

Національний транспортний університет
Міністерство освіти і науки України
Національний транспортний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ХАРІН ПАВЛО ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 625.7:678

ДИСЕРТАЦІЯ
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЙ
НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ІЗ ГЕОГРАТКАМИ ПОЛІМЕРНИМИ
ЖОРСТКИМИ БАГАТОВІСНООРІЄНТОВАНИМИ

05.22.11 – автомобільні шляхи та аеродроми

Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших
авторів мають посилання на відповідне джерело

П.Л. Харін

Науковий керівник –
Усиченко Олена Юріївна
кандидат технічних наук, доцент

Ідентичність усіх примірників дисертації

Засвідчую

В.о. вченого секретаря

спеціалізованої вченої ради Д 26.059.02

О.М. Ложачевська



Київ 2025

АНОТАЦІЯ

Харін П.Л. Удосконалення методу розрахунку конструкцій нежорсткого дорожнього одягу із геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.11 «Автомобільні шляхи та аеродроми». (192 – Будівництво та цивільна інженерія). – Національний транспортний університет, Київ, 2025.

У дисертації досліджено важливе науково-практичне завдання удосконалення методу розрахунку конструкцій нежорсткого дорожнього одягу із урахуванням посилення геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими. Застосування запропонованого підходу сприяє підвищенню ефективності використання геосинтетичних матеріалів у транспортному будівництві, що забезпечує оптимізацію конструктивних рішень, зниження матеріаломісткості та енергозатрат на будівництво і ремонт доріг, а також підвищення їх довговічності та експлуатаційної надійності.

Наукова новизна роботи ґрунтується на комплексному експериментальному вивченні поведінки нежорстких дорожніх одягів, посилених полімерними геогратками, під дією статичних та короточасних навантажень. Проведені натурні дослідження дозволили встановити якісні та кількісні закономірності взаємодії елементів посилення із щибеним шаром і ґрунтовою основою. Зокрема, експерименти дозволили виявити, що геогратки сприяють значному збільшенню зони розподілу навантажень на основу, формують композитний шар посилення з підвищеною згинальною жорсткістю, що перешкоджає локальним деформаціям і випору ґрунту.

Встановлено залежність ефективності посилення від співвідношення деформативних характеристик матеріалів дорожнього одягу та основи (коефіцієнта $E_{\text{гр}}/E_{\text{до}}$) та відносної глибини закладення геогратки ($h_{\text{до}}/D$). Проведено аналіз впливу

різних типів геограток на напружено-деформований стан конструкцій, що дало змогу оцінити зміни величин активних зсувних напруг і еквівалентного модуля пружності.

На основі кореляційно-регресійного аналізу отримано емпіричну математичну модель для визначення коефіцієнта посилення, що враховує комплекс параметрів конструкції та умов її експлуатації. Розроблена інженерна методика розрахунку дозволяє обґрунтувати оптимальні товщини та параметри дорожніх одягів посиленних геогратками, враховуючи інтенсивність руху, навантаження на вісь автомобіля, термін експлуатації та кліматичні умови.

Практична значущість роботи підтверджується впровадженням розроблених методик та технологічних рішень у будівельну практику низки організацій транспортної інфраструктури, а також використанням матеріалів дослідження у навчальному процесі Національного транспортного університету.

Отримані результати сприяють підвищенню надійності та довговічності дорожніх покриттів, зниженню експлуатаційних витрат і матеріаломісткості будівельних конструкцій, що є вагомим внеском у розвиток сучасного транспортного будівництва з використанням інноваційних геосинтетичних матеріалів.

Ключові слова: автомобільна дорога, шар щебню, геогратка, нежорсткий дорожній одяг, натурні дослідження, статичні штампові випробування, напружено-деформований стан.

Список публікацій здобувача

**Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:
Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені
до міжнародних наукометричних баз:**

1. Plytus R., Kharin P., Modeling of polymeric rigid geogrid performance in the Plaxis 2D software package. *Veda a perspektivy* № 11(42) (2024): science and perspectives. DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-11\(42\)-375-382](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-11(42)-375-382)

Статті у фахових виданнях України:

2. Усиченко О.Ю., Харін П.Л. Огляд використання геосинтетичних матеріалів Tensar в транспортному будівництві. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник.* 93 випуск. 2015. С. 97-105. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/93/097-105.pdf

3. Усиченко О.Ю., Харін П.Л. Використання армоґрунтових конструкцій Тенсар на слабких перезволожених ґрунтах. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник.* 95 випуск. 2016. С. 97-103. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/95/096-103.pdf

4. Варивода О.М., Харін П.Л. Механізм посилення насипів на слабких основах. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури збірник наукових праць*, 2018. Випуск № 71, С. 161-169. https://drive.google.com/file/d/1DLnGV1YiL-1RvZcogF25OVF0c5_wdLMn/view

5. Гуртіна Л.Г., Хлапук М.М., Шумінський В.Д., Харін П.Л. Ефективність роботи споруд з ґрунтових матеріалів, підсилених георешітками, з врахуванням сейсмічних впливів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування.* Випуск 2(86). 2019 р. С. 28–44 http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnuvgrp_tekhn_2019_2_5

6. Усиченко О.Ю., Смірнова Н.В., Кушнірова О.М., Харін П.Л. Обґрунтування моделі розрахунку незв'язних шарів дорожньої конструкції, що стабілізовані

геогра́ткою. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник*. Вип. 108. 2020. С. 84–95. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-284-291

http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/108/84.pdf

7. Усиченко О.Ю., Харін П.Л., Зарічний А.О. Експериментальні дослідження конструкцій дорожніх одягів посилених жорсткими багатовісноорієнтованими полімерними георешітками. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. 2024. Випуск 115. Частина 1. С. 284 – 291. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-284-291

8. Харін П.Л., Плитус Р. М. Метод розрахунку нежорсткого дорожнього одягу посиленого георешітками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. 2025. Випуск 115. Частина 1. С. 100-108. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2025-117.1-100-108>

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. L. Gurtina, I. Mazur, V. Sedin, K. Bikus, V. Kovba, Y. Slyusarenko, V. Tytarenko, N. Kosheleva, P. Kharin, R. Plytus, I. Kaliukh Case study. Experimental and theoretical analysis of reinforcement of weak soils with geogrids at the foundation on the basis of field studies of a road embankment bypassing the city of Reni, Ukraine. *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet*. 2023. С. 1254-1260. DOI: 10.1201/9781003386889-159

Свідоцтва та патенти:

10. Патент України на корисну модель, реєстраційний номер заявки u 2024 02591 Дамба з ґрунтових матеріалів. Шуминський В.Д., Домбровський Я.І., Шаповал В.Г., Харін П.Л. Дата реєстрації 26 листопада 2024 р.

11. Патент України на корисну модель, реєстраційний номер заявки u 2025 00306. Земляна дамба на перезволожених ґрунтах. Шуминський В.Д., Домбровський Я.І., Шаповал В.Г., Харін П.Л. Дата реєстрації 24 січня 2025 р.

ABSTRACT

Kharin P.L. Improvement of the method for calculating non-rigid road pavement structures with polymer rigid multi-axis oriented geogrids – As a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.22.11 “Motorways and Airfields.” (192 – Construction and Civil Engineering). – National Transport University, Kyiv, 2025.

The dissertation investigates an important scientific and technical problem of improving the method of calculating non-rigid road pavement structures, taking into account reinforcement with rigid multi-axis oriented polymer geogrids. The application of the proposed approach contributes to the more efficient use of geosynthetic materials in transport construction, which ensures the optimization of design solutions, a reduction in material consumption and energy costs for road construction and repair, as well as an increase in their durability and operational reliability.

The scientific novelty of the work is based on a comprehensive experimental study of the behavior of non-rigid road pavements reinforced with polymer geogrids under static and short-term loads. Field studies have established qualitative and quantitative patterns of interaction between reinforcement elements, the crushed stone layer, and the soil base. In particular, the experiments revealed that geogrids contribute to a significant increase in the load distribution area on the base and form a composite reinforcement layer with increased bending stiffness, which prevents local deformations and soil heaving.

The dependence of the reinforcement efficiency on the ratio of the deformation characteristics of pavement and subgrade materials (coefficient E_{rp}/E_{do}) and the relative depth of geogrid embedding (h_{do}/D) was established. The influence of different types of geogrids on the stress-strain state of structures was analyzed, which made it possible to estimate changes in the values of active shear stresses and the equivalent elastic modulus.

Based on the correlation-regression analysis, an empirical mathematical model was obtained to determine the gain factor, which takes into account a set of structural parameters

and operating conditions. The developed engineering calculation methodology makes it possible to justify the optimal thicknesses and parameters of pavements reinforced with geogrids, taking into account traffic intensity, vehicle axle load, service life, and climatic conditions.

The practical significance of the work is confirmed by the implementation of the developed methods and technological solutions in the construction practice of a number of transport infrastructure organizations, as well as the use of research materials in the educational process of the National Transport University.

The obtained results contribute to increasing the reliability and durability of road pavements, reducing operating costs and material consumption of building structures, which is a significant contribution to the development of modern transport construction using innovative geosynthetic materials.

Keywords: highway, crushed stone layer, geogrid, non-rigid road surface, field studies, static stamp tests, stress-strain state.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПОСИЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ ГЕОСИНТЕТИЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ	17
1.1 Загальні відомості щодо застосування геосинтетичних матеріалів в транспортному будівництві	17
1.2 Напрями використання геосинтетичних матеріалів у дорожньому будівництві	22
1.3 Механічно стабілізовані шари конструкцій дорожнього одягу	24
1.4 Стан питання щодо розрахунку дорожніх конструкцій і основ, посилених геосинтетичними матеріалами.....	33
Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОНСТРУКЦІЙ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ ПРИ ДІЇ СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ...	48
2.1 Обґрунтування підходів до експериментальних досліджень	48
2.2 Мета і завдання експериментальних досліджень	54
2.3 Планування експерименту	57
2.3.1 Вибір значимих чинників та інтервалів варіювання	57
2.3.2 Матриця планування.....	59
2.4 Обладнання, методика і техніка проведення експерименту.....	62
2.5 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз	70
2.5.1 Визначення деформативних характеристик посилених і традиційних конструкцій дорожнього одягу етап №1	70
2.5.2 Виявлення факторів, що супроводжують посилення конструкцій дорожніх одягів етап № 2.....	96
Висновки до розділу 2	102

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПОСИЛЕНОГО ГЕОГРАТКАМИ БАГАТОВІСНООРІЄНТОВАНИМИ.....	104
3.1 Обґрунтування розрахункової схеми та математичної моделі	104
3.2 Методичні принципи визначення коефіцієнта посилення та отримання аналітичної залежності для обчислення еквівалентного модуля пружності	112
Висновки до розділу 3	127
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА КОНСТРУЮВАННЯ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ ПОСИЛЕНИХ ГЕОГРАТКАМИ.....	129
4.1 Інженерна методика розрахунку нежорстких дорожніх одягів	129
4.2 Рекомендації щодо конструювання нежорстких дорожніх одягів	135
4.3 Основні технологічні операції з влаштування конструкції дорожніх одягів, посилених геотратками.....	136
4.4 Економічна ефективність застосування геотраток у конструкціях дорожнього одягу	143
Висновки до розділу 4	148
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	149
ДОДАТОК А ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПОСИЛЕНОЇ ГЕОГРАТКОЮ.....	167
ДОДАТОК Б РОЗРАХУНОК РЕСУРСНИХ КОШТОРИСНИХ НОРМ.....	171
ДОДАТОК В СТАНДАРТИ (СОУ), ТЕХНІЧНІ УМОВИ (ТУ), РОЗРОБЛЕНІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕОГРАТОК	180
ДОДАТОК Г ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБОК	186
ДОДАТОК Д СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	191
ДОДАТОК Е СВІДОЦТВО ПРО ВІДПОВІДНІСТЬ СИСТЕМ ВИМІРЮВАНЬ ВИМОГАМ ДСТУ ISO 10012:2005.....	194

ВСТУП

Актуальність роботи.

