

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Винников Юрій Леонідович,
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, професор кафедри автомобільних доріг, геодезії, землеустрою та сільських будівель

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Павлюк Дмитро Олександрович,
Національний транспортний університет (м. Київ), завідувач кафедри проектування доріг, геодезії та землеустрою

кандидат технічних наук
Краюшкіна Катерина Вікторівна,
державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна» (м. Київ), старший науковий співробітник

Захист відбудеться «2» грудня 2016 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.062.12 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова 1, корп. 5, ауд. 303.

З дисертацією можна ознайомитись у Науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий «___»_____ 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент

О.В. Степанчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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. Ґрунтові 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, тому 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, а 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'язаної 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 госпдогвірною 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 та задачі дослідження. Метою роботи є 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 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 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 пилуватих 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 пилюватих 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 капремонті проїзної частини по вул. Промислова (від вул. Гурамішвілі 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.

Особистий внесок здобувача. Результати досліджень, включені в дисертацію, автор отримала самостійно. В публікаціях у співавторстві її особистий внесок полягає в: [1, 3] – експериментальних випробуваннях ґрунтів статичною і динамічною penetрацією, встановленні взаємозв'язку між питомим опором penetрації, 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 пилюватого, вміщеного в пластмасові труби висотою 1,5 м й ущільненого за коефіцієнта водонасичення $S_r = 0,85$ до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$; 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 (НАУ), Київ), 8-й Міжнародній науково-технічній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди» (13 – 16 жовтня 2014 р., Національний університет водного господарства та природокористування, 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, Харків), інтернет-конференції «Ресурсосберегающие геотехнические конструкции и технологии» (березень 2016 р., Таразський державний університет, Казахстан), II Міжнародному науково-практичному конгресі «Міське середовище – XXI сторіччя» – «Архітектура. Будівництво. Дизайн» (15 – 18 березня 2016 р., НАУ, Київ), V-й Міжнародній науково-практичній конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (5 – 6 жовтня 2016 р., Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту (ДНУЗТ), Дніпро); 4 Всеукраїнських конференціях: Всеукраїнському науково-практичному семінарі за участю іноземних фахівців «Сучасні проблеми геотехніки» (2012 р., Полтава), Всеукраїнській конференції молодих учених і студентів (10 – 11 жовтня 2013, Полтава), 8-й Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механіка ґрунтів, геотехніка та фундаментобудування» (11 – 14 листопада 2013 р., Полтава), Всеукраїнській інтернет-конференції молодих учених і студентів «Проблеми і перспективи сталого розвитку та просторового планування територій» (18 березня 2015 р., Полтава), – і на конференціях професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів і студентів ПолтНТУ (2013 – 2016 рр.). 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., НАУ, Київ). У повному обсязі дисертаційна робота була заслухана на семінарі спеціалізованої вченої ради К 26.062.12 (30 червня 2016 р., НАУ, Київ) і V-й Міжнародній науково-практичній конференції «Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика» (5 – 6 жовтня 2016 р., ДНУЗТ, 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено основні результати, отримані автором, виділено їх наукову новизну, практичну цінність і впровадження.

Перший розділ містить аналіз сучасних методів ущільнення ґрунтів, причин деформацій ЗП в насипу; недоліків нормативної бази контролю якості ущільнення ґрунтів; рішень МСЕ задач ущільнення ґрунту. Проблеми ущільнення ґрунтів у складі дорожніх насипів досліджували А.О. Афіногенов, О.А. Білятинський, В.І. Біруля, Ю.Л. Винников, І.П. Гамеляк, М.Н. Гольдштейн, С.А. Євтюков, М.Л. Зоценко, В.Д. Казарновський, В.І. Каськів, Ю.О. Кірічек, В.І. Коваленко, М.В. Корнієнко, К.В. Краюшкіна, В.І. Крутов, Е.К. Кузахметова, А.С. Литвиненко, М.М. Маслов, Д.О. Павлюк, В.Ф. Разорьонов, В.Я. Савенко, В.М. Сиденко, Н.Я. Хархута, D. Adam, M. Conde, C. Dobrescu, A. Hassan, B. Indraratna, M. Islam, B. Jean-louis, K. Kawai, S. Lourenco, A. Nikolaidis, E. Olinic, N. Perez, R. Proctor, M. Sulewska, K. Tateyama, G. Tsitsas, W. Van Impe й ін.

До недоліків методів ущільнення ґрунтів ЗП належать: необхідність «прив'язки» кривої ущільнення ґрунту до певних параметрів конкретного ущільнюючого механізму; достатньо широкі межі оптимальної вологості ґрунтів; певна суб'єктивність у визначенні вологості ґрунту на межі розкочування 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.

Проте 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. На стан ущільненого ґрунту 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. У механіці ґрунтів мінімальні напруження, за яких зразок руйнується через нескінченно тривалий проміжок часу, приймають за межу 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. Тому 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.

Рішення просторових задач МСЕ з використанням пружно-пластичних моделей ґрунту доводять можливість коректного моделювання ущільнення ґрунту, та невирішене поки питання апробації цих рішень для моделювання процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі ЗП за умови забезпечення їх тривалої

міцності. Недолік нормативних лабораторних методів прогнозу ущільнення ґрунтів – у їх відставанні від можливостей сучасної ущільнюючої техніки, бо при збільшенні питомої енергії ущільнення величини оптимальної вологості й максимальної щільності ґрунтів значно змінюються.

