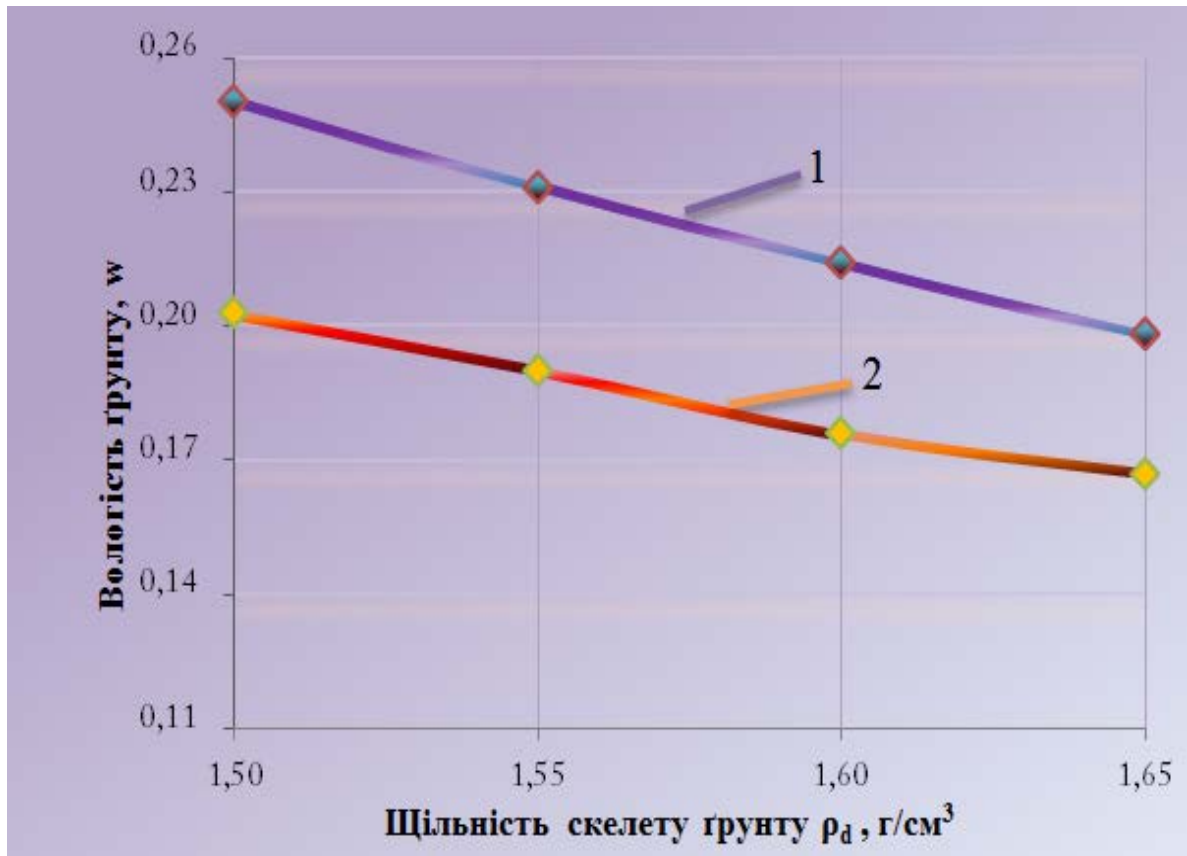


Рис. 3.1 Графіки залежності вологості ґрунту w , при якій суглинок важкий ущільнювали, від щільності скелету ґрунту ρ_d (1) та стабілізованої (кінцевої) вологості ґрунту w_k вже ущільненого суглинка важкого пилуватого після «відпочинку» ЗП від щільності скелету ґрунту ρ_d в межах висоти труби, (2)

Порівнюючи за даними табл. 3.1 і табл. 3.2 і рис. 3.1 та рис. 3.2 значення стабілізованої (кінцевої) вологості ущільнених суглинків w_k за висотою дорожнього насипу (знизу – догори) через два місяці «відпочинку» ЗП, з величинами початкової вологості w цих же ґрунтів, зокрема, можливо констатувати наступне:

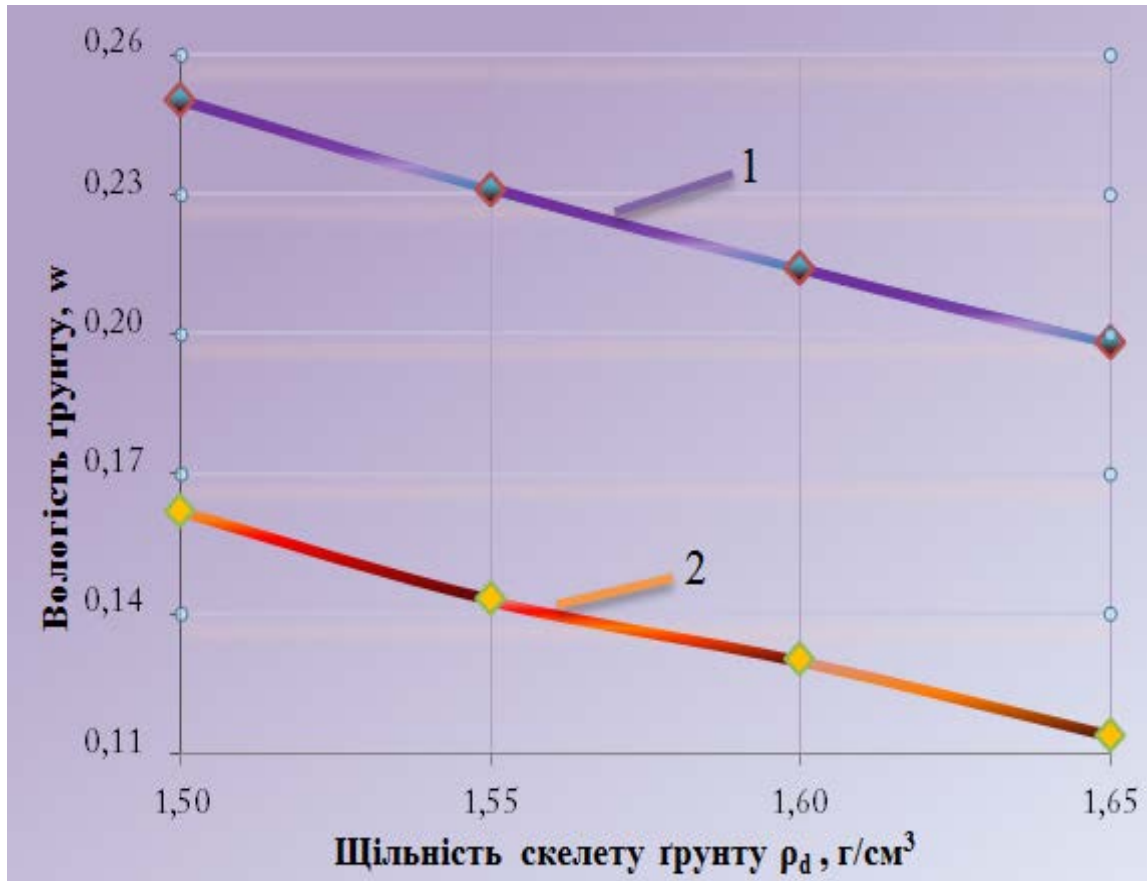


Рис. 3.2 Графіки залежності вологості ґрунту w , при якій суглинок легкий ущільнювали, від щільності скелету ґрунту ρ_d (1) та стабілізованої (кінцевої) вологості ґрунту w_k вже ущільненого суглинка легкого пілуватого після «відпочинку» ЗП від щільності скелету ґрунту ρ_d в межах висоти труби, (2)

– значення середньої стабілізованої (кінцевої) вологості w_k ущільнених суглиноків порівняно з початковою вологістю w , при якій глинистий ґрунт ущільнювали, знизилось для всіх величин щільності скелету ґрунту ρ_d майже на всю висоту труби за винятком її верхньої ланки, для якої вологість ґрунту наблизилась до значення вологості водонасичення w_{sat} , яке відповідає коефіцієнту водонасичення близькому до $S_r \approx 1,0$, за рахунок капілярного підняття води; при цьому вологість суглинка важкого пілуватого в нижній ланці труб зменшилась до $w = 0,10 - 0,12$, а вологість суглинка легкого пілуватого до $w = 0,08$ внаслідок випаровування вільної (фізично незв'язної) води;

– значення стабілізованої (кінцевої) вологості w_k ущільнених суглинків ЗП у межах дослідного інтервалу щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$ зменшується за залежністю близькою до логарифмічної зі зростанням величини щільності скелету ґрунту (див., зокрема, графік 2 на рис. 3.1 і 3.2), що пояснюється тим, що зі збільшенням величини ρ_d товщина плівок зв'язаної води (а отже й значення максимальної молекулярної вологоємності) дещо зменшується, до речі, величина коефіцієнта фільтрації ґрунту також знижується, що призводить до зниження швидкості перерозподілу вологості;

– стабілізована (кінцева) вологість ґрунту w_k в усіх випадках виявилась меншою за вологість цього ґрунту на межі розкочування W_p і наближається до його, так званої, максимальної молекулярної вологомідкості w_{mm} (наприклад, за В.І. Біруля [6] $w_{mm} \approx 0,17$);

– зниження початкової вологості w , при якій глинистий ґрунт ущільнювали, в межах дорожнього насипу на практиці призводить до його додаткових осідань.

У результаті статистичної обробки методом найменших квадратів дослідних даних табл. 3.1 (і рис. 3.1) встановлено, що зниження значень стабілізованої (кінцевої) вологості w_k ущільнених суглинків важких пілуватих (дослідний ґрунт №1) ЗП в залежності від зростання щільності скелету ґрунту в межах дослідного інтервалу $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$ найбільш коректно описувати логарифмічною функцією виду [174]

$$w_k = a + b \ln \left(\frac{\rho_d}{\rho_{d0}} \right), \quad (3.1)$$

де $\rho_{d0} = 1 \text{ г/см}^3$;

емпіричні коефіцієнти становлять:

- $a = 0,358$;
- $b = - 0,384$.

При цьому значення коефіцієнтів множинної кореляції r та варіації v відповідно складають: $r = 0,997$; $v = 0,008$, що свідчить про тісний зв'язок між дослідними даними та про коректність їх апроксимації логарифмічною функцією [174].

Аналогічна логарифмічна залежність отримана й для стабілізованої вологості w_k ущільнених суглинків легких пілуватих (дослідний ґрунт №2) ЗП.

При цьому емпіричні коефіцієнти виразу (3.1) склали:

- $a = 0,362$;
- $b = - 0,494$.

При цьому значення коефіцієнтів множинної кореляції r та варіації v відповідно складають: $r = 0,998$; $v = 0,0115$, що свідчить про тісний зв'язок між дослідними даними та про коректність їх апроксимації логарифмічною функцією [174].

Таким чином, лабораторне фізичне моделювання можливої міграції води за висотою дорожнього насипу шляхом досліджень змін у часі протягом двох місяців вологості суглинків важкого та легкого пілуватого, ущільнених за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65$ г/см³, розміщених у пластмасових трубах висотою 1,5 м, показало, що стабілізована величина вологості w_k глинистих ґрунтів зменшується (нижче за їх вологість на межі розкочування W_p) до максимальної молекулярної вологомісткості цих ґрунтів.

Встановлено також, що величина стабілізованої вологості w_k ущільнених глинистих ґрунтів ЗП зменшується за логарифмічною залежністю зі зростанням щільності скелету ґрунту ρ_d .

3.2 Оцінювання закономірностей міграції води в ущільненому глинистому ґрунті дорожнього насипу залежно від його висоти

Графіки зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого, ущільненого за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$, за висотою дорожнього насипу (пластмасової труби) потужністю 45, 90, 150, 210 і 285 см наведено у розділі 2 на рис. 2.11 та 2.14 – 2.17.

Результати визначення середніх величин кінцевої вологості ущільненого глинистого ґрунту w_k за всією висотою труби, виключаючи верхні та нижні ланки для кожного заданого значення щільності скелету ґрунту ρ_d ЗП представлено у вигляді табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Значення середніх величин кінцевої вологості w_k ущільненого суглинку легкого пілуватого залежно від висоти труби при $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$

Висота труби h, см	Кінцева вологість ґрунту, w_k
45	0,138
90	0,141
150	0,129
210	0,129
285	0,133

Було, зокрема, встановлено, що:

– максимальне значення вологості ґрунту w_k у дорожньому насипу (в пластмасовій трубі) висотою 0,45 м згідно графіку склало 0,146, а мінімальне

значення вологості цього ґрунту в нижній ланці труби – 0,132, при цьому середня величина вологості ґрунту за висотою труби склала 0,138;

– максимальне значення вологості ґрунту w_k в трубі висотою 0,90 м згідно графіку склало 0,153, а мінімальне значення вологості цього ґрунту в нижній ланці труби – 0,118, середня вологість ґрунту по висоті труби становила 0,143;

– максимальне значення вологості ґрунту w_k в трубі висотою 1,50 м згідно графіку склало 0,164, мінімальне значення вологості цього ґрунту в нижній ланці труби склало 0,128, середня вологість ґрунту за висотою труби склала 0,143;

– максимальне значення вологості ґрунту w_k в трубі висотою 2,10 м згідно графіку склало 0,138, а мінімальне значення ґрунту – 0,118, середня вологість ґрунту за висотою труби склала 0,130;

– максимальне значення вологості ґрунту w_k труби висотою 2,85 м згідно графіку склало 0,150, а мінімальне значення вологості ґрунту – 0,121, середня вологість ґрунту по висоті труби становила 0,134.

Аналіз даних табл. 3.3 і графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труб 45, 90, 150, 210 та 285 см показав, що висота шарово ущільненого глинистого ґрунту в складі дорожнього насипу суттєво не впливає на його вологісний режим ЗП.

3.3 Оцінювання закономірностей міграції води в товщі ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу залежно від фактору часу

Графіки зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою дорожнього насипу (пластмасової труби), ущільненого за вологості $w = 0,231$ (за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$) до щільності скелету

грунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$, після 74, 120 та 180 діб «відпочинку» представлено на рис. 2.18 – 2.20 розділу 2.

З них, зокрема, видно, що середня величина стабілізованої (кінцевої) вологості w_k ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби, за виключенням її верхньої та нижньої ланки після 74 діб «відпочинку» склала $w_k = 0,143$, після 120 діб – «відпочинку» – $w_k = 0,134$, а після 180 діб – $w_k = 0,131$, тобто вологість знизилась лише приблизно на 1,0%.

Тобто, при збільшенні часу «відпочинку» з 74 до 120 і 180 діб вологість суглинку легкого пілуватого, ущільненого до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ знизилась лише у межах 1%.

Отже, шляхом лабораторного фізичного моделювання доведено, що час «відпочинку» (до початку експлуатації) ЗП після 2 місяців суттєво не впливає на величину стабілізованої вологості глинистого ґрунту.

3.4 Емпірична залежність оптимальної вологості пілуватих суглинків для їх ущільнення від проектної величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності ґрунту

Результати фізичного лабораторного експерименту зі встановлення закономірностей міграції води в товщі ущільненого важкого та легкого пілуватого суглинків дорожнього насипу (вид глинистого ґрунту – число його пластичності I_p , щільності скелету ґрунту ρ_d , г/см^3 , стабілізована (кінцева) вологість ущільненого глинистого ґрунту w_k) представлені в табл. 3.4.

З неї, зокрема, наочно видно, що зі збільшенням значення його числа пластичності I_p при одних і тих же величинах щільності скелету ґрунту ρ_d значення стабілізованої вологості ущільненого глинистого ґрунту w_k зростає.

Таблиця 3.4

Значення стабілізованої (кінцевої) вологості ущільнених суглинків важкого і легкого пілуватого за висотою труби для кожного заданого значення щільності скелету ґрунту ЗП

Задана щільність скелету ґрунту, ρ_d , г/см ³	Число пластичності глинистого ґрунту, I_p	
	0,162	0,080
1,50	$\frac{0,203}{-0,95\%}$	$\frac{0,162}{2,36\%}$
1,55	$\frac{0,190}{-0,51\%}$	$\frac{0,143}{-0,86\%}$
1,60	$\frac{0,176}{-0,58\%}$	$\frac{0,130}{-0,21\%}$
1,65	$\frac{0,167}{2,35\%}$	$\frac{0,114}{-2,04\%}$

Примітка: у чисельнику – дослідне значення стабілізованої вологості глинистого ґрунту w_k ; у знаменнику – відносна похибка цього параметру, розрахованого за виразом (3.2)

У п. 3.2 і 3.3 вже було встановлено, що: висота дорожнього насипу з пошарово ущільненого глинистого ґрунту суттєво не впливає на його вологісний режим; час «відпочинку» ЗП після 2 місяців суттєво не впливає на величину стабілізованої вологості глинистого ґрунту.

Отже, доцільно виконати двохфакторний статистичний аналіз залежності стабілізованої вологості w_k ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу від щільності скелету ґрунту ЗП та його числа пластичності [174].

В результаті такого двохфакторного статистичного аналізу методом найменших квадратів даних табл. 3.4 отримано наступну емпіричну залежність стабілізованої вологості w_k ущільненого глинистого ґрунту

дорожнього насипу від щільності скелету ґрунту та його числа пластичності [174]

$$w_k = a_0 + a_1 \left(\frac{\rho_d}{\rho_{d0}} \right) + a_2 \cdot I_p \quad (3.2)$$

де $\rho_{d0} = 1 \text{ г/см}^3$;

емпіричні коефіцієнти становлять:

– $a_0 = 0,531$;

– $a_1 = -0,279$;

– $a_2 = 0,570$.

При цьому значення коефіцієнта множинної кореляції становить $r = 0,995$, а критерію Фішера $F = 106,326$, що більше за його табличне значення $F_{табл.} = 4,89$ при рівні значущості $p = 5\%$ та числі ступенів свободи $\nu_1 = 7$ і $\nu_2 = 5$.

Значення статистичних показників свідчать про тісний зв'язок між дослідними даними, а отже про коректність емпіричної формули (3.2).

Значення відносної похибки стабілізованої вологості, розрахованої за виразом (3.2), порівняно з її дослідними величинами також подані в табл. 3.4. Вони не перевищують 2,36%.

Таким чином, за статистичним аналізом результатів фізичного лабораторного експерименту отримано емпіричну залежність стабілізованої вологості пилуватих суглинків для їх пошарового ущільнення в залежності від проектної величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності глинистого ґрунту.

Цей параметр відповідає вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води, за якої доцільно виконувати пошарове ущільнення глинистих ґрунтів ЗП для забезпечення їх тривалої міцності [174].

3.5 Лабораторні дослідження міграції води в товщі ущільненого за оптимальної вологості глинистого ґрунту дорожнього насипу

Було також виконано дві серії лабораторного фізичного експерименту для дослідження можливої міграції води в товщі глинистого ґрунту, ущільненого вже за стабілізованої вологості. Для цього суглинок легкий пілуватий ущільнювали за початкової вологості, що дорівнювала величині стабілізованої вологості для цього виду ґрунту (тобто при числі його пластичності $I_p = 0,08$ вологість становила $w = w_k = 0,130$) до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$ при висоті пластмасової труби 150 см.

Методика першої серії дослідів при цьому не відрізнялась від описаної в розділі 2 (сам дослід тривав 70 діб), а в другій серії дослідів для перевірки можливого капілярного підняття вологи за дорожнім насипом лоток для дренажу із гранвідсівом додатково заповнювали водою (рис. 3.3).

Нижні кінці труби заводили в лоток, тобто, дослідний ґрунт мав можливість, так званого, «підсмоктування» вологи. Нижня ланка труби знаходилась на відстані не більше 2 – 3 см від рівня води в лотку і по мірі її випаровування воду періодично підливали в лоток.

Сам дослід тривав 68 діб.

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинка легкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $1,60 \text{ г/см}^3$ за вихідної вологості $w = 0,130$ представлено у таблиці в Додатку А.

Слід також для порівняння відзначити, що графік зміни вологості суглинка легкого пілуватого, ущільненого при вологості $w = 0,214$, до щільності скелету ґрунту $1,60 \text{ г/см}^3$, після 77 діб витримки представлено на рис. 2.12 розділу 2.



Рис. 3.3 Лоток, заповнений водою для дослідження можливого капілярного підняття
вологи за дорожнім насипом

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,60 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,130$ після 70 діб витримки представлено на рис. 3.4.

Максимальне значення вологості ґрунту w_k в трубці згідно графіку склало 0,145, мінімальне значення вологості цього ґрунту в нижній ланці труби склало 0,070, середня вологість ґрунту за висотою труби склала 0,124.

Графік зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби при щільності скелету ґрунту $1,60 \text{ г/см}^3$, вологості $w = 0,130$ після 68 діб витримки (при цьому дослідний ґрунт мав можливість, так званого, «підсмоктування» вологи) представлено на рис. 3.5.

Максимальне значення вологості ґрунту w_k в трубці згідно графіку склало 0,138, а мінімальне значення вологості цього ґрунту в нижній ланці труби – 0,075, середня вологість ґрунту по висоті труби становила 0,121.

З рис. 3.4 і 3.5 наочно видно, що середня вологість ґрунту в пластмасовій трубці суттєво не змінилась (особливо у досліді, коли лоток для

дренажу із гранвідсівом не заповнено водою) порівняно з початковою вологістю $w = w_k = 0,130$, при якій ґрунт ущільнювали.

Таким чином, величина вологості глинистого ґрунту ЗП, ущільненого за вологості, що відповідає значенню стабілізованої вологості (або вологості максимального вмісту зв'язаної води) в часі суттєво не змінюється.

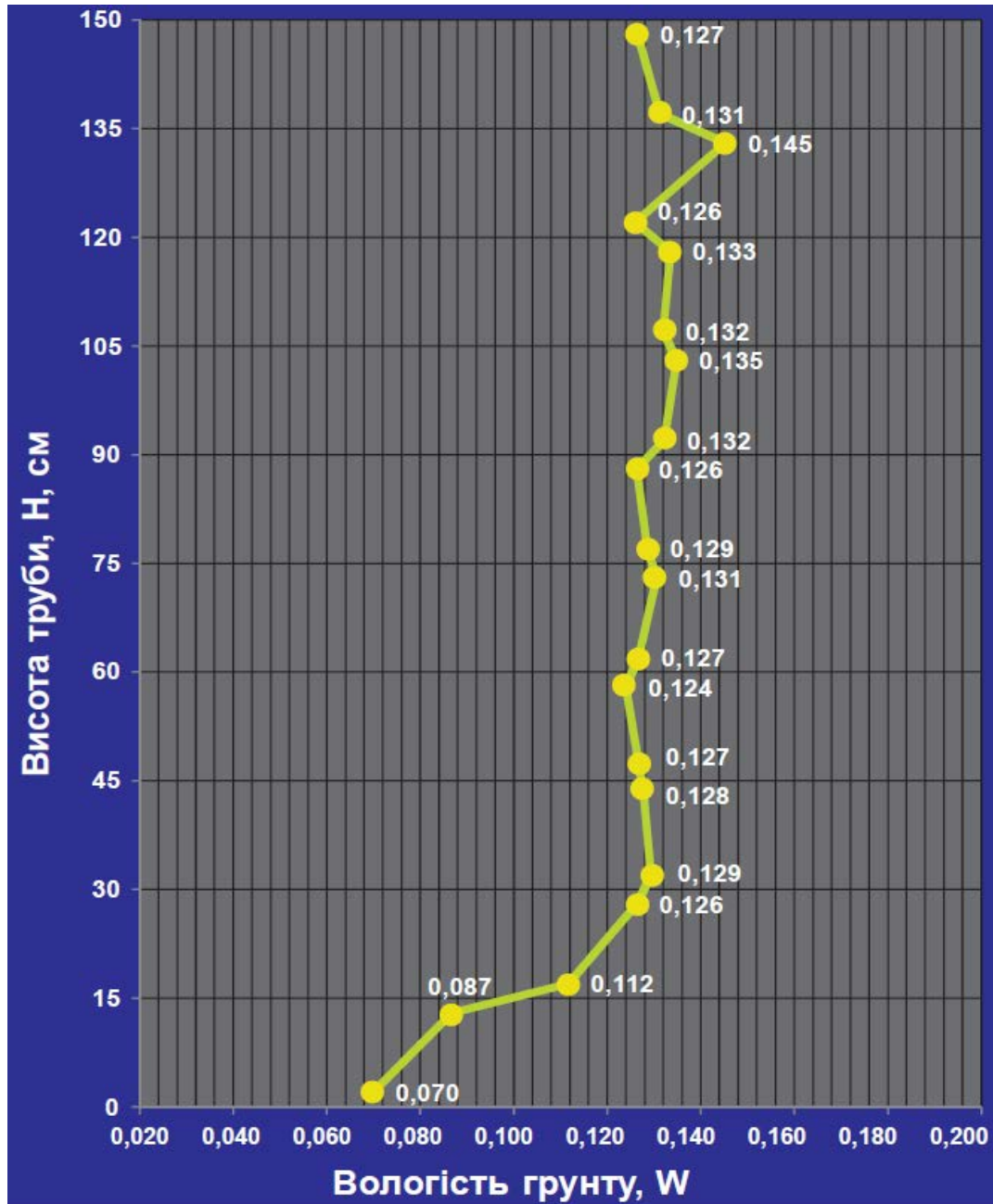


Рис. 3.4 Графік зміни вологості легкого пилуватого суглинку, ущільненого при вологості, яка дорівнювала величині стабілізованої вологості $w = w_k = 0,130$, до щільності скелету

ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

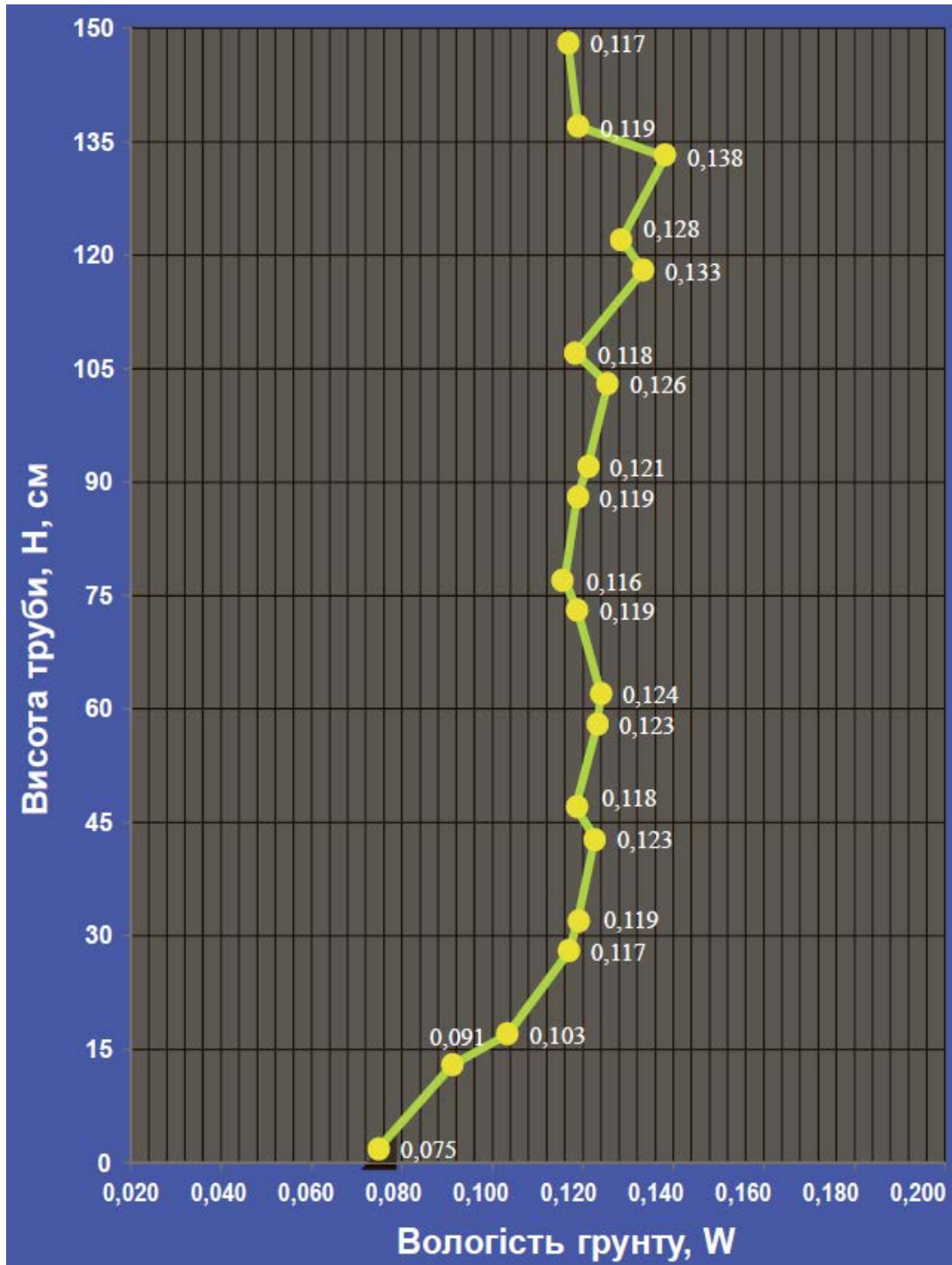


Рис. 3.5 Графік зміни вологості легкого пилуватого суглинку, ущільненого при вологості, яка дорівнювала величині стабілізованої вологості $w = w_k = 0,130$, до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см (у досліді лоток для дренажу із гранвідсівом додатково заповнено водою)

3.6 Висновки до розділу 3

За результатами кількісного аналізу результатів фізичного лабораторного експерименту зі встановлення закономірностей міграції води в товщі ущільнених пілуватих суглинків дорожнього насипу, зокрема величин стабілізованої (чи кінцевої) вологості w_k глинистого ґрунту в залежності від їх виду (числа пластичності), щільності скелету ґрунту, висоти насипу та часу «відпочинку» ЗП до початку експлуатації можливі наступні висновки.

1. Дослідним шляхом підтверджено гіпотезу про те, що найбільш сприятливою умовою забезпечення тривалої міцності глинистих ґрунтів ЗП і відповідно мінімальних деформацій за нормативний час його експлуатації є пошарове ущільнення ґрунту за вологості, близькій до його максимального вмісту зв'язаної води.

2. Фізичним моделюванням можливої міграції води за висотою дорожнього насипу для суглинків важкого і легкого пілуватого, ущільнених за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$, вміщених у пластмасових трубах висотою 1,5 м, встановлено, що стабілізована величина їх вологості зменшується (нижче за їх вологість на межі розкочування W_p) до максимальної молекулярної вологомісткості цих ґрунтів.

3. Величина стабілізованої вологості ущільнених глинистих ґрунтів ЗП зменшується за логарифмічною залежністю зі зростанням щільності скелету ґрунту.

4. Фізичним моделюванням можливої міграції води в межах ущільненого суглинку легкого пілуватого потужністю від 45 до 285 см доведено, що висота дорожнього насипу з пошарово ущільненого глинистого ґрунту суттєво не впливає на його вологісний режим.

5. При збільшенні часу «відпочинку» з 74 діб до 120 і 180 діб вологість суглинку легкого пілуватого, ущільненого до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ знизилась у межах 1%, тобто час «відпочинку» ЗП після 2 місяців суттєво не впливає на величину стабілізованої вологості глинистого ґрунту.

6. За статистичним аналізом результатів фізичного лабораторного експерименту отримано емпіричну залежність стабілізованої вологості пілуватих суглинків для їх пошарового ущільнення в залежності від величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності глинистого ґрунту. Цей параметр відповідає вологості максимального вмісту зв'язаної води, за якої доцільно виконувати пошарове ущільнення глинистих ґрунтів ЗП для забезпечення їх тривалої міцності.

7. Величина вологості глинистого ґрунту дорожнього насипу, ущільненого за вологості, що відповідає значенню стабілізованої вологості (чи вологості максимального вмісту зв'язаної води) в часі суттєво не змінюється.

РОЗДІЛ 4

ПОЛЬОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ УЩІЛЬНЕНИХ ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ

Задачею польових досліджень було встановити закономірності міграції води в товщі пошарово ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, висоти насипу та фактору часу. Програмою було заплановано наступні послідовні етапи:

1) визначення індикаційних характеристик дослідних глинистих ґрунтів, які надалі використовують для натурних досліджень їх пошарового ущільнення;

2) визначення оптимальних параметрів укочування глинистих ґрунтів у польових умовах;

3) обґрунтування мінімальної кількості (за ДСТУ Б В.2.1-5-96 [34]) дослідних визначень окремих величин фізичних властивостей глинистих ґрунтів у складі пошарово ущільненого дорожнього насипу;

4) відбір у натурних умовах з тіла пошарово ущільненого дорожнього насипу зразків ущільнених глинистих ґрунтів і визначення в лабораторії нормативними методами їх фізичних характеристик;

5) статистична обробка отриманих дослідних даних;

6) виділення фізичних параметрів ґрунту та технологічних чинників, які суттєво впливають на значення фізичних характеристик ущільнених глинистих ґрунтів дорожнього насипу.

Натурні дослідження виконано при влаштуванні з глинистих ґрунтів пошарово ущільненого дорожнього насипу на об'єкті «Облаштування Хрестищенського ГКР, реконструкція Хрестищенської ДКС» у Красноградському районі Харківської області та на чотирьох інших об'єктах (3 – у Полтавській області, а 1 – у Чернігівській) з пошаровим укочуванням

насипів автомобільних доріг, площадок і геотехнічному контролі якості ущільнення ЗП.

4.1. Методика проведення польових досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів

4.1.1 Польові дослідження міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів

За результатами лабораторних досліджень встановлено, що в якості матеріалу дорожнього насипу на об'єкті «Облаштування Хрестищенського ГКР, реконструкція Хрестищенської ДКС» використано суглинок важкий пілуватий, твердий.

В якості матеріалу дорожнього насипу автомобільної дороги в м. Лубни використано суглинок легкий пілуватий, напівтвердий.

Матеріал насипу з кар'єрів доставляли та відсипали на трасу автосамоскидами (рис. 4.1 а, б).

Його планували до горизонтального рівня грейдерами (рис. 4.1, в) чи бульдозерами (рис. 4.1, г).

Фактично товщина кожного відсипаного шару ґрунту склала 200 – 250 мм.

Ґрунт ущільнювали однобарабанним кулачковим самохідним вібраційним катком НАММ 3520 послідовно 14-ма проходами за одним слідом (рис. 4.1, д).

Для пошарового ущільнення глинистого ґрунту використовували також пневмоколісний каток Hamm HD 150 ТТ (рис. 4.1, е).

На рис. 4.1, є показано, зокрема, ущільнення поверхні пневмокотком Hamm HD 150 ТТ.



Рис. 4.1 Етапи зведення ґрунтового дорожнього насипу:

- а – доставка матеріалу на трасу для зведення ґрунтового насипу; б – відсипання ґрунту в тіло дорожнього насипу; в – планування земляного полотна до горизонтального рівня грейдером; г – планування земляного полотна до горизонтального рівня бульдозером; д – ущільнення ґрунту однобарабанним кулачковим самохідним вібраційним катком НАММ 3520; е, є – ущільнення ґрунту пневмоколісним катком Hamn HD 150 ТТ; ж – дозволення ґрунту поливомийною машиною

При необхідності ґрунт зволожували до оптимальної вологості поливомийною машиною (рис. 4.1, ж) й організовували технологічну перерву на 2 – 3 години, щоб волога рівномірно розподілилась по товщі всього шару.

Технічні параметри ущільнюючих механізмів, що застосовувались для ущільнення ґрунту дорожнього насипу наступні:

– однобарабанного кулачкового самохідного вібраційного катка НАММ 3520:

- 1) маса – 15750 кг;
- 2) навантаження на передній міст – 93 кН;
- 3) навантаження на задні колеса – 64,5 кН;
- 4) робоча ширина – 2,14 м;
- 5) робоча швидкість 0 ÷ 4,4 км/год;
- 6) тип віброзбуджувача – з прямим гідростатичним приводом;
- 7) частота, Гц/мм – при першій передачі 30/1,95; при другій – 40/0,90;
- 8) глибина ущільнення – 0,8 ÷ 1 м.

– пневмоколісного котку Hamm HD 150 TT:

- 1) максимальна робоча ширина – 1910 мм;
- 2) експлуатаційна маса – 14330 кг;
- 3) навантаження на передню вісь – 7230 кг;
- 4) навантаження на задню вісь – 7100 кг;
- 5) потужність – 85 кВт;
- 6) робоча швидкість: 0 – 6,5 км/год;
- 7) радіус повороту – 4020 мм

Наступні кроки досліджень – статистичне обґрунтування кількості визначень окремих величин фізичних властивостей суглинку легкого пілуватого у складі дорожнього насипу, відбір у натурних умовах із тіла насипу необхідної кількості зразків ущільнених за різних параметрів укочування, визначення в лабораторних умовах їх властивостей.

Комплекс лабораторних і польових досліджень проведено згідно вимог норм [93, 94].

При геотехнічному контролі якості ущільнення ґрунту [26, 92, 94] дорожніх насипів фіксувалось:

- початкова товщина кожного шару відсипаного ґрунту h ;

- зниження його поверхні під катком Δh ;
- початкова щільність скелету ґрунту в межах кожного шару після його відсипання та планування до горизонтального рівня; кількість проходів катка за одним слідом N ;
- геометричні розміри робочого органу й режим його роботи тощо.

Якість ущільнення ґрунту кожного шару дорожнього насипу згідно зі [92, 94] контролювали відбором на кожні 300 м² по 3 зразки ґрунту в кільця площею 40 см² й об'ємом 140 см³ (діаметром і висотою відповідно близько 70 та 35 мм) з шурфів.

Їх зберігання й доставку до лабораторії для подальших досліджень виконували за вимогами [28].

У лабораторії визначали фізичні властивості за [32] й характеристики міцності та деформативності ущільненого ґрунту (кут внутрішнього тертя φ , питоме зчеплення c , модуль деформації E) за [31].

Підсумки досліджень групували за технологічними параметрами укочування ґрунту.

Відбір зразків ущільненого ґрунту методом ріжучих кілець у шурфах з кожного ущільненого шару насипу складався з таких послідовних операцій (рис. 4.3):

- ущільнення ґрунту (рис. 4.2, а);
- зняття верхнього шару (рис. 4.2, б);
- вдавлювання кільця в ґрунт (рис. 4.2, в);
- підрізання ріжучого кільця з боків і знизу;
- виймання ріжучого кільця з ґрунтом;
- зрізання ґрунту з верхньої та нижньої кромки кільця (рис. 4.2, г), зразки якого відбирають у бюкси для подальшого лабораторного визначення його вологості.

Відбір зразків ущільненого ґрунту методом ріжучих кілець у шурфах з їх подальшим лабораторним дослідженням виконували як безпосередньо після ущільнення кожного шару, так і через 0,5 – 1 місяць «відпочинку».

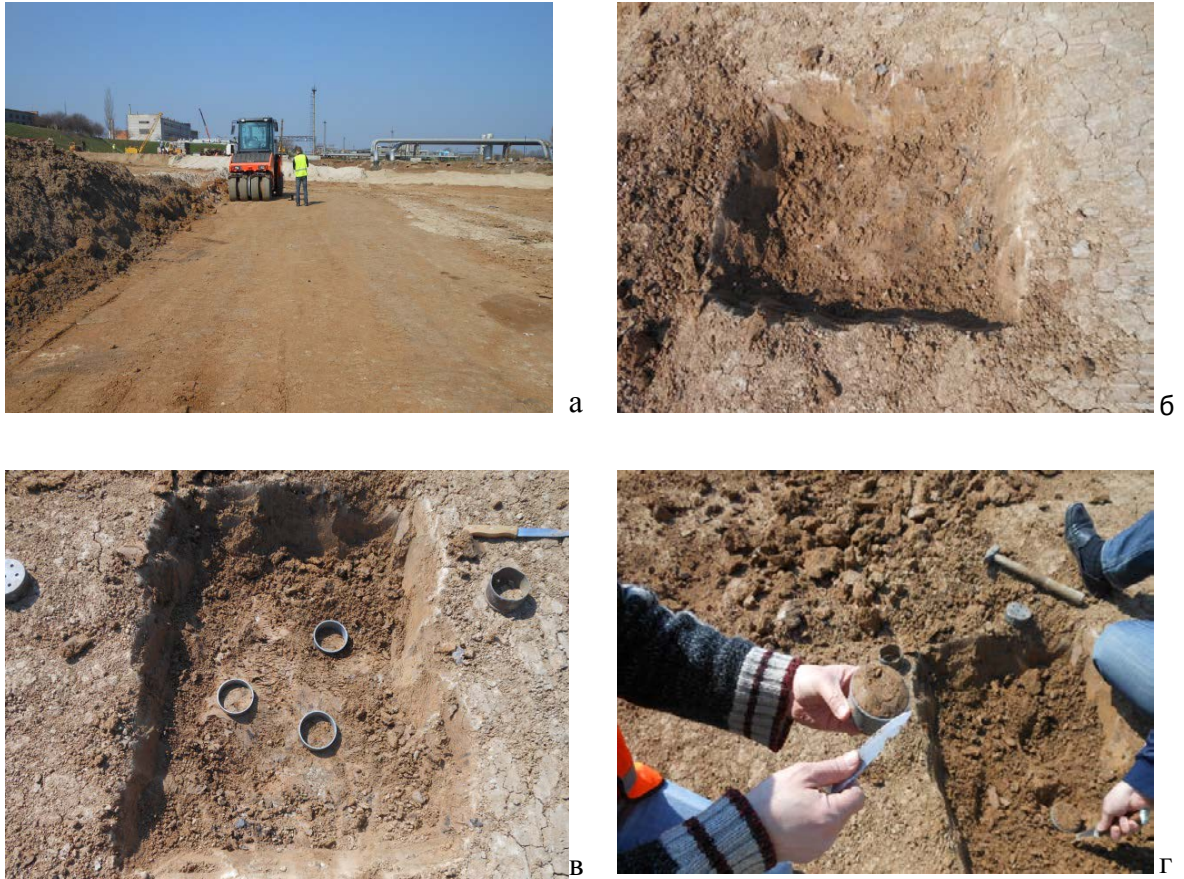


Рис. 4.2 Відбір зразків ущільненого легкого пілуватого суглинку методом ріжучих кілець з шару дорожнього насипу:

а – ущільнення шару; б – зняття верхнього шару; в – вдавлювання кільця в ґрунт;
г – зрізання ґрунту з верхньої та нижньої кромки кільця

4.1.2 Лабораторні дослідження фізико-механічних властивостей ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів

Відібрані в ріжучі кільця зразки доставляли в лабораторію геотехніки ПолНТУ.

На першому етапі відповідно до норм [32] визначали фізичні властивості: щільність ρ , щільність скелету ґрунту ρ_d ; вологість w ; вологість на межі розкочування W_p і текучості W_L , число пластичності I_p ,

показник текучості I_L , – й встановлювали повну назву цього глинистого ґрунту.

На другому етапі за [31] визначали деформаційні показники цього ґрунту у приладах з компресійних випробувань КПП-1 (рис. 4.3, а) ступеневим прикладанням тиску $\sigma = 0,05; 0,10; 0,20; 0,30$ МПа до зразків без їх бічного розширення.

При цьому послідовно встановлювали: початковий коефіцієнт пористості ґрунту e_0 ; коефіцієнти пористості e_i при відповідних тисках σ_i ; відповідні коефіцієнти стисливості m_0 й відносної стисливості m_v . Кожну ступінь витримували до умовної стабілізації деформації за [31] – 0,01 мм, після чого прикладали нову ступінь.

Для зразків ґрунту проводили penetраційні дослідження у лабораторії за такою методикою: після досягнення умовної стабілізації деформацій кільце зі зразком виймали з ущільнювача й здійснювали penetрацію ґрунту з використанням лабораторного пенетрометра ЛП-1 (рис. 4.3, б) наконечником із кутом конічності 30° при чотирьох – п'яти ступенях навантаження й кінцевому зануренні конусу $h \geq 1,0$ см. Навантаження на першому ступені – 0,66 – 0,76 Н (вага конусу зі штангою), а на наступних – залежно від виду і стану ґрунту. Інтервал прикладання навантаження – 0,5 хв. Глибину занурення конусу визначали за шкалою індикатора годинникового типу з точністю 0,01 см. Дані випробувань зв'язних ґрунтів оброблялись, враховуючи лінійну залежність, між зусиллям penetрації P і квадратом глибини занурення наконечника h^2 (4.1), а для незв'язних – за залежністю $h^3 = f(P)$ (4.2). Питомий опір penetрації R зв'язних і незв'язних ґрунтів відповідно дорівнює:

$$R = (P \pm P_0)/h^2; \quad (4.1)$$

$$R = (P \pm P_0)/h^3, \quad (4.2)$$

де P_0 – поправка до зусилля penetрації (координата точки перетину усереднюючої прямої осі зусиль), H , що залежить від ґрунту, умов експерименту [87].

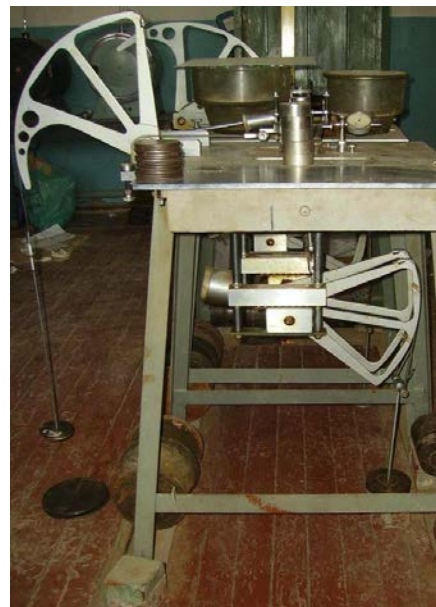
Про високу якість проведення дослідів свідчить майже функціональна залежність між зусиллям penetрації P і квадратом глибини занурення наконечника h^2 , яка відображена коефіцієнтом лінійної кореляції $r \cong 1,0$.



а



б



в

Рис. 4.3 Лабораторне обладнання для визначення механічних характеристик ґрунту: а – компресійний прилад; б – лабораторний пенетрометр; в – прилад одноплощинного зрушення

Після компресії та penetрації зразки випробували у приладі одноплощинного зрушення ПСГ-2М (рис. 4.3, в), в якому обойма розділена на верхню, що може переміщуватись під дією горизонтального (дотичного) навантаження Q , і нижню, нерухому, частини за [31]. Між частинами кільця встановлювали проріз 0,5 – 1 мм, що задає площину, за якою відбудеться зрушення рухомої частини зразка за нерухомою. На зразок через штамп передавали стискаючу силу F . Горизонтальні переміщення верхньої частини зразка $\Delta\ell$ фіксували індикатором до верхньої каретки. Для встановлення залежності між опором зрушенню $\tau = Q/A$ і вертикальним напруженням $\sigma = F/A$, де A – площа поперечного перерізу зразка, дослід проводили при кількох вертикальних напруженнях. Навантаження Q прикладали ступенями до тих пір поки не відбудеться зрушення (чи досягненні $\Delta\ell = 5$ мм). Графік будують у координатах « $\tau - \Delta\ell$ ». За ним визначають граничний опір зрушенню τ , а за даними серії випробувань отримують графік у координатах « $\tau - \sigma$ ». За цими даними обраховують значення c та ϕ .

Таким чином, на конкретних об'єктах пошарово ущільнених дорожніх насипів з глинистого ґрунту апробовано методику геотехнічного контролю якості ущільнення ґрунту дорожніх насипів методом ріжучих кілець.

4.2. Результати польових досліджень міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів

За даними лабораторних досліджень для матеріалу дорожнього насипу на об'єкті №1 – «Облаштування Хрестищенського ГКР, реконструкція Хрестищенської ДКС» використано суглинок важкий пилуватий, твердий, що має такі індикаційні характеристики:

– вологість природна $w = 0,21$;

- вологість на межі текучості $W_L = 0,40$;
- вологість на межі розкочування $W_p = 0,23$;
- число пластичності $I_p = 0,17$;
- отримана оптимальна вологість $W_{opt} = W_p = 0,23$;
- середня щільність скелету ґрунту в ущільненому насипу $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$.

Оскільки ґрунт на об'єкті Хрестищенське ГКР мав вологість, меншу за оптимальну, то його дозволили з $W = 0,21$ до $W_{opt} = 0,23$. Розрахунковий об'єм води на 1 м^2 при товщині шару $0,2 \text{ м}$ становив

$$Q = \frac{1,1 \cdot (W_{opt} - W) \cdot \rho_{dc} \cdot \Delta h}{\rho_w} = 0,022 \cdot 1,6 \cdot 0,2 = 0,007 \text{ м}^3. \quad (4.1)$$

Цей об'єм води рівномірно розподілили за всією площею 1 м^2 заданою товщиною $0,2 \text{ м}$.

Товщина шару ґрунту після його та планування до горизонтального рівня складала переважно $0,20 \text{ м}$. Машини, задіяні для укочування ґрунту, представлені в п. 4.1.

За даними лабораторних досліджень для матеріалу дорожнього насипу на об'єкті №2 – площадка в м. Лубни Полтавської області, використано суглинок лесований брунатний, легкий пілуватий, напівтвердий і має такі індикаційні характеристики:

- вологість природна $w = 0,17 - 0,20$;
- вологість на межі текучості $W_L = 0,27$;
- вологість на межі розкочування $W_p = 0,20$;
- число пластичності $W_{opt} = 0,07$;
- середня щільність скелету ґрунту в ущільненому насипу $\rho_d = 1,64 \text{ г/см}^3$.

Тобто, вологість ґрунту в межах насипу ($W = 0,20$) досить близька до її оптимального значення $W_{opt} = W_p = 0,204$.

Фактична товщина шару ґрунту, що відсипався, складав 25 – 30 см. Його укочування здійснювали за 6 – 10 проходок завантаженого автомобіля КрАЗ-256 по одному сліду.

В результаті досліджень фізико-механічних характеристик ґрунту ущільненого ґрунтового насипу на об'єкті №3 по вул. Гагаріна в м. Лубни Полтавської області встановлено, що його ґрунт – суглинок лесований, брунатний, важкий пілуватий, від твердого до напівтвердого з наступними значеннями фізичних характеристик:

- вологість природна $w = 0,175 – 0,195$;
- вологість на межі текучості $w_L = 0,34$;
- вологість на межі розкочування $W_p = 0,19$;
- число пластичності $I_p = 0,15$;
- отримана оптимальна вологість $W_{opt} = W_p = 0,19$;
- середня щільність скелету ґрунту в ущільненому насипу
 $\rho_d = 1,705 \text{ г/см}^3$.

Товщина шару ґрунту після його планування до горизонтального рівня складала переважно 0,25 – 0,30 м. Укочування здійснювали проходами завантажених автомобілів КрАЗ і МАЗ по одному сліду.

За результатами досліджень фізико-механічних характеристик ґрунту при геотехнічному контролі якості ущільнення ґрунтового полотна на об'єкті №4 – насип під'їзної залізничної колії комплексу по прийманню, зберіганню та відвантаженню зернових та олійних культур по станції Ромодан у смт. Ромодан Полтавської області встановлено, що його ґрунт – суглинок лесований, важкий пілуватий, твердий з наступними значеннями фізичних характеристик:

- вологість природна $w = 0,21$;
- вологість на межі текучості $w_L = 0,355$;

- вологість на межі розкочування $W_p = 0,22$;
- число пластичності $I_p = 0,135$;
- середня щільність скелету ґрунту в ущільненому насипу $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$.

Фактична товщина шару ґрунту, що відсипався, складав 25 – 30 см. Його укочування здійснювалось катком на базі скрепера МОАЗ 6014 масою 25 т за 6 – 10 прохідок по одному сліду (рис. 4.4).