Підтвердженням актуальності досліджень слугує аналіз передчасних руйнувань дорожніх одягів автомобільних доріг. Найбільших ушкоджень зазнають ділянки з основами із незв'язних та слабозв'язних матеріалів, які в процесі експлуатації втрачають здатність ефективно розподіляти навантаження від коліс транспортних засобів. Накопичення залишкових деформацій, формування колійності, поява локальних просідань призводять до суттєвого зниження рівності та довговічності покриття.

Дорожня конструкція є складною інженерною системою, працездатність якої визначається не лише міцністю та зносостійкістю шарів покриття, але й стабільністю та несною здатністю шарів основи дорожнього одягу. Такі шари з інертних матеріалів забезпечують загальну міцність дорожньої конструкції та слугують для перерозподілу навантажень від транспортних засобів та зниження тисків до значень, що не перевищують межу міцності ґрунту основи дорожнього одягу. Разом з тим міцнісні характеристики таких матеріалів можуть значно знижуватись при зміні волого-теплогового режиму, особливо в післязимовий період. Дія зовнішніх навантажень, власної ваги шарів дорожнього одягу та втрата міцності при перезволоженні призводить до інтенсивного накопичення пластичних деформацій. Це є однією з основних причин скорочення терміну служби дорожніх конструкцій по відношенню до проєктного.

Одним із найбільш перспективних напрямів підвищення довговічності основ із інертних матеріалів є їх посилення жорсткими багатовісноорієнтованими полімерними геогратками. Таке посилення сприяє стабілізації щибеневого шару, обмеженню деформацій, перерозподілу напружень у ґрунтовій основі та зростанню еквівалентного модуля пружності дорожньої конструкції в цілому. Для достовірної оцінки напружено-деформованого стану та прогнозування довговічності дорожніх

одягів у реальних експлуатаційних умовах важливим питанням залишається урахування ефекту посилення основ дорожніх одягів геосинтетичними матеріалами.

Отже, удосконалення методу розрахунку конструкцій нежорсткого дорожнього одягу із геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими є актуальним науково-практичним завданням, вирішення якого дозволить підвищити надійність дорожніх конструкцій як елементів транспортної інфраструктури країни.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні дослідження теоретичного і прикладного характеру виконані згідно з тематикою науково-дослідних робіт, що виконувались кафедрою транспортного будівництва та управління майном Національного транспортного університету:

- «Розроблення сучасних методів проектування, будівництва та експлуатації дорожніх конструкцій, транспортних споруд та інженерних мереж земляного полотна» № державної реєстрації 0114U006496, 2017 р.;
- «Удосконалення системи управління станом автомобільних доріг та методів їх оцінки», № державної реєстрації 0116U002491, 2018- 2019 рр.

Мета і завдання дослідження. Метою досліджень є удосконалення методу розрахунку конструкцій нежорсткого дорожнього одягу із незв'язними або слабозв'язними шарами які стабілізовані геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими, шляхом врахування коефіцієнта посилення, що визначений на основі фізичного моделювання.

Для досягнення мети дисертаційного дослідження були поставлені такі завдання:

- проаналізувати результати попередніх досліджень, присвячених застосуванню жорстких багатовісноорієнтованих геограток у конструкціях нежорстких дорожніх одягів, узагальнити наукові підходи до опису їх взаємодії з інертними матеріалами шарів основи дорожнього одягу та виявити чинники, що визначають ефективність застосування геосинтетичних матеріалів у якості елементів посилення та стабілізації;

- дослідити експериментально механізм стабілізації дорожніх конструкцій, встановити вплив жорстких багатовісноорієнтованих геораток на деформаційні характеристики, визначити зміну еквівалентного модуля пружності та несної здатності ґрунту залежно від типу георатки, різновиду підстильного ґрунту та глибини її закладання, оцінити ефективність розподілу напружень у ґрунтовій основі;
- розробити на основі результатів фізичного моделювання математичну модель стабілізації дорожньої конструкції з урахуванням впливу жорстких багатовісноорієнтованих геораток на напружено-деформований стан основи; визначити за допомогою кореляційно-регресійного аналізу коефіцієнт посилення, установити аналітичну залежність для розрахунку еквівалентного модуля пружності та сформулювати критерії міцності дорожніх конструкцій;
- запропонувати удосконалену методику розрахунку дорожніх одягів із урахуванням коефіцієнта посилення, обґрунтувати її застосування в новому будівництві та при підсиленні існуючих конструкцій, оцінити економічну доцільність впровадження розробленої методики на основі порівняння з традиційними проєктними рішеннями.

Об’єкт дослідження – процеси стабілізації шарів нежорстких дорожніх одягів автомобільних доріг за рахунок ефекту посилення, що забезпечується застосуванням жорстких багатовісноорієнтованих геораток.

Предмет дослідження – параметри, що визначають ефект стабілізації незв’язних шарів конструкцій нежорстких дорожніх одягів із георатками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими.

Методи дослідження: натурні експериментальні дослідження, планування експерименту, математично-статистичний метод, математичне моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше проведено комплекс натурних експериментальних досліджень поведінки нежорстких дорожніх одягів, посиленних георатками полімерними

жорсткими багатовісноорієнтованими, з метою встановлення впливу стабілізуючих елементів на напружено-деформований стан дорожньої конструкції;

- вперше отримано регресійні залежності для визначення коефіцієнта посилення незв’язних шарів дорожнього одягу, стабілізованих георатками, на основі результатів експериментальних випробувань;

- встановлено закономірності впливу елементів посилення на несну здатність дорожніх конструкцій залежно від міцнісних характеристик ґрунтів основи та товщини щебеневого шару;

- удосконалено розрахункову схему конструкцій дорожнього одягу, стабілізованих георатками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими, шляхом урахування специфіки роботи елементів посилення;

- розроблено метод розрахунку конструкцій нежорстких дорожніх одягів за критерієм допустимого пружного прогину на основі математичної моделі, що враховує ефект посилення геосинтетичними матеріалами.

Практичне значення отриманих результатів: полягає в тому, що на основі розробленого методу запропоновано методику розрахунку незв’язних шарів посилення георатками, яка дозволяє оптимізувати їхню товщину, підвищити несну здатність основи, зменшити витрати на будівництво та ремонтно-відновлювальні роботи, а також забезпечити довговічність і надійність автомобільних доріг. Застосування запропонованої методики у проєктній практиці сприятиме підвищенню якості інженерних рішень, можливості використання сучасних матеріалів і технологій, адаптації до різних ґрунтово-кліматичних умов.

Результати досліджень були впроваджені при розробленні нормативних документів для стандартизації використання геораток у дорожньому будівництві: СОУ 42.1-21483639 – 004:2017 Георешітки полімерні жорсткі тривісноорієнтовані «TENSAR TX» Методи проєктування дорожніх одягів та штучних основ з георешітками; ТУ У В.2.7-17.5-21483639-003:2016 Георешітки полімерні жорсткі тривісноорієнтовані «TENSAR TX» Технічні умови; ТУ У 17.5-21483639-009:2023

Георешітки (геогратки) полімерні жорсткі композитні багатовісноорієнтовані гексагональні. Технічні умови.

Результати дисертаційної роботи були використані в навчально-методичних комплексах дисциплін: «Технологія будівництва земляного полотна автомобільних доріг» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти та «Механіка земляного полотна» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітньо-професійні програми «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів», а також як теоретико-науковий базис під час підготовки кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів зі спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітньо-професійні програми «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

Впровадження в практику результатів досліджень було підтверджено відповідними довідками із таких організацій: Служба відновлення та розвитку інфраструктури в Одеській області, ТОВ «НВФ «Мостопроект», ДП Західний реабілітаційно-спортивний центр національного комітету спорту інвалідів України, ТОВ «НТЦ» «Дорінжнаука».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні та експериментальні результати досліджень, які виносяться на захист, отримано автором самостійно. Внесок автора в опублікованих зі співавторами наукових працях: [8, 82, 83] – виконаний науковий аналіз сучасного стану застосування геосинтетичних матеріалів у транспортному будівництві, в межах якого систематизовано різновиди геосинтетичних матеріалів, визначено їх основні фізико-механічні характеристики, особливості технології виробництва та обґрунтовано сфери раціонального використання. Здійснено критичний огляд і порівняльний аналіз наявних підходів розрахунку будівельних конструкцій із використанням геосинтетичних матеріалів, визначено їх переваги, обмеження та можливості подальшого вдосконалення; [84] – досліджено механізм посилення основ дорожніх одягів геогратками; [85] – досліджено вплив геогратки, влаштованої в основі незв'язного шару конструкції дорожнього одягу, розраховано

значення коефіцієнту посилення; [87] – запропонована математична модель посиленої конструкції нежорсткого дорожнього одягу із геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими.

Обґрунтованість та достовірність отриманих в роботі результатів: підтверджується застосуванням фізично обґрунтованих (на основі експериментальних даних) математичних моделей, які перевірені на адекватність; достатнім обсягом експериментальних даних, що отримані з використанням сучасного лабораторного обладнання; апробацією результатів роботи під час виробничого впровадження.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені на: всеукраїнській науково – практичній конференції «Застосування новітніх технологій та матеріалів у транспортній інфраструктурі України», місце проведення ДП «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П.Шульгіна» 2015 року, м. Київ; міжнародній науково-технічній конференції «Інтертранспорт – гідротехнічне і транспортне будівництво», 2015 – 2019 рр., м. Одеса; науково практичній конференції «Проектування та будівництво об'єктів транспортної інфраструктури із застосуванням нових технологій», місце проведення ДП «Укрдїпродор» 2015 р., м. Київ; міжнародному форумі з будівництва, експлуатації та проектування автомобільних доріг і мостів «Автодорекспо» 2016 – 2021 рр., м. Київ; щорічній науково практична конференції «Новітні технології в автодорожній галузі», місце проведення «Автомагістраль – Південь», 2017 – 2021 рр., м. Одеса; конференції Львівської політехніки «Архітектура, будівництво, транспорт», 2017 р., м. Львів; науково-практичному семінарі «Актуальні питання проектування автомобільних доріг загального користування», 2019 р., м. Запоріжжя; міжнародній науково-технічній конференції «Гідротехнічне і транспортне будівництво», 2023 р., м. Одеса; II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Сталий розвиток інфраструктури авіаційного транспорту: проблеми утримання та відновлення», 2025 р., м. Київ.