Вищевикладене стало базою для постановки мети та задач дисертації.

У **другому розділі** для обґрунтування нових оптимальних критеріїв ущільнення, за яких забезпечується тривала міцність глинистих ґрунтів ЗП створено методику фізичного експерименту зі встановлення закономірностей міграції води в товщі дорожнього насипу, в якості факторів якого прийнято: вид глинистого ґрунту (число пластичності I_p); вологість w , при якій його ущільнювали; щільність скелету ґрунту ρ_d в насипу; висота насипу; час «відпочинку» після зведення й до початку експлуатації насипу. Для реалізації її використано обладнання лабораторії геотехніки ПолтНТУ, де у 2013 – 2015 рр. досліджено закономірності міграції води за висотою у часі в ґрунті, вміщеному в пластмасові труби (імітувався пошарово ущільнений ґрунт ЗП). Стандартними випробуваннями встановлено, що дослідний ґрунт №1 – суглинок важкий пилуватий ($I_p = 0,162$), а №2 – суглинок легкий пилуватий ($I_p = 0,08$), що характерно для зведення ЗП в Україні. Щільність скелету ґрунту приймали за змінний чинник, а початкову величину коефіцієнта водонасичення ущільнених ґрунтів в 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 використано: ваги; пульверизатор; 40 ланок труб із зовнішнім діаметром 50 мм і довжиною 150 мм; металева стійка; лоток для дренажу; ручна трамбівка; шпатель (рис. 1, а – в). Внутрішній діаметр труб – 46,4 мм. Його приймали в розрахунках вихідної маси ґрунту для заповнення певного об'єму труб. Заповнення труб ґрунтом здійснювали послідовно на висоту по 3 см. Задаючись щільністю скелету ґрунту та його вологістю, розраховували для відповідного об'єму масу ґрунту природної вологості ($w_0 = 0,132$) і масу води, яку слід до неї додати, щоб отримати задану вологість w , при якій $S_r = 0,85$. Відібрано й зважено для чотирьох варіантів відповідні маси ґрунту (рис. 1, а). Його зволожували до заданої вологості w за допомогою пульверизатора (рис 1, б) та перемішували шпателем для рівномірного зволоження ґрунту (рис. 1, в). Потім порціями його подавали в труби й рівномірно ущільнювали трамбівкою з відповідними позначками за її висотою (рис. 1, г, рис. 2, а) кожного разу до товщини 30 мм, після чого ланки труби (по 150 мм) з'єднували до загальної висоти (рис. 2, д). Ці труби з пошарово ущільненим ґрунтом встановлювали на стійку (рис. 2, б – г). Нижні кінці труб заводили у дренажний лоток, заповнений щебенем фракції 0 – 5 мм. Отже, вільна (незв'язана) вода мала можливість міграції за всією висотою ґрунту в трубі, що імітувало її міграцію у межах висоти ЗП.

Зверху труби з пошарово ущільненим ґрунтом герметично закривали для запобігання випаровуванню води «вгору». Після цього труби з пошарово ущільненим суглинком залишали на стійці в спокої, на «відпочинок». Через заданий час «відпочинку» труби розбирали на окремі ланки.



Рис. 1. Етапи проведення лабораторних досліджень вологісного режиму ущільненого суглинку дорожнього насипу: а – зважування порції ґрунту; б – дозволоження порції глинистого ґрунту до заданої величини w ; в – перемішування порції ґрунту для його рівномірного зволоження; г – пошарове (по 3 см) ущільнення кожної порції суглинку в трубі; д – монтування ланок труб до загальної висоти

З кожної ланки відбирали по три зразки ґрунту в бюкси, за якими нормативним методом вагової вологості визначали кінцеву (стабілізовану) вологість ущільненого ґрунту w_k . Отже, в межах експерименту проведено:

- 4 серії дослідів для встановлення залежності кінцевої вологості ґрунту №1 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 ґрунту №2 залежно від висоти труби 45, 90, 150, 210 та 285 см при $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$;
- 3 серії дослідів для виявлення залежності кінцевої вологості ґрунту №2 залежно від часу його витримки 74, 120 та 180 діб при $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$;
- 2 серії дослідів для встановлення залежності кінцевої вологості ґрунту №2 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.

Побудовано графіки зміни вологості ущільненого суглинку:

- важкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $1,50 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,250$, при щільності скелету $1,55 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,231$, при щільності скелету $1,60 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,214$, при щільності скелету $1,65 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,198$ після 62 діб витримки і висотою труби 1,50 м;



Рис. 2. Етапи лабораторних досліджень вологісного режиму ущільненого суглинку дорожнього насипу: а – трамбівка для ущільнення ґрунту; б – стійка для розташування труб з ущільненим ґрунтом; в, г – труби заповнені ущільненим ґрунтом

– легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $1,50 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,250$, при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,231$, при щільності скелету ґрунту $1,60 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,214$, при щільності скелету ґрунту $1,65 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,198$ після 62, 74, 77 і 75 добах витримки відповідно та висотою труби 1,50 м;

– легкого пілуватого за висотою труби 0,45 м, 0,9 м, 1,50 м, 2,10 м і 2,85 м при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,231$ після 59, 59, 74, 62 і 66 добах витримки відповідно;

– легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $1,55 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,231$ після 74, 120 і 180 добах витримки та висоті труби 1,50 м.