а



б

Рис. 4.4 Зведення ґрунтового насипу на об'єкті №4: а – ущільнюючий механізм – каток на базі скрепера МОАЗ 6014; б – вигляд ЗП після укочування

За результатами геотехнічного контролю якості ущільнення ґрунту на площадці на об'єкті №4 – «Розширення зерносховища ТОВ «Елеватор АГРО» на 80000 т зерна в с. Івківці Прилуцького району Чернігівської області» встановлено, що його ґрунт – суглинок лесований, жовтувато-бурий, легкий пилуватий, тугопластичний з наступними значеннями фізичних характеристик:

- вологість природна $w = 0,225$;
- вологість на межі текучості $W_L = 0,27$;
- вологість на межі розкочування $W_p = 0,19$;
- число пластичності $I_p = 0,08$;
- середня щільність скелету ґрунту в ущільненому насипу $\rho_d = 1,57 \text{ г/см}^3$.

Після влаштування ґрунтового насипу до початку його експлуатації було витримано «відпочинок» до 1 місяця, і знову шляхом відбору зразків у різучі кільця було визначено вологість ущільнених глинистих ґрунтів, яка в середньому склала:

- на першому об'єкті $w_k = 0,17$;
- на другому – $w_k = 0,13$;
- та третьому – $w_k = 0,15$;
- на четвертому – $w_k = 0,17$;
- та п'ятому – $w_k = 0,15$.

Таким чином, встановлено, що вологість пошарово ущільнених легкого та важкого пилуватих суглинків після влаштування насипу до початку його експлуатації за час «відпочинку» зменшилась і наблизилась до максимальної молекулярної вологості.

4.3 Кількісні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів за результатами польових досліджень

Отже, доцільно виконати двохфакторний статистичний аналіз (аналогічний описаному в п. 3.4) залежності стабілізованої вологості w_k ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу від щільності скелету ґрунту ЗП та його числа пластичності [174].

В результаті такого двохфакторного статистичного аналізу методом найменших квадратів отримано емпіричну залежність, аналогічну виразу (3.2), стабілізованої вологості w_k ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу від щільності скелету ґрунту та його числа пластичності, емпіричні коефіцієнти якої в даному випадку становлять:

- $a_0 = 0,490$;
- $a_1 = -0,238$;
- $a_2 = 0,440$.

При цьому значення коефіцієнту множинної кореляції становить $r = 0,993$, а критерію Фішера $F = 76,73$, що більше за його табличне значення $F_{табл.} = 19,25$ при рівні значущості $p = 5\%$ та числі ступенів свободи $\nu_1 = 4$ і $\nu_2 = 2$ (при кількості дослідів $n = 5$).

Значення статистичних показників свідчать про тісний зв'язок між дослідними даними, а отже про коректність емпіричної формули (3.2) для результатів польових досліджень.

Порівнянням величин стабілізованої вологості w_k ущільненого (до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65$ г/см³) глинистого ґрунту ЗП, визначених за виразом (3.2) за різних значень емпіричних коефіцієнтів a_0 , a_1 , a_2 для лабораторних і натурних умов, встановлено, що:

– при числі пластичності ґрунту $I_p = 0,07$ (тобто, легкий пілуватий суглинок близький за властивостями до пілуватого супіску) величини вологості w_k , отримані за формулою (3.2) за даними натурних досліджень, перевищують аналогічні значення, отримані за результатами лабораторних досліджень, не більш, ніж на 0,015;

– при числі пластичності ґрунту $I_p = 0,17$ (тобто, важкий пілуватий суглинок близький за властивостями до легкої пілуватої глини) різниця величин вологості w_k , отримані за виразом (3.2) за результатами польових і лабораторних досліджень, не перевищує 0,005.

Було також порівняно значення характеристик міцності (кута внутрішнього тертя ϕ та питомого зчеплення c) суглинку важкого пілуватого, зразки якого було відібрано в кільця на об'єкті №1 безпосередньо з ущільненого насипу (п. 4.1.1). Щільність скелету ґрунту при цьому склала $\rho_d = 1,65$ г/см³. Одна група зразків відповідала укочуванню ґрунту за вологості $w = 0,21$, а друга – за вологості $w_k = 0,17$. Зразки зберігались у вологому ексікаторі.

В результаті випробувань цих зразків на одноплощинне зрушення отримано для ущільненого суглинку першої групи кут внутрішнього тертя склав $\phi = 24^\circ$, питоме зчеплення $c = 34$ кПа, а для ущільненого суглинку другої групи $\phi = 24^\circ$, а $c = 41$ кПа. Отже, міцність глинистого ґрунту, ущільненого при вологості, близькій до вологості, що відповідає максимального вмісту зв'язаної води, w_k виявилась вищою, ніж за вологості, що перевищувала цю величину.

Таким чином, підтверджено загальний вигляд отриманої за лабораторним дослідом залежності стабілізованої вологості суглинків для їх пошарового ущільнення від величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності ґрунту. Різниця величин цієї вологості, отримані за емпіричним виразом за даними польових і

лабораторних дослідів, при $I_p = 0,17$ не перевищує 0,005, а при $I_p = 0,07 - 0,015$.

4.4. Висновки до розділу 4

Результати польових досліджень вологісного режиму пошарово ущільнених легких і важких пилуватих суглинків у межах ЗП дозволили зробити наступні висновки.

1. Польовим дослідним ущільненням знайдено оптимальні параметри ущільнення суглинків пилуватих – оптимальна вологість W_{opt} , максимальна щільність скелету ґрунту $\rho_{d\max}$, відповідна кількість циклів ущільнюючого механізму, катка, у статичному режимі роботи N . Доведено, що проектна щільність скелету ґрунту при його оптимальній вологості досягається за меншої кількості проходів катка.

2. Дослідним шляхом підтверджено, що оптимальна вологість ущільнення шляхом пошарового укочування в статичному режимі суглинку легкого пилуватого складає $W_{opt} \approx 19\%$, що на 1% менше від його вологості на межі розкочування $W_p = 20\%$. При цьому відповідна максимальна щільність скелету ґрунту $\rho_{d\max} \approx 1,68 - 1,705$ г/см³ при середньому значенні коефіцієнта ущільнення ґрунту $k_s = 0,98$.

3. На конкретних об'єктах пошарово ущільнених дорожніх насипів з глинистого ґрунту апробовано методику геотехнічного контролю якості ущільнення ґрунту дорожніх насипів методом ріжучих кілець. Визначено вид ґрунту та його індикаційні характеристики: природну вологість, вологість на межі текучості та розкочування, число пластичності та щільність скелету ґрунту.

4. Натурним дослідом встановлено, що вологість суглинків пилуватих, пошарово укочених за вологості на межі розкочування цих ґрунтів, за час «відпочинку» після зведення дорожнього насипу до початку його експлуатації зменшується приблизно до максимальної молекулярної вологоємності.

5. Підтверджено загальний вигляд отриманої за лабораторним дослідом залежності стабілізованої вологості суглинків для їх пошарового ущільнення від величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності ґрунту. При цьому різниця величин стабілізованої вологості глинистого ґрунту ЗП w_k , отримані за емпіричним виразом (3.2) за результатами польових і лабораторних досліджень, при числі пластичності $I_p = 0,17$ не перевищує 0,005, а при $I_p = 0,07$ величини w_k , отримані за даними натурних досліджень, перевищують аналогічні значення, отримані за результатами лабораторних досліджень, не більш, ніж на 0,015.

РОЗДІЛ 5

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У ПРАКТИКУ ЗВЕДЕННЯ ГЛИНИСТИХ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ

5.1 Встановлення коректних умов моделювання МСЕ процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів

Як визначено у висновках до першого розділу, рішення просторових задач МСЕ з використанням пружно-пластичних моделей ґрунту доводять можливість коректного моделювання ущільнення ґрунту, але невирішеним поки є питання апробації цих рішень для моделювання процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності.

Для моделювання процесу пошарового ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожнього насипу використано добре апробований програмний комплекс «PRIZ-Pile» (про нього мова йшла в п. 1.4), який було створено Ю.Л. Винниковим і С.Ф. Клованичем, у якому реалізоване рішення вісесиметричної задачі МСЕ кроково-ітераційними методами у фізично й геометрично нелінійній постановці з представленням ґрунту ізотропним чи ортотропним середовищем [13, 48].

Блок-схеми комплексу «PRIZ-Pile» та пакету програм «Pile Graph» [13] до нього подані в Додатку Б.

Застосування восьмивузлових ізопараметричних вісесиметричних скінчених елементів, що мають властивості значно змінюватися за формою й об'ємом, дає можливість використання як прямокутної, так і криволінійної сітки скінчених елементів, а врахування цих змін – визначення переміщень, напружень і наведених властивостей ґрунту на кожному кроці влаштування й

навантаження фундаментів. Моделювання їх зведення полягає в завданні переміщень вузлів сітки скінчених елементів з оцінюванням НДС масиву.

При представленні ґрунту ізотропним середовищем фізичні рівняння напруженого стану в матричній формі мають вигляд [13]

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = \frac{E}{\Omega} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix}; \quad (5.1)$$

$$\Omega = [(1+\nu)(1-2\nu)]/(1-\nu), \quad (5.2)$$

де σ_r , σ_θ , σ_z , τ_{rz} – нормальні та дотичні напруження в скінчених елементах у циліндричних координатах;

E – модуль деформації ґрунту цього ж скінченого елемента;

ν – коефіцієнт Пуассона ґрунту скінченого елемента;

ε_r , ε_θ , ε_z , γ_{rz} – осьові та кутові компоненти відносних деформацій у скінченому елементі.

За феноменологічною моделлю ґрунту в задачах ущільнення масиву (перший етап моделювання) враховується як геометрична, так і фізична нелінійність роботи ґрунту, а для наступної роботи основи під статичним навантаженням (другий етап) – лише фізична нелінійність.

Після першого етапу напруження релаксуються, а наведені характеристики ґрунту зберігаються.

Особливість моделі за значної геометричної й фізичної нелінійності – опис у явній формі зміни характеристик при незворотних об'ємних деформаціях ґрунту залежно від зміни пористості та швидкості передачі на нього тиску.

Особливість моделі за малих деформацій – у тому, що загальні деформації включають лінійну й пластичну складові, причому пластична виникає з досягненням напруженого стану межі міцності відповідно до умови Мізеса–Шлейхера–Боткіна. Враховується і зміцнення ґрунту як на першому етапі.

Параметри моделі встановлюють інтерпретацією логарифмічної функції даних компресійних випробувань ґрунту відповідно до швидкості передачі тиску при влаштуванні чи експлуатації основ.

Співвідношення дотичного й нормального напруження визначають за прямим зрушенням ґрунту в діапазоні нормальних напружень, аналогічному одноосьовому стисненню.

Параметром прийнятої феноменологічної моделі ґрунту, що використовується в програмному комплексі «PRIZ-Pile» для прогнозування величини модуля його деформації в кожному шарі ґрунту ЗП після його укочування, зокрема, є закономірність деформування ґрунту, що зв'язує відношення модулів деформації E_i/E_0 та відношення об'ємів ґрунту (наприклад, у компресійному кільці чи скінченому елементі) V_i/V_0 відповідно на i -ому та початковому ступені тиску.

Ці залежності апроксимуються з найкращими статистичними показниками логарифмічними функціями, зокрема вигляду [13]

$$E_i/E_0 = 1 + a_0[V_i/V_0 - \ln(V_i/V_0) - 1], \quad (5.3)$$

де a_0 – емпіричний коефіцієнт.

Для моделювання на першому етапі укочування глинистих ґрунтів використовуються результати компресійних випробувань при часі витримки Δt кожного ступеня тиску $\Delta\sigma = 0,1$ МПа на ґрунт від 10 – 15 секунд до 1 хвилини) при кінцевому тискові, що відповідає його середній величині під катком (звичайно до $\sigma = 1,5 - 2$ МПа), а на другому етапі для імітації

статичного тиску під подошвою фундаменту на дорожній насип – дані аналогічних, але значно більш «повільних» компресійних випробувань (при часі витримки кожного ступеня тиску до умовної стабілізації деформацій 0,01 мм за 16 годин згідно із п. 5.4.4.6 ДСТУ Б В.2.1-4-96 [31]) і при кінцевому значенні тиску, що відповідає його середній величині під фундаментом (найчастіше до $\sigma = 0,3 - 0,4$ МПа).

Експериментальну залежність $E_i / E_0 = f(V_i / V_0)$ для подальших розрахунків досить часто представляють також у табличній формі.

Згідно з дослідженням створення основ і фундаментів, а також штучних ґрунтових споруд, зокрема ЗП, класу «Робота ґрунту без можливості його бічного витиснення з-під робочого органу чи фундаменту» слід моделювати заданням лише вимушених вертикальних переміщень вузлових точок верхньої межі (чи горизонтальних переміщень вузлових точок відповідно вертикальної осі симетрії) розрахункової області.

При цьому можливість витиснення ґрунту в інших напрямках відсутня. Для цього класу за неї прийнята, так звана «компресійна задача» [13].

На відміну від інших пружно-пластичних моделей ґрунту з фіксованим значенням модуля деформації, ця феноменологічна модель ущільнення глинистого ґрунту в явній формі описує його зміни від незворотних об'ємних деформацій ущільнення, у т. ч. укочуванням, залежно від зміни пористості ґрунту й швидкості передачі на нього тиску, а для кожного режиму укочування слід визначати лише один емпіричний коефіцієнт a_0 .

Для моделювання процесу ущільнення шляхом укочування глинистих ґрунтів у складі шарів дорожнього насипу цілком достатньо використання можливостей лише першого етапу «компресійної задачі» програмного комплексу «PRIZ-Pile».

На цьому етапі моделюють процес укочування шарів глинистих ґрунтів у складі ЗП.

Вплив укочування задають у вигляді вимушених вертикальних переміщень вузлів сітки скінчених елементів, які лежать на верхній межі розрахункової області, що моделює процес витиснення ґрунту катком.

Ці переміщення ведуть до зменшення об'єму скінчених елементів, а отже, й зменшення пористості ґрунту і зростання його модуля деформації та міцності.

Оскільки вимушені переміщення сумірні з розмірами скінчених елементів, на кожному кроці коригується вихідна розрахункова схема уточненням координат вузлів з урахуванням переміщень, отриманих на попередньому кроці.

Зі зміною координат змінюються об'єми скінчених елементів, що дає можливість уточнити величину модуля деформації ґрунту в кожному скінченому елементі за формулою (5.3) для компресійних випробувань відповідно до режиму укочування.

Коефіцієнт пористості ґрунту в кожному скінченому елементі при цьому складає

$$e_i = e_0 - (1 + e_0)(1 - V_i/V_0). \quad (5.4)$$

Результатом першого етапу (а за необхідності і кожного з його кроків) є нові координати вузлів скінчених елементів, наведені властивості ґрунту (частіше ρ_d , e , E), переміщення вузлів сітки скінчених елементів, напруження, зокрема вертикальні (ізобари σ_z) та радіальні (розпори σ_r) нормальні, що подаються у вигляді таблиць, графіків, ізоліній.

Розрахунок на першому етапі пов'язаний з кроковим рішенням задачі на задані переміщення та ведеться за деформованою схемою на кожному кроці.

При цьому, як правило, відбувається істотна зміна форми скінчених елементів, що може призвести до виродження скінчених елементів («якобіан перетворення координат стає непозитивним»).

Щоб уникнути цього переміщення вузлів задають не більше від величини добутку розміру скінчених елементів й пористості ґрунту в ньому чи відповідним чином підбирають розміри скінчених елементів.

Якщо все ж розрахунок на більші переміщення необхідний, їх задають частинами по кроках, кількість яких задається в контрольних даних.

Розрахункова область вісесиметричної задачі моделювання укочуванням шарів глинистих ґрунтів у дорожнього насипу – циліндр (рис. 5.1, а), отриманий обертанням прямокутної розрахункової зони (рис. 5.1, б) навколо осі симетрії ОА.

Розміри розрахункової зони для цієї задачі встановлюють таким чином:

- бічні межі ОА та ВС приймають відповідно на осі симетрії і достатній відстані від місця вимушених переміщень для максимального зменшення впливу з умови заборони горизонтальних переміщень, концентрації напружень й ущільнення ґрунту на контакті із зовнішньою межею розрахункової зони. Для виконання цієї умови в задачі укочування ґрунту катком слід прийняти діаметр розрахункової області не менше ніж $10b$, де b – довжина барабану катка;

- верхню (горизонтальну) межу ОВ розміщують на рівні поверхні шару відсипаного ґрунту до його укочування;

- на першому етапі моделювання за нижню горизонтальну межу АС приймають покрівлю вже ущільненого шару ґрунту (за натурними дослідями впливом на нього від прохідки катка верхнім шаром ґрунту насипу можна знехтувати);

- на другому етапі моделювання нижня горизонтальна межа АС повинна знаходитись у шарі, що не має особливих властивостей і придатний як природна основа; за глибину розрахункової зони прийнята нижня межа стислої товщі згідно з додатком Д ДБН В.2.1-10-2009 [26].

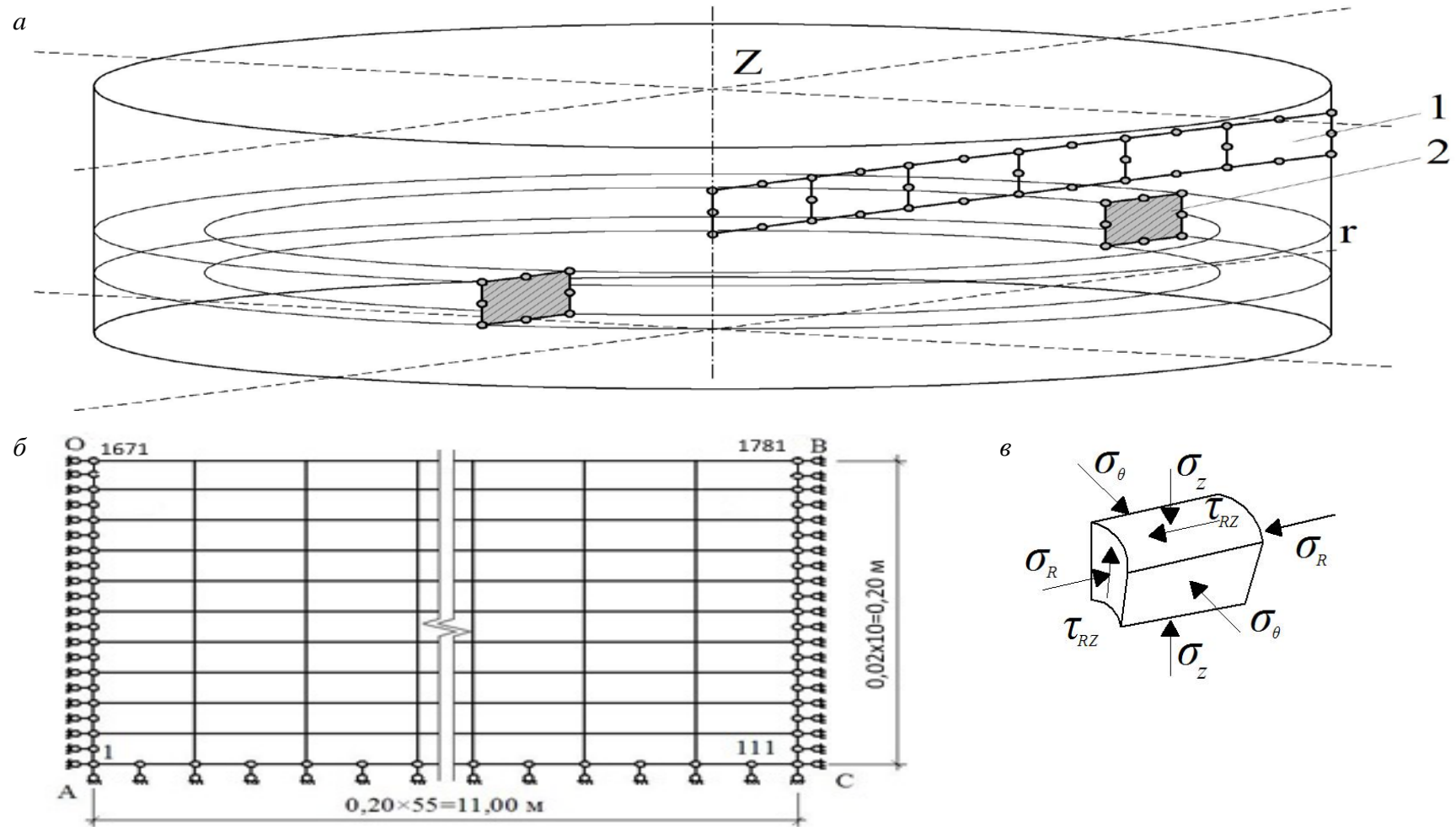


Рис. 5.1 Вихідна розрахункова область вісесиметричної задачі у формі циліндру: *a* – розрахункова область; *б* – прямокутна розрахункова зона (для прикладу, укочування шару глинистого ґрунту гладким катком); *в* – компоненти напружень; 1 – фрагмент членування розрахункової області; 2 – скінчений елемент

Прийнята наскрізна нумерація вузлів й скінчених елементів. Їх нумерують, починаючи з нижніх скінчених елементів і від осі симетрії. Розміри скінчених елементів приймають, переважно, з урахуванням величин вимушених переміщень на першому етапі моделювання. Звичайно сітку скінчених елементів згущують (їх розміри зменшують) у місцях, де на першому етапі передбачаються найбільші вимушені переміщення (а звідси суттєва зміна фізико-механічних характеристик ґрунту та НДС масиву), а на другому – переміщення ґрунту й концентрація напружень у ньому.

Після призначення розмірів розрахункової зони й поділу її на скінчені елементи встановлюють граничні умови, що відповідають натурним умовам утворення та роботи основ і фундаментів під навантаженням, а саме: всі вузли, що знаходяться на нижній межі АС, закріплюються непорушно; вузли бічних меж ОА і ВС не можуть мати горизонтальних переміщень, крім тих вузлів, яким на першому етапі задають вимушені переміщення та які близькі до останніх (звичайно вони лежать на осі ОА).

У результаті розрахунків першого етапу знаходять переміщення вузлових точок, нові координати вузлів деформованої схеми, деформації, напруження, наведені значення щільності скелету ґрунту, модуля деформації та інших характеристик у кожному скінченому елементі, змінені за рахунок зменшення його об'єму.

Таким чином, маючи вихідні параметри кожного шару насипного ґрунту (початкову товщину відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП грейдером чи бульдозером шару h , щільність скелету ґрунту $\rho_{d.0}$ в ньому (ще до укочування) і відповідні величини модуля деформації, параметри міцності) і технологічного обладнання (довжина барабану b) та задаючись зниженням поверхні кожного шару насипу під катком Δh , проектувальник (чи безпосередній виконавець робіт) з використанням можливостей комплексу «PRIZ-Pile» отримує відповідні наведені властивості ґрунту кожного шару дорожнього насипу.

З попереднього досвіду [13] достовірність рішень, отриманих моделюванням МСЕ за програмним комплексом «PRIZ-Pile», забезпечується формою та властивостями скінчених елементів, формою та розмірами розрахункової області, вибором відповідних розрахункових схем МСЕ укочування шарів ґрунту ЗП, відповідності параметрів моделі дійсному стану ґрунту при його влаштуванні.

Як вихідні використані дані влаштування з глинистих ґрунтів пошарово ущільненого дорожнього насипу на об'єкті «Облаштування Хрестищенського ГКР, реконструкція Хрестищенської ДКС» (див. розділ 4).

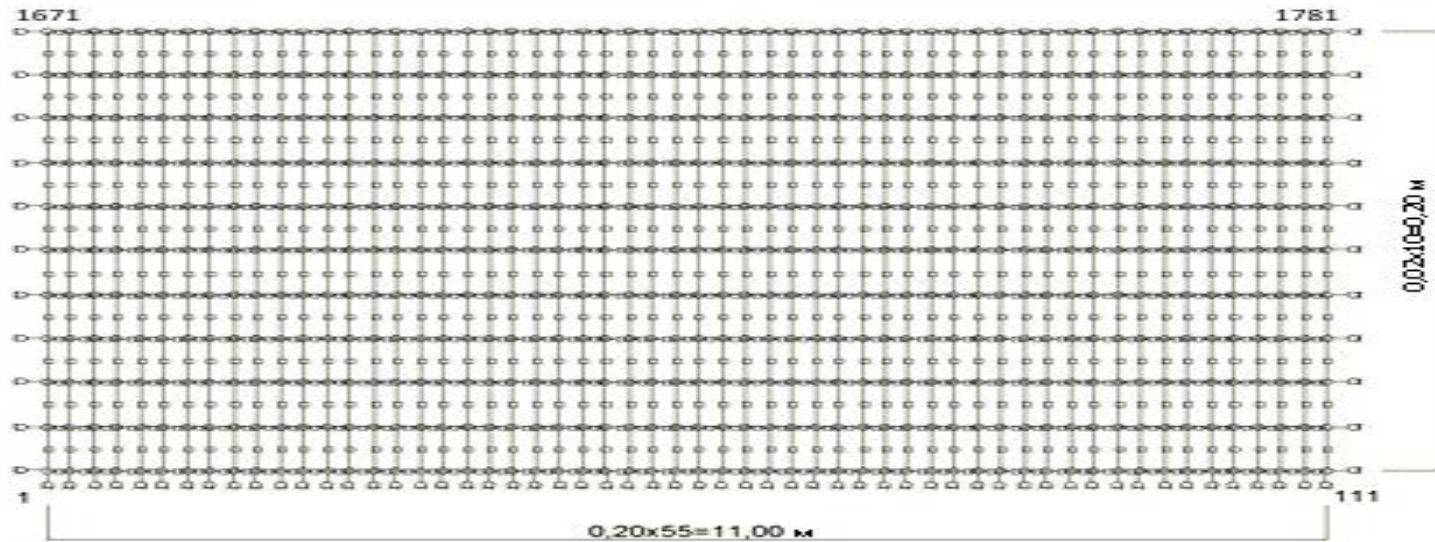
Зокрема, було сплановано чисельний дослід з впливу на середнє значення щільності скелету глинистого ґрунту в кожному ущільненому шарі трьох технологічних чинників:

- початкової щільності скелету глинистого ґрунту в межах шару після його відсипання та розрівнювання $\rho_{d,0}$;
- початкової товщини відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП грейдером чи бульдозером шару h ;
- зниження поверхні кожного шару глинистого ґрунту під гладким катком Δh .