Публікації. За темою дисертаційного дослідження опубліковано 9 наукових праць, у тому числі: 7 праць у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України, 1 стаття у зарубіжних періодичних наукових виданнях, 1 стаття додатково відображає наукові результати дисертації у зарубіжному виданні в рамках матеріалів конференції, що входить до наукометричної бази WoS.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел із 130 найменувань та п'ять додатків. Загальний обсяг дисертації становить 194 сторінки. Основний текст викладений на 131 сторінці. Текст ілюструється 45 рисунками і містить 17 таблиць.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ПОСИЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ ГЕОСИНТЕТИЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

1.1 Загальні відомості щодо застосування геосинтетичних матеріалів в транспортному будівництві

Конструкція дорожнього одягу – це багат шарова система, яка забезпечує сприйняття та передачу навантаження від транспорту до ґрунтової основи дороги та забезпечує необхідну міцність, рівність і довговічність дорожнього покриття.

Надійність і довговічність дорожніх одягів багато в чому залежать від правильності розроблених проєктних рішень і якості виконаних будівельних робіт. На стадії проєктування основними вхідними параметрами, що використовуються в розрахунках, є міцнісні (c , ϕ) і деформаційні (E) характеристики ґрунтів, а також інтенсивність і характер прикладених поверхневих навантажень. Якщо характеристики ґрунтів не задовольняють умовам виконаних розрахунків – необхідно або замінити їх на інші, з вищими значеннями, або штучно посилити, тобто підвищити фізико-механічні властивості.

У сучасному будівництві існує велика кількість геосинтетичних матеріалів, їх комбінацій та напрямів їхнього застосування. Такі матеріали, технології та методи армування ґрунтів почали застосовуватися у вузькоспеціалізованих галузях будівництва, зокрема у конструкціях дорожніх одягів автомобільних доріг. Для проєктування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг з використанням армувальних геосинтетичних матеріалів в основі дорожніх одягів необхідні надійні методи розрахунку. За понад тридцять років використання технологій армування ґрунтів геосинтетикою у нашій країні було запропоновано й апробовано різні підходи до розрахунку конструкцій дорожніх одягів автомобільних доріг. Найбільш ефективні методики рекомендувалися до впровадження у нормативні документи. У дисертаційній роботі наведено аналіз методів розрахунку армованих дорожніх одягів, що знайшли відображення у регламентуючих та методичних галузевих

документах та стандартах. Отримані результати дослідження засвідчують відсутність раціонально обґрунтованої методики розрахунку конструкцій дорожнього одягу із застосуванням геосинтетичних матеріалів. Існуючі стандарти та технічні документи, у частині методів розрахунку, ґрунтуються на застарілих припущеннях більш ніж двадцятирічної давності.

Один із перших в Україні впровадженням геосинтетичних матеріалів почав займатись Гамеляк І. П. У наукових працях [12,15,16,17] обґрунтовано доцільність і механізми застосування геосинтетичних матеріалів у сучасному транспортному будівництві, зокрема при проєктуванні та влаштуванні конструкцій дорожнього одягу. Дослідник підкреслює, що використання геосинтетики дозволяє значно підвищити техніко-економічні показники конструкцій та забезпечити ефективну взаємодію між шарами дорожнього одягу і ґрунтовою основою.

Геосинтетичні матеріали виконують комплексні функції в системі дорожнього одягу: армування, розділення шарів, фільтрація, дренаж, захист та стабілізації. Їхнє впровадження доцільне як при будівництві нових доріг, так і при реконструкції чи ремонті існуючих конструкцій.

Основною метою використання геосинтетики є покращення деформаційних характеристик конструктивних шарів, зниження залишкових деформацій, попередження змішування матеріалів різної зернистості та забезпечення стабільності при навантаженнях від транспорту.

Найбільший ефект застосування геосинтетичних матеріалів спостерігається на слабких або неоднорідних ґрунтах, де геосинтетика дозволяє зменшити товщину дорожнього одягу без втрати несної здатності. Встановлено, що армування незв'язних шарів геосітками сприяє утворенню армованої зони з підвищеним опором до зсуву, що знижує напруження в основі та запобігає деформаціям.

В цих працях акцент робиться на необхідність врахування реальних механічних властивостей геосинтетики у розрахункових схемах, а також на потребі стандартизації методів їх проєктування та випробувань. Також наведено приклади успішного

впровадження геосинтетичних матеріалів в Україні, зокрема в умовах складних ґрунтово-гідрологічних умов.

Використання геосинтетичних матеріалів у дорожньому будівництві, згідно з науковими підходами І.П. Гамеляка, є ефективним інженерним рішенням для підвищення довговічності, несної здатності та економічної доцільності конструкцій дорожнього одягу, особливо за умов слабкої основи або обмежених технічних ресурсів.

Посиленням будівельних конструкцій у тому числі і геосинтетичними матеріалами відстежується у працях Кузло М. Т. [53,54,55]. Автор розглядає фундаментальні питання забезпечення стійкості та довговічності ґрунтових споруд шляхом впровадження сучасних технологій, та досліджує можливості використання геосинтетичних матеріалів, як ефективного засобу покращення механічних характеристик ґрунтів у транспортному та гідротехнічному будівництві.

Армування ґрунтових масивів геосинтетичними матеріалами сприяє значному підвищенню несної здатності та зсувної стійкості укосів, насипів, дамб, а також інших конструкцій, що працюють в умовах складних інженерно-геологічних умовах.

Автор підкреслює, що взаємодія між армувальним елементом і ґрунтом є ключовим фактором ефективності посилення. Для досягнення позитивного результату необхідно забезпечити оптимальне зчеплення між геосинтетиком і частинками ґрунту, що реалізується через належну структуру армувального матеріалу (наприклад, відкриту коміркову георешітку або перфоровану геомембрану).

Кузло М.Т. розробив інженерні методики оцінки стійкості та деформативності посилених ґрунтових конструкцій, які враховують не лише фізико-механічні властивості армувального шару, а й умови зволоження, сезонну фільтрацію, ерозійні процеси, навантаження від транспорту тощо.

Окрему увагу приділено дослідженню впливу армування на фільтраційні властивості основ та довговічність геосинтетичних матеріалів в умовах агресивного

середовища, що є актуальним при зведенні споруд на підтоплюваних та просідних ґрунтах.

У своїх роботах автор також пропонує конструктивно-технологічні рішення, які включають оптимальну компоновку армувальних елементів у тілі насипу, техніку укладання, методи ущільнення та вимоги до контролю якості під час будівництва.

Підхід Кузло М.Т. до посилення ґрунтових споруд ґрунтується на системному врахуванні інженерно-геологічних, конструктивних та технологічних чинників. Його розробки забезпечують підвищення надійності та стійкості споруд, мінімізацію деформацій і підвищення загальної безпеки транспортної інфраструктури в складних природних умовах.

Значний внесок у цю область досліджень зроблено і іншими науковцями: Радовським Б.С., Мозговим В.В., Гамеляком І.П., Павлюком Д. О., Ряпухіним В.М., Батраковою А.Г., Савенком В.Я, Усиченко О.Ю., Головком С.К., Павленко Н.В., Дубиком О.М, Шумінським В.Д., Лісом Е., Маньян Ж., Коллінзом С., Гіроудом Д., Джарретом П. [13,19,21,39,41,54,64,65,70,71,76,90,107,105,110,118,127] та іншими.

Найбільш ефективні та апробовані методи знаходять відображення у нормативно-технічних документах з проєктування автомобільних доріг. У сучасних нормативних документах наводяться розрахункові схеми конструкцій дорожнього одягу із геосинтетичними матеріалами які поступово вдосконалюються.

У 1986 р. з'явилися Відомчі будівельні норми «Вказівки щодо підвищення несної здатності земляного полотна та дорожніх одягів із застосуванням синтетичних матеріалів», де був запроваджений термін «коефіцієнт підсилення», що сприяв збільшенню загального модуля пружності дорожнього одягу з про шарком із синтетичного матеріалу. Коефіцієнт підбирається за табличними даними залежно від співвідношення середнього модуля пружності вищерозташованих шарів ґрунту до модуля пружності підстильного шару та співвідношення глибини закладання ґрунту до діаметра відбитка колеса.

Для вивчення цієї методики аналізувалися табличні дані з коефіцієнтом підсилення. Перевірялися різні варіанти армованих конструкцій дорожнього одягу з різними значеннями модуля пружності та потужності шарів.

У результатах порівняння варіацій немає явних закономірностей зміни коефіцієнта підсилення від модуля пружності ґрунтів основи та потужності верхніх шарів дорожнього одягу. Отже, така методика не може бути достовірною та слугувати гарантією у розрахунках армування дорожніх одягів.

У 2008 році виходить відомчий дорожній методичний документ ВБН В.2.3-218-544:2008 «Споруди транспорту. Матеріали геосинтетичні в дорожньому будівництві», який в 2015 році замінили на галузеві будівельні норми ГБН В.2.3-37641918-544:2014 «Автомобільні дороги. Застосування геосинтетичних матеріалів у дорожніх конструкціях. Основні вимоги». Ці галузеві будівельні норми встановлюють вимоги проектування та контролю якості при будівництві нових, ремонті та реконструкції існуючих автомобільних доріг загального користування щодо застосування геосинтетичних матеріалів в дорожньому будівництві.

Геосинтетичні матеріали поділяються на водопроникні і водонепроникні. В свою чергу, водопроникні геосинтетичні матеріали поділяються на:

- геотекстилі (ткані, неткані, плетені);
- геосинтетичні матеріали (геосітки, геогратки, геомати).

Водонепроникні геосинтетичні матеріали поділяються на геосинтетичні глиномати і геомембрани.

Для виготовлення геосинтетиків використовуються різні полімери: поліамід (ПА), поліестер (ПЕТ) (поліефір (ПЕФ)), поліпропілен (ПП), поліетилен (ПЕ) та інші. Суміші поліпропілену і поліетилену позначаються як поліолефіни. Для додання спеціальних властивостей можуть вводиться добавки. Для покриття застосовуються полівінілхлорид (ПВХ), поліетилен, бітум. У табл. 1.1. наведені властивості волокон, що застосовуються для виробництва геосинтетичних матеріалів.