Приклади графіків зміни вологості ущільненого суглинку важкого й легкого пілуватого при щільності скелету ґрунту $1,50 \text{ г/см}^3$ вологості $w = 0,250$ та висоті труби 1,50 м показано на рис. 3, а та 3, б відповідно. У більшості дослідів зафіксовано тенденцію до зростання вологості суглинку у верхній ланці труб та її зменшення у нижній. Тому в розрахунку середніх значень вологості й коефіцієнта варіації цього параметру за висотою труби величини вологості у верхній і нижній ланках не брались до уваги. Із побудованих за даними експерименту графіків зафіксовано таке:

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

Отже, для подальшого аналізу отримано нові експериментальні дані залежності вологісного режиму ущільнених глинистих ґрунтів ЗП від їх виду, щільності скелету ґрунту, висоти насипу й часу їх витримки до експлуатації.

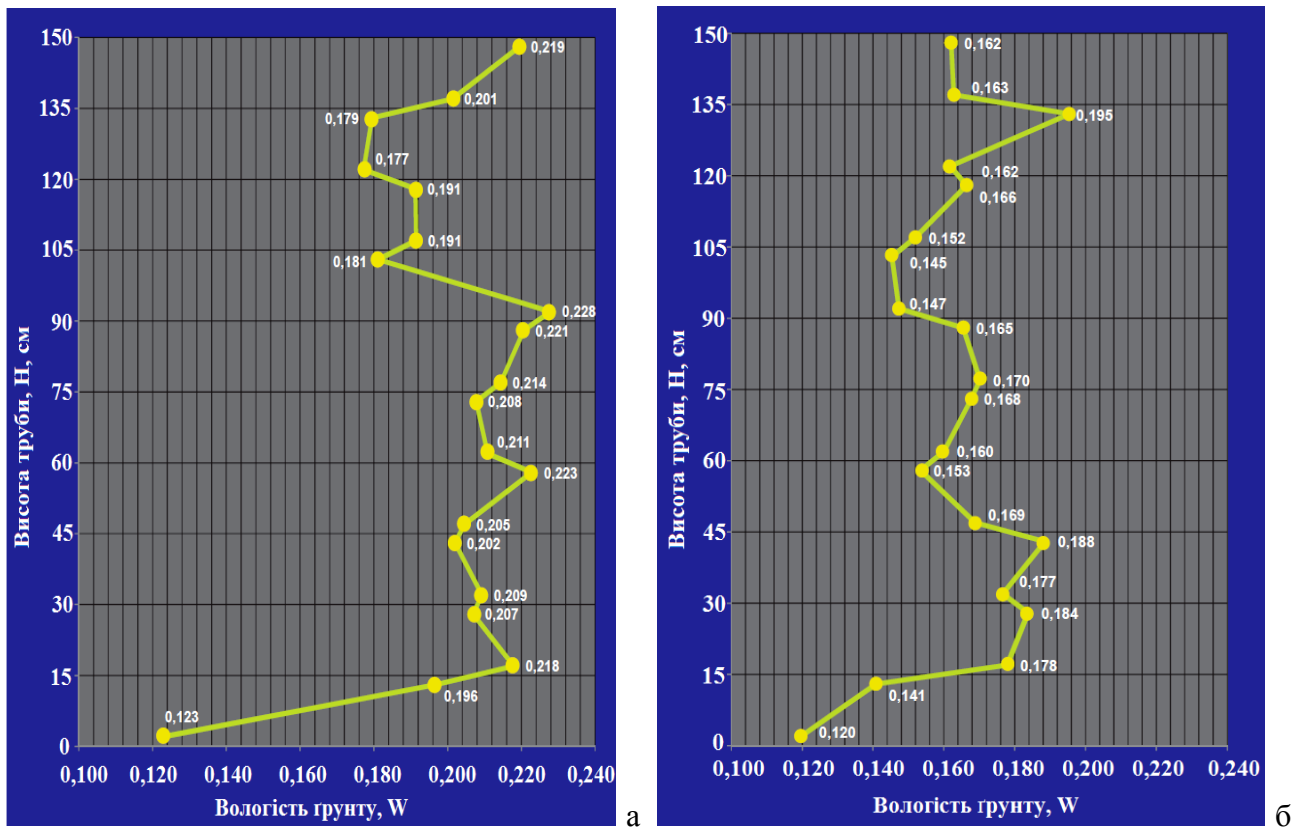


Рис. 3. Залежності вологості ущільнених суглинків важкого пілуватого (а) та легкого пілуватого (б) від щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,50 \text{ г/см}^3$ при висоті труби 150 см

Третій розділ містить кількісний аналіз отриманих вище результатів експерименту зі встановлення закономірностей міграції води в товщі ущільненого важкого та легкого пілуватого суглинків дорожнього насипу, зокрема величини стабілізованої вологості ущільненого глинистого ґрунту w_k в залежності від чинників: виду глинистого ґрунту (числа пластичності I_p); щільності скелету ґрунту ρ_d , г/см^3 ; висоти насипу, м; часу «відпочинку» ЗП, діб. Величина стабілізованої 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. Тому з позицій забезпечення тривалої міцності ущільненого глинистого ґрунту w_k ЗП саме цей параметр доцільно прийняти за оптимальну вологість ущільнення ґрунту W_{opt} . Результати визначення середніх величин стабілізованої вологості ущільненого ґрунту w_k за всією висотою труби, виключаючи її верхні та нижні ланки для кожного заданого значення щільності скелету ґрунту $1,50 - 1,65 \text{ г/см}^3$ вміщено в табл. 1 і 2. В останній колонці таблиць подані величини коефіцієнта варіації параметру w_k , за якими ґрунт в усіх дослідах можна прийняти як однорідний.