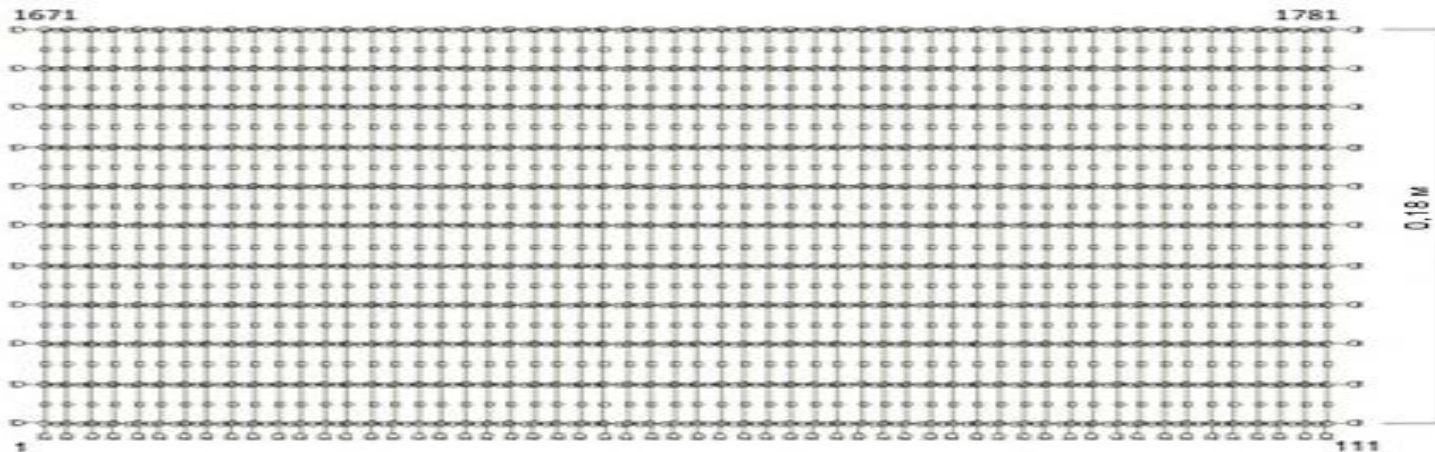
За даними натурних досліджень прийнято, що оптимальна кількість проходів гладкого самохідного пневмоколісного катка HammHD 150 TT за одним слідом склала 14.

При моделюванні укочування шару глинистого ґрунту прийнята вихідна розрахункова схема (рис. 5.2, а), що містить 550 скінчених елементів (55×10), 1781 вузлів сітки скінчених елементів, з яких 151 – закріплені.

В результаті чисельного моделювання було виконано трьохчинниковий аналіз впливу на середнє значення щільності скелету ґрунту в ущільненому шарі (відповідно ρ_d , т/м³) технологічних чинників:



а



б

Рис. 5.2 Схеми розбивки прямокутної розрахункової зони на скінчені елементи для моделювання процесу укочування відсипаного та спланованого до горизонтального рівня грейдером чи бульдозером шару глинистого ґрунту:
а – вихідна; б – після укочування гладким катком

1) початкової щільності скелету глинистого ґрунту в межах шару після його відсипання та розрівнювання $\rho_{d,0}$ (в дослідах $\rho_d = 1,30 \text{ т/м}^3$; $1,35 \text{ т/м}^3$; $1,40 \text{ т/м}^3$);

2) початкова товщина відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП грейдером чи бульдозером шару h (в дослідах – $h = 0,15 \text{ м}$; $0,20 \text{ м}$; $0,25 \text{ м}$);

3) зниження поверхні цього шару ґрунту під катком Δh (у дослідах – $\Delta h = 0,02 \text{ м}$; $0,03 \text{ м}$; $0,04 \text{ м}$).

Тому розміри скінчених елементів склали в дослідах $200 \times 15 \text{ мм}$, $200 \times 20 \text{ мм}$ і $200 \times 25 \text{ мм}$.

Відповідно розмір прямокутної утворюючої розрахункової області (рис. 5.1, б та рис. 5.2, а) складав $11,0 \times 0,15 \text{ м}$, $11,0 \times 0,20 \text{ м}$ і $11,0 \times 0,25 \text{ м}$.

Підстильний, вже ущільнений, шар подушки приймали як нестисливий. Вимушені вертикальні переміщення задавали всім вузловим точкам верхньої межі розрахункової області (умова «компресійної задачі»). Зокрема, 111 вузлам (від 1671 до 1781) задавались вертикальні переміщення на величини $\Delta h = 15 \text{ мм}$, 20 мм (рис. 5.2, б) і 25 мм .

Отже, загальна кількість дослідів, таким чином, склала $n = 3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$. З них до подальшого аналізу було прийнято лише 14 результатів чисельного моделювання, в яких одержано реальні значення щільності скелету глинистого ґрунту в кожному ущільненому шарі у межах $\rho_d = 1,55 - 1,75 \text{ т/м}^3$. В результаті трьохчинникового аналізу отримано наступне рівняння взаємозв'язку між щільністю скелету глинистого ґрунту в кожному ущільненому шарі ρ_d та початковою щільністю скелету глинистого ґрунту в межах шару після його відсипання та розрівнювання $\rho_{d,0}$, початковою товщиною відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП грейдером чи бульдозером шару h , зниженням поверхні кожного шару глинистого ґрунту під гладким катком Δh

$$\rho_d = a_0 + a_1 \cdot \rho_{d,0} + a_2 \cdot h + a_3 \cdot \Delta h, \quad (5.5)$$

де $a_0 = 0,4716 \text{ т/м}^3$; $a_1 = 0,8703$; $a_2 = -1,4648 \text{ т/м}^4$; $a_3 = 8,5459 \text{ т/м}^4$ – емпіричні коефіцієнти виразу (5.3).

Для рівняння (5.5) величина коефіцієнта множинної кореляції склала $r = 0,9279$, а величина критерію Фішера $F = 7,1976$, що більше за його табличне значення $F_{\text{табл.}} \approx 2,65$ при рівні значущості $p = 5\%$ та числі ступенів свободи $\nu_1 = 13$ і $\nu_2 = 10$. Отже, вираз (5.3) є цілком коректним. Відносна похибка змодельованих величин ρ_d порівняно з результатами натурних досліджень не перевищує 2,24%.

Отже, результати чисельного моделювання укочування гладким катком шарів різної товщини суглинку з різною початковою щільністю скелету ґрунту в межах шару після його відсипання та розрівнювання при різній величині зниження поверхні кожного шару глинистого ґрунту під гладким катком дорожнього насипу на об'єкті «Облаштування Хрестищенського ГКР, реконструкція Хрестищенської ДКС», в цілому, добре корелюється з даними натурних досліджень.

Таким чином, встановлено нові коректні умови моделювання процесу пошарового ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів з використанням можливостей задачі класу «Робота ґрунту без можливості його бічного витиснення з-під робочого органу чи фундаменту» за пружно-пластичною феноменологічною моделлю ґрунту за умов вісесиметричної версії МСЕ у фізично та геометрично нелінійній постановці, в результаті чого проектувальник отримує щільність скелету ґрунту та модуль його деформації в кожному шарі. На точність моделювання процесу укочування суттєво впливають початкова товщина відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП грейдером чи бульдозером шару ґрунту; зниження його поверхні під катком, щільність скелету ґрунту в межах кожного шару після його відсипання та розрівнювання.

З високими значеннями статистичних показників отримано емпіричне рівняння взаємозв'язку між щільністю скелету глинистого ґрунту в кожному ущільненому шарі ρ_d та початковою щільністю скелету глинистого ґрунту в

межах шару після його відсипання та розрівнювання $\rho_{d,0}$, початковою товщиною відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП грейдером чи бульдозером шару h , зниженням поверхні кожного шару глинистого ґрунту під гладким катком Δh .

5.2 Пропозиції з удосконалення оптимальних критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожніх насипів

У попередніх розділах було встановлено, що для тривалої експлуатації дорожнього насипу важливі не лише максимально досягнуті значення щільності скелету ґрунту та його міцності, а й збереження їх протягом тривалого часу експлуатації; на стан ущільненого ґрунту в часі істотно впливає вологість, за якої проведено ущільнення, і кількісне співвідношення окремих видів води в ущільненому ґрунті. Тому проектування процесу пошарового ущільнення (укочування) глинистих ґрунтів дорожнього насипу за умови тривалої міцності зводиться до визначення параметрів, які дозволяють ущільнити ґрунт до максимально можливої щільності при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води.

Отже, доцільно виконувати пошарове укочування глинистих ґрунтів саме за вологості, що відповідає максимальному вмісту зв'язаної води (чи стабілізованої величини вологості ґрунту w_k), тобто приймаючи величину оптимальної вологості ґрунту за формулою (3.2) в залежності від проектної величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності цього ґрунту.

Величина цієї вологості ґрунту w_k нижча за значення його вологості на межі розкочування W_p (як це прийнято у виразі (1.3)). Однак, діапазон сучасної ущільнюючої техніки дає можливість достатньо збільшувати питому енергію ущільнення, щоб укочувати глинистий ґрунт за вологості,

меншої від вологості на межі розкочування, досягаючи при цьому максимальної щільності ґрунту ЗП.

Дослідне підтвердження такого висновку можна знайти в працях «XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development», який пройшов в Едінбурзі в 2015 році, присвячений, головним чином, саме проблемам дорожнього будівництва, зокрема в доповідях румунських фахівців – С. Dobrescu та ін. [133], Е. Olinic та ін. [160], а також англійців – А. Hasan та ін. [139]. З українських фахівців, зокрема, аналогічні результати отримав професор Д.О. Павлюк [82].

При цьому товщину шару глинистого ґрунту після його відсипання та планування до горизонтального рівня, а також кількість проходів техніки за одним слідом традиційно слід приймати в залежності від виду ущільнюючого механізму.

Розвиток технологій зі створення штучних основ і земляних споруд (насипи, дамби тощо), особливо за рахунок ущільнення ґрунтів, у т. ч. динамічним навантаженням, потребує відповідного забезпечення контролю за якістю ущільнення ґрунту. З аналізу досліджень у галузі геотехніки можна зробити висновок, що методики дослідження властивостей ґрунтів постійно вдосконалюються. Одним із найбільш актуальних напрямів є контроль властивостей ґрунтів за допомогою пенетрації. Ефективним способом для нормування механічних властивостей ґрунтів і оперативного контролю якості їх ущільнення є встановлення графіків взаємозв'язку фізичних і механічних властивостей ґрунтів [4, 51].

Для використання пенетраційного методу контролю якості ущільнення ґрунтів проводять пенетраційні випробування при різній вологості й будують номограму взаємозв'язку між питомим об'ємом скелету ґрунту $1/\rho_d$, вологістю W та питомим опором пенетрації R . У процесі виконання робіт знаходять значення питомого об'єму скелету ґрунту $1/\rho_d$ і при відомому значенні вологості визначають величину питомого опору пенетрації R_c , яке повинне бути досягнуто в кінці

ущільнення. Після проектної кількості проходів катка виконують пенетраційні випробування, знаходять питомий опір пенетрації R , роблять висновок про можливість відсипання наступного шару (якщо $R \geq R_c$) чи про необхідність додаткового ущільнення (якщо $R < R_c$) [4, 38, 87].

У зв'язку з тим, що статична пенетрація й відомі методи динамічного прикладання навантаження при випробуваннях ґрунту мають певні обмеження для достовірного вирішення питань, пов'язаних з дією на ґрунт динамічних впливів, доцільно вдосконалювати динамічний метод пенетрації та зіставляти його результати з даними статичної пенетрації. У ньому для визначення властивостей ґрунтів теж використовують конічний наконечник, але для його занурення прикладають ударне навантаження, що створюють скиданням вантажу з певної висоти.

Умовою встановлення взаємозв'язку між показниками фізичного стану ґрунту (природна вологість W , коефіцієнт пористості e_0 , щільність скелету ґрунту ρ_d , питомий об'єм скелету ґрунту $1/\rho_d$ тощо) й показниками механічних властивостей (питомий опір пенетрації R , кут внутрішнього тертя φ , питома зчеплення c , модуль деформації E та ін.) є накопичення результатів випробувань для визначення перелічених характеристик ґрунтів із відносно постійним числом пластичності й літологічно (генетично) однорідних. Визначення коефіцієнтів рівнянь взаємозв'язку за кожним масивом експериментальних даних звичайно виконують способом найменших квадратів із розрахунком значень необхідних статистичних даних (коефіцієнтів кореляції r , варіації v тощо) [4, 38].

У квітні – травні 2013 року автор [4] спільно з фахівцями Полтавського ТОВ «ЕКФА» виконала дослідження якості ущільнення ґрунту дорожнього насипу Хрестищенського ГКР у Красноградському районі Харківської області, про що йшла мова у четвертому розділі. Якість ущільнення ґрунту постійно контролювали відповідно до реальних темпів зведення насипу й намагалися, щоб проміжок часу між відбором зразків і початком випробувань їх у лабораторії не перевищував однієї

доби для оперативного внесення коректив у процес ущільнення. Так, було здійснено комплексні лабораторні випробування зразків, до складу яких входило визначення показників фізичних властивостей ущільненого ґрунту (щільність скелету ґрунту ρ_d , природна вологість W , вологість на межі розкочування W_p , вологість на межі текучості W_L , число пластичності I_p , показник текучості I_p , оптимальна вологість W_{opt}).

При пенетраційних випробуваннях (рис. 5.3 а, б) використовували конічний наконечник з кутом при вершині $\alpha = 30^\circ$. Завантаження його в лабораторному пенетрометрі ЛП-1 (див. рис. 4.3, б) виконували ступенями різної величини залежно від фізичного стану ґрунту, переважно від 1 до 10 Н. Кількість ступенів навантаження визначалася глибиною занурення наконечника $h \geq 10$ мм. Тривалість витримування кожного ступеня – 1 хв. Фіксація глибини занурення здійснювалася за індикатором годинникового типу з точністю до 0,01 мм [38]. Обробку даних пенетрації виконували, враховуючи відому властивість інваріантності показника пенетрації R від величини навантаження P та квадрату глибини занурення конуса h^2 методом найменших квадратів за виразом (4.1).

Показники пенетрації оцінювали за коефіцієнтом лінійної кореляції r між параметрами P і h^2 , значення якого для динамічної пенетрації перевищувало 0,99, що свідчить про практично функціональний зв'язок цих показників. У результаті було пропенетровано близько 100 зразків ущільненого ґрунту одного генетичного різновиду й встановлено взаємозв'язок між показниками його фізичних властивостей та опором пенетрації, а також внесено пропозиції щодо суттєвого зменшення обсягів випробувань традиційними методами за рахунок запровадження пенетраційних випробувань.



Рис. 5.3 Проведення пенетрації: а – статичної; б – динамічної

Статистичні дані й обробку результатів дослідження наведено в табл. 5.1. Коефіцієнт кореляції при статичних пенетраційних випробуваннях склав 0,958, а при випробуваннях динамічною пенетрацією – 0,998. За результатами табл. 5.1 побудовано номограми залежності питомого об'єму скелету ґрунту від питомого опору статичної (рис. 5.4, а) та динамічної (рис. 5.4, б) пенетрації [4]. З аналізу номограм бачимо, що при відомій вологості за результатами пенетраційних випробувань легко визначати відповідну величину питомого об'єму скелету ґрунту. Візьмемо, наприклад, значення вологості за результатами динамічної пенетрації $W = 0,20$, величину щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,597 \text{ г/см}^3$ ($1/\rho_d = 0,626 \text{ см}^3/\text{г}$). Для значення $1/\rho_d = 0,626 \text{ см}^3/\text{г}$ величина достатнього питомого опору динамічної пенетрації складає $R = 82,30 \text{ кг/см}^2$. Це значення і є критерієм необхідного ущільнення ґрунту [4].

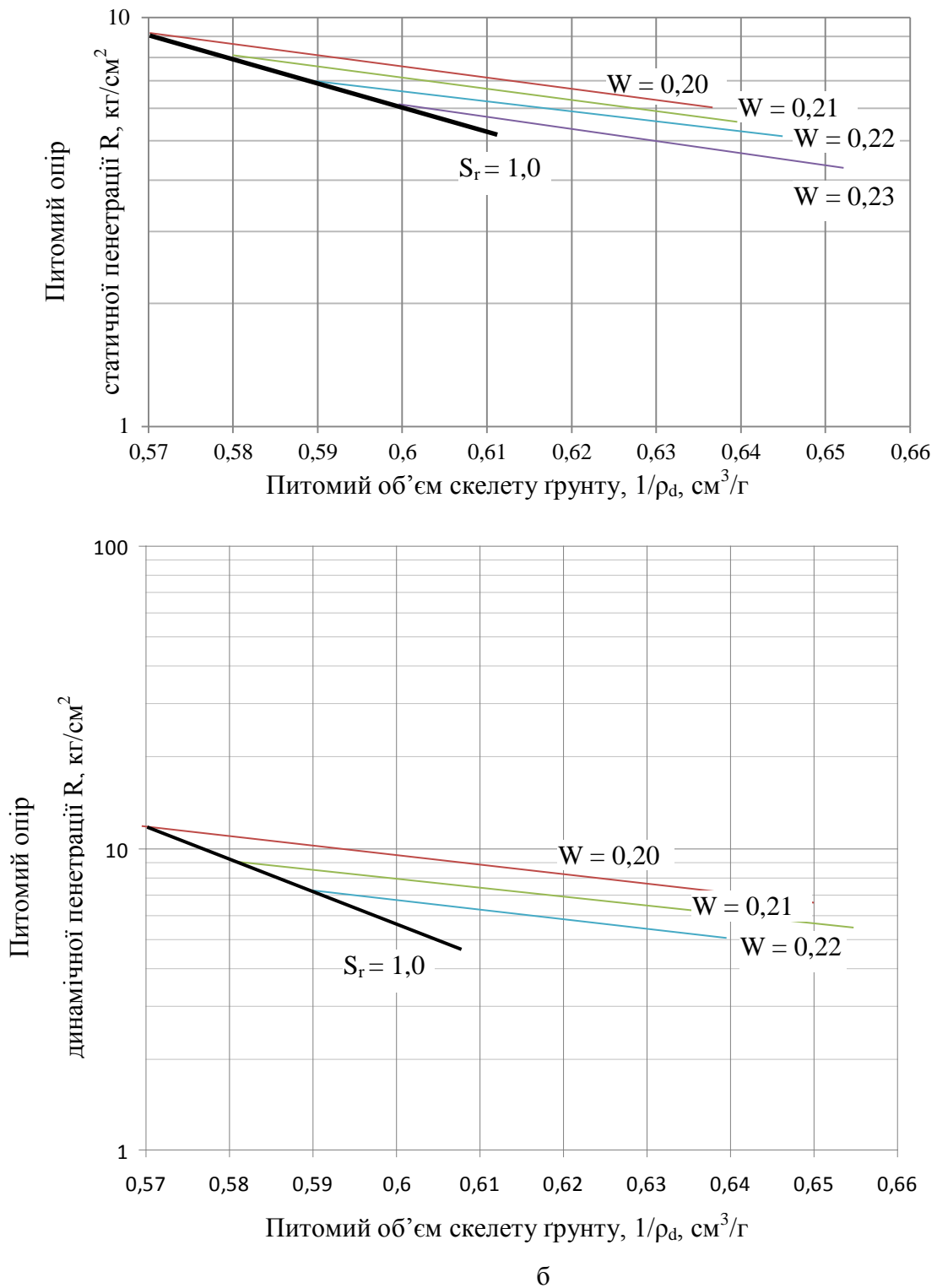


Рис. 5.4 Номограми penetрації: а – статичної; б – динамічної

Застосування penetраційних випробувань з удосконаленою методикою обробки їх результатів дозволило одержати більш точний показник механічних властивостей зв'язного ґрунту R , що не залежить від особливостей проведення penetрації й тісно пов'язаний із параметрами фізичного стану ґрунту, котрі визначають традиційними методами. Точність обчислення показника penetрації забезпечується можливістю проведення

великої кількості окремих випробувань та подальшого визначення його статистично обґрунтованої величини [4].

Таким чином, результати комплексних випробувань генетично однорідного, штучно ущільненого зв'язного ґрунту підтвердили можливість виявлення взаємозв'язку між показниками фізичного стану ґрунту та питомим опором статичної та динамічної пенетрації. Аналізуючи результати лабораторних випробувань ущільненого ґрунту статичною та динамічною пенетрацією, зафіксовано тенденцію до зменшення величини питомого опору пенетрації зі збільшенням вологості й зростанням величини опору пенетрації зі збільшенням щільності скелету ґрунту.

5.3. Пропозиції з удосконалення конструкції та технології зведення ґрунтових дорожніх насипів

Як відзначено в попередніх розділах, проблема підсилення властивостей основ насипів є однією з найбільш актуальних при спорудженні земляного полотна автомобільних доріг [5, 20, 54], оскільки просадочні ґрунти виявлені майже на 75% території України, а у Вінницькій, Дніпропетровській, Миколаївській, Одеській, Харківській, Херсонській областях вони покривають практично всю територію.

Ґрунти мають відносно низьку межу міцності, тому вони не здатні витримувати всі види зусиль, що діють на ґрунтову конструкцію під впливом зовнішнього навантаження [20]. Тому в комплексі з пошаровим укочуванням глинистих ґрунтів при їх вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води, доцільне, особливо у верхніх шарах ЗП (які, як свідчать лабораторні дослідження, викладені в розділі 2, часто виявляються зволожені до коефіцієнта водонасичення $S_r \approx 1,0$) використання геосинтетичних матеріалів – геосіток, геотекстильних полотен або геокомпозиційних

матеріалів, що дозволяє витримувати створювані граничні стани структури. Геосинтетичні продукти використовують як армуючий елемент, тому що їх властивості покращують умови роботи ЗП [5, 20].

Найбільш поширеним методом зміцнення ґрунтів дорожніх насипів в сучасних умовах є їх армування геосинтетичними матеріалами [20]. Приклади сучасних конструкцій дорожніх насипів на перезволожених і слабких ґрунтах із застосуванням геосинтетиків подано на рис. 5.5 – 5.7.

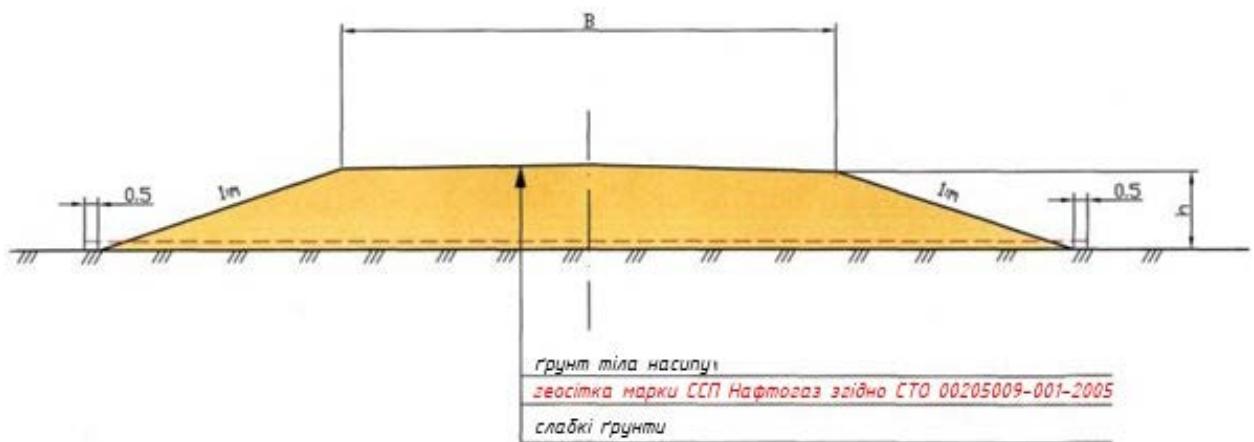


Рис. 5.5 Конструкція насипу на слабкому ґрунті

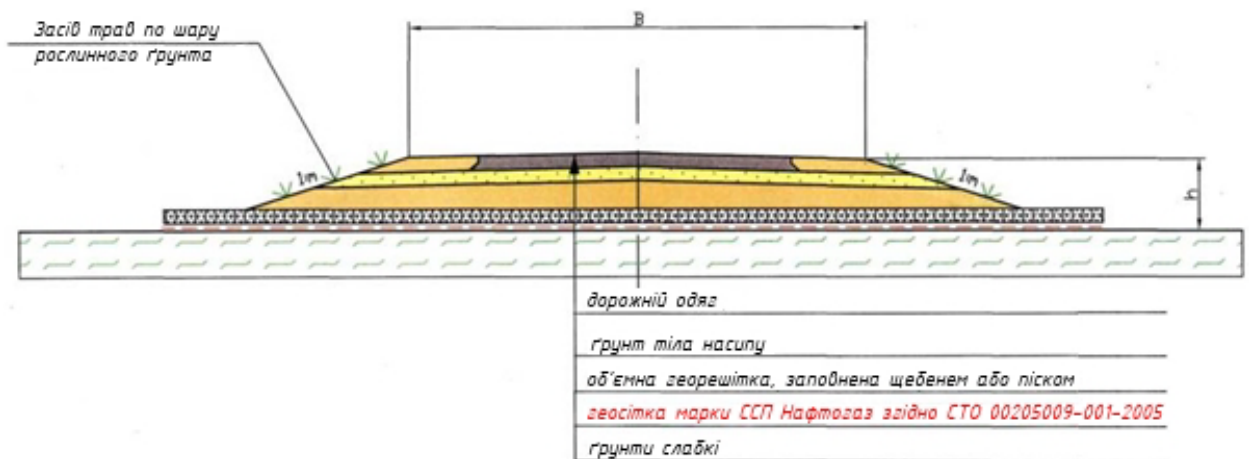


Рис. 5.6 Конструкція насипу на перезволоженому ґрунті із використанням просторової геосітки

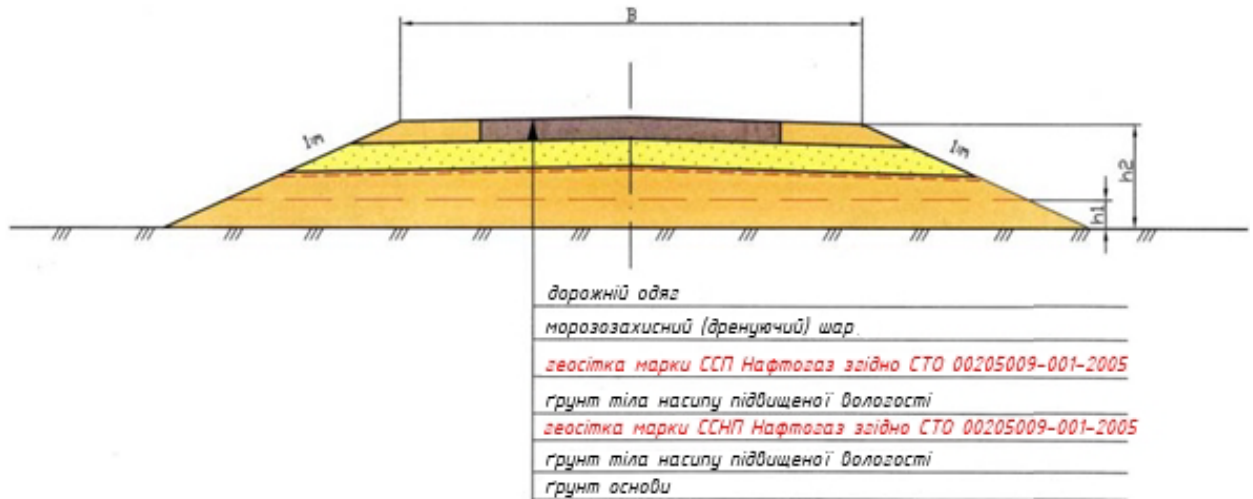


Рис. 5.7 Конструкція насипу із ґрунту підвищеної вологості

Сучасні геосинтетичні матеріали, що застосовуються в дорожньому будівництві виконують функції:

- дренажу (підвищення ефективності відведення води);
- розподілу (запобігання переміщенню двох різних ґрунтів або матеріалів);
- укріплення схилів (розподілення зусиль розтягу у схилах);
- укріплення слабких ґрунтів (збільшення несучої здатності ґрунту);
- контролю ерозії та стабілізації поверхні (запобігає переміщенню ґрунту внаслідок опадів, стоку вод та дії вітру);
- огороження (опір боковому зрушенню ґрунтових мас) [20].