Таблиця 1.1 – Волокна, що застосовуються у виробництві геосинтетичних матеріалів

Показник	Волокна на основі			
	Поліестра (поліефіра)	Поліпропілена	Поліаміда	Поліетилена
Щільність, т/м ³	1,36 – 1,38	0,90 – 0,92	1,14	0,95 – 0,96
Водопоглинання %	0,2 – 0,5	0	3,5 – 4,5	0
Розривна міцність волокна, МПа	35 – 90	22 – 55	45 – 70	32 – 65
Розривне подовження волокна, %	15 – 40	15 – 30	30 – 80	15 – 30
Стійкість до: слабких кислот лугів мікроорганізмів світла	Добре Погано Дуже добре Добре	Дуже добре Дуже добре Дуже добре Погано	Добре Добре Добре Погано	Дуже добре Добре Дуже добре Середньо

1.2 Напрями використання геосинтетичних матеріалів у дорожньому будівництві

Ефект від застосування геосинтетичних матеріалів при влаштуванні дорожніх одягів, спорудженні земляного полотна полягає в тому, що в конструкцію додається геосинтетичний матеріал, який володіє додатковими характеристиками – такими як міцність, водонепроникність, тощо. Геосинтетичні матеріали при застосуванні в конструкціях дорожнього одягу можуть виконувати функції – посилення, армування, розділення, дренажування.

Оскільки геосинтетики, що застосовуються у більшості випадків, крім геосіток, георіток та інших матеріалів, володіють усіма трьома зазначеними функціями, вони можуть бути введені в конструкцію в якості арматури, дрени або фільтра. Залежно від призначення конструкції, особливостей конструктивного рішення та виду матеріалу

синтетичний прошарок може виконувати або одну з цих трьох функцій, або всі функції одночасно і рівною мірою.

У національній нормативно-технічній базі України одним із ключових документів, що регламентує умови використання геосинтетичних матеріалів у транспортному будівництві, є ГБН В.2.3-37641918-544:2014. Цей документ визначає базові технічні, конструктивні та експлуатаційні вимоги щодо впровадження геосинтетичних матеріалів у конструкції дорожнього одягу з метою підвищення їх ефективності, довговічності та надійності.

Документ класифікує геосинтетичні матеріали відповідно до їх функціонального призначення: армування, розділення, дренажування, фільтрація, захист та ізоляція. У документі враховано основні фізико-механічні характеристики матеріалів, такі як міцність на розрив, деформативність, стійкість до ультрафіолетового випромінювання, хімічна та біологічна стійкість, що визначають їх довговічність в умовах експлуатації.

Норматив регламентує доцільність застосування геосинтетичних матеріалів у конструктивних шарах дорожнього одягу, зокрема в основах із недостатньою несучою здатністю, при будівництві на слабких, насипних, просадкових та набухаючих ґрунтах, а також для стабілізації узбіч, укосів і водовідвідних систем. Окрему увагу приділено питанням монтажу, зокрема підготовці основи, погодним умовам, способам укладання та зчеплення з навколишніми матеріалами.

Таким чином, застосування положень зазначеного нормативного документа сприяє підвищенню якості та ефективності реалізації дорожньо-будівельних проєктів із використанням геосинтетичних матеріалів.

Існуючі методики передбачають розподіл напружень з урахуванням відповідного коефіцієнта для армуючого прошарку в залежності від геоматеріалу з текстилю з низьким контактним напруженням із ґрунтом. Відповідно, використання цієї методики для розрахунків армованих дорожніх одягів із застосуванням інтегральних геораток є недоцільним.

В процесі розвитку світової науки й техніки спостерігається активне впровадження інноваційних геосинтетичних матеріалів у галузі транспортного будівництва. Зокрема, інтегральні полімерні геогратки становлять окремий клас армувальних елементів, які суттєво відрізняються від геотекстилю за структурою, механізмом взаємодії з ґрунтовим середовищем та технічними характеристиками. Їх поява зумовила необхідність перегляду традиційних підходів до проектування дорожніх конструкцій із використанням геосинтетичних матеріалів.

Перевага геограток полягає у тому, що разом із щебеним шаром за рахунок ефекту блокування у комірках утворюється посилений шар, який збільшує кут розподілу вертикальних напружень.

Геогратка полімерна жорстка багатовісноорієнтована – це гратчаста структура, отвори якої мають форму рівносторонніх трикутників, розташованих навколо центру (вузла). Така форма надає виробу цілий ряд покращених фізико-механічних властивостей. Її характеристики значно перевершують властивості інших геограток попереднього покоління. Поєднує ефективно заклинювання частинок інертного матеріалу з рівномірним розподілом зусиль у різних напрямках.

При поєднанні геогратки з інертним матеріалом, його частинки проникають у отвори і відбувається їх заклинювання. Це явище називають ефектом механічної стабілізації, а сам посилений шар – механічно стабілізованим шаром.

1.3 Механічно стабілізовані шари конструкцій дорожнього одягу

Конструкція дорожнього одягу є важливим елементом автомобільної дороги. Вона сприймає через верхні шари покриття навантаження від рухомого складу і розподіляє їх на нижні незв'язні шари ґрунту. В результаті циклічного прикладання динамічних навантажень, природно-кліматичних факторів, що впливають на температурно-вологісний режим, в нижніх незв'язних шарах виникають і накопичуються деформації, викликані не тільки вертикальними, але і горизонтальними напруженнями. Шари з незв'язних матеріалів, не здатні сприймати

розтягувальні зусилля та характеризуються обмеженим опором зсуву зернистих частинок відносно одна одної. Ці процеси призводять до різних деформацій конструкції дорожнього одягу, що згодом викликають руйнування верхніх шарів покриття

Недовговічність несних шарів з ґрунтів і кам'яних матеріалів традиційно є однією з найбільш гострих проблем при будівництві. Більш низький термін служби таких основ, в порівнянні з розрахунковим, обумовлений наявністю цілого ряду причин, до числа яких, разом з технологічними, слід віднести і недосконалість розрахункових схем і методів, прийнятих в практиці конструювання.

В першу чергу це відноситься до конструкцій, в яких застосовуються нові матеріали. Адже, як правило, впровадження сучасних конструкцій відбувається за відсутності нормативних документів та стандартів.

Причини передчасного руйнування дорожнього одягу автомобільних доріг є недостатня міцність і малий термін служби основ, що споруджуються з незв'язних матеріалів (щебеню, щебенево-піщаних сумішей, гравію тощо). Досить велика товщина шару із незв'язних матеріалів в основі призводить до накопичення залишкових деформацій і як наслідок – до утворення колійності.

Одним з найбільш перспективних способів підвищення міцності таких основ є застосування геораток.

Георатка полімерна жорстка двовісноорієнтована – має жорстку монолітну структуру з рівномірними вузлами і ребрами та квадратний переріз з гострою гранню і сприймають розтягуючі зусиллями в двох напрямках.

Георатка полімерна жорстка багатовісноорієнтована – це високоміцна полімерна структура з фіксованими чарунками, які утворені шляхом переформування листів поліпропілену з додаванням сажі (не менше 2 % за масою), з наступним витягуванням у декількох напрямках, що забезпечує багатовісну орієнтацію молекулярних зв'язків (рис. 1.1-1.3).

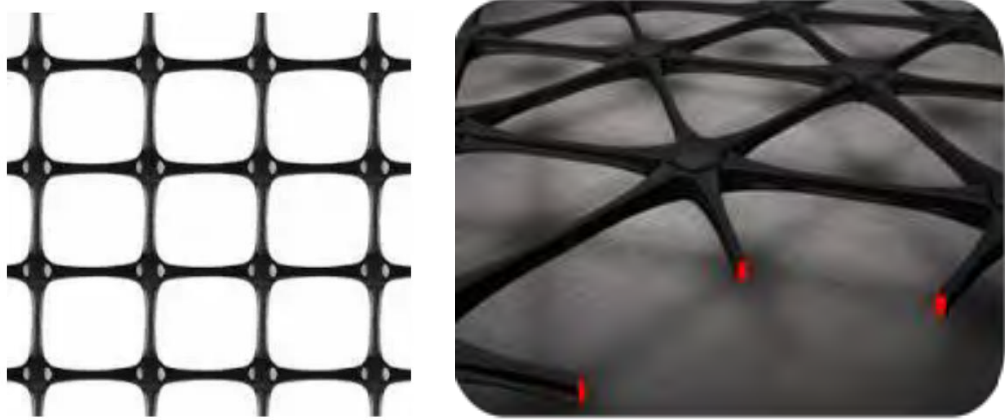


Рисунок 1.1 – Загальний вигляд двовісної та багатовісноорієнтованої геогратки

Шестикутник забезпечує оптимальне співвідношення структурної стійкості та ефективного використання матеріалу, а жорстка (ізометрична) структура рівномірно сприймає розтягуючі зусилля за усіма напрямками на 360° . Застосування такої технології дозволяє отримати економію витрачених затрат на будівництво конструкції дорожнього одягу.

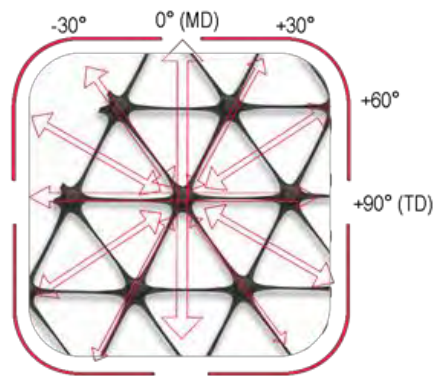


Рисунок 1.2 – Ізометрична структура багатовісноорієнтованої геогратки

Багатовісноорієнтовні геогратки мають відміну від інших геосинтетичних матеріалів, поєднання в конструкціях дорожніх одягів багатовісноорієнтованих геограток спільно з інертними матеріалами засипки утворюють механічно стабілізований шар.

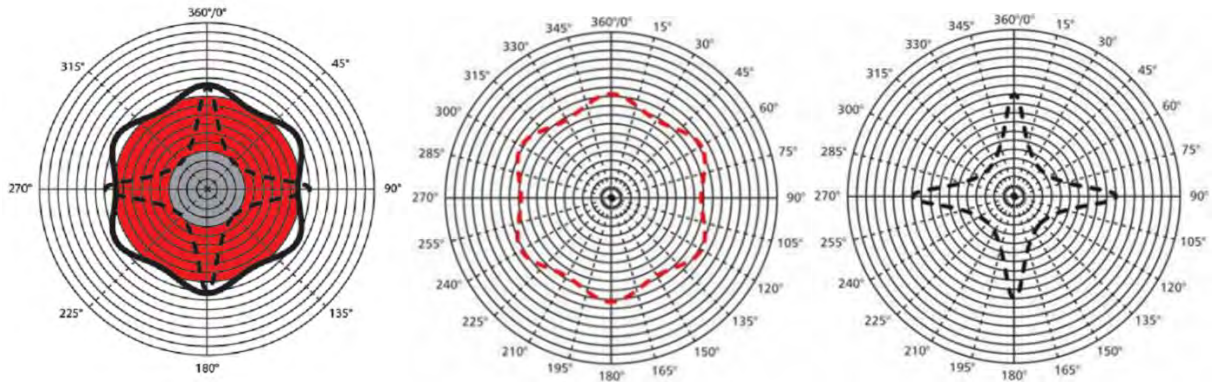


Рисунок 1.3 – Радіальна діаграма відображає залежність коефіцієнтів жорсткості двовісноорієнтованої та багатовісноорієнтованої георатки

На сьогоднішній день з'являються все більші можливості для проведення різних дослідницьких робіт за допомогою комп'ютерного моделювання, в тому числі з дискретними середовищами. Світова компанія Tensar International, виробник тривісноорієнтованих геораток провела численні дослідження і випробування для вивчення механічно стабілізованого шару і визначення коефіцієнтів посилення в різних країнах в транспортних університетах.