За даними табл. 1 і 2 побудовано графіки (рис. 4 а, б) залежностей:

- графік 1 – вологості ґрунту w , при якій обидва види дослідних ґрунтів ущільнювали, від щільності скелету ґрунту ρ_d в дорожньому насипу (трубі);
- графік 2 – стабілізованої вологості ґрунту w_k ущільнених суглинків після «відпочинку» ЗП від щільності скелету ґрунту ρ_d в межах висоти труби.

Таблиця 1 – Значення середніх величин кінцевої вологості ущільненого важкого пілуватого 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 2 – Значення середніх величин кінцевої вологості ущільненого легкого пілуватого 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

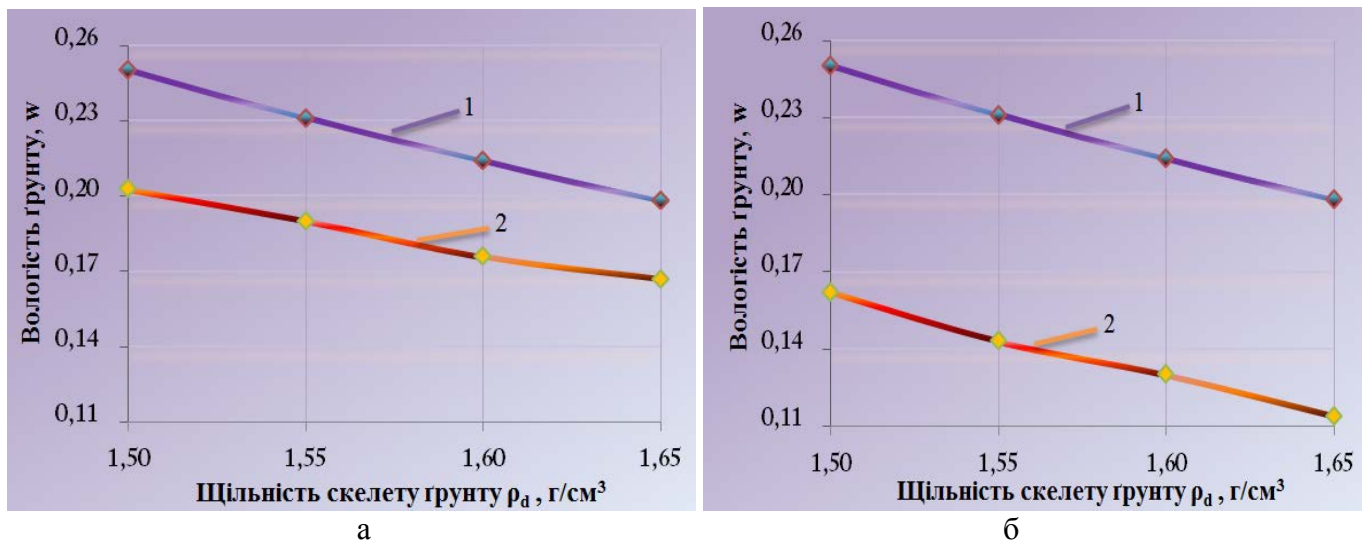


Рис. 4. Графіки залежності вологості ґрунту w , при якій суглинок ущільнювали, (1) та стабілізованої (кінцевої) вологості ґрунту w_k вже ущільненого суглинку після «відпочинку» ЗП (2) від щільності скелету ґрунту в межах висоти труби: а – важкого суглинку; б – легкого суглинку

Порівнюючи за даними табл. 1 і табл. 2 та рис. 4 а, б значення стабілізованої вологості ущільнених суглинків w_k за висотою дорожнього насипу (знизу – догори) через два місяці «відпочинку» ЗП, з величинами початкової вологості w цих же ґрунтів можливо констатувати наступне:

– значення середньої стабілізованої вологості w_k ущільнених суглинків порівняно з початковою вологістю w , при якій їх ущільнювали, знизилось для всіх величин щільності скелету ґрунту ρ_d майже на всю висоту труби за винятком її верхньої ланки, для якої вологість наблизилась до вологості водонасичення w_{sat} ,

яке відповідає коефіцієнту водонасичення близькому до $S_r \approx 1,0$, за рахунок капілярного підняття вологи; при цьому вологість суглинку важкого пилюватого в нижній ланці труб зменшилась до $w = 0,10 - 0,12$, а легкого пилюватого до $w = 0,08$ внаслідок випаровування вільної води;

– значення стабілізованої 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. 4 а, б), 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 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 вологомісткості w_{mm} ;

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

Значення середніх величин кінцевої вологості w_k ущільненого суглинку легкого пилюватого залежно від висоти труби при $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$ склали: при висоті труби 0,45 м – $w_k = 0,138$; 0,9 м – $w_k = 0,141$; 1,50 м – $w_k = 0,129$; 2,10 м – $w_k = 0,129$ і при 2,85 м – $w_k = 0,133$. Аналіз графіків зміни вологості ущільненого суглинку за висотою труб 45, 90, 150, 210 та 285 см показав, що висота ущільненого глинистого ґрунту в складі ЗП суттєво не впливає на його вологісний режим.