Геосинтетичні матеріали поліпшують технічні характеристики дорожніх конструкцій завдяки своїм властивостям: високій міцності на розтяг і розрив при малих деформаціях, високій адгезії з ґрунтом, довговічності, а також стійкості до дії хімічно агресивних середовищ [20, 54]. Розширення асортименту геосинтетичних матеріалів призвело до збільшення області їх застосування та функціональності. Залежно від виду конструкцій дороги, характеристик ґрунтів і навантажень застосовують ті чи інші геосинтетичні матеріали.

При укладанні полотен геосинтетичних матеріалів на природну ґрунтову основу насипу спостерігаються незначні, переважно рівномірні

осідання, а чергування полотен синтетичного матеріалу та шарів ґрунту в тілі насипу збільшує тертя між ними і тим самим підвищує його стійкість. Укладання геосинтетичного матеріалу у відповідний перетин насипу протидіє сповзанню його укосів. Застосування геосинтетичних матеріалів – це нові рішення та технології в будівництві, які дозволяють:

- забезпечити довготривалу та надійну експлуатацію будівельних об'єктів, земляного полотна та дорожніх покриттів;
- запобігти руйнуванню земляного та дорожнього полотна, розмиванню ґрунту, утворенню тріщин і вибоїн, просіданню ґрунту;
- спростити технологію проведення будівельних робіт;
- скоротити терміни будівельних робіт;
- підвищити якість споруд, що зводяться.

Додатковими перевагами використання геосинтетичних матеріалів є їх зручність в транспортуванні та зберіганні, простота при укладанні (без застосування спеціального устаткування), низька собівартість і рентабельність. Зведене до мінімуму втручання в навколишнє середовище робить геоматеріали екологічно безпечними та ефективними, що в сучасних умовах є необхідним показником якості будівельних матеріалів.

Результати дисертаційної роботи, зокрема, використані (відповідні довідки про впровадження результатів дисертації вміщено в Додатку В):

- ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (НДІБК) при розробці розділів 10 «Вказівки щодо проектування будівель і споруд на слабких ґрунтах» та 11 «Конструктивні та геотехнічні заходи захисту» ДСТУ-Н Б В.1.1-XX:201X «Настанова з проектування будинків, будівель і споруд на слабких ґрунтах»;
- ДП «Полтавський облавтодор» при лабораторному контролі якості ущільнення ґрунтів ЗП автодороги Полтава – Олександрія (М22);
- ТОВ «ЕКФА» при геотехнічному супроводженні пошарового ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу на об'єкті «Облаштування

Хрещищенського ГКР. Реконструкція Хрещищенської ДКС» у Красноградському районі Харківської області;

– ТОВ «РСУ – 8» при капітальному ремонті проїзної частини по вул. Промислова (від вул. Гурамівці до будинку №10) в м. Карлівка Полтавської області;

– кафедрою автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель ПолтНТУ при викладанні курсу «Технологія будівництва земляного полотна», а також при виконанні 2 магістерських робіт «Удосконалення критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожніх насипів» (2014 р.) і «Вологісний режим ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу» (2015 р.) на цій кафедрі.

5.4 Висновки до розділу 5

1. Встановлено нові коректні умови моделювання процесу пошарового ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів з використанням можливостей задачі класу «Робота ґрунту без можливості його бічного витиснення з-під робочого органу» за пружно-пластичною феноменологічною моделлю ґрунту за умов вісесиметричної версії МСЕ у фізично та геометрично нелінійній постановці, в результаті чого проектувальник отримує щільність скелету ґрунту та модуль його деформації в кожному шарі. На точність моделювання процесу укочування суттєво впливають початкова товщина після відсипання та планування до горизонтального рівня шару ґрунту; зниження його поверхні під катком, щільність скелету ґрунту в межах кожного шару після його відсипання та розрівнювання.

2. З високими значеннями статистичних показників отримано емпіричне рівняння взаємозв'язку між щільністю скелету глинистого ґрунту

в кожному ущільненому шарі та початковою щільністю скелету глинистого ґрунту в межах шару після його відсипання та розрівнювання, початковою товщиною відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП, зниженням поверхні кожного шару глинистого ґрунту під гладким катком.

3. Доцільно виконувати пошарове укочування глинистих ґрунтів за вологості, що відповідає максимальному вмісту зв'язаної води, приймаючи її за виразом (3.2) в залежності від проектної величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності цього ґрунту. Величина цієї вологості ґрунту нижча за значення вологості на межі розкочування, але сучасна ущільнююча техніка дає можливість достатньо збільшувати питому енергію ущільнення, щоб укочувати ґрунт за вологості, меншої за вологість на межі розкочування, при максимальній щільності ґрунтів ЗП. При дотриманні такої умови забезпечується тривала міцність глинистих ґрунтів дорожніх насипів і відповідно їх мінімальні деформації за нормативний час експлуатації ЗП, порівняно із загальноприйнятим підходом щодо укочування ґрунту за оптимальної вологості, яка відповідає його вологості на межі розкочування.

4. Застосування модифікованого автором динамічного пенетраційного методу контролю якості ущільнення глинистих ґрунтів з удосконаленою методикою обробки їх результатів дозволило одержати більш точний показник механічних властивостей зв'язного ґрунту R , що не залежить від особливостей проведення пенетрації й тісно пов'язаний із параметрами фізичного стану ґрунту, котрі визначають традиційними методами.

5. У комплексі з пошаровим укочуванням глинистих ґрунтів при їх вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води, доцільне, особливо у верхніх шарах дорожніх насипів використання геосинтетичних (геосіток, геотекстильних полотен) або геокомпозиційних матеріалів, що дозволяє витримувати створювані граничні стани структури та покращити умови роботи ЗП.

6. Результати досліджень використано: ДП НДІБК при розробці розділів 10 та 11 ДСТУ-Н Б В.1.1-ХХ:201Х «Настанова з проектування будинків, будівель і споруд на слабких ґрунтах»; ДП «Полтавський облавтодор» при лабораторному контролі якості ущільнення ґрунтів земляного полотна автодороги Полтава – Олександрія (М22); ТОВ «ЕКФА» при геотехнічному супроводженні пошарового ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу на об'єкті «Облаштування Хрестищенського ГКР. Реконструкція Хрестищенської ДКС»; ТОВ «РСУ – 8» при капітальному ремонті проїзної частини по вул. Промислова (від вул. Гурамівці до будинку №10) в м. Карлівка Полтавської області; кафедрою автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель ПолтНТУ при викладанні курсу «Технологія будівництва земляного полотна», а також при виконанні 2 магістерських робіт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Викладені експериментально-теоретичні дослідження свідчать про розв'язання в дисертації наукової задачі з удосконалення оптимальних критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу, за яких забезпечується їх тривала міцність. Вони дали змогу зробити висновки.

1. Згідно норм максимальну щільність скелету ρ_{dmax} і оптимальну вологість W_{opt} призначають з отриманих в лабораторії за тестом Проктора значень для певного виду ґрунту та параметрів динамічного впливу без урахування особливостей механізмів. Але норми відстають від можливостей техніки, бо зі збільшенням питомої енергії ущільнення величини оптимальної вологості та максимальної щільності ґрунтів значно змінюються. Дослідно підтверджено гіпотезу, що найбільш сприятливою умовою забезпечення тривалої міцності глинистих ґрунтів ЗП і відповідно мінімальних деформацій за нормативний час його експлуатації є пошарове ущільнення ґрунту за вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води.

2. Для обґрунтування нових оптимальних критеріїв ущільнення, за яких забезпечується тривала міцність глинистих ґрунтів ЗП розроблено та реалізовано нову методику фізичного лабораторного експерименту зі встановлення закономірностей міграції води в товщі дорожнього насипу, в якості факторів якого прийнято: вид глинистого ґрунту; вологість його ущільнення; щільність скелету ґрунту в насипу; висота насипу; час «відпочинку» після зведення й до початку експлуатації насипу.

3. Статистичним аналізом результатів лабораторного дослідження отримано емпіричну залежність стабілізованої вологості пилюватих суглинків для їх пошарового ущільнення в залежності від величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності ґрунту. Цей параметр відповідає вологості максимального вмісту зв'язаної води, за якої доцільно виконувати пошарове ущільнення глинистих ґрунтів ЗП для забезпечення їх тривалої міцності. Висота насипу з пошарово ущільненого

грунту і час «відпочинку» ЗП після 2 місяців суттєво не впливають на величину стабілізованої вологості ґрунту.

4. Натурним дослідом встановлено, що вологість суглинків, пошарово укочених за вологості на межі розкочування цих ґрунтів, за час «відпочинку» після зведення ЗП до початку його експлуатації зменшується до максимальної молекулярної вологоємності. Підтверджено загальний вигляд отриманої за лабораторним дослідом залежності стабілізованої вологості суглинків для їх пошарового ущільнення від щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу й числа пластичності ґрунту I_p . Різниця величин цієї вологості, отримані за емпіричним виразом за даними польових і лабораторних дослідів, при $I_p = 0,17$ не перевищує 0,005, а при $I_p = 0,07 - 0,015$.

5. Встановлено нові коректні умови моделювання процесу пошарового ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів з використанням задачі класу «Робота ґрунту без можливості його бічного витиснення з-під робочого органу» у вісесиметричній версії МСЕ у фізично та геометрично нелінійній постановці, в результаті чого маємо щільність скелету ґрунту та модуль його деформації в кожному шарі. Отримано рівняння взаємозв'язку між щільністю скелету ґрунту в кожному ущільненому шарі та початковою щільністю скелету глинистого ґрунту в межах шару після його відсипання та планування, початковою товщиною спланованого до горизонтального рівня ЗП, зниженням поверхні кожного шару ґрунту під гладким катком.

6. Укочування глинистих ґрунтів слід вести за вологості, що відповідає максимальному вмісту зв'язаної води, приймаючи її залежно від проектної величини щільності скелету ґрунту ЗП і його I_p , що забезпечує максимальну щільність ґрунтів і їх тривалу міцність. Результати досліджень використано: ДП НДІБК у ДСТУ-Н Б В.1.1-XX:201X; ДП «Полтавський облавтодор» при контролі якості ущільнення ґрунтів ЗП дороги Полтава – Олександрія (М22); ТОВ «ЕКФА» при зведенні насипу на «Облаштуванні Хрещищенського ГКР»; ТОВ «РСУ – 8» при капремонті проїзної частини вул. Промислова в Карлівці; ПолтНТУ в курсі «Технологія будівництва ЗП» і роботах магістрів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**Публікації у наукових фахових виданнях України**

1. Коваленко В.І. Визначення опору ґрунтів динамічним навантаженням / В.І. Коваленко, М.О. Харченко, Ю.Л. Винников, Р.Г. Савенко, Т.В. Литвиненко, Я.В. Носаченко // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – Вип. 2(30). – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – С. 180 – 184.
2. Коваленко В.І. Методика визначення механічних властивостей ущільнених укочуванням розкривних супісків / В.І. Коваленко, Р.М. Лопан, В.А. Василенко, Т.В. Литвиненко, П.М. Омельченко // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во). / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – Вип. 4(34). – Т. 2. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – С. 107 – 114.
3. Біда С.В. Аналіз взаємозв'язку питомого об'єму скелету ґрунту та вологості з питомим опором статичної та динамічної пенетрації / С.В. Біда, Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко, П.М. Омельченко // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 3(38). – Т. 1. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – С. 56 – 63.
4. Винников Ю.Л. Нові критерії оптимального ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2014. – Вип. 1(11). – С. 424 – 433.
5. Винников Ю.Л. Моделювання міграції води в ущільненому глинистому насипу / Ю.Л. Винников, В.І. Коваленко, Т.В. Литвиненко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. Вип. 29. – Рівне: НУВГП, 2014. – С. 525 – 531.
6. Винников Ю.Л. Дослідження стабілізованої вологості ущільненого глинистого насипу / Ю.Л. Винников, В.І. Коваленко, Т.В. Литвиненко //

- Вісник Сумського національного аграрного університету. Науковий журнал. – Серія «Будівництво». – Вип. 10(18), 2014. – С. 158 – 161.
7. Винников Ю.Л. Лабораторные исследования влажностного режима уплотненного суглинка дорожной насыпи / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 155. – С. 158 – 164. (Міжн. науком. база Index Copernicus).
 8. Винников Ю.Л. Фактори впливу на міграцію води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2016. – Вип. 1(15). – С. 92 – 102.
 9. Lytvynenko T.V. Qualitative relationships of water migration in highway embankment clay soils / T.V. Lytvynenko // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 1 (46). – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – С. 256 – 263. (Міжн. науком. база Index Copernicus).
 10. Vynnykov Yu. Qualitative relationships of water migration in highway embankment clay soils by the results of laboratory and field research / Y.L. Vynnykov, T.V. Lytvynenko // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 2(47)'. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – С. 226 – 232. (Міжн. науком. база Index Copernicus).

Публікації у закордонних наукових періодичних виданнях

11. Vynnykov Y.L. Investigation of Compacted Clay Embankment Stabilized Moisture / Y.L. Vynnykov, V.I. Kovalenko, T.V. Lytvynenko // Collection of scientific articles «Energy, Energy Saving and Rational Nature Use». – №2(3), 2014. – Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom,

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. – Radom, 2014. – P. 53 – 57. (Міжн. науком. база Index Copernicus).

12. Vynnykov Y.L. Time influence on water migration of compacted clay soils highway embankment / Y.L. Vynnykov, T.V. Lytvynenko // Механика и технологии. 2016, №3(53). – Научный журнал. – Тараз: РГП «Таразский государственный университет им. М.Х. Дулати». – 2016. – С. 115 – 119. (Міжн. науком. база даних Information Service for Physics, Electronics and Computing (INSPEC DIRECT) Інституту Інжинірингу і Технологій Великобританії).

Публікації у збірниках праць за матеріалами конференцій

13. Литвиненко Т.В. Динамічна penetрація ґрунтів / Т.В. Литвиненко, Ю.Л. Винников // Матеріали інтернет-конф. молодих учених «Проблеми сучасного будівництва» (21 – 22 листопада 2012 р.). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – С. 45 – 47.
14. Винников Ю.Л. Експрес-методи визначення геотехнічних властивостей ґрунтів дорожніх насипів / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Зб. наук. праць студентів будівельного факультету. – Вип. 4. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – С. 31 – 34.
15. Винников Ю.Л. Применение экспресс-методов для определения геотехнических свойств грунтов дорожных насыпей / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Строительство: проблемы и перспективы: сб. статей междунар. научно-практ. конф. 29 – 30 марта 2013 г. – Махачкала: ДГИНХ, 2013. – С. 53 – 55.
16. Литвиненко Т.В. Удосконалення експрес-методів контролю геотехнічних властивостей ґрунтів дорожніх насипів / Т.В. Литвиненко, Ю.Л. Винников // Матеріали Всеукр. конф. молодих учених і студентів «Перспективи розвитку будівельної галузі» (10 – 11 жовтня 2013 р.). – Полтава: ПолтНТУ. – 2013. – С. 20 – 25.

17. Винников Ю.Л. Нові критерії оптимального ущільнення ґрунтів дорожнього насипу / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Міське середовище – XXI. Архітектура. Будівництво. Дизайн: Тези доповідей І Міжнар. наук.-практ. конф., Київ, 10 – 14 лютого 2014 р. – К.: НАУ, 2014. – С. 296 – 297.
18. Винников Ю.Л. Совершенствование критериев оптимального уплотнения ґрунтов дорожной насыпи / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Модернизация и научные исследования в транспортном строительстве: Материалы междунар. науч.-практ. конф., Пермь, 24 – 25 апреля 2014 г. – Пермь: ПНИГУ, 2014. – С. 389 – 391.
19. Литвиненко Т.В. Нові критерії оптимального ущільнення ґрунтів дорожнього насипу / Т.В. Литвиненко, В.І. Омельченко // Тези 66 наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, Полтава, 2014 р). – Т. 1 – Полтава: ПолтНТУ, 2014. – С. 68 – 69.
20. Винников Ю.Л. Новые критерии оптимального уплотнения ґрунтов дорожной насыпи при условии обеспечения их продолжительной прочности / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Новые идеи нового века – 2014: материалы 14-ой междунар. научн. конф. – Т. 3. – Хабаровск: ТОГУ, 2014. – С. 338 – 343.
21. Литвиненко Т.В. Дослідження стабілізованої вологості ущільненого глинистого насипу / Т.В. Литвиненко, Д.Г. Хачіян // Матеріали Всеукр. Інтернет-конф. молодих учених і студентів «Проблеми сучасного будівництва» (17 грудня 2014 р.). – Полтава: ПолтНТУ, 2014 . – С. 55 – 58.
22. Литвиненко Т.В. Лабораторні дослідження вологісного режиму ущільненого суглинку дорожнього насипу / Т.В. Литвиненко, Д.Г. Хачіян, Ю.Л. Винников // Проблеми і перспективи сталого розвитку та просторового планування територій. – Матеріали Всеукр. інтернет-конф. молодих учених і студентів. 18.03.2015 р. – Полтава: ПолтНТУ. – 2015. – С. 180 – 182.

23. Винников Ю.Л. Лабораторные исследования влажностного режима уплотненного суглинка дорожной насыпи / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Проблемы надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті. – Тези 5-ої Міжн. науково-техн. конф., Харків, 23 – 24 квітня 2015 р. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – С. 40 – 41.
24. Винников Ю.Л. Фактори впливу на міграцію води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Міське середовище – XXI. Архітектура. Будівництво. Дизайн: Тези доповідей II Міжнар. наук.-практ. конгр., Київ, 15 – 18 березня 2016 р. – К.: НАУ, 2016. – С. 49 – 50.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алиев С.К. Лессовые просадочные грунты как основания земляного полотна автомобильных дорог: автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: 05.23.02 / С.К. Алиев. – Баку: ААСУ, 2009. – 39 с.
2. Аксьом Н.М. Вплив вологи на властивості ґрунтів і характер її розподілу в межах зсувного тіла // Зб. наук. пр. НТУ: Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 66. – К.: НТУ. – 2003. – С. 148 – 155.
3. Афиногенов А.О. Обоснование региональных норм степени уплотнения глинистых грунтов земляного полотна автомобильных дорог (на примере районов Западной Сибири): автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: 05.23.11 / А.О. Афиногенов. – Омск: ТГАСУ, 2011. – 22 с.
4. Біда С.В. Аналіз взаємозв'язку питомого об'єму скелету ґрунту та вологості з питомим опором статичної та динамічної пенетрації / С.В. Біда, Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко, П.М. Омельченко // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 3 (38). – Т. 1. – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – С. 56 – 63.
5. Белятинский А.А. Применение трехмерных георешеток для стабилизации переувлажненных грунтов на Украине / А.А. Белятинский, К.В. Краюшкина // Дороги. – №25, 2013. – С. 50 – 52.
6. Бируля В.И. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов / В.И. Бируля. – Харьков: ХГУ, 1956. – 124 с.
7. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса: монография / Г.Г. Болдырев. – Пенза: ПГУАС, 2008. – 696 с.
8. Васильев А.П. Эксплуатация автомобильных дорог / А.П. Васильев. – Т. 1. – М.: Издат. центр «Академия». – 2010. – 320 с.
9. Великодный Ю.И. Экспериментальные исследования особенностей выявления взаимосвязи между показателями физического состояния и

- прочностными свойствами связных грунтов: автореф. дис. на соискание уч. степ. канд. техн. наук: 05.23.02 / Ю.И. Великодний. – Одесса: ОИСИ, 1974. – 30 с.
10. ВБН В.2.3-218-186-2004. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу. – К.: НТУ, Укравтодор. – 2004. – 153 с.
11. Винников Ю.Л. Дослідження стабілізованої вологості ущільненого глинистого насипу / Ю.Л. Винников, В.І. Коваленко, Т.В. Литвиненко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Науковий журнал. – Серія «Будівництво». – Вип. 10 (18), 2014. – С. 158 – 161.
12. Винников Ю.Л. Лабораторные исследования влажностного режима уплотненного суглинка дорожной насыпи / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – Вип. 155. – С. 158 – 164.
13. Винников Ю.Л. Математичне моделювання взаємодії фундаментів з ущільненими основами при їх зведенні та наступній роботі: Монографія / Ю.Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ імені Юрія Кондратюка, 2016. – 280 с.
14. Винников Ю.Л. Моделювання міграції води в ущільненому глинистому насипу / Ю.Л. Винников, В.І. Коваленко, Т.В. Литвиненко // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. Вип. 29. – Рівне: НУВГП, 2014. – С. 525 – 531.
15. Винников Ю.Л. Нові критерії оптимального ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2014. – Вип. 1 (11). – С. 424 – 433.
16. Винников Ю.Л. Фактори впливу на міграцію води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Проблеми розвитку міського середовища: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2016.

17. Винников Ю.Л. Шляхи підвищення ефективності геотехнічного супроводження зведення піщаних подушок / Ю.Л. Винников, Р.М. Лопан // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. пр. – Вип. 23. – Рівне: НУВГП, 2012. – С. 548 – 554.
18. Висоцький В.П. Нові інструментальні методи контролю ущільнення земляного полотна та шарів дорожнього одягу/ В.П. Висоцький, В.М. Нагайчук, В.О. Поспішний // Автошляховик України. – №4, 2008. – С. 33 – 36.
19. Габибов Ф.Г. Теория и практика улучшения свойств структурно-неустойчивых глинистых грунтов при решении геотехнических и инженерно-геоэкологических проблем: Монография / Ф.Г. Габибов. – Баку: Изд-во «Элм», 2011. – 422 с.
20. ГБН В.2.3-37641918-544:2014 Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях – К.: Мінінфраструктури України, 2014. – 147 с.
21. Гениев Г.А. Вопросы динамической прочности связных грунтов / Г.А. Гениев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1997. – №4. – С. 2 – 4.
22. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов / М.Н. Гольдштейн. – М.: Стройиздат. – Т. I. – 1971. – 368 с., Т. II. – 1973. – 375 с., Т. III. – 1979. – 304 с.
23. Грицык В.И. Возможные деформации земляного полотна: учеб. иллюстрированное пособие для студ. вузов, техникумов и колледжей ж.-д. трансп. / В. И. Грицык. – М.: Маршрут, 2003. – 64 с.
24. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.В. Вознесенский и др. Под ред. В.Т. Трофимова. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
25. ДБН В.1.2-5:2007. Науково-технічний супровід будівельних об'єктів. – К.: Мінрегіонбуд України, 2007. – 13 с.

26. ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти будинків і споруд. Основні положення проектування. Зі змінами №1 і №2. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 161 с.
27. ДБН В.2.3-4:2015. Споруди транспорту. Автомобільні дороги. – К., 2015. – 91 с.
28. ДСТУ Б В.2.1-8-2001. Ґрунти. Відбирання, упакування, транспортування і зберігання зразків. – К.: Мінрегіонбуд України, 2001. – 16 с.
29. ДСТУ Б В.2.1-2-96. Ґрунти. Класифікація. – К.: Мінрегіонбуд України, 1995. – 43 с.
30. ДСТУ Б В.2.1-12:2009. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 19 с.
31. ДСТУ Б В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності. – К.: Державний комітет України у справах містобудування й архітектури, 1997. – 101 с.
32. ДСТУ Б В.2.1-17: 2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 32 с.
33. ДСТУ Б В.2.1-3-96. Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення. / Державний комітет України у справах містобудування та архітектури. – К.: МНТКС, 1997. – 24 с.
34. ДСТУ Б В.2.1-5-96. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань / Державний комітет України у справах містобудування та архітектури. – К.: МНТКС, 1997. – 32 с.
35. Евтюков С.А. Строительство дорожных насыпей на слабых грунтах: подходы и методы / С.А. Евтюков, Е.П. Медрес. – Наука и транспорт. Транспортное строительство. – 2012. – №4. – С. 31 – 33.
36. Захаров М.С. Как нам повысить качество инженерно - геологических изысканий / М.С. Захаров // Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции: сб. тр.