Відповідно до європейського нормативного документу ISO 10318- з'явився новий термін – стабілізація, що дає змогу розділити поняття механічної стабілізації незв'язних матеріалів та армування.

Стабілізація – це покращення механічної поведінки незв'язного зернистого матеріалу за рахунок включення одного чи декількох геосинтетичних шарів, так щоб деформація при прикладеному навантаженню зменшилась за рахунок мінімізування переміщення незв'язного зернистого матеріалу (рис. 1.4).

Роботи щодо вивчення механічно стабілізованого шару проводяться і в Україні. Для легкості застосування механічно стабілізованого шару інженерами були розроблені нормативні документи [28,81], що полегшують застосування даної технології.

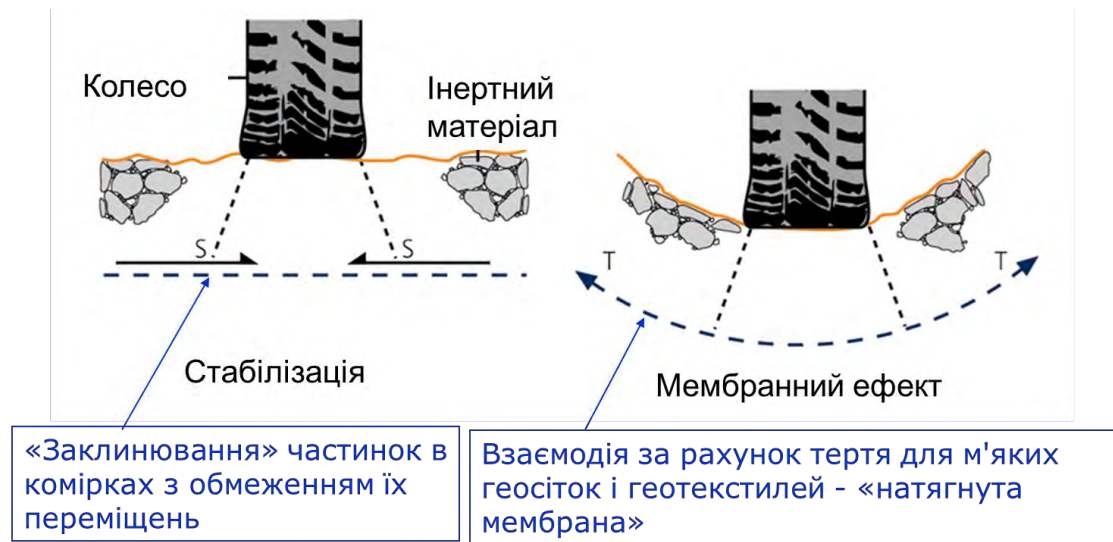


Рисунок 1.4 – Варіанти взаємодії геосинтетичних матеріалів з кам'яним матеріалом

Влаштування механічної стабілізації в незв'язних шарах конструкції дорожнього одягу призводить до підвищення зсувостійкості, зменшення вертикальних деформацій, підвищення модуля пружності, що в свою чергу продовжує термін експлуатації дорожнього одяга та автомобільної дороги в цілому до наступного капітального ремонту.

Ефективність застосування жорстких полімерних багатовісноорієнтованих георіток у конструкціях дорожнього одягу підтверджується результатами численних зарубіжних досліджень. Зокрема, у Лабораторії транспортних досліджень Великобританії (Transport Research Laboratory, TRL) були проведені експериментальні дослідження з оцінки поведінки тривісноорієнтованих георіток Tensar в умовах прикладення навантажень, наближених до експлуатаційних. Отримані результати свідчать про здатність таких матеріалів формувати механічно стабілізовані шари, що сприяють зменшенню залишкових деформацій, підвищенню несної здатності основи та покращенню загальної жорсткості конструкції дорожнього одягу.



Рисунок 1.5 – Дослідження тривісноорієнтованих геораток Тенсар Лабораторії транспортних досліджень (TRL), Великобританія

Серед сучасних концепцій посилення конструкцій дорожнього одягу геосинтетичними матеріалами важливе місце посідає підхід, запропонований Ендрю Лісом [110], який полягає в реалізації принципів механічно стабілізованих шарів. Суть підходу полягає у створенні композитної системи шляхом взаємодії щебеневого шару та георатки, яка забезпечує просторову стабілізацію зернистого матеріалу.

У результаті такої взаємодії формується стабілізований прошарок, що характеризується підвищеною згинальною жорсткістю та здатністю перерозподіляти навантаження на більшу площу ґрунтової основи. Основним механізмом є ефект розклинювання зерен щебеню у вічках георатки, що забезпечує підвищення зсувної жорсткості та стійкості шару до залишкових деформацій.

Ключовими параметрами, що впливають на ефективність механічної стабілізації, визначено: відношення модулів деформації ґрунту основи та модулю пружності шару дорожнього одягу; глибина закладення георатки яка визначає ступінь включення стабілізуючого елемента в роботу конструкції; тип і жорсткість георатки, її багатовісна орієнтація та геометрія чарунок.

Підхід Е. Ліса використовується у проєктуванні за міжнародними рекомендаціями, зокрема у настановах Tensar International, а також у публікаціях та нормативно-методичних документах в США та Великій Британії.

Модель механічної стабілізації, запропонована Лісом, становить важливе наукове та практичне підґрунтя для удосконалення методів проєктування нежорстких конструкцій дорожнього одягу з геооґратками, що особливо актуально за умов інтенсивного транспортного навантаження та обмеженого ресурсу природних матеріалів.

Одним із найбільш авторитетних центрів, що здійснюють дослідження ефективності геосинтетичних матеріалів у транспортному будівництві, є Інженерний дослідний та проєктний центр, що входить до складу Корпусу інженерів армії США. У цій установі були проведені комплексні лабораторні випробування багатовісноорієнтованих полімерних геооґраток Tensar, з метою оцінки їхньої ефективності при посиленні шарів дорожнього одягу.

Дослідження передбачали моделювання навантажень, які виникають у реальних дорожніх умовах, та вивчення впливу стабілізації на розподіл тиску, зменшення залишкових деформацій, куту розширення зони напружень, а також формування стабілізованої структури щебеневого шару. Було виявлено, що використання геооґраток сприяє підвищенню несної здатності конструкції та покращенню її деформаційних характеристик.

Ці результати стали підґрунтям для впровадження технології механічної стабілізації із застосуванням геооґраток у нормативні документи США та які підтверджують ефективність їх використання при влаштуванні основ дорожніх одягів у складних ґрунтово – геологічних умовах.

Одним із ключових прикладів системного підходу до вивчення стабілізації дорожніх конструкцій є дослідження, проведені у Ноттінгемському університеті (Велика Британія), де геооґратки типу Tensar вивчалися як ефективний інженерний елемент підсилення основи нежорсткого дорожнього одягу. Роботи виконувалися у Центрі геотехнічних досліджень факультету інженерії за участі провідних вчених у галузі транспортного та геотехнічного будівництва.



Рисунок 1.6 – Інженерний дослідний та проєктний центр, Корпус інженерів в Міссісіпі, США

Дослідження охоплювали як лабораторні випробування, так і чисельне моделювання, спрямоване на оцінку взаємодії між геограткою та зернистим заповнювачем, визначення жорсткісних характеристик посилених конструкцій, а також впливу геогратки на процес формування залишкових деформацій. Особливу увагу було приділено впливу стабілізації на структуру основи, її напружено-деформований стан та перерозподіл навантажень під дією статичних і динамічних впливів.

Результати підтвердили, що застосування багатовісноорієнтованих геограток сприяє формуванню стабілізованої контактної структури заповнювача, підвищує кут внутрішнього тертя в системі «основа – елемент стабілізації», зменшує вертикальні і поперечні переміщення конструктивних шарів. Отримані залежності дозволили дати кількісну оцінку ефективності армування та розробити рекомендації з проєктування шарів основи дорожніх одягів з урахуванням параметрів армування.

Матеріали досліджень Ноттінгемського університету були використані для формування підходів до механічної стабілізації основ дорожніх конструкцій та включені до низки міжнародних інженерних настанов.



Рисунок 1.7 – Дослідження геограток Тенсар в Ноттінгемському університеті
Великобританія

Відповідно до вимог Європейської технічної організації оцінювання технічної придатності геосинтетичних матеріалів до застосування в транспортному будівництві здійснюється на підставі комплексних випробувань та процедур, визначених Європейськими технічними настановами та стандартами.

У процесі випробувань було досліджено:

1. Механічні характеристики матеріалу, зокрема міцність на розтяг у поздовжньому та поперечному напрямках, модуль пружності, стійкість до повзучості, старіння та вплив агресивного середовища.
2. Експлуатаційну ефективність при стабілізації незв'язних шарів, включно з характеристиками взаємодії геогратки з заповнювачем, здатністю до обмеження горизонтальних переміщень та підвищення несної здатності основи.
3. Довговічність і відповідність експлуатаційним умовам, в тому числі температурна стабільність, збереження функціональних властивостей у різних гідрогеологічних умовах та впродовж розрахункового терміну експлуатації.

На підставі отриманих результатів випробувань було видано Європейське технічне свідоцтво, що підтверджує відповідність геограток Tensar вимогам

Регламенту (ЄС) № 305/2011 щодо придатності для використання у сфері цивільного та транспортного будівництва. Це дозволяє використовувати геогратки Tensar як технічно обґрунтований елемент стабілізації дорожніх конструкцій з метою підвищення їх надійності, довговічності та ефективності в умовах динамічного транспортного навантаження.

Згідно з положеннями [29] геогратки розглядаються як геосинтетичні матеріали, призначені для зміцнення ґрунтової основи, незв'язних шарів дорожнього одягу та підвищення загальної несної здатності дорожньої конструкції.

Основні вимоги до матеріалів: геогратки виготовляються з полімерних матеріалів, що мають стійкість до впливу ультрафіолету, хімічно агресивних середовищ та механічних пошкоджень у процесі укладання.

Застосування тривісноорієнтованих жорстких геограток регламентується для наступних цілей:

- стабілізація основ дорожніх одягів (особливо на слабких ґрунтах);
- зменшення товщини незв'язних шарів без втрати несної здатності;
- підвищення стійкості конструкції до накопичення залишкових деформацій;
- збільшення терміну служби дорожнього одягу.

Застосування геограток у конструкції нежорстких дорожніх одягів дозволяє досягти суттєвого підвищення ефективності та довговічності транспортних споруд, знижуючи при цьому витрати на будівництво та експлуатацію.

1.4 Стан питання щодо розрахунку дорожніх конструкцій і основ, посилених геосинтетичними матеріалами

Для оцінювання працездатності дорожніх конструкцій, ґрунтових основ, посилених геосинтетичними матеріалами, використовують різні підходи, що ґрунтуються на теоретичних та експериментальних дослідженнях, які відрізняються

одне від одного як вихідними передумовами і розрахунковими схемами, так і математичним апаратом, що застосовується.