З аналізу графіків зміни вологості ущільненого суглинку легкого пилюватого за висотою насипу (труби), ущільненого за вологості $w = 0,231$ до щільності скелету ґрунту $\rho_d = 1,55 \text{ г/см}^3$, після 74, 120 та 180 діб «відпочинку», зокрема, видно, що середня величина стабілізованої вологості ущільненого суглинку за висотою труби, за виключенням її верхньої та нижньої ланки після 74 діб склала $w_k = 0,143$, 120 – $w_k = 0,134$, а 180 – $w_k = 0,131$, тобто вологість знизилась лише приблизно на 1,0%.

Оскільки висота насипу з ущільненого суглинку суттєво не впливає на його вологісний режим, і збільшення часу «відпочинку» ЗП після 2 місяців суттєво не впливає на величину стабілізованої вологості ґрунту, то виконано двохфакторний статистичний аналіз залежності стабілізованої вологості w_k ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу від щільності скелету ґрунту ЗП та його числа пластичності. У результаті методом найменших квадратів отримано залежність

$$w_k = a_0 + a_1 \left(\frac{\rho_d}{\rho_{d0}} \right) + a_2 \cdot I_p, \quad (1)$$

де $\rho_{d0} = 1 \text{ г/см}^3$; емпіричні коефіцієнти: $a_0 = 0,531$; $a_1 = -0,279$; $a_2 = 0,570$.

Коефіцієнт кореляції становить $r = 0,995$, критерій Фішера $F = 106,33$, що більше за табличне значення $F_{табл.} = 4,89$ при рівні значущості $p = 5\%$ й числі ступенів волі $\nu_1 = 7$, $\nu_2 = 5$. Це свідчить про коректність виразу (1).

Виконано й 2 серії експерименту з дослідження можливої міграції води в товщі глинистого ґрунту, ущільненого вже за стабілізованої вологості. Для цього суглинок легкий пілуватий ($I_p = 0,08$) ущільнювали до $\rho_d = 1,60 \text{ г/см}^3$ за вище встановленої оптимальної вологості $w_k = 0,130$ при висоті труби 150 см. Методика першої серії не відрізнялась від описаної в розділі 2 (час досліду – 70 діб), а в другій серії для перевірки можливого капілярного підняття вологи у ЗП лоток із щебенем заповнювали водою. Нижні кінці труби заводили в нього, тобто, ґрунт мав можливість «підсмоктування» вологи. Нижня ланка труби знаходилась на відстані не більше 2 – 3 см від рівня води в лотку, і по мірі її випаровування воду підливали в лоток. Встановлено, що вологість глинистого ґрунту в трубі, ущільненого за вологості, що відповідає значенню стабілізованої вологості (чи вологості максимального вмісту зв'язаної води) в часі суттєво не змінилася порівняно з початковою вологістю $w = 0,130$.

У **розділі 4** виконано натурні досліди при зведенні з глинистих ґрунтів пошарово ущільненого ЗП на об'єкті «Облаштування Хрещищенського ГКР» у Красноградському р-ні Харківської області та ще на 4 об'єктах (3 – Полтавщині, 1 – Чернігівщині) з пошаровим укочуванням насипів автодоріг і площадок. Як матеріал ЗП «Облаштування Хрещищенського ГКР» використано суглинок важкий пілуватий, твердий. Матеріал насипу з кар'єрів доставляли і відсипали на трасу автосамоскидами (рис. 5 а, б). Його планували до горизонтального рівня грейдерами (рис. 5, в) чи бульдозерами (рис. 5, г). Товщина кожного відсипаного шару склала 200 – 250 мм. Ґрунт ущільнювали однобарабанным кулачковим самохідним вібраційним катком НАММ 3520 послідовно 14-ма проходами за одним слідом (рис. 5, д). Для пошарового ущільнення ґрунту використано також пневмоколісний каток Hamm HD 150 TT (рис. 5, е, є). При необхідності ґрунт дозволювали поливомийною машиною (рис. 5, ж) й робили перерву на 2 – 3 години, щоб волога рівномірно розподілилась по товщі всього шару.

Відбір зразків у ріжучі кільця в шурфах з їх подальшим лабораторним дослідженням виконували як безпосередньо після ущільнення кожного шару, так і через 0,5 – 1 місяць «відпочинку». Встановлено, що вологість суглиноків, укочених за вологості на межі розкочування, за час «відпочинку» зменшилась приблизно до максимальної молекулярної вологоємності.

Здійснено двохфакторний статистичний аналіз залежності стабілізованої вологості w_k ущільненого ґрунту ЗП від щільності скелету ґрунту і його числа пластичності, в результаті якого отримано емпіричну залежність, аналогічну виразу (1), стабілізованої вологості w_k ущільненого глинистого ґрунту дорожнього насипу від щільності скелету ґрунту та його числа пластичності, коефіцієнти якої становлять: $a_0 = 0,490$; $a_1 = -0,238$; $a_2 = 0,440$. При цьому $r = 0,993$, а $F = 76,73$, що більше за $F_{табл.} = 19,25$ при $p = 5\%$ та $\nu_1 = 4$ і $\nu_2 = 2$ (кількість дослідів $n = 5$), що свідчить про коректність формули (1).