- науч.-техн. конф. / Санкт-Петербургский госуд. архит.-строит. ун-т. – СПб., 2010. – С. 309 – 316.
37. Зоценко М.Л. Використання «хвостів» Полтавського ГЗК при влаштуванні земляних споруд / М.Л. Зоценко // Світ геотехніки, 2005. – № 4. – С. 7 – 11.
38. Инженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти: Підручник / М.Л. Зоценко та ін. – Полтава: ПНТУ, 2004. – 568 с.
39. Ишихара К. Поведение ґрунтов при землетрясениях / К. Ишихара. – СПб.: НПО «Геореконструкция – Фундаментпроект», 2006. – 384 с.
40. Казарновский В.Д. Влияние влажности ґрунтов при уплотнении на его свойства в уплотненном состоянии / В.Д. Казарновский, А.Д. Каюмов, М.Х. Каюмходжаева. – М.: Тр. «СоюздорНИИ», 1987. – С. 45 – 50.
41. Казарновский В.Д. Геотехнические проблемы при возведении насыпей / В.Д. Казарновский // Российская геотехника – шаг в XXI век. – Тр. конф. к 50-летию РОМГГиФ. – М.: НИИОСП, 2007. – Т. II. – С. 105 – 113.
42. Казарновский В.Д. Нормирование сроков службы земляного полотна и дорожных одежд / В.Д. Казарновский // Наука и техника в дорожной отрасли, №3, 2003. – С. 9 – 11.
43. Казарновский В.Д. Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог / В.Д. Казарновский, А.К. Мирошкин, И.В. Лейтланд / ФГУП «СоюздорНИИ». М., 2002. – 54 с.
44. Калужский Я.А. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд / Я.А. Калужский, О.Т. Батраков. – М.: Изд – во «Транспорт», 1971. – 160 с.
45. Каськів В.І. До питання нормування коефіцієнта стійкості укосу насипу / В.І. Каськів, С.В. Каськів // Автошляховик України. – 2011. – №4. – С. 28 – 32.
46. Кірічек Ю.О. Посилення високих насипів у складних інженерно-геологічних умовах [Електронний ресурс] / Ю.О. Кірічек, В.Б. Балашова, С.М. Кочан // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Зб. наук. пр.

- НТУ. – Вип. 86. – К.: НТУ. – 2012. – С. 78 – 87. Режим доступу: <http://archive.nbuu.gov.ua> – Назва з екрану. – Дата звернення: 2.11.2014.
47. Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С.Н. Клепиков. – К.: НИИСК, 1996. – 202 с.
48. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С.Ф. Клованич – Запорожье: «ИПО «Запорожье». – 2009. – 400 с.
49. Клочков Я.В. Совершенствование методики расчета и регулирования температурного режима обводненных грунтовых оснований: автореф. дис. на соискание науч. степ. канд. техн. наук: 05.23.11 / Я.В. Клочков. – Хабаровск: ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», 2015. – 23 с.
50. Коваленко В.И. Использование результатов стандартного уплотнения с учетом характеристик грунтоуплотняющих механизмов / В.И. Коваленко, В.Г. Хилобок // Основания и фундаменты: Республ. межвед. науч.-техн. сб. – К.: Будівельник, 1990. – Вып. 23. – С. 25 – 27.
51. Коваленко В.И. Исследования уплотняемости связных грунтов / В.И. Коваленко, В.Ф. Разоренов, В.Г. Хилобок. – Воронеж: ВГУ, 1981. – 196 с.
52. Косточка Н.А. Прогноз деформацій основ на базі компресійних випробувань ґрунтів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.23.02 / Н.А. Косточка. – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – 22 с.
53. Корнієнко М.В. Особливості влаштування ґрунтових подушок в сучасних умовах / М.В. Корнієнко, В.П. Голуб, А.М. Ращенко // Будівельні конструкції: Міжвід. наук.-техн. зб. – Вип. 71., Т. 2. – К.: НДІБК, 2008. – С. 19 – 26.
54. Краюшкина К.В. Практика использования геосинтетики на автомобильных дорогах Украины / К.В. Краюшкина // Дороги. – №7, 2011. – С.12 – 14.

55. Крутов В.И. Основания и фундаменты на насыпных грунтах / В.И. Крутов. – М.: Стройиздат, 1988. – 224 с.
56. Крутов В.И. Проектирование и устройство оснований и фундаментов на просадочных грунтах / В.И. Крутов, А.С. Ковалев, В.А. Ковалев. – М.: Изд-во АСВ, 2013. – 544 с.
57. Крутов В.И. Ускоренные методы контроля качества уплотнения грунтов / В.И. Крутов, А.С. Ковалев // Механизация строительства. – 1993. – Вып. 5. – С. 20 – 21.
58. Кузахметова Э.К. Методология оценки состояния земляного полотна при реконструкции и ремонте автомобильных дорог в сложных природных условиях: Монография / Э.К. Кузахметова, В.В. Савицкий, В.И. Бартошик, С.Е. Троицкая. – Балашиха: ВТУ Спецстроя России, 2010. – 160 с.
59. Кузахметова Э.К. Основы прогноза осадки высоких насыпей при использовании глинистых грунтов с влажностью выше оптимальной: автореф. дис. на соискание науч. степени д-ра техн. наук: 05.23.02 / Э.К. Кузахметова. – М.: МАДИ, 1997. – 41 с.
60. Лебедев А.Ф. Почвенные и грунтовые воды / А.Ф. Лебедев. – М.: Сельхозгиз, 1930. – 280 с.
61. Лебедев А.Ф. Уплотнение грунтов при различной их влажности и различной уплотняющей работе / А.Ф. Лебедев. – М.: Стройвоенмориздат. – 1949. – 56 с.
62. Литвиненко А.С. Наскільки об'єктивно визначається значення верхньої межі пластичності зв'язних ґрунтів у сучасному будівельному ґрунтознавстві / А.С. Литвиненко // Світ геотехніки. – №4 (44), 2014. – С. 9 – 18.
63. Литвиненко А.С. Про вплив стану ґрунтових основ на стан дорожніх одягів на ділянках автомобільних доріг у нульових відмітках і невисоких насипах / А.С. Литвиненко // Автошляховик України. – №6 (242), 2014. – С. 35 – 39.

64. Литвиненко А.С. Про фізичний зміст необхідної і достатньої величини густини сухого ґрунту зв'язних ґрунтів при спорудженні земляного полотна автомобільних доріг / А.С. Литвиненко // Автошляховик України. – №4, 2011. – С. 21 – 27.
65. Литвиненко А.С. Ще до питання нормування ступеня ущільнення та контролю якості ущільнення ґрунтів земляного полотна автомобільних доріг / А.С. Литвиненко // Дороги і мости: Зб. наук. праць ДерждорНДІ. – Вип. 12. Укравтодор. – 2012. – С. 90 – 101.
66. Лобачева Н.Г. Изменение расчетных параметров грунта основания при использовании метода уплотняющих давлений / Н.Г. Лобачева, А.А. Петраков // Строительные конструкции: Межвед. науч.-техн. сб., Вып. 61. – Т. 2. – К.: НИИСК, 2004. – С. 59 – 63.
67. Лопан Р.М. Взаємозв'язок фізико-механічних характеристик ґрунтів піщаних подушок з параметрами їх укочування: Автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.23.02 / Р.М. Лопан. – Одеса: ОДАБА, 2012. – 24 с.
68. Луцкий С.Я. Теория и практика применения интенсивной технологии возведения насыпей на слабом основании / С.Я. Луцкий, Д.В. Долгов // Взаимодействие сооружений и оснований: методы расчета и инженерная практика. – Тр. междунар. конф. – С.-Пб.: АСВ, 2005. – Т. 2 – С. 235 – 241.
69. Лыу Ань Туан Влияние водно-теплового режима на несущую способность искусственных покрытий аэродромов в условиях СРВ: автореф. дис. на соискание науч. степ. канд. техн. наук: 05.23.11 / А.Т. Лыу. – М: ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет», 2015. – 19 с.
70. Макій Ю.А. Механізація дорожнього будівництва / Ю.А. Макій, В.Г. Ткаченко, Д.В. Зеркалов. – К.: «Основа», 2004. – 199 с.
71. Малышев М.В. Прочность ґрунтов и устойчивость оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1994. – 228 с.

72. Маслов Н.Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов / Н.Н. Маслов. – М.: Высш. шк., 1982. – 511 с.
73. Месчян С.Р. Экспериментальные основы реологии глинистых грунтов / С.Р. Месчян. – Ереван: Гитутюн, 2008. – 807 с.
74. Методические рекомендации по ускоренному определению оптимальной влажности и максимальной плотности глинистых грунтов при сооружении земляного полотна автомобильных дорог [Электронный ресурс] – М.: СоюздорНИИ, 1990. Режим доступа: http://gostrf.com/norma_data/50/50826/index.htm – Назва з екрану. – Дата звернення: 18.10.2014.
75. Методы подготовки и устройства искусственных оснований: Учеб. пособие / Р.А. Мангушев, Р.А. Усманов, С.В. Ланько, В.В. Конюшков. – М. – СПб: Изд-во АСВ, 2012. – 280 с.
76. Механіка ґрунтів. Основи та фундаменти: Підручник / В.Б. Швець, І.П. Бойко, Ю.Л. Винников та ін. – Дн-вськ: «Пороги», 2014. – 231 с.
77. Митинский В.М. К вопросу качества устройства грунтовых подушек / В.М. Митинский // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Астропринт, 2001. – Вип. № 4. – С. 142 – 144.
78. Неклюдов М.К. Механизация уплотнения грунтов / М.К. Неклюдов. – М.: Стройиздат, 1985. – 168 с.
79. Осипов В.И. Динамическое разжижение водонасыщенных грунтов: природа и факторы его определяющие / В.И. Осипов // Инж. геология. – 1988. – № 2. – С. 3 – 31.
80. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород / В.И. Осипов. – М., 1979. – 235 с.
81. Павлюк Д.О. Обґрунтування формул для визначення модуля деформації як показника ущільнення ґрунтів земляного полотна / Д.О. Павлюк, М.В. Шурьяков, С.А. Гладун // Автошляховик України, №3 (245), 2015. – С. 41 – 43.

82. Павлюк Д.О. Порівняння методів і засобів контролю ущільнення ґрунтів при будівництві земляного полотна / Д.О. Павлюк, М.В. Шурьяков, С.А. Гладун // // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 2 (46) – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – С. 255 – 262.
83. Павлюк Д.А. Ускоренная оценка уплотнения грунтов легким прибором с падающим грузом / Д.А. Павлюк, В.М. Глуховея, С.В. Шморгун и др. // Автошляховик України, № 5, 2009. – С. 27 – 31.
84. Парамонов В.Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники / В.Н. Парамонов. – СПб.: Группа компаний «Геореконструкция», 2012. – 264 с.
85. Приходченко О.Е. Напряженно-деформированное состояние лессовых оснований в процессе влагопереноса: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.23.02 / О.Е. Приходченко. – К: НИИСК, 1995. – 49 с.
86. Проектування автомобільних доріг: Підручник: У 2 ч. / О.О. Білятинський, В.Й. Заворицький, В.П. Старовойда, Я.В. Хом'як. – К.: Вища шк., 1997. – Ч. 1. – 518 с.
87. Разоренов В.Ф. Пенетрационные испытания грунтов: (Теория и практика применения) / В.Ф. Разоренов. – М.: Стройиздат, 1980. – 248 с.
88. Райзер В.Д. Теория надежности сооружений. Научное издание. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 384 с.
89. Р В.2.3–218–02070915–757:2009. Рекомендації з підвищення стійкості високих насипів автомобільних доріг [Електронний ресурс] – К.: Укравтодор, 2009. – 30 с. Режим доступу: <http://www.budstandart.ua>. – Назва з екрану. – Дата звернення: 17.06.2015.
90. Рубцов И.В. Закрепление грунтов земляного полотна автомобильных и железных дорог: Научн. изд. / И.В. Рубцов, В.И. Митраков, О.И. Рубцов. – М.: АСВ, 2007. – 184 с.
91. Рувинский В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна (на основе регулирования водно-теплового режима). – М.: Транспорт, 1992. – 240 с.

92. Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве. – РД 34 15.073-91. – Л., 1991. – 302 с.
93. Руководство по сооружению земляного полотна автомобильных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 160 с.
94. Руководству по геотехническому контролю при производстве земляных работ. – М.: Стройиздат, 1974. – 80 с.
95. Руководство по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов. – М.: Стройиздат, 1981. – 55 с.
96. Савенко В.Я. Актуальність проблеми оптимального конструювання дорожніх одягів автомобільних доріг / В.Я. Савенко, С.В. Гавриленко, В.В. Петрович // Зб. наук. пр. НТУ: Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 63. – К.: НТУ. – 2001. – С. 16 – 20.
97. Савенко В.Я. Транспорт і шляхи сполучення / В.Я. Савенко, В.А. Гайдукевич // Рівне: УДУВГП, 2004. – 259 с.
98. Самедов А.М. Расчет и проектирование геотехнических инженерных сооружений: монография / А.М. Самедов. – К.: НТУУ «КПИ», 2013. – 806 с.
99. Сахаров В.О. Взаємодія інженерних конструкцій з нелінійною основою при сейсмічних навантаженнях: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.02 / В.О. Сахаров. – К.: КНУБА, 2015. – 41 с.
100. Сиденко В.М. Расчет и регулирование водно-теплого режима дорожных одежд и земляного полотна: монография / В.М. Сиденко. – М.: Автотрансиздат, 1962. – 115 с.
101. Сиденко В.М. Технология строительства автомобильных дорог. Ч. I. / В.М. Сиденко, О.Т. Батраков, А.И. Леушин. – К.: Вища школа, 1970. – 236 с.
102. Скляднева И.И. Прогноз деформаций консолидации высоких насыпей автомобильных дорог из глинистых грунтов с влажностью выше

- оптимальной: автореф. дис. на соискание науч. степ. канд. техн. наук: 05.23.11 / И.И. Складнева. – М.: ГВД НИИ «СоюздорНИИ», 1991. – 23 с.
103. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / Под ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М.: Изд-во АСВ, 2014. – 728 с.
104. Ставницер Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов / Л.Р. Ставницер // Монография. – М.: Изд-во АСВ, 2010. – 448 с.
105. Степура В.С. Основи експлуатації автомобільних доріг і аеродромів: навч. посіб. / В.С. Степура, А.О. Белятинський, Н.В. Кужель. – К.: НАУ, 2013. – 204 с.
106. Строительство автомобильных дорог. Т. 1: Учебник для вузов. / Н.Н. Иванов, В.К. Некрасов, С.М. Полосин-Никитин и др. Под ред. В.К. Некрасова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1980. – 416 с.
107. Сучасні будівельні матеріали і конструктивні системи для зведення доступного житла та об'єктів інфраструктури / К.К. Пушкарева, А.М. Бамбура, Л.Й. Дворкін та ін. – К.: Вік-Принт. – 2015 – 280 с.
108. Теличенко В.И. Технология строительных процессов: Учеб. для вузов / В.И. Теличенко, О.М. Терентьев, А.А. Лapidус. – М.: Высш. шк., 2005. – 392 с.
109. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов / З.Г. Тер-Мартirosян. – М.: АСВ, 2009. – 550 с.
110. Трофимчук А.Н. Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред / А.Н. Трофимчук, А.М. Гомилко, О.А. Савицкий. – К.: Наук. думка, 2003. – 230 с.
111. Улицкий В.М. Геотехническое сопровождение развития городов / В.М. Улицкий, А.Г. Шашкин, К.Г. Шашкин. – СПб.: Стройиздат Северо-Запад; «Геореконструкция», 2010. – 552 с.
112. Хархута Н.Я. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог / Н.Я. Хархута, Ю.М. Васильев. – М.: Транспорт, 1975. – 288 с.

113. Харченко М.О. Оцінка неоднорідності ущільнених ґрунтів штучних основ: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.23.02 / М.О. Харченко. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – 23 с.
114. Черный Г.И. Изменение физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1979. – 132 с.
115. Чечуга О.С. Особливості моделювання ґрунтових основ у розрахунках методом скінчених елементів / О.С. Чечуга, С.В. Каськів, А.П. Яремов // Зб. наук. пр. НТУ: Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Вип. 86. – К.: НТУ. – 2012. – С. 48 – 51.
116. Шапиро Д.М. Метод конечных элементов в строительном проектировании / Д.М. Шапиро. – Воронеж: «Научная книга», 2013. – 181 с.
117. Шон Б.Ч. Длительная устойчивость водонасыщенных оснований насыпей / Б.Ч. Шон // Вестник МГСУ. – М.: МГСУ, 2006. – № 1. – С. 61 – 68.
118. Шур'яков М.В. Недоліки використання коефіцієнта ущільнення при будівництві земляного полотна автомобільної дороги / М.В. Шур'яков // «Проблеми і перспективи сталого розвитку та просторового планування територій». – Матеріали Всеукраїнської інтернет-конф. молодих учених і студентів (18 березня 2015 р.). – Полтава: ПолтНТУ, 2015. – С. 236 – 239.
119. Юркин Р.Г. Стабильная плотность насыпных грунтов, её определение и значение / Р.Г. Юркин, Л.И. Черепанова // «Геотехнические проблемы XXI века в строительстве зданий и сооружений». – Тр. междунар. конф. – Пермь: ПГТУ, 2007. – С. 247 – 250.
120. Юшков Б.С. Об одном подходе к надежности автомобильных дорог Пермского края [Електронний ресурс] / Б.С. Юшков, А.М. Бургонутдинов. – Пермь: ПНИПУ, 2013. – С. 195 – 201. Режим доступу: vestnik.pstu.ru/.../Б.С.+Юшков,+А.М.+Бургонутдинов+ОБ+ОДНОМ+... – Назва з екрану. – Дата звернення: 7.01.2016.
121. Adam D. Innovative dynamic compaction techniques and integrated compaction control methods / D. Adam, H. Brandl // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil

- Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt: JOS Press, 2009. – P. 2216 – 2219.
122. Adam D. Five years of impact compaction in Europe – successful implementation of an innovative compaction technique based on fundamental research and field experiments / D. Adam, I. Paulmichl, C. Adam // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1225 – 1228.
123. Arslan H. Influence of tamper weight shape on dynamic compaction / H. Arslan, A.S. Alawneh, R. Rabadi // Ground improvement, 2007. – 11(2). – P. 61 – 66.
124. ASTM D1586-08a. Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils. The American Society for testing and Materials (ASTM), 2008. – 9 p.
125. Bai X. Experimental study on effect of initial moisture content on compressive property of compacted loess like silt / Bai X., Yang J., Ma F. // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1081 – 1084.
126. Brito A. Compaction control of soil-rock mixture at Odelouca Dam / A. Brito, L. Caldeira // Proc. of 19th European Young Geotechnical Engineers' Conf. – Szechenyi Istvan Egyetem Győr, Hungary, 2008. – P. 79 – 88.
127. Chu J. Construction Processes / J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 3006 – 3135.
128. Conde M. Applicability of the Geogauge, P-FWD and DCP for compaction control / Conde M., Lopes M. // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1263 – 1266.
129. Conde M. Stiffness methods for compaction control: the P-FWD device / M. Conde, M. Lopes, L. Caldeira // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil

- Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt: JOS Press, 2009. – P. 1012 – 1015.
130. De Beer M. Use of dynamic cone penetrometer (DCP) in the design of road structures / Geotechnics in African environment. Blight et.al. (Eds). London: Taylor and Francis. – 1991. – P. 167 – 176.
131. DIN 18127:2012. Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch. – 32 p.
132. DIN 18134:2001-09. Determining the deformation and strength characteristics of soil biteplate loading test. – 16 p.
133. Dobrescu C.F. Experimental applications regarding the stabilization of soils with low mechanical strength by using local materials / C.F. Dobrescu, E.A. Calarasu, I. Macarescu // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburgh, UK, 2015. – P. 3159 – 3164.
134. Dynamic compaction of collapsible soils – case study from a motorway project in Romania / G. Tsitsas, V. Dimitriadi, D. Zekkos and al. // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburg. – 2015. – P. 1487 – 1492.
135. EN 1997-1. 2004. Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 1. General Rules CEN/TC 250/SC7. European Committee for Standardization, Brussels. – 166 p.
136. Fang Y. Variation of soil density and earth pressure due to strip compaction / Y. Fang, Y. Chien // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 700 – 703.
137. Fu Z.Y. Quantifying the influence depth of dynamic compaction using the discrete element method / Z.Y. Fu, M.B. Jaksa, A. Deng // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburg. – 2015. – P. 3851 – 3856.
138. Hajjalilue-Bonab M. Soil deformation pattern in low-energy dynamic compaction / M. Hajjalilue-Bonab, A. Rezaei // Proc. of the 17th Intern. Conf.

- on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt: JOS Press, 2009. – P. 542 – 545.
139. Hassan A.A. Water content characteristics of mechanically compacted clay soil determined using the electrical resistivity method / A.A. Hassan, D.G. Toll // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburgh, UK, 2015. – P. 3395 – 3400.
140. Indraratna B. General report TC 202 transportation geotechnics / B. Indraratna, A. Correia // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1213 – 1220.
141. Indrawan I. Hydraulic conductivity of compacted clay liners moisture-conditioned and permea with saline coal seam gas water / I. Indrawan, D. Williams, A. Scheuemann // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 3029 – 3032.
142. Islam M. Long-term performance of preloaded road embankment / M. Islam, C. Gnanendran // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1291 – 1294.
143. Jean-Louis B. Intelligent compaction: overview and research needs / B. Jean-Louis, S. Jeongbok. – Texas A&M University, 2003. – 84 p.
144. JIS A 1210: Test method for soil compaction using a rammer, 2009. – 12 p.
145. Kawai K. Expression of mechanical characteristics in compacted soil with soil /water/ air coupled F.E. simulation / K. Kawai, A. Iizuka // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1129 – 1132.
146. Kelm M. FE-simulation of soil compaction / M. Kelm, J. Grabe // Proc. XIIIth European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Vol. 1. – Prague, 2003. – P. 739 – 742.
147. Kudla W. Flow-liquefaction of mine dumps during rising of groundwater-table in Eastern Germany - reasons and model-tests / W. Kudla, S. Szczyrba1,

- T. Rosenzweig // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburgh, UK, 2015. – P. 1585 – 1590.
148. Kuo Y. Assessing the effectiveness of rolling dynamic compaction / Y. Kuo, M. Jaksa, B. Scott // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1309 – 1312.
149. Kyulule A. Additional considerations on compaction of soils in developing countries / A. Kyulule. – Zurich, 1983. – 174 p.
150. Lange D. Comparing Vibratory and Impact Laboratory Compaction Methods / D. Lange, G. Fanourakis // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 93 – 96.
151. Lietaert B. Latest Advances in Marine Ground Improvement / B. Lietaert, F. Maucotel // Recent Research, Advances & Execution Aspects of ground improvement works. – Vol. 5. – Brussels, 2012. P. 3 – 70.
152. Lobo B. An approach to evaluate internal friction from dynamic penetration tests / B. Lobo, F. Schnaid, M. Rocha, E. Odebrecht // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt: JOS Press, 2009. – P. 941 – 944.
153. Lourenco S.D.N. Water repellent soils for slope stability / S.D.N. Lourenco, G.-H. Wang, T.Kamai // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburgh, UK, 2015. – P. 1609 – 1613.
154. Lunne T. Cone penetration testing in geotechnical practice / T. Lunne, P. Robertson, J. Powell. – London and New York: Spon Press, 2004. – 312 p.
155. Lytvynenko T.V. Qualitative relationships of water migration in highway embankment clay soils / T.V. Lytvynenko // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 1 (46) – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – С. 256 – 263.
156. Mendes J. Influence of initial water content on the water retention behaviour of a sandy clay soil / J.Mendes, D. Toll // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1155 – 1158.

157. Nikolaides A. Highway Engineering. Pavements, Materials and Control of Quality [Electronic resource]. – Electronic data. – [Taylor & Francis Group, 2015]. – 868 p. – Mode of access: <http://ru.bookzz.org/book/2572438/c4c4f0> P B.2.3–218–02070915–757:2009 (viewed on March, 15, 2016). – Title from screen.
158. New devices for water content measurement / D. Toll, A. Hassan, J. King, J. Asquith // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 1199 – 1202.
159. Numerical simulation of consolidation problem / K. Edip, M. Garevski, V. Sheshov, J. Bojadjeva // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburg. – 2015. – P. 3847 – 3850.
160. Olinic E. Improvement of difficult soils by mixing with mineral materials and inorganic waste. Experimental projects and case studies from Romania / E. Olinic, T. Ivasuc, S. Manea // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburgh, UK, 2015. – P. 2437 – 2442.
161. Pak A. Behavior of dry and saturated soils under impact load during dynamic compaction / A. Pak, H. Shahir, A. Ghassemi // Proc. 16th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Osaka, 2005. – P. 1245 – 1248.
162. Perez N. Behavior of fine-grained soils compacted with high shear stresses / N. Perez, P. Gamica, I. Mendoza, M. Reyes // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 407 – 410.
163. Pooley E. Assessment of the use of dynamic compaction on double porosity clay landfill / E. Pooley, J. Laue, S. Springman // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 2252 – 2255.
164. Proctor R. Fundamental Principle of Soil Compaction // ENR, №10 (11), 1993. – P. 286 – 289.