Можливі такі підходи:

- дискретний – фізико-механічні властивості ґрунту або слабозв'язних шарів дорожнього одягу та геосинтетичного матеріалу розглядають окремо;
- композитний – ґрунт або слабо зв'язні шари дорожнього одягу, армовані геосинтетичним матеріалом, розглядають як композит з узагальненими фізико-механічними характеристиками;
- дискретно-композитний – армований ґрунт або шари дорожніх одягів мають задані властивості, а арматура представляє деякий композит, що має узагальнені характеристики, які враховують властивості арматури і прилеглого до неї шару.

Існуючі методи розрахунку умовно можна розділити на чотири групи залежно від можливих підходів до розрахунку дорожніх конструкцій і ґрунтових основ, армованих геосинтетичними матеріалами (табл. 1.2).

Перша група – інженерні методи, що засновані на дискретному підході. У цьому випадку, складаються спрощені розрахункові схеми, що відповідають граничному стану роботи дорожніх конструкцій. До неї належать методики та розрахунково-теоретична модель:

В основу розрахунку товщини насипного шару конструкції автомобільних доріг на слабких ґрунтах із застосуванням геосинтетичних матеріалів покладено методику, наведену в [98]. На поверхню ґрунтової товщі відсипано шар, до поверхні якого через штамп прикладається деяке навантаження, що моделює навантаження від колеса. У роботі характер і умови роботи дорожньої конструкції визначаються тільки умовами роботи слабого ґрунту в основі насипного шару. У методиці розглянуто два можливих процеси:

- 1) порушення міцності слабого ґрунту внаслідок перевищення опору зсуву від зовнішнього навантаження;

2) розвиток ущільнення слабого ґрунту під впливом стискаючих напружень від зовнішнього навантаження.

Таблиця 1.2 – Методи розрахунку штучних ґрунтових основ, шарів дорожніх одягів, армованих геосинтетичними матеріалами

Інженерні методи	Експериментально аналітичні методи	Аналітичні методи	Чисельні методи
Ntilon Limited (Англ.) Tensar Corporation (США)	Nicolon (Англ.) Delft Soil (Голланд) Джевел, Мюррей	Coun Westergrad Gerard K. Biquet J. Lee K.	Павлюк Д.О. AL-Hussaini M. Jonson L.D. (США) Hermann L.R. Yssin A.L. (США) Naylor D.J. Richards H.

Аналіз картин деформацій конструкцій під час спостережень за моделями дозволив авторам розробити розрахункову схему для кількісної оцінки ролі прошарку. У результаті отримано вираз, який визначає величину додаткового навантаження на штамп. З погляду викладених положень, роль геосинтетичного прошарку зводиться до того, що він ніби знімає частину напружень, що діють на поверхню слабої товщі від зовнішнього навантаження.

До недоліків цієї методики можна віднести те, що вона не враховує опір ґрунту в міжколійній зоні, а також потребує уточнення величини сил тертя прошарку по ґрунту.

Для дорожніх одягів на слабких супіщаних ґрунтах запропоновано розрахунково-теоретичну модель [101], що дає змогу в умовах плоскої задачі враховувати вплив прошарку геосинтетичного матеріалу на деформований стан конструкції. Стиск слабого ґрунту під навантаженням від колеса за рахунок ущільнення не враховується. Щебеневий шар на слабкодеформованій основі розраховують у межах навантаженої

смуги, як плити на пружній вінклерівській основі. Ширина плити приймається рівною ширині накату. Виходячи з нескінченної протяжності смуги накату і насипу, у пропонованій розрахунковій схемі розглянуто плоску задачу. Навантаження в межах смуги накату прийнято рівномірно розподіленим, щебеневий шар характеризується певною розподільною здатністю, піщана основа - коефіцієнтом перекриття та кутом внутрішнього тертя. Геосинтетичний прошарок, що володіє абсолютною гнучкістю, характеризується модулем деформації при подовженні та розривним навантаженням. Оскільки автором не допускається розвиток колії на щебені глибше 30 мм, то кривизна гнучкого прошарку обмежена діапазоном малих кутів. Прийнято, що:

- а) за реальних модулів деформації геосинтетичного матеріалу не відбувається прослизання прошарку по піску або щебеню;
- б) деформація піщаного шару і прошарку під дією навантаження характеризується відсутністю випору. Отримано залежність навантаження, розподіленого по поверхні основи, через відоме навантаження від колеса автомобіля на щебеневий шар.

Основними недоліками цього методу розрахунку є:

- методика призначена для вузького кола завдань;
- плоска задача у розрахунковій моделі не зовсім обґрунтована.

У роботі [105] наведено методику оцінювання працездатності конструкції армованої ґрунтової стіни, яка дає змогу за певного доопрацювання проводити розрахунок стійкості земляного полотна. У роботі за критерії стійкості армованої стіни з ґрунту приймають коефіцієнти стійкості на зсув, перекидання і коефіцієнт безпеки за зчепленням арматури з ґрунтом. Запропонований підхід дає змогу визначати геометричні параметри конструкцій, знайти регресійну залежність, що зв'язує потрібну висоту стіни, висоту насипу та характеристики опору зсуву ґрунту насипу, визначати ширину армоґрунтової стіни з умови її роботи на зсув та перекидання, а також параметрів її армування.

У роботі [103] для розрахунку довжини зони тертя (або довжини закладення армуючого прошарку в ґрунтовому масиві, земляному полотні) під час впливу рівномірно розподіленого навантаження розглянуто схему, в якій геосинтетичний матеріал затиснутий між двома шарами ґрунту. Геосинтетичний матеріал характеризується модулем деформації, товщиною, розривним зусиллям, а ґрунт земляного полотна кутом внутрішнього тертя і щільністю. Умова граничної рівноваги прийнята із умови рівності висмикувального та утримувального зусиль.

Висмикувальне зусилля приймається залежно від дефіциту стійкості укусу, що припадає на один прошарок. У результаті отримано загальний вираз для визначення утримувального зусилля і необхідної довжини армування геосинтетичного матеріалу у ґрунті земляного полотна.

Запропонована авторами [126] розрахункова схема припускає, що механізм впливу прошарку, покладеного в основі насипу, зводиться до збільшення «жорсткості» самого насипу за рахунок розподілу горизонтальних складових зусиль від розтягнутого прошарку та підвищення внутрішнього тертя в самому насипі. Вважається, що при підвищенні «жорсткості» насипу картина передачі напружень від насипу на основу трансформується, причому межами цих змін є схеми абсолютно гнучкого й абсолютно жорсткого штампів. У роботі зазначено, що в разі підвищення «жорсткості» насипу напруження по осі мають знижуватися за одночасного збільшення напружень у крайніх (укісних) частинах. Епюра навантаження, що виникає в цьому разі на поверхні основи, враховує вплив прошарку, визначена за виразом, отриманим із використанням методу кінцевих різниць. У результаті розрахунків авторами отримано такі висновки:

- зменшення тертя на поверхні прошарку, що контактує з основою, підвищує ефект армування;
- збільшення тертя на поверхні прошарку, що контактує з насипом, збільшує ефект армування.

У роботі [123] розглянуто щебеневий шар дорожнього одягу не у вигляді континууму, а у вигляді шару, що складається з окремих зерен - щебінок. Кожну щебінку, що контактує з ґрунтом, вважають концентратором напружень у ґрунтовому масиві, а щебеневий шар представлено як множину тришарових систем. Авторами зазначено, що під час дії на будь-яку тришарнірну систему вертикального або горизонтального навантаження реакція опор матиме не тільки вертикальну складову, а й горизонтальну - розпір. У зв'язку з цим щебеневий шар відносять до категорії розпірних систем - систем, що передають будь-яке навантаження у вигляді вертикальної та горизонтальної складових. Тому було висунуто гіпотезу про ефективність «затяжок» для нижньої зони щебеневого шару. Для того, щоб обмежити передачу горизонтального навантаження на ґрунт, запропоновано щебінки, що контактують із ґрунтом, розмістити в осередках геосітки, яка має модуль пружності під час розтягування, значно більший, ніж у підстиляючого шару.

Теоретичну оцінку зменшення горизонтального навантаження отримали, порівнюючи горизонтальні переміщення круглого штампа на пружному напівпросторі під дією дотичної сили з горизонтальним переміщенням такого самого штампа, але з додатковим зв'язком, що має деформативні властивості сітки. При цьому використовували метод редуційних коефіцієнтів, застосований у будівельній механіці для розв'язання задач про «складові стрижні». Параметр, що характеризує зменшення горизонтального навантаження, назвали коефіцієнтом ефективності армування, який залежить від розміру щебінок, деформативних характеристик геосітки і ґрунту, вертикального напруження, що виникають на рівні сітки.

У роботі [119] запропоновано розрахунок дорожніх конструкцій для автомобільних лісовозних доріг із застосуванням геосинтетичних матеріалів, що мають гравійні та щебеневі покриття, які допускають утворення колії до 0,05-0,08 м. Автором зазначено, що в цих конструкціях основну роль відіграють властивості геосинтетичного матеріалу запобігати перемішуванню перезволоженого глинистого ґрунту із зернистим кам'янистим матеріалом, що дає змогу знизити напруження,

передані на ґрунт завдяки розподілу навантаження на велику площу. Проведені обстеження дослідних ділянок шляхом розрізу дорожніх гравійних одягів завтовшки 0,3-0,5 м, деформованих під час випробувань, дали змогу встановити, що за модулів деформації підстильного ґрунту 5 МПа і вище не спостерігається колії, яка різко виділяється разом із валиками ґрунту, що випирає. Тому автор припустив, що геосинтетик після деформації складається з увігнутих і опуклих сфер різного діаметру, а навантаження від транспортних засобів сприймаються ґрунтом і геосинтетичним матеріалом. Наближене рішення для розрахунку дорожніх одягів, знаходиться з наступних умов і припущень:

- пласка поверхня геосинтетика у чаші деформації набуває сферичної форми;
- напруженнями, що виникають за рахунок тертя між геосинтетичним матеріалом, ґрунтом і гравієм у чаші деформації, нехтують;
- використовуються методи розв'язання плоскої задачі;
- застосовуються положення безмоментної теорії оболонок;
- геосинтетичний матеріал вважають ізотропним матеріалом;
- деформації в площині геосинтетичного матеріалу рівномірні;
- геосинтетичний матеріал за межами чаші деформацій затиснутий між ґрунтом і дорожнім одягом і не переміщується.

У результаті отримано вираз для визначення питомого навантаження, що приймається ґрунтом і геосинтетичним матеріалом.

Однак, запропонований метод не позбавлений недоліків, а саме:

- не враховуються сили тертя між гравієм і прошарком;
- потребує уточнення розрахункова схема;
- застосування безмоментної теорії оболонок у розрахунку не зовсім обґрунтоване.

О.С. Марченко розробив метод обліку підвищення стійкості земляних споруд та отримав формулу, яка виражає коефіцієнт запасу стійкості укосу насипу через опір

грунту і геосинтетика. У розрахунковій схемі розглянуто випадок руйнування укусу по круглоциліндричній поверхні. У роботі представлено вираз, що дає змогу визначати довжину закладення геосинтетичного матеріалу, як в однорідному масиві, так і на межі двох різних ґрунтів.