Тобто, підтверджено загальний вигляд отриманої за лабораторним дослідом залежності стабілізованої вологості суглиноків для їх пошарового ущільнення від величини щільності скелету ґрунту в межах дорожнього насипу та числа пластичності ґрунту.



Рис. 5. Етапи зведення ґрунтового дорожнього насипу: а – доставка матеріалу на трасу для зведення ґрунтового насипу; б – відсипання ґрунту в тіло дорожнього насипу; в – планування ЗП до горизонтального рівня грейдером; г – планування ЗП до горизонтального рівня бульдозером; д – ущільнення ґрунту одnobарабанним кулачковим самохідним вібраційним катком НАММ 3520; е, е – ущільнення ґрунту пневмоколісним катком Hamm HD 150 ТТ; ж – дозволення ґрунту поливомийною машиною

Різниця величин w_k , що отримані за виразом (1) за результатами польових і лабораторних дослідів, при $I_p = 0,17$ не перевищує 0,005, а при $I_p = 0,07$ величини w_k , отримані за даними натурних дослідів, перевищують аналогічні значення, отримані за лабораторними дослідями, не більш, ніж на 0,015.

У п'ятому розділі обґрунтовано коректні умови моделювання МСЕ процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів, пропозиції щодо впровадження результатів досліджень у практику зведення ЗП і вміщено інформацію про впровадження результатів дисертації. Для моделювання процесу пошарового ущільнення ґрунтів у складі дорожнього насипу використано апробований програмний комплекс «PRIZ-Pile», який створили Ю.Л. Винников і С.Ф. Клованич, де реалізоване рішення вісесиметричної задачі МСЕ кроково-ітераційними методами у фізично й геометрично нелінійній постановці з представленням ґрунту ізотропним середовищем. Для моделювання процесу укочування ґрунтів у складі

шарів ЗП достатньо використання можливостей лише першого етапу «компресійної задачі» комплексу. Як вихідні використані дані влаштування пошарово ущільненого дорожнього насипу на «Облаштуванні Хрещищенського ГКР».

Сплановано чисельний дослід з впливу на середнє значення щільності скелету глинистого ґрунту в кожному ущільненому шарі трьох чинників: початкової щільності скелету ґрунту в межах шару після його відсипання та розрівнювання $\rho_{d,0}$; початкової товщини відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП грейдера чи бульдозера шару h ; зниження поверхні кожного шару ґрунту під гладким катком Δh . При моделюванні укочування шару ґрунту прийнята вихідна прямокутна розрахункова схема (рис. 6, а), що містить 550 скінчених елементів (СЕ), 55×10 , 1781 вузлів сітки СЕ, з яких 151 – закріплені.

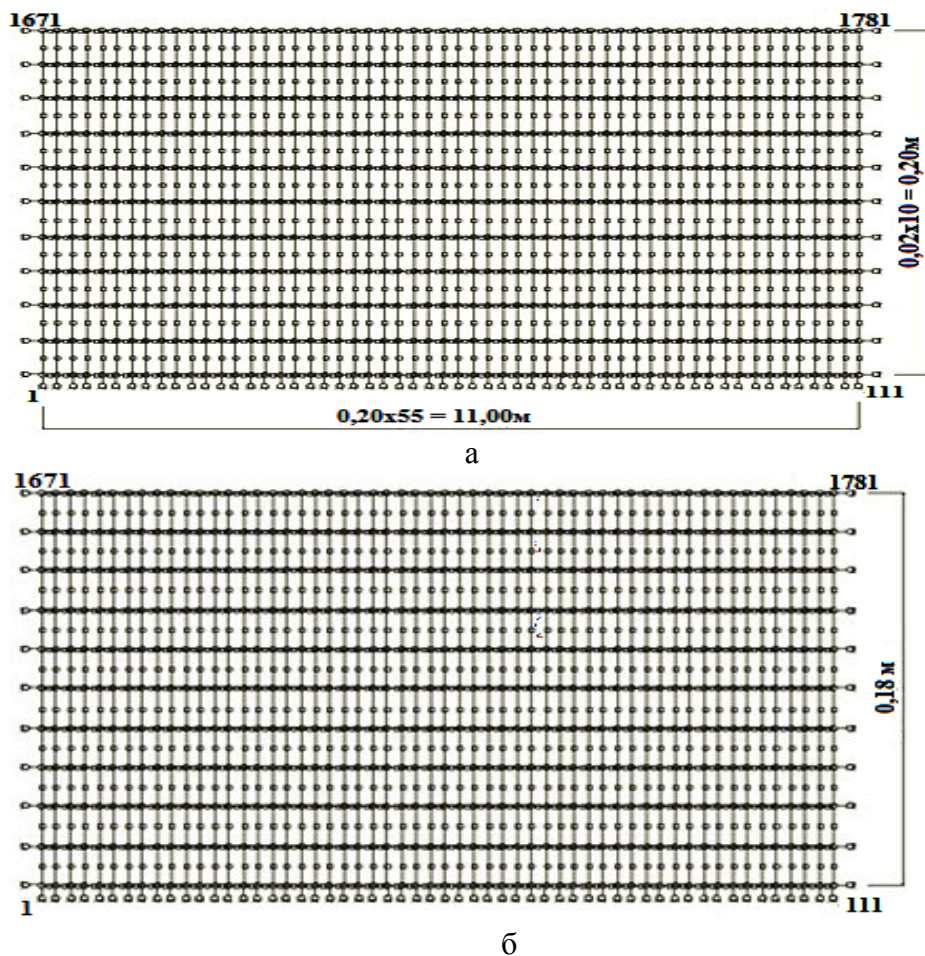


Рис. 6. Схеми розбивки розрахункової зони на СЕ для моделювання процесу укочування відсипаного та спланованого до горизонтального рівня грейдера чи бульдозера шару глинистого ґрунту: а – вихідна; б – після укочування гладким катком