165. Rito F. Development and field application of static cone penetrometer combined with dynamic penetration / F. Rito, N. Sugavara // Proc. of the 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt: JOS Press, 2009. – P. 969 – 972.
166. Sawicki A. Mechanics of Reinforced Soil / A. Sawicki. – Balkema / Rotterdam / Brookfield. – 2000. – 193 p.
167. Simic D. Seasonal ground movements of swelling clay subgrades / D. Simic // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburgh, UK, 2015. – P. 2305 – 2309.
168. Stirling R. A. Multiphase modelling of desiccation cracking in the near-surface of compacted soils / R. A. Stirling, C. T. Davie¹, S. Glendinning // Proc. of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. – Edinburgh, UK, 2015. – P. 2311 – 2316.
169. Szymanski A. Field and laboratory experience with the soft subsoil deformation / A. Szymanski, W. Sas, A. Niesiolowska // Proc. of 17th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – Amsterdam, Berlin, Tokyo, Washington: JOS Press. – 2009. – P. 723 – 726.
170. Tateyama K. Introduction of Concurrent Engineering to Embankment Construction / K. Tateyama // The Japanese Geotechnical J., №9 (54), 2006. – P. 30 – 32.
171. Tateyama K. Working Group on the Earth Structure for Road, Railway and Airport (WG2) // Geotechnical Pavement Research in Japan II – Final Report. – Tokio, 2013. – P. 110 – 132.
172. Van Impe W. On the design, construction and monitoring of embankments on soft soil in underwater conditions / W. Van Impe, R. Verastegui Flores – Saint Petersburg: NPO «Georeconstruction – Fundamentproject», 2007. – 164 p.
173. Vynnykov Y. Investigation of Compacted Clay Embankment Stabilized Moisture / Y.L. Vynnykov, V.I. Kovalenko, T.V. Lytvynenko // Collection of scientific articles «Energy, Energy Saving and Rational Nature Use». – №2 (3), 2014. – Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in

- Radom, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. – Radom, 2014. – P. 53 – 57.
174. Vynnykov Y. Qualitative relationships of water migration in highway embankment clay soils by the results of laboratory and field research / Y.L. Vynnykov, T.V. Lytvynenko // Зб. наук. праць (галузеве машинобуд., буд-во) / Полт. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. Вип. 2 (47)' – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – С. 226 – 232.
175. Zabielska-Adamska K. Dynamic CBR as a method of embankment compaction assessment / K. Zabielska-Adamska, M. Sulewska // Proc. of the XVIIIth Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Paris, 2013. – P. 641 – 644.
176. Zotsenko M. Designing the compacted subsoil's using mathematical simulation method / M. Zotsenko, Y. Vynnykov // Active Geotechnical Design in Infrastructure Development. – Proc. of the XIIIth Danube-European Conf. on Geotechnical Engineering. Vol. 2. – Ljubljana, 2006. – P. 385 – 390.
177. Zotsenko M. Modern practice of determination of strength characteristics of cohesive soils by penetration methods / M. Zotsenko, Y. Vynnykov, A. Yakovlev // Proc. of XIVth Danube – European Conf. on Geotechnical Engineering. – Bratislava: Slovak University of Technology. – 2010. – P. 245 – 253.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

**СТАТИСТИЧНІ МАТЕРІАЛИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ЛАБОРАТОРНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ МІГРАЦІЇ ВОДИ В ТОВЩІ УЩІЛЬНЕНИХ
ГЛИНИСТИХ ҐРУНТІВ ДОРОЖНІХ НАСИПІВ ЗАЛЕЖНО ВІД
ЩІЛЬНОСТІ СКЕЛЕТУ ҐРУНТУ, ТОВЩИНИ НАСИПУ ТА
ФАКТОРУ ЧАСУ**

Табл. А 1

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3$

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	1	17,61	46,82	43,63	29,21	26,02	0,123
W верх	13	2	17,26	48,26	43,17	31,00	25,91	0,196
W низ	17	3	17,04	41,74	37,32	24,70	20,28	0,218
W верх	28	4	17,08	47,59	42,36	30,51	25,28	0,207
W низ	32	5	17,52	50,92	45,14	33,40	27,62	0,209
W верх	43	6	17,04	50,01	44,47	32,97	27,43	0,202
W низ	47	7	17,26	50,46	44,82	33,20	27,56	0,205
W верх	58	8	17,15	53,97	47,26	36,82	30,11	0,223
W низ	62	9	16,53	43,58	38,87	27,05	22,34	0,211
W верх	73	10	17,58	45,89	41,02	28,31	23,44	0,208
W низ	77	11	17,17	46,79	41,56	29,62	24,39	0,214
W верх	88	12	17,11	49,86	43,94	32,75	26,83	0,221
W низ	92	13	17,10	45,55	40,27	28,45	23,17	0,228
W верх	103	14	17,30	47,37	42,76	30,07	25,46	0,181
W низ	107	15	17,65	49,76	44,60	32,11	26,95	0,191
W верх	118	16	17,62	50,44	45,17	32,82	27,55	0,191
W низ	122	17	16,81	54,87	49,14	38,06	32,33	0,177
W верх	133	18	16,60	51,89	46,52	35,29	29,92	0,179
W низ	137	19	17,11	59,31	52,24	42,20	35,13	0,201
W верх	148	20	17,55	51,68	45,54	34,13	27,99	0,219

Табл. А 2

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$

№ виробки	Глибина відбору	№ б'юкс (кілець)	Маса б'юкс (кілець)	Маса б'юкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	1	17,61	46,29	43,35	28,68	25,74	0,114
W верх	13	2	17,26	43,79	39,92	26,53	22,66	0,171
W низ	17	3	17,04	51,31	46,20	34,27	29,16	0,175
W верх	28	4	17,08	44,30	39,91	27,22	22,83	0,192
W низ	32	5	17,52	50,87	45,11	33,35	27,59	0,209
W верх	43	6	17,04	43,11	38,58	26,07	21,54	0,210
W низ	47	7	17,26	50,40	44,58	33,14	27,32	0,213
W верх	58	8	17,15	44,54	39,85	27,39	22,70	0,207
W низ	62	9	16,53	49,16	44,26	32,63	27,73	0,177
W верх	73	10	17,58	52,14	46,61	34,56	29,03	0,190
W низ	77	11	17,17	43,18	38,94	26,01	21,77	0,195
W верх	88	12	17,11	45,53	40,84	28,42	23,73	0,198
W низ	92	13	17,10	50,91	44,86	33,81	27,76	0,218
W верх	103	14	17,30	48,97	43,63	31,67	26,33	0,203
W низ	107	15	17,65	49,70	44,85	32,05	27,20	0,178
W верх	118	16	17,62	47,81	43,12	30,19	25,50	0,184
W низ	122	17	16,81	50,85	45,44	34,04	28,63	0,189
W верх	133	18	16,60	50,34	45,04	33,74	28,44	0,186
W низ	137	19	17,11	53,03	47,13	35,92	30,02	0,197
W верх	148	20	17,55	50,78	45,35	33,23	27,80	0,195

Табл. А 3

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	1	17,61	48,22	45,22	30,61	27,61	0,109
W верх	13	2	17,26	43,67	40,08	26,41	22,82	0,157
W низ	17	3	17,04	47,34	43,27	30,30	26,23	0,155
W верх	28	4	17,08	45,38	41,04	28,30	23,96	0,181
W низ	32	5	17,52	51,46	46,37	33,94	28,85	0,176
W верх	43	6	17,04	50,17	45,48	33,13	28,44	0,165
W низ	47	7	17,26	54,52	49,14	37,26	31,88	0,169
W верх	58	8	17,15	47,13	42,67	29,98	25,52	0,175
W низ	62	9	16,53	49,04	44,18	32,51	27,65	0,176
W верх	73	10	17,58	49,92	45,41	32,34	27,83	0,162
W низ	77	11	17,17	49,88	45,43	32,71	28,26	0,157
W верх	88	12	17,11	47,54	43,45	30,43	26,34	0,155
W низ	92	13	17,10	47,30	42,57	30,20	25,47	0,186
W верх	103	14	17,30	45,35	41,12	28,05	23,82	0,178
W низ	107	15	17,65	54,72	49,33	37,07	31,68	0,170
W верх	118	16	17,62	47,26	42,48	29,64	24,86	0,192
W низ	122	17	16,81	51,33	45,63	34,52	28,82	0,198
W верх	133	18	16,60	53,77	48,01	37,17	31,41	0,183
W низ	137	19	17,11	51,80	46,53	34,69	29,42	0,179
W верх	148	20	17,55	45,35	41,22	27,80	23,67	0,174

Табл. А 4

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку важкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	1	17,61	47,93	45,21	30,32	27,60	0,099
W верх	13	2	17,26	43,27	40,11	26,01	22,85	0,138
W низ	17	3	17,04	42,83	39,48	25,79	22,44	0,149
W верх	28	4	17,08	48,28	44,02	31,20	26,94	0,158
W низ	32	5	17,52	50,67	45,88	33,15	28,36	0,169
W верх	43	6	17,04	45,74	41,65	28,70	24,61	0,166
W низ	47	7	17,26	49,16	44,58	31,90	27,32	0,168
W верх	58	8	17,15	47,90	43,79	30,75	26,64	0,154
W низ	62	9	16,53	47,24	43,18	30,71	26,65	0,152
W верх	73	10	17,58	47,14	42,89	29,56	25,31	0,168
W низ	77	11	17,17	50,58	45,72	33,41	28,55	0,170
W верх	88	12	17,11	43,53	39,62	26,42	22,51	0,174
W низ	92	13	17,10	49,79	45,11	32,69	28,01	0,167
W верх	103	14	17,30	45,93	41,58	28,63	24,28	0,179
W низ	107	15	17,65	50,06	45,47	32,41	27,82	0,165
W верх	118	16	17,62	48,59	44,08	30,97	26,46	0,170
W низ	122	17	16,81	50,21	45,04	33,40	28,23	0,183
W верх	133	18	16,60	43,93	39,76	27,33	23,16	0,180
W низ	137	19	17,11	49,81	45,01	32,70	27,90	0,172
W верх	148	20	17,55	49,51	44,89	31,96	27,34	0,169

Табл. А 5

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3$

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	18	16,79	36,63	34,51	19,84	17,72	0,120
W верх	13	17	16,99	43,48	40,21	26,49	23,22	0,141
W низ	17	20	17,69	41,33	37,76	23,64	20,07	0,178
W верх	28	13	17,14	49,60	44,56	32,46	27,42	0,184
W низ	32	35	18,29	43,34	39,58	25,05	21,29	0,177
W верх	43	40	18,21	43,81	39,75	25,60	21,54	0,188
W низ	47	12	17,16	44,30	40,38	27,14	23,22	0,169
W верх	58	16	17,60	50,01	45,70	32,41	28,10	0,153
W низ	62	8	17,26	37,41	34,63	20,15	17,37	0,160
W верх	73	1	17,63	49,31	44,76	31,68	27,13	0,168
W низ	77	4	17,08	40,52	37,11	23,44	20,03	0,170
W верх	88	10	17,62	46,57	42,46	28,95	24,84	0,165
W низ	92	6	17,08	38,26	35,54	21,18	18,46	0,147
W верх	103	9	16,61	43,49	40,08	26,88	23,47	0,145
W низ	107	14	17,39	39,67	36,73	22,28	19,34	0,152
W верх	118	15	17,35	43,43	39,71	26,08	22,36	0,166
W низ	122	3	17,02	39,93	36,74	22,91	19,72	0,162
W верх	133	19	17,58	44,56	40,15	26,98	22,57	0,195
W низ	137	11	17,19	40,40	37,15	23,21	19,96	0,163
W верх	148	7	16,96	49,80	45,22	32,84	28,26	0,162

Табл. А 6

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	3	17,02	40,67	37,98	23,65	20,96	0,128
W верх	13	1	17,63	48,57	44,79	30,94	27,16	0,139
W низ	17	5	17,58	45,65	42,34	28,07	24,76	0,134
W верх	28	2	17,65	44,36	41,27	26,71	23,62	0,131
W низ	32	13	17,14	42,91	39,96	25,77	22,82	0,129
W верх	43	9	16,61	42,29	39,16	25,68	22,55	0,139
W низ	47	12	17,16	43,74	40,29	26,58	23,13	0,149
W верх	58	6	17,08	46,95	43,31	29,87	26,23	0,139
W низ	62	35	18,29	44,26	40,95	25,97	22,66	0,146
W верх	73	40	18,21	44,23	41,01	26,02	22,80	0,141
W низ	77	17	16,99	40,01	36,99	23,02	20,00	0,151
W верх	88	20	17,69	42,41	38,98	24,72	21,29	0,161
W низ	92	11	17,19	44,72	40,84	27,53	23,65	0,164
W верх	103	10	17,62	47,90	43,91	30,28	26,29	0,152
W низ	107	14	17,39	39,68	36,82	22,29	19,43	0,147
W верх	118	8	17,26	53,05	48,51	35,79	31,25	0,145
W низ	122	4	17,08	41,89	38,73	24,81	21,65	0,146
W верх	133	15	17,35	46,65	43,30	29,30	25,95	0,129
W низ	137	7	16,96	39,86	37,21	22,90	20,25	0,131
W верх	148	19	17,58	46,97	43,41	29,39	25,83	0,138

Табл. А 7

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	9	16,61	40,86	38,18	24,25	21,57	0,124
W верх	13	3	17,02	47,00	43,43	29,98	26,41	0,135
W низ	17	1	17,63	44,26	41,55	26,63	23,92	0,113
W верх	28	5	17,58	49,15	45,51	31,57	27,93	0,130
W низ	32	12	17,16	45,63	42,07	28,47	24,91	0,143
W верх	43	3	17,02	47,69	43,76	30,67	26,74	0,147
W низ	47	16	17,60	44,00	40,95	26,40	23,35	0,131
W верх	58	18	16,79	46,34	42,83	29,55	26,04	0,135
W низ	62	1	17,63	47,16	43,63	29,53	26,00	0,136
W верх	73	10	17,62	47,91	44,82	30,29	27,20	0,114
W низ	77	7	16,96	44,55	41,62	27,59	24,66	0,119
W верх	88	19	17,58	48,56	45,06	30,98	27,48	0,127
W низ	92	15	17,35	46,40	43,15	29,05	25,80	0,126
W верх	103	5	17,58	47,31	43,81	29,73	26,23	0,133
W низ	107	12	17,16	45,71	42,57	28,55	25,41	0,124
W верх	118	9	16,61	47,62	44,06	31,01	27,45	0,130
W низ	122	13	17,14	45,28	42,23	28,14	25,09	0,122
W верх	133	13	17,14	44,15	40,64	27,01	23,50	0,149
W низ	137	18	16,79	47,65	44,07	30,86	27,28	0,131
W верх	148	16	17,60	47,45	43,98	29,85	26,38	0,132

Табл. А 8

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,65 \text{ г/см}^3$

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	35	18,29	56,76	54,03	38,47	35,74	0,076
W верх	13	40	18,21	48,02	45,24	29,81	27,03	0,103
W низ	17	2	17,65	48,33	45,36	30,68	27,71	0,107
W верх	28	20	17,69	51,74	48,40	34,05	30,71	0,109
W низ	32	6	17,08	49,82	46,40	32,74	29,32	0,117
W верх	43	17	16,99	49,89	46,31	32,90	29,32	0,122
W низ	47	4	17,08	47,32	43,88	30,24	26,80	0,128
W верх	58	8	17,26	47,25	44,32	29,99	27,06	0,108
W низ	62	11	17,19	50,71	47,32	33,52	30,13	0,113
W верх	73	14	17,39	49,56	46,34	32,17	28,95	0,111
W низ	77	7	16,96	40,97	38,64	24,01	21,68	0,107
W верх	88	13	17,14	58,66	54,09	41,52	36,95	0,124
W низ	92	10	17,62	46,95	43,79	29,33	26,17	0,121
W верх	103	18	16,79	53,66	49,58	36,87	32,79	0,124
W низ	107	9	16,61	47,12	43,63	30,51	27,02	0,129
W верх	118	15	17,35	56,17	52,10	38,82	34,75	0,117
W низ	122	16	17,60	49,47	46,26	31,87	28,66	0,112
W верх	133	19	17,58	55,48	51,70	37,90	34,12	0,111
W низ	137	1	17,63	50,85	47,58	33,22	29,95	0,109
W верх	148	3	17,02	56,32	52,52	39,30	35,50	0,107

Табл. А 9

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 0,45 м

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	346	22,87	61,57	57,05	38,70	34,18	0,132
W верх	13	324	23,41	64,20	58,99	40,79	35,58	0,146
W низ	17	372	22,70	68,06	62,50	45,36	39,80	0,140
W верх	28	359	23,75	69,76	64,36	46,01	40,61	0,133
W низ	32	132	24,80	71,40	65,62	46,60	40,82	0,142
W верх	43	338	24,59	70,25	64,82	45,66	40,23	0,135

Табл. А 10

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 0,90 м

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	83	25,57	62,76	58,83	37,19	33,26	0,118
W верх	13	308	24,61	69,67	64,00	45,06	39,39	0,144
W низ	17	328	23,82	68,14	62,94	44,32	39,12	0,133
W верх	28	292	23,89	61,62	56,88	37,73	32,99	0,144
W низ	32	1	17,63	52,57	48,13	34,94	30,50	0,146
W верх	43	4	17,08	53,77	49,29	36,69	32,21	0,139
W низ	47	6	17,08	53,87	49,26	36,79	32,18	0,143
W верх	58	3	17,02	55,04	50,24	38,02	33,22	0,144
W низ	62	5	17,58	48,99	45,03	31,41	27,45	0,144
W верх	73	2	17,65	52,35	47,75	34,70	30,10	0,153
W низ	77	8	17,26	46,20	42,71	28,94	25,45	0,137
W верх	88	7	16,96	54,86	50,00	37,90	33,04	0,147

Табл. А 11

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 2,10 м

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	132	24,80	69,14	64,47	44,34	39,67	0,118
W верх	13	346	22,87	63,04	58,44	40,17	35,57	0,129
W низ	17	359	23,75	69,00	63,61	45,25	39,86	0,135
W верх	28	338	24,59	69,45	64,21	44,86	39,62	0,132
W низ	32	372	22,70	68,97	63,42	46,27	40,72	0,136
W верх	43	324	23,41	72,66	66,84	49,25	43,43	0,134
W низ	47	4	18,09	55,20	50,72	37,11	32,63	0,137
W верх	58	3	16,98	58,77	53,76	41,79	36,78	0,136
W низ	62	324	23,41	70,31	64,92	46,90	41,51	0,130
W верх	73	83	25,57	68,18	63,31	42,61	37,74	0,129
W низ	77	346	22,87	68,36	63,12	45,49	40,25	0,130
W верх	88	338	24,59	66,67	61,92	42,08	37,33	0,127
W низ	92	132	24,80	71,53	66,45	46,73	41,65	0,122
W верх	103	308	24,61	66,03	61,30	41,42	36,69	0,129
W низ	107	328	23,82	75,92	69,85	52,10	46,03	0,132
W верх	118	372	22,70	71,99	66,19	49,29	43,49	0,133
W низ	122	359	23,75	69,29	64,01	45,54	40,26	0,131
W верх	133	292	23,89	73,91	68,19	50,02	44,30	0,129
W низ	137	4	18,09	59,91	55,39	41,82	37,30	0,121
W верх	148	3	16,98	55,40	51,04	38,42	34,06	0,128
W верх	152	1	17,63	57,40	52,65	39,77	35,02	0,136
W верх	163	2	17,65	56,79	52,03	39,14	34,38	0,138
W верх	167	5	17,58	52,61	48,82	35,03	31,24	0,121
W верх	178	7	17,26	57,38	52,86	40,12	35,60	0,127
W верх	182	372	22,70	66,66	61,63	43,96	38,93	0,129
W верх	193	338	24,59	68,48	63,33	43,89	38,74	0,133
W верх	197	324	23,41	69,00	63,88	45,59	40,47	0,127
W верх	208	308	24,61	74,48	68,92	49,87	44,31	0,125

Табл. А 12

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 2,85 м

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	359	23,75	70,02	65,01	46,27	41,26	0,121
W верх	13	292	23,89	70,58	65,34	46,69	41,45	0,126
W низ	17	132	24,80	70,03	64,87	45,23	40,07	0,129
W верх	28	83	25,57	75,53	69,09	49,96	43,52	0,148
W низ	32	346	22,87	65,52	60,52	42,65	37,65	0,133
W верх	43	328	23,82	73,09	67,35	49,27	43,53	0,132
W низ	47	328	23,82	70,32	65,10	46,50	41,28	0,126
W верх	58	308	24,61	62,52	58,04	37,91	33,43	0,134
W низ	62	292	23,89	66,24	61,26	42,35	37,37	0,133
W верх	73	324	23,41	70,07	64,33	46,66	40,92	0,140
W низ	77	346	22,87	66,75	61,22	43,88	38,35	0,144
W верх	88	132	24,80	69,84	64,71	45,04	39,91	0,129
W низ	92	83	25,57	58,20	54,45	32,63	28,88	0,130
W верх	103	338	24,59	67,57	62,69	42,98	38,10	0,128
W низ	107	359	23,75	63,52	59,13	39,77	35,38	0,124
W верх	118	372	22,70	64,36	59,54	41,66	36,84	0,131
W низ	122	4	18,09	49,40	45,89	31,31	27,80	0,126
W верх	133	3	16,98	49,07	45,31	32,09	28,33	0,133
W низ	137	7	16,96	57,40	52,39	40,44	35,43	0,141
W верх	148	1	17,63	52,41	48,47	34,78	30,84	0,128
W низ	152	8	17,26	49,82	46,22	32,56	28,96	0,124
W верх	163	6	17,08	52,40	48,42	35,32	31,34	0,127
W низ	167	2	17,65	48,63	45,06	30,98	27,41	0,130
W верх	178	4 б	17,08	52,95	48,87	35,87	31,79	0,128
W низ	182	5	17,58	52,45	48,50	34,87	30,92	0,128
W верх	193	3 б	17,02	51,48	47,55	34,46	30,53	0,129
W низ	197	308	24,61	68,33	63,38	43,72	38,77	0,128
W верх	208	346	22,87	65,52	60,30	42,65	37,43	0,139
W низ	212	324	23,41	59,87	55,40	36,46	31,99	0,140
W верх	223	328	23,82	64,72	59,42	40,90	35,60	0,149
W низ	227	292	23,89	68,22	62,78	44,33	38,89	0,140
W верх	238	338	24,59	67,05	61,69	42,46	37,10	0,144
W низ	242	83	25,57	61,03	56,85	35,46	31,28	0,134
W верх	253	359	23,59	59,90	55,71	36,31	32,12	0,130
W низ	257	132	24,80	66,74	61,75	41,94	36,95	0,135
W верх	268	372	22,70	66,45	60,76	43,75	38,06	0,150
W низ	272	4	18,09	48,77	45,03	30,68	26,94	0,139
W верх	283	3	16,98	51,74	47,62	34,76	30,64	0,134

Табл. А 13

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 1,50 м (час «відпочинку 120 діб)

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	328	23,82	67,71	62,96	43,89	39,14	0,121
W верх	13	346	22,87	71,47	65,74	48,60	42,87	0,134
W низ	17	83	25,57	58,49	54,67	32,92	29,10	0,131
W верх	28	372	22,70	59,41	55,05	36,71	32,35	0,135
W низ	32	132	24,80	65,55	60,29	40,75	35,49	0,148
W верх	43	359	23,75	63,69	58,66	39,94	34,91	0,144
W низ	47	308	24,61	59,36	55,29	34,75	30,68	0,133
W верх	58	292	23,89	58,86	54,88	34,97	30,99	0,128
W низ	62	338	24,59	56,51	52,81	31,92	28,22	0,131
W верх	73	324	23,41	64,58	59,58	41,17	36,17	0,138
W низ	77	40	17,90	48,61	44,84	30,71	26,94	0,140
W верх	88	35	17,71	50,30	46,18	32,59	28,47	0,145
W низ	92	10	17,36	45,54	42,06	28,18	24,70	0,141
W верх	103	20	18,12	49,73	45,92	31,61	27,80	0,137
W низ	107	83	25,57	58,02	54,08	32,45	28,51	0,138
W верх	118	132	24,80	68,52	63,42	43,72	38,62	0,132
W низ	122	372	22,70	60,47	56,12	37,77	33,42	0,130
W верх	133	328	23,82	64,51	59,43	40,69	35,61	0,143
W низ	137	359	23,75	61,02	57,03	37,27	33,28	0,120
W верх	148	346	22,87	69,81	64,92	46,94	42,05	0,116

Табл. А 14

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ та висоті труби 1,50 м (час «відпочинку 180 діб)

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	328	23,82	61,08	57,18	37,26	33,36	0,117
W верх	13	346	22,87	69,53	64,58	46,66	41,71	0,119
W низ	17	83	25,57	54,61	51,28	29,04	25,71	0,130
W верх	28	372	22,70	57,24	53,29	34,54	30,59	0,129
W низ	32	132	24,80	54,36	50,87	29,56	26,07	0,134
W верх	43	359	23,75	61,23	56,90	37,48	33,15	0,131
W низ	47	308	24,61	59,36	55,32	34,75	30,71	0,132
W верх	58	292	23,89	62,47	58,07	38,58	34,18	0,129
W низ	62	338	24,59	57,83	53,86	33,24	29,27	0,136
W верх	73	324	23,41	61,07	56,62	37,66	33,21	0,134
W низ	77	40	17,90	57,49	52,96	39,59	35,06	0,129
W верх	88	35	17,71	53,76	49,61	36,05	31,90	0,130
W низ	92	10	17,36	56,48	52,12	39,12	34,76	0,125
W верх	103	20	18,12	58,14	53,61	40,02	35,49	0,128
W низ	107	83	25,57	52,59	49,42	27,02	23,85	0,133
W верх	118	132	24,80	54,49	50,88	29,69	26,08	0,138
W низ	122	372	22,70	49,16	46,03	26,46	23,33	0,134
W верх	133	328	23,82	55,69	51,76	31,87	27,94	0,141
W низ	137	359	23,75	59,67	55,49	35,92	31,74	0,132
W верх	148	346	22,87	58,15	54,14	35,28	31,27	0,128

Табл. А 15

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60$ г/см³ за вихідної вологості $w = 0,130$