У роботі показано практичний метод розрахунку основи, армованої металевою сіткою, під час дії на фундамент вертикального осьового навантаження з використанням коефіцієнтів підвищення розрахункового опору і жорсткості за рахунок армування.

Друга група – експериментально-аналітичні методи в основі яких лежить композитний підхід. Дорожні конструкції, армовані геосинтетиком, представляють як однорідний масив (композит), що має узагальнені характеристики, які визначаються експериментально. До неї належать такі розрахунки:

Під час розрахунку осідання автором у роботі [95] використано розрахункову схему, в якій слабкий шар обмеженої потужності підстиляється масивом, що не стискається. Для отримання розрахункової залежності використовувалась формула для визначення осідання шару скінченної потужності.

Перший етап розрахунку полягає в оцінці ступеня збільшення модуля пружності ґрунтових шарів у результаті застосування геосинтетичних матеріалів, з подальшим розрахунком дорожньої конструкції.

Другий етап – в оцінці відповідності міцності геосинтетика з урахуванням його зміни в процесі експлуатації при реальному режимі навантаження. Третій етап розрахунку - за зсувом на контакті «геосинтетик - ґрунт» виконується за загальноприйнятою методикою, але з урахуванням реальних значень опору зсуву на контакті.

У роботі [120] наведено математичні моделі для визначення повного НДС дорожньої конструкції, запроєктованої для роботи в пружній стадії. Розглянуто осесиметричну задачу теорії пружності стосовно багат шарового півпростору, з урахуванням специфічних граничних умов на контакті шарів.

У своїх роботах, заснованих на експериментальних дослідженнях, [122,124,125] автори стверджують, що зростання міцності армованого ґрунту не завжди прямо пропорційне числу армувальних елементів у системі. У разі скорочення кроку між армувальними елементами нижче за деяку межу виникає інтерференція, яка виражається в тому, що відбувається падіння приросту стійкості на зсув армованого ґрунту, який забезпечується кожною з арматур. Інтерференція залежить від відношення величини кроку до ефективної довжини арматури. За їхнього відношення одна до одної менш ніж 1, вплив кожної з арматур на опір піску зсуву різко знижується.

У роботах Джоунса і Сімса [106,107] йдеться про те, що напружений стан конструкції змінюватиметься зі збільшенням глибини закладення, кількості та типу арматури. Концепція розміщення арматури за напрямком деформацій, що розтягують, застосована до споруд із вертикальною стінкою та може бути прийнятною і при розгляді несної здатності фундаментів. При цьому під фундаментом арматура розташовується горизонтально, а за подошвою – вертикально.

Ж. Бінке і К. Лі [92] проводили модельні випробування в умовах плоскої задачі з армоґрунтовою плитою, навантаженою штампом. Змінювалося кількість шарів арматури і відстань від нижньої поверхні до кінця верхнього шару.

Досліди показали, що жорсткість і міцність основ фундаментів можуть бути збільшені в 2-4 рази за допомогою 4 шарів арматури навіть за низького відсотка армування (0,25).

Автори звертають увагу на три види руйнування конструкції: розрив арматури (відбувається за значної довжини арматури); висмикування арматури (відбувається через недостатню довжину арматури); руйнування вище армованої подушки (відбувається при застосуванні потужної арматури і високому відсотку армування).

Третя група – аналітичні методи, в основі лежить дискретний підхід. У цих методах ґрунт уявляють як пружний однорідний напівпростір, а геосинтетик, як нескінченно тонку стрічку, що має жорсткість на розтяг. За допомогою відомих залежностей теорії пружності розв'язуються задачі з визначення напружень і

переміщень від зовнішнього навантаження. До третьої групи належать наступні методики.

Койн [94] запропонував інженерну методику, у якій армований ґрунт розглядається як конструкція, що працює за принципом балки, сформованої в єдиний жорсткий блок. Така модель ґрунтується на припущенні, що взаємодія між ґрунтовою основою та армувальними елементами (розкосами і стійками) забезпечує їх сумісну роботу, утворюючи просторову систему, здатну сприймати та передавати навантаження аналогічно до балки, яка деформується у межах пружної стадії. У цьому підході зв'язок армувальних елементів з ґрунтом розглядається як ключовий фактор підвищення несної здатності та зменшення деформацій конструкції.

Вестерград [128] розглядав середовище, представлене слабким пружним матеріалом, армованим близько розташованими в горизонтальному напрямі гнучкими і нерозтяжними листами.

Бендер та Браун [91,93] припустили, що введення арматури змінює характеристики розширення і напрямки основної деформації. Принцип ґрунтується на тому факті, що при обмеженні розширення ґрунту міцність на зсув буде вищою. Присутність арматури в ґрунті обмежує розширення. Оптимальним є горизонтальне розташування арматури, що збігається з головним напрямком деформації розтягу. У разі розміщення арматури за напрямком і в межах сектору розтягуючих напружень відбувається переорієнтація поля деформацій, що призводить до поліпшення властивостей жорсткості та несної здатності.

Запропоновані дві моделі для опису міцності маси ґрунту, армованої в горизонтальному напрямі, що руйнується при розширенні в напрямку розташування арматури. У першій моделі арматура ініціює нормальний обмежувальний тиск, у другій наявність арматури спричиняє зсувне напруження. Якщо руйнування зразків відбувається в результаті розриву арматури, напруження, що ініціюються, вважаються постійними. Коли руйнування відбувається внаслідок прослизання між ґрунтом і арматурою, ці напруження вважаються пропорційними початковому вертикальному

напруженню. Підвищення міцності ґрунту армуванням відбивається або відрізком уявного зчеплення (розрив арматури), або збільшенням кута внутрішнього тертя (прослизання).

У деяких методиках [129,130] відображено теоретичні розробки з визначення під впливом навантаження, прикладеного до поверхні, загального осідання системи, яка містить слабку ґрунтову основу, прошарок із геосинтетика і насипний шар. У порядку першого наближення представлено, що матеріал працює як мембрана, затиснута по контуру. Під час прогину мембрани частина напружень сприймається нею і не передається на підстильний ґрунт, у зв'язку з чим осідання останнього зменшується (як в конструкції без прошарку). Отримано формули, що дають змогу визначити величину напружень, які «знімаються» мембраною з підстильного ґрунту і зниження осідання за рахунок введення прошарку.

Отримані залежності показують, що вплив прошарку буде тим більшим, чим ближче до поверхні розташовується прошарок, чим нижче модуль пружності ґрунту, чим більша товщина і модуль пружності прошарку.

Аналізуючи теоретичні передумови цієї методики, можна зробити наступні висновки:

- а) прийняття зосередженого навантаження за розрахункове є недостатньо обґрунтованим тому, що дорожні конструкції, як правило, розраховуються на навантаження, рівномірно розподілене по майданчику, еквівалентному за площею колу з діаметром 37 см;
- б) припущення, що геосинтетик працює як мембрана, затиснута по контуру, є не зовсім правильним, оскільки зона защемлення змінюється у процесі деформації;
- в) вимагає перевірки також припущення, що на певній глибині напруження постійні.

У роботі [115] виконано розрахунок для сильно стисливих водонасичених основ. У ній армоване геосинтетичним матеріалом ґрунтове середовище моделюється однорідним ізотропним та пружним середовищем з модулем деформації та

коефіцієнтом Пуасона. Передбачається, що геосинтетик та ґрунт працюють спільно, тобто. мають однакові деформації. У цьому випадку завдання визначення деформацій зводиться до визначення деформацій пружного напівпростору в горизонтальному напрямку. У розрахунковій схемі відображається пружна основа, до поверхні якої по круговому майданчику, рівновеликій площі відбитка коліс автомобіля, прикладено навантаження. Тиск на основу прийнято у вигляді, аналогічному рішенню контактної задачі Герца.

Дана методика дозволяє визначити напруження та деформації в геосинтетиці, закладеної на різних глибинах, а також дозволяє визначити оптимальну глибину закладення і товщину насипу. До недоліків цієї методики можна віднести те, що вона не враховує накопичення пластичних деформацій в окремих конструктивних шарах. Крім того, припущення про те, що геосинтетичний матеріал і ґрунт працюють спільно, необхідно доповнити характеристикою зчеплення матеріалу з ґрунтом.

У роботі [111] викладаються теоретичні дослідження щодо вдосконалення методики проектування насипів з місцевим армуванням геотекстильними прошарками, де автор обмежився розглядом НДС прошарків і тієї частини ґрунту, яка знаходиться в околиці прошарків, тобто. поблизу зони їх безпосереднього контакту. Математичні моделі взаємодії ґрунту із геосинтетичним матеріалом побудовані для різних ділянок, що мають різний кут нахилу до горизонту. Вибір конкретної моделі залежить від потреб користувача і розв'язуваних ним завдань. Автором встановлено, що при розташуванні прошарку у стійкій частині насипу у вигляді відрізка кругової кривої, зверненою опуклістю вгору, на її поверхнях мобілізуються дотичні напруження більші, ніж при горизонтальному закладенні. В результаті, збільшення утримувальної сили при однаковій довжині прошарку може досягати 55 %.

І.Г. Беккером отримана залежність зусилля розтягування, що сприймається прошарком, від глибини колії і характеристик слабкого ґрунту земляного полотна.

У роботі [121] розглянуто питання ефективності армування дорожньої конструкції, що працює в пружній стадії. Для теоретичного аналізу цього питання в

порядку першого наближення було розглянуто задачу про НДС лінійного шаруватого пружного напівпростору, в якому геосинтетик представлений у вигляді тонкого шару. НДС чисельно оцінювали за програмою, що реалізує метод функцій податливості Приварнікова. Як показали розрахунки, найбільш чутливими до армування виявилися максимальні активні напруження зсуву нижнього шару.

Четверта група – обчислювальні методи, що базуються на рівняннях механіки суцільних середовищ, розв'язуваних чисельним методом. У цьому методі в основному, використовується дискретно-комполітний підхід.

Аналіз експериментальних досліджень дорожніх одягів і ґрунтових основ, армованих геосинтетичними матеріалами

Перші ґрунтові роботи були виконані вченими Binquet I. та Lee K [108,109] з армування ґрунтових основ.

У роботі [114] наведено результати 65 модельних випробувань армованих ґрунтових основ. Штампові випробування проводилися в ґрунтовому лотку, розміром $1,5 \times 0,51 \times 0,33$ м. Навантаження на основу передавалося за допомогою штампа, розмірами $7,6 \times 51,0$ см (плоска задача). Матеріал армування: фольга побутова алюмінієва, шириною - 13мм, товщиною - 0,13мм, довжиною -1,5м, міцністю на розрив -17 Н. Ґрунт основи – пісок.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що використання геосинтетичних матеріалів для посилення конструкцій дорожнього одягу є одним із найбільш ефективних технічних рішень для підвищення несної здатності, забезпечення довговічності та зменшення деформацій дорожніх конструкцій, зокрема в умовах недостатньої міцності ґрунтів основи.