У результаті моделювання виконано аналіз впливу на значення щільності скелету ґрунту в ущільненому шарі (відповідно ρ_d , т/м³) технологічних чинників: 1) початкової щільності скелету ґрунту в межах шару після його відсипання та розрівнювання $\rho_{d,0}$ (в досліді $\rho_d = 1,30$ т/м³; $1,35$ т/м³; $1,40$ т/м³); 2) початкової товщини відсипаного та спланованого до горизонтального рівня ЗП грейдера (бульдозера) шару h ($h = 0,15$ м; $0,20$ м; $0,25$ м); 3) зниження поверхні цього шару ґрунту під катком Δh ($\Delta h = 0,02$ м; $0,03$ м; $0,04$ 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) задавали вертикальні переміщення на величини $\Delta h = 15$ мм, 20 мм, 25 мм (рис. 6, б). Отже, загальна кількість дослідів склала $n = 3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$. З них до подальшого аналізу було прийнято 14 результатів, в яких у кожному ущільненому шарі одержано $\rho_d = 1,55 - 1,75$ т/м³.

Шляхом трьохчинникового аналізу отримано рівняння взаємозв'язку

$$\rho_d = a_0 + a_1 \cdot \rho_{d.0} + a_2 \cdot h + a_3 \cdot \Delta h, \quad (2)$$

де $a_0 = 0,4716$ т/м³; $a_1 = 0,8703$; $a_2 = -1,4648$ т/м⁴; $a_3 = 8,5459$ т/м⁴.

Для рівняння (2) $r = 0,928$, а $F = 7,198$, що більше за $F_{табл.} \approx 2,65$ при $p = 5\%$ та $\nu_1 = 13$ і $\nu_2 = 10$. Отже, вираз (2) є коректним. Відносна похибка змодельованих величин ρ_d порівняно з даними дослідів не перевищує 2,24%, тобто результати моделювання та натурних досліджень добре корелюються.

Проектування пошарового 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, тобто приймаючи величину оптимальної вологості ґрунту за формулою (1) залежно від проектної величини щільності скелету ґрунту в межах ЗП і числа пластичності ґрунту. Величина цієї вологості ґрунту нижча за її вологість на межі розкочування W_p , але діапазон сучасної ущільнюючої техніки дає можливість достатньо збільшувати питому енергію ущільнення, щоб укочувати ґрунт до максимальної щільності ґрунтів ЗП. Дослідне підтвердження цього містять праці «XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development» (Единбург, 2015 р.), присвячені переважно дорожньому будівництву, зокрема, роботи румунських фахівців – С. Dobrescu та ін., Е. Olinic та ін., англійців – А. Nassan та ін. Аналогічні результати отримав і професор Д.О. Павлюк.

У комплексі з пошаровим укочуванням ґрунтів при їх вологості, близькій до максимального вмісту зв'язаної води, є сенс у верхніх шарах дорожніх насипів застосовувати геосинтетичні (геосітки, геотекстильні полотна) чи геокомпозиційні матеріали, що дозволяє витримати граничні стани структури й покращити умови роботи ЗП. Модифікований автором метод динамічного пенетраційного контролю якості ущільнення ґрунтів з удосконаленою методикою обробки їх результатів дає більш точний показник механічних властивостей зв'язного ґрунту R , що не залежить від особливостей пенетрації і тісно пов'язаний з параметрами фізичного стану ґрунту.

Результати досліджень використано: ДП НДІБК при розробці розділів 10 та 11 ДСТУ-Н Б В.1.1-ХХ:201Х; 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»; ТОВ «РСУ – 8» при капремонті проїзної частини по вул. Промислова (від вул. Гурамівшілі 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.

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 і 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 ґрунту 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, отриманих 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 penetрації / 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 I 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 суглинку дорожной насыпи / Ю.Л. Винников, Т.В. Литвиненко // Проблеми 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.

АНОТАЦІЯ

Литвиненко Т.В. Ущільнення ґрунтів дорожнього насипу за умови забезпечення їх тривалої міцності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 – автомобільні шляхи і аеродроми. – Національний авіаційний університет МОН України. – Київ, 2016.