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	132	24,80	75,80	72,47	51,00	47,67	0,070
W верх	13	359	23,75	71,95	68,10	48,20	44,35	0,087
W низ	17	328	23,82	70,28	65,61	46,46	41,79	0,112
W верх	28	83	25,57	71,75	66,57	46,18	41,00	0,126
W низ	32	324	23,41	64,09	59,43	40,68	36,02	0,129
W верх	43	372	22,70	67,27	62,22	44,57	39,52	0,128
W низ	47	308	24,61	67,33	62,52	42,72	37,91	0,127
W верх	58	4	17,04	55,03	50,84	37,99	33,80	0,124
W низ	62	3	17,92	50,81	47,11	32,89	29,19	0,127
W верх	73	8	17,26	55,54	51,12	38,28	33,86	0,131
W низ	77	2	17,65	49,59	45,95	31,94	28,30	0,129
W верх	88	12	17,16	55,43	51,14	38,27	33,98	0,126
W низ	92	7	16,96	53,18	48,95	36,22	31,99	0,132
W верх	103	19	17,58	51,58	47,54	34,00	29,96	0,135
W низ	107	11	17,19	52,53	48,41	35,34	31,22	0,132
W верх	118	5	17,58	54,26	49,94	36,68	32,36	0,133
W низ	122	1	17,63	54,63	50,49	37,00	32,86	0,126
W верх	133	6	17,08	53,34	48,74	36,26	31,66	0,145
W низ	137	4 б	17,11	49,70	45,92	32,59	28,81	0,131
W верх	148	9	16,61	58,55	53,84	41,94	37,23	0,127

Табл. А 16

Вихідні дані для побудови графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пілуватого за висотою труби 1,50 м при щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$ за вихідної вологості $w = w_k = 0,130$ (за можливого капілярного підняття)

№ виробки	Глибина відбору	№ бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець)	Маса бюкс (кілець) з ґрунтом		Маса ґрунту		Вологість
				вологим	сухим	вологого	сухого	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
W низ	2	8 б	17,11	41,22	39,54	24,11	22,43	0,075
W верх	13	10	17,59	44,39	42,15	26,80	24,56	0,091
W низ	17	1	17,54	45,94	43,28	28,40	25,74	0,103
W верх	28	3	16,97	43,34	40,58	26,37	23,61	0,117
W низ	32	12	17,08	47,22	44,02	30,14	26,94	0,119
W верх	43	13	17,08	41,42	38,76	24,34	21,68	0,123
W низ	47	9	16,52	41,94	39,25	25,42	22,73	0,118
W верх	58	18	16,66	36,72	34,52	20,06	17,86	0,123
W низ	62	2	17,23	44,80	41,76	27,57	24,53	0,124
W верх	73	20	18,04	42,43	39,84	24,39	21,80	0,119
W низ	77	372	22,65	46,52	44,04	23,87	21,39	0,116
W верх	88	83	25,52	46,63	44,39	21,11	18,87	0,119
W низ	92	308	24,56	51,70	48,77	27,14	24,21	0,121
W верх	103	324	23,39	48,68	45,86	25,29	22,47	0,126
W низ	107	328	23,76	49,45	46,73	25,69	22,97	0,118
W верх	118	359	23,70	48,77	45,82	25,07	22,12	0,133
W низ	122	132	24,80	48,60	45,89	23,80	21,09	0,128
W верх	133	4	17,10	37,20	34,76	20,10	17,66	0,138
W низ	137	40	17,98	50,71	47,23	32,73	29,25	0,119
W верх	148	8	17,90	38,56	36,40	20,66	18,50	0,117

ДОДАТОК Б
БЛОК-СХЕМИ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «PRIZ-PILE»

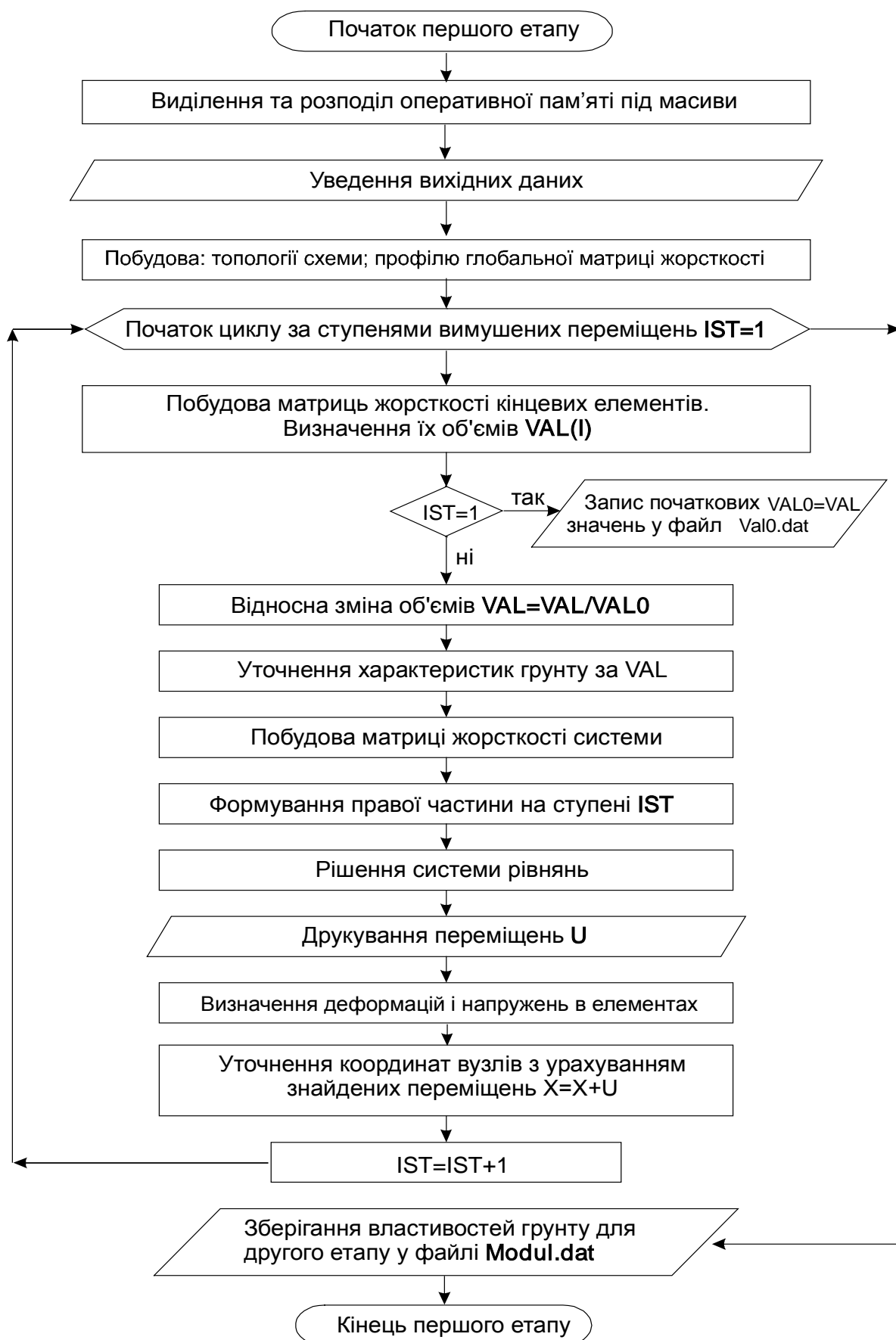


Рис Б.1 Блок-схема першого етапу комплексу «PRIZ-Pile» [13]

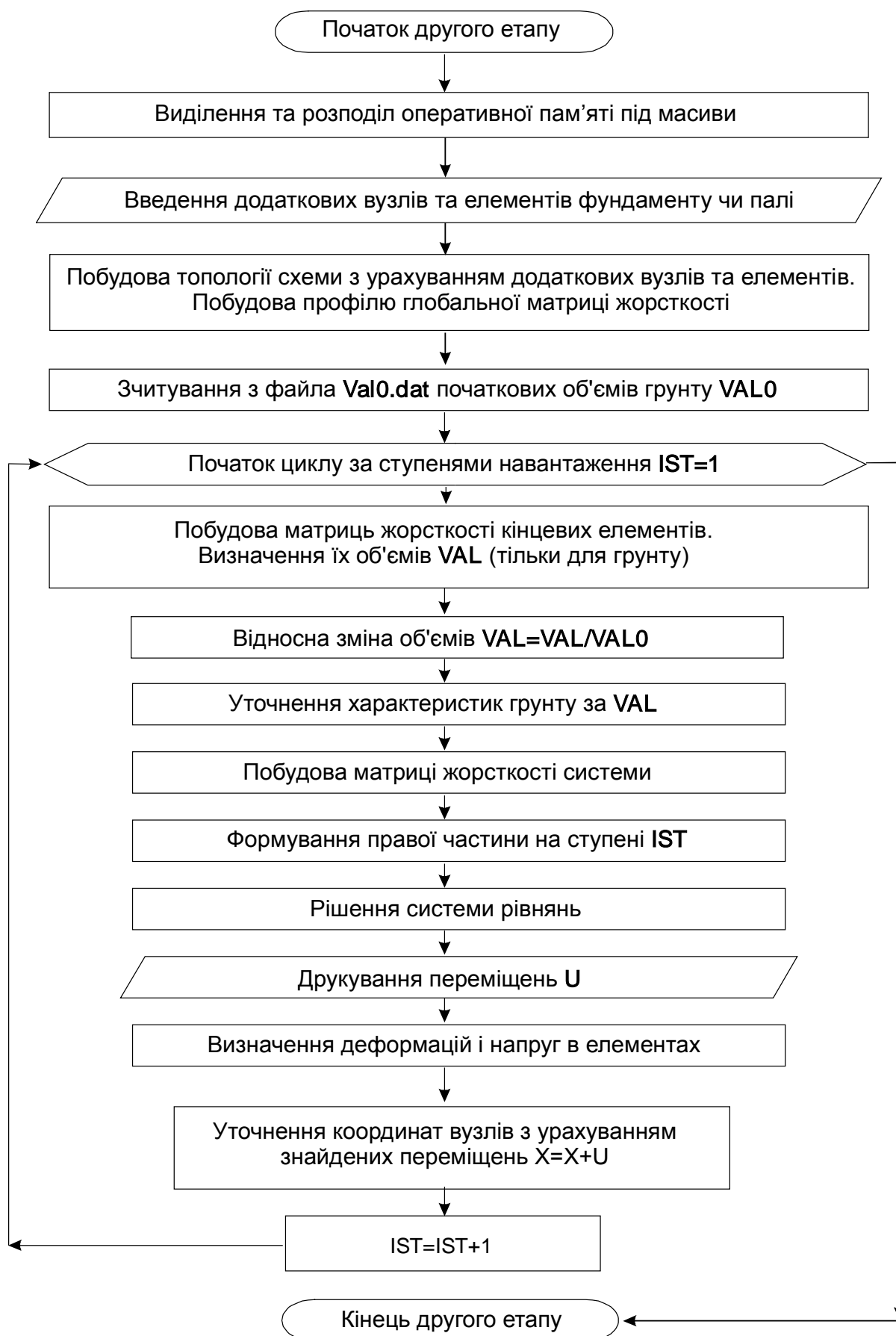


Рис Б.2 Блок-схема другого етапу комплексу «PRIZ-Pile» [13]

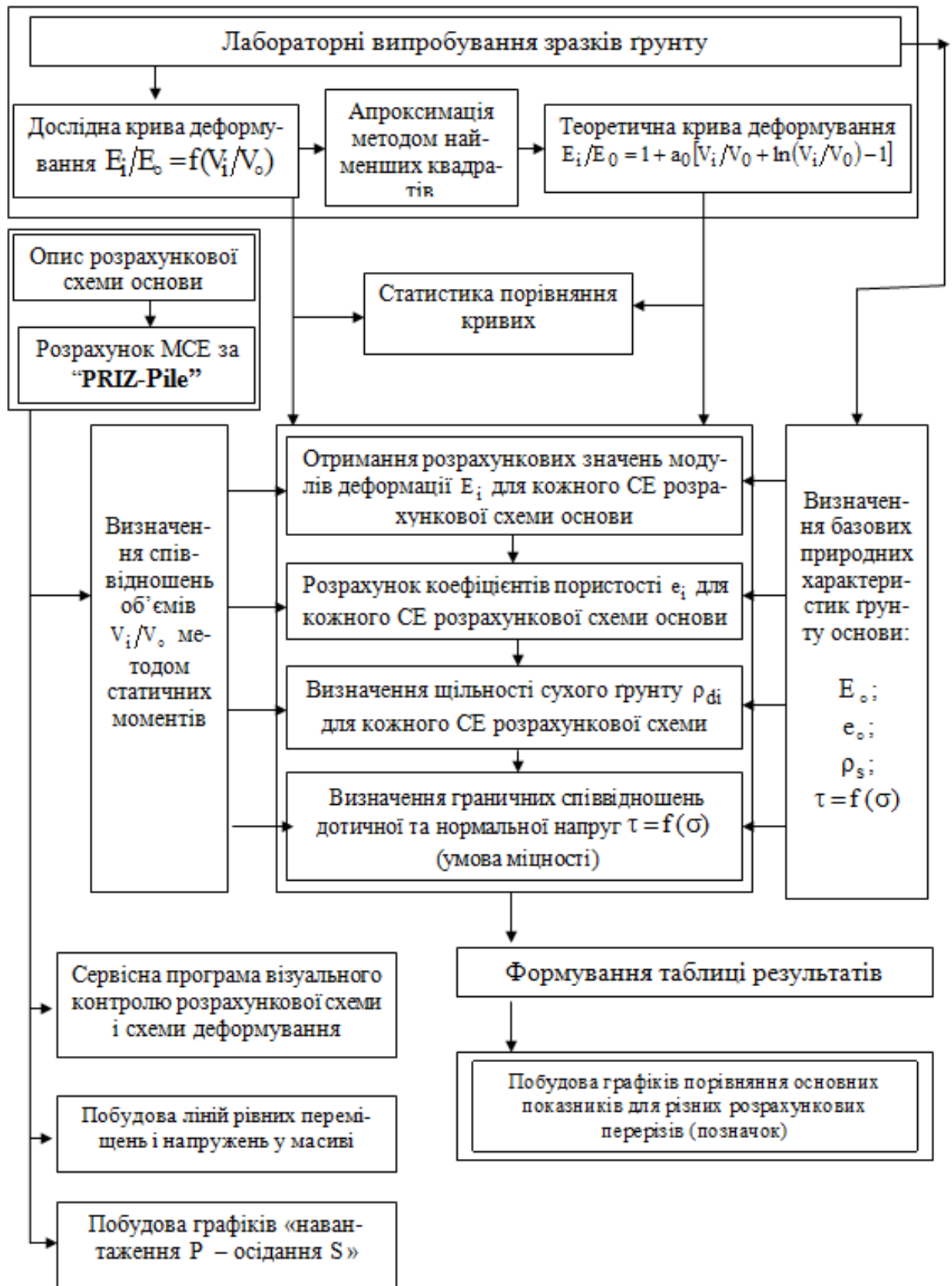


Рис Б.3 Блок-схема пакета програм «Pile Graph» [13]

ДОДАТОК В
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ



МІНІСТЕРСТВО РЕГІОНАЛЬНОГО РОЗВИТКУ, БУДІВНИЦТВА ТА
ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
„ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ”
(ДП НДІБК)**



Юридична адреса: вул. Івана Клименка, 5/2, м. Київ-37, 03037, поштова адреса:
вул. Преображенська, 5/2, м. Київ-37, 03037 тел. (044) 249-72-34, факс (044) 248-89-09
E-mail: niisk-office@ndibk.gov.ua; adm-inst@ndibk.kiev.ua Код ЄДРПОУ 02495431

02.06.2016 № 111-1193 На № _____

Від _____
Заст. директора інституту
з наукової роботи, канд. техн. наук, с.н.с.
Ю.С. Слюсаренко
« 1 » 06 2016

ДОВІДКА

**про впровадження результатів дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук
«Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови
забезпечення їх тривалої міцності»
(спеціальність 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми)
аспіранта кафедри видобування нафти і газу та геотехніки
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка
Литвиненко Тетяни Василівни**

Цим підтверджується, що результати дисертаційної роботи Литвиненко Тетяни Василівни «Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності» використано при розробці розділів 10 та 11 ДСТУ-Н Б В.1.1-XX:201X «Настанова з проектування будинків, будівель і споруд на слабких ґрунтах».

При цьому враховано такі основні результати дисертації:

- за результатами лабораторних і польових досліджень отримано нові дослідні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, товщини насипу та фактору часу;
- удосконалено оптимальні критерії ущільнення пилуватих суглинків, за яких забезпечується тривала міцність дорожнього насипу, а саме – ущільнення ґрунту при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води.

Завідувач відділення досліджень
технічного стану будівель та споруд
при небезпечних геологічних процесах,
с.н.с., канд. техн. наук

В.А. Титаренко

ВІДКРИТЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
Державна акціонерна компанія
«Автомобільні дороги України»
Дочірнє підприємство «Полтавський облавтодор»

вул. Куйбишева, 22-А, м. Полтава, 36039, тел./факс: (0532) 61-33-25, тел. (05322) 2-08-10
 E-mail: PoltavaOAD.main@ukr.net Код ЄДРПОУ 32017261

30.03. 2016 р. № 01-18/61-5 На № _____ від _____ 2016 р.

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук
«Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови
забезпечення їх тривалої міцності»
(спеціальність 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми)
аспіранта кафедри видобування нафти і газу та геотехніки
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка
Литвиненко Тетяни Василівни

Цим підтверджується, що основні результати дисертаційної роботи Литвиненко Тетяни Василівни «Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності» використано при лабораторному контролі якості ущільнення ґрунтів земляного полотна автодороги Полтава-Олександрія (М22).

При цьому враховано такі основні результати дисертації:

- за результатами лабораторних і польових досліджень отримано нові дослідні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, товщини насипу та фактору часу;
- удосконалено оптимальні критерії ущільнення пилуватих суглинків, за яких забезпечується тривала міцність дорожнього насипу, а саме – ущільнення ґрунту при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води.

Директор ДП «Полтавський облавтодор»



В.В. Іщенко



Товариство з обмеженою
відповідальністю
“ЕКФА”
ІНЖЕНЕРНА ФІРМА

Україна м. Полтава,
вул. Пушкіна 31/25, к.54
тел/факс: (05322) 2-97-53
E-mail: ekfa_poltava@bigmir.net
Ідентифікаційний код: 13927558,
р/р №260037422 в АБ Полтава-
банк в м. Полтава, МФО 331489

32-05-6ig 18.05.2016р.

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертації на здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук
«Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови
забезпечення їх тривалої міцності»
(спеціальність 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми)
аспіранта кафедри видобування нафти і газу та геотехніки
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка
Литвиненко Тетяни Василівни

Цим підтверджується, що окремі результати дисертаційної роботи Литвиненко Тетяни Василівни «Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності» використано у 2013 році нашою організацією при геотехнічному супроводженні пошарового ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу на об'єкті «Облаштування Хрестищенського ГКР. Реконструкція Хрестищенської ДКС» у Красноградському районі Харківської області. Матеріал насипу являє собою суглинок важкий пілуватий. Укочування ґрунту об'єкті здійснювалось пневмокатком Hamm HD 150 TT.

При цьому було враховано наступні результати дисертації:
– за результатами польових досліджень отримано нові дослідні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від щільності скелету ґрунту, товщини насипу та фактору часу;
– удосконалено оптимальні критерії ущільнення пілуватих суглинків, за яких забезпечується тривала міцність дорожнього насипу, а саме – ущільнення ґрунту при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води.

Директор ТОВ «ЕКФА»,
канд. техн. наук, член-кореспондент
Академії будівництва України



П.М. Омельченко

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор із наукової та
інноваційної роботи
Полтавського національного
технічного університету
імені Юрія Кондратюка




В.В. Муравльов
“ ” 2016 р.

Довідка

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Ми, декан факультету, д.т.н., професор Нестеренко М.П., в.о. завідувача кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель д.т.н., професор Єрмоленко Д.А., д.т.н., професор Винников Ю.Л. склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи Литвиненко Т.В. на тему «Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності» впроваджено в навчальний процес при виконанні магістерських робіт на теми: «Удосконалення критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожніх насипів» (2014) і «Вологісний режим ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу» (2015 р.).

Ефективність впровадження наукових положень, розроблених здобувачем Литвиненко Т.В., виявилась у підвищенні якості навчання студентів-будівельників спеціальності 8.06010105 «автомобільні дороги і аеродроми».

Декан будівельного факультету
д.т.н., професор



М.П. Нестеренко

В.о. зав. кафедри автомобільних доріг, геодезії,
землеустрою та сільських будівель
д.т.н., професор

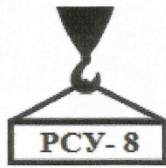


Д.А. Єрмоленко

Науковий керівник
д.т.н., професор



Ю.Л. Винников



Товариство з
обмеженою
відповідальністю
«PCY-8»

пров. Крутий 8А, м. Полтава, 36010,
тел/факс: (0532) 65-47-24,
тел. (099) 002-82-08
E-mail: onipkovi@mail.ru
Код ЄДРПОУ 38019491
Ідентифікаційний код: 38019491,
р/р №26005054605365 в Приватбанк
в м. Полтава,
МФО 331401

12.09. 2016 р. № 47-03 На № _____ від _____ 2016 р.

ДОВІДКА
про апробацію нової авторської методики, представленої в дисертації на
здобуття
наукового ступеня кандидата технічних наук
«Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови
забезпечення їх тривалої міцності»
(спеціальність 05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми)
аспіранта кафедри видобування нафти і газу та геотехніки
Полтавського національного технічного університету
імені Юрія Кондратюка
Литвиненко Тетяни Василівни

Цим підтверджується, що авторська методика із визначення максимальної кількості зв'язаної води глинистих ґрунтів у складі дорожнього насипу, розроблена д.т.н., проф. Винниковим Ю.Л., к.т.н., доц. Коваленком В.І та аспірантом Литвиненко Т.В. апробована нашою організацією при капітальному ремонті проїзної частини по вул. Промислова (від вулиці Гурамівській до будинку №10) в м. Карлівка Полтавської області.

Директор ТОВ «PCY-8»



[Signature]
С.О. Лисицін



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

 ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2. Тел. (056) 776-59-47, 793-19-00 (залізн.)

Факс: (0562) 47-18-66, E-mail: dnuzt@diit.edu.ua

06.10.16 № 11-03/889-1834

на № _____

072624

ДОВІДКА

На засіданні секції V-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (м. Дніпро, 5-6 жовтня 2016 р.) заслухана доповідь аспірантки Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка Литвиненко Тетяни Василівни за основними результатами дисертаційної роботи «Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності» на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 – «Автомобільні шляхи та аеродроми» (науковий керівник – д.т.н., професор Винников Ю.Л.). Викладені нею експериментально-теоретичні дослідження свідчать про розв'язання в дисертації наукової задачі з удосконалення оптимальних критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу, за яких забезпечується їх тривала міцність. Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

– за результатами лабораторних і польових досліджень отримано нові дослідні закономірності міграції води в товщі ущільнених глинистих ґрунтів дорожніх насипів залежно від виду ґрунту, щільності його скелету, товщини насипу та фактору часу;

– удосконалено оптимальні критерії ущільнення пилюватих суглинків, за яких забезпечується тривала міцність дорожнього насипу, а саме – ущільнення ґрунту при вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води;

– встановлено нові коректні умови моделювання МСЕ у фізично та геометрично нелінійній постановці процесу пошарового ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів, за якими проектувальник отримує щільність скелету ґрунту та модуль його деформації.

Результати дисертаційної роботи Т.В. Литвиненко було схвалено.

Заступник голови наукового комітету конференції,
 проректор із наукової роботи Дніпропетровського
 національного університету залізничного транспорту
 імені академіка В. Лазаряна,
 д.т.н., професор


 С.В. Мямлін

Завідувач кафедри «Мости і тунелі»,
 д.т.н., доцент


 О.Л. Тютькін



II МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ КОНГРЕС

Міське середовище - XXI ст.

Архітектура. Будівництво. Дизайн

15-18 березня 2016 р., НАУ, Київ, Україна

ДИПЛОМ

I ступеня

Нагороджується

ЛИТВИНЕНКО Тетяна Василівна, аспірант
(Полтавський національний технічний університет
ім.Ю.Кондратюка, Україна)
за доповідь
«Фактори впливу на міграцію води в товщі ущільнених
глинистих ґрунтів дорожніх насипів»

Директор ННІАП НАУ

Відповідальний
за науково-методичну роботу ННІАП НАУ



О.В.Чемакіна

А.О.Бєлятинський

ДОДАТОК Д
ДОВІДКА ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ МЕТРОЛОГІЧНОГО
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор із наукової та

інноваційної роботи Полтавського
національного технічного університету

імені Юрія Кондратюка

 В.В. Муравльов

» _____ 2016 р.



ДОВІДКА

про відповідність засобів вимірювальної техніки та випробувального обладнання вимогам метрологічного забезпечення

Вимірювальні прилади та обладнання, що використані при проведенні польових і лабораторних експериментальних досліджень у 2013-2016 роках у лабораторії кафедри видобування нафти, газу та геотехніки в процесі виконання дисертаційної роботи аспіранта Т.В. Литвиненко «Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності», проходили періодичну перевірку в ДП «Полтавський регіональний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації» («Полтавастандартметрологія») відповідно до вимог Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність». При цьому встановлено, що вимірювальні прилади й обладнання (індикатори годинникового типу, ваги лабораторні, стаціонарний прилад динамічного ущільнення МДУ-1, прилад для визначення деформаційних характеристик й ущільнення ґрунтів перед зрушенням КПр-1, пенетрометр лабораторний ЛП-1) використані аспірантом методично вірно й відповідають вимогам діючих нормативних документів, зокрема:

- ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей;
- ДСТУ Б В.2.1-12:2009. Ґрунти. Метод лабораторного визначення максимальної щільності;
- ДСТУ Б В.2.1-4-96. Ґрунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформативності.

Завідувач кафедри
видобування нафти і газу та геотехніки,
д.т.н., професор




М.Л. Зоценко

Науковий керівник: д.т.н., професор

Ю.Л. Винников

Завідувач лабораторією кафедри
видобування нафти, газу та геотехніки



М.Г. Романова