Роботу присвячено удосконаленню оптимальних критеріїв ущільнення глинистих ґрунтів дорожнього насипу, за яких забезпечується їх тривала міцність. Розроблено та реалізовано методику фізичного експерименту зі встановлення закономірностей

міграції води в товщі земляного полотна (ЗП), в якості факторів якого прийнято: вид глинистого ґрунту (його число пластичності); вологість, при якій його ущільнювали; щільність скелету ґрунту в насипу; висота насипу; час «відпочинку» після зведення і до початку експлуатації ЗП. Шляхом лабораторних і польових дослідів встановлено закономірності міграції води в товщі ущільнених ґрунтів ЗП. Статистичним аналізом їх результатів отримано емпіричну залежність стабілізованої вологості пилуватих суглинків для їх пошарового ущільнення в залежності від величини щільності скелету ґрунту в межах насипу і числа пластичності ґрунту, параметр якої відповідає вологості максимального вмісту зв'язаної води, за якої доцільно пошарово ущільнювати глинисті ґрунти ЗП для забезпечення їх тривалої міцності. Встановлено коректні умови моделювання методом скінчених елементів процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів.

Ключові слова: глинистий ґрунт дорожнього насипу, тривала міцність, міграція води, пошарово ущільнений суглинок, максимальна щільність скелету ґрунту, максимальна молекулярна вологоємність (максимальна кількість зв'язаної води), статистичний аналіз, моделювання процесу ущільнення ґрунту.

АННОТАЦІЯ

Литвиненко Т.В. Уплотнение ґрунтов дорожньої насыпи при умови забезпечення її довготривалої міцності. – На правах рукописи.

Дисертація на соискание ученої ступені кандидата технічних наук по спеціальності 05.22.11 – автомобільні дороги і аеродроми. – Національний авіаційний університет МОН України. – Київ, 2016.

Дисертація присвячена удосконаленню оптимальних критеріїв ущільнення ґрунтів дорожньої насыпи, при яких забезпечується їх довготривала міцність. Розроблена і реалізована методика фізичного експерименту по встановленню закономірностей міграції води в товщі земляного полотна (ЗП), в якості факторів якого прийнято: вид глинистого ґрунту (його число пластичності); вологість, при якій його ущільнювали; щільність скелету ґрунту в насипу; висота насипу; час «відпочинку» після зведення і до початку експлуатації ЗП. Шляхом лабораторних і польових дослідів встановлено закономірності міграції води в товщі ущільнених ґрунтів ЗП. Статистичним аналізом їх результатів отримано емпіричну залежність стабілізованої вологості пилуватих суглинків для їх пошарового ущільнення в залежності від величини щільності скелету ґрунту в межах насипу і числа пластичності ґрунту, параметр якої відповідає вологості максимального вмісту зв'язаної води, за якої доцільно пошарово ущільнювати глинисті ґрунти ЗП для забезпечення їх довготривалої міцності. Встановлено коректні умови моделювання методом скінчених елементів процесу ущільнення глинистих ґрунтів у складі дорожніх насипів.

Ключевые слова: глинистий ґрунт дорожньої насыпи, довготривала міцність, міграція води, пошарово ущільнений суглинок, максимальна щільність скелету ґрунту, максимальна молекулярна вологоємність (максимальне вміст зв'язаної води), статистичний аналіз, моделювання процесу ущільнення ґрунту.

ABSTRACT

Lytvynenko T.V. The compaction of road embankment soils by ensuring their long-term strength – Manuscript.

Thesis for the Candidate Degree in Technical science: Speciality 05.22.11 – Highways and airfields. – Kyiv National Aviation University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to improving the optimal compaction criteria of road embankment soils, which provide their long-term strength. The first unit contains the analysis of modern soil compaction methods, subgrade deformation causes in the embankment, finite element method (FEM) solves of soil compaction tasks, regulatory framework of quality control disadvantages, and others.

The second unit is stated a new author's method and the laboratory tests results of water migration in compacted silty loam embankment, including the stabilized (or final) clay soil moisture values, depending on their type (number plasticity), soil skeleton density, embankment height and time «rest» of the subgrade before it's operation are presented. Water migration patterns in clay soil, placed in plastic tubes (it is simulated the soil multilayer consolidation of road embankment) through time is researched.

In the third unit as a result of statistical processing by least squares method the research laboratory and field data, the empirical dependence of compacted clay soil stabilized moisture for their multilayer consolidation in relation to soil skeleton density and plasticity number values is obtained. Empirical dependence parameter corresponds to maximum molecular moisture capacity at what it is advisable to do the subgrade clay soils multilayer consolidation for their long-term strength ensuring. The embankment thickness of multilayer consolidation and subgrade «rest» time after 2 months did not significantly affect the stabilized soil moisture.

In the fourth unit the field observation of clay soils compaction with multilayer rolling at five objects is performed. Full-scale experiment found that multilayer loams moisture consolidation by plastic limit of these soils during the «rest» time after subgrade erection and before its operation is reduced to a maximum molecular moisture capacity. General form of receiving from laboratory tests dependence of compacted loams stabilized moisture for their multilayer consolidation in relation to soil skeleton density in road embankment and plasticity number is approved.

The fifth unit contains the FEM modeling correct conditions of clay soils compaction process being a part of road embankments; suggestions for the optimal compaction criteria of road embankment soils; thesis results implementation. With high statistical indicators values the empirical equation of the relationship between clay soil skeleton density in each compacted layer and the initial clay soil skeleton density within the layer after its dumping and leveling, initial thickness of filled and planned to horizontal level subgrade by grader or bulldozer layer, reduction of each clay soil layer surface under the smooth roller is obtained.

Keywords: road embankment clay soils, long-term strength, water migration, loam multilayer consolidation, maximum soil skeleton density, maximum molecular moisture capacity (maximum quantity of unfree water), statistical processing, soils compaction modeling.