Аналіз існуючих експериментальних досліджень засвідчив, що найбільше поширення отримали технології застосування геораток, геотекстилю та геокомпозитів, які завдяки посиленню, армуванню, фільтрації та розділенню дозволяють знижувати ризики передчасного руйнування дорожнього одягу. Водночас встановлено, що чинна нормативна база має фрагментарний характер та не забезпечує

достатнього рівня деталізації розрахункових методик для конструкцій, посилених геосинтетиками. Це обумовлює необхідність проведення подальших експериментальних досліджень для уточнення механізмів роботи армованих шарів та розроблення вдосконалених розрахункових моделей.

Отримані результати комплексного огляду та систематизації сучасних методів посилення дорожніх конструкцій геосинтетичними матеріалами створюють підґрунтя для формування обґрунтованих технічних рішень щодо підвищення ефективності та надійності конструкцій дорожнього одягу в реальних умовах експлуатації.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу сучасного стану застосування геосинтетичних матеріалів у дорожньому будівництві, існуючих методів розрахунку дорожніх конструкцій, посилених геосинтетиками, а також узагальнення експериментальних досліджень встановлено наступне:

1. Доведено доцільність використання геосинтетичних матеріалів у дорожньому будівництві, що забезпечує підвищення надійності та довговічності конструкцій, економічна ефективність, а також оптимізація технологічних процесів.
2. Встановлено, що застосування геораток дає змогу зменшити товщину конструктивних шарів дорожнього одягу, знизити величини деформацій від інтенсивних та високих навантажень, зменшити нерівномірність осідань насипів та колієутворення, прискорити процеси консолідації ґрунтової основи.
3. Обґрунтовано, що використання геосинтетиків має міжгалузевий характер, зокрема у спорудженні підпірних стін, укріпленні укосів, захисті берегів водних об'єктів, підвищенні стійкості фундаментів та у запобіганні ерозійним процесам. Це розширює сферу їх застосування не лише у транспортному, але й у гідротехнічному та цивільному будівництві.
4. Встановлено науково-практичні переваги геосинтетиків, які полягають не лише в економічній ефективності, але й у забезпеченні екологічної безпеки та

ресурсозбереження за рахунок використання місцевих матеріалів та скорочення обсягів земляних робіт.

5. Підкреслено необхідність удосконалення існуючих методів розрахунку дорожнього одягу з використанням геограток, оскільки наявні методики не повною мірою враховують особливості роботи стабілізованих шарів у різних інженерно-геологічних умовах. Це зумовлює потребу у подальших дослідженнях, спрямованих на розроблення науково обґрунтованих підходів до посилення конструкцій дорожнього одягу із геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими.

РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ КОНСТРУКЦІЙ НЕЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ ПРИ ДІЇ СТАТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування підходів до експериментальних досліджень

В умовах сучасного розвитку дорожньої галузі та постійного зростання інтенсивності транспортних потоків особливої актуальності набуває впровадження геосинтетичних матеріалів для підвищення несної здатності та довговічності конструкцій дорожнього одягу. Застосування жорстких багатовісноорієнтованих геораток створює умови для формування механічно стабілізованих шарів дорожнього одягу, здатних ефективно сприймати навантаження протягом усього терміну експлуатації. Недосконалість існуючої нормативної бази об'єктивно обумовлює необхідність проведення експериментальних випробувань для поглибленого вивчення механізмів роботи та удосконалення існуючих розрахункових моделей.

Проведення експериментальних досліджень у даному напрямі є обґрунтованим з таких причин: експериментальна модель дозволяє наближено відтворити НДС конструкції дорожнього одягу при реальних статичних навантаженнях; натурні випробування забезпечують можливість кількісної оцінки впливу геораток на несну здатність та деформаційні характеристики шарів дорожнього одягу; результати експериментів можуть бути використані для перевірки достовірності існуючих теоретичних залежностей і коригування розрахункових схем; натурні експериментальні дослідження дозволяють оцінити роботу дорожнього одягу в реальних умовах та уточнити розрахункові моделі для практичного застосування.

Для виконання поставлених завдань було обрано метод натурних штампових випробувань, що дозволяє досліджувати роботу дорожнього одягу нежорсткого типу під дією статичних навантажень. Такий метод дозволяє отримати об'єктивні дані про фактичні деформаційні параметри та несну здатність конструкції дорожнього одягу в натурних умовах. Застосування даного підходу дає змогу отримати науково

обґрунтовані результати щодо ефективності посилення дорожнього одягу геогратками та сформувані рекомендації для подальшого вдосконалення нормативної та методичної бази. Таким чином, обраний експериментальний підхід є доцільним та раціонально обґрунтованим, що робить його важливим інструментом у розв'язанні актуальної науково-практичної задачі підвищення ефективності конструкцій дорожнього одягу шляхом їх посилення геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими.

Важливою складовою експериментального дослідження є його значення для розвитку теоретичних розрахункових підходів. Отримані у ході випробувань дані слугують вихідною інформацією для побудови та калібрування математичних моделей, що описують роботу дорожнього одягу, посиленого геогратками. Це дозволяє: розробити емпіричні залежності між навантаженнями, деформаціями та структурними характеристиками конструкції; перевірити адекватність існуючих методик розрахунку; створити науково обґрунтовані рекомендації для подальшого удосконалення нормативної бази та проєктних стандартів. Проведення експериментальних досліджень є важливим етапом у дослідженні конструкцій дорожнього одягу нежорсткого типу, що посилені геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими, що одночасно забезпечує практичне підтвердження ефективності таких рішень та формує основу для розвитку сучасних математичних моделей.

Планування експерименту є одним із ключових етапів будь-якого наукового дослідження, що визначає його наукову обґрунтованість, достовірність та практичну цінність результатів [58]. У контексті експериментальних досліджень роботи конструкцій дорожнього одягу нежорсткого типу, посиленого геогратками, планування дозволяє досягти основної мети – отримання репрезентативних і відтворюваних даних для подальшого аналізу та використання у розрахункових моделях.

Планування експерименту забезпечує: досягнення поставлених цілей дослідження. Завчасне визначення переліку параметрів, що підлягають вивченню, а також умов проведення випробувань дозволяє максимально наблизити лабораторний експеримент до реальних експлуатаційних умов; мінімізувати похибки та вплив побічних факторів [59]. Продумана методика дослідження дозволяє уникнути впливу випадкових або неконтрольованих чинників, які можуть спотворювати результати; раціонально використовувати ресурси. Планування дозволяє оптимізувати витрати матеріалів, часу, обладнання та трудових ресурсів, що особливо важливо для складних і тривалих випробувань.

При плануванні експериментів передбачено: визначення кількості серій випробувань, їх послідовність та параметри варіації; розробка схем встановлення вимірювального обладнання; визначення способів збору та обробки експериментальних даних; розробка програми контролю точності та достовірності отриманих результатів.

Спланований експеримент забезпечує можливість отримання необхідної кількості та якості вихідних даних для побудови і калібрування математичних схем, що описують роботу посиленних конструкцій дорожнього одягу. Це дозволяє: формувати емпіричні залежності між навантаженнями, деформаціями та характеристиками конструкції; перевіряти існуючі розрахункові методики на відповідність експериментальним даним; удосконалювати нормативно-технічну базу проєктування та будівництва.

Отже, планування експерименту виступає необхідною умовою успішного проведення досліджень, що забезпечує достовірність результатів та створює передумови для їх практичного використання при розробленні нових технічних рішень у сфері дорожнього будівництва.

Для дослідження принципу роботи та ефективності застосування геограшок полімерних жорстких багатовісноорієнтованих у конструкціях дорожніх одягів були поставлені наступні завдання:

1. Розробити конструкції дорожнього одягу тріпдиційного типу та конструкції дорожнього одягу посилені геогратками, для проведення серії випробувань під навантаженнями від статичного штампа.

2. Провести дослідження деформованого стану для визначення коефіцієнта посилення модуля пружності посиленої конструкції дорожнього одягу.

Натурні експериментальні дослідження вимірювання модуля деформації конструкцій дорожніх одягів виконувалися на наступних об'єктах:

1. Автомобільна дорога державного значення М-03 Київ – Харків – Довжанський, км 231 км 232 Полтавська область (Нове будівництво, обхід с. Ковтуни) (рис. 2.1).

2. Автомобільна дорога державного значення М – 22 Полтава – Олександрія, км 57 – км 58 Полтавська область (Капітальний ремонт).

3. Автомобільна дорога державного значення Н – 03 Житомир – Чернівці, км 92 – км 93 Чернівецька область (Капітальний ремонт).



Рисунок 2.1 – Влаштування багатовісноорієнтованої геогратки Tensar TriAx



Рисунок 2.2 – Статичні штампові випробування ґрунтової основи та шару із щебеню фр. 20 – 40

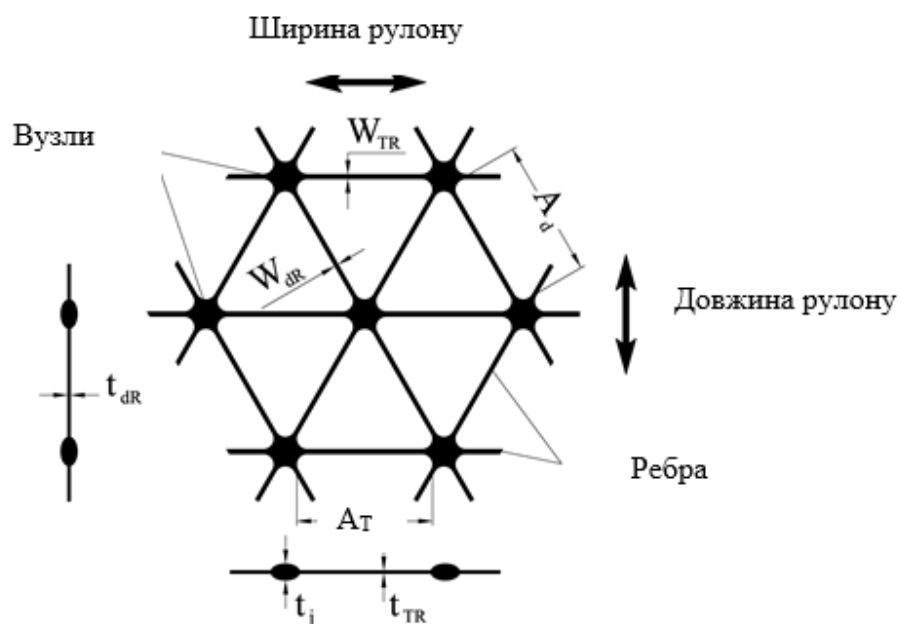


Рисунок 2.3 – Схема загального вигляду георатки Tensar TriAx

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні характеристики геограток Tensar TriAx

Найменування показники (характеристики)	Числові значення для марок		
	TX150	TX160	TX170
1	2	3	4
Поверхнева щільність, г/м ²	205(-35)	220(-35)	270(-35)
Міцність при розтягненні за чотирма основними напрямками: Уздовж полотна - 0°; 30°; 60° до повздовжнього напрямку; Поперек полотна - 90°, кН/м, не менше	15	16	20
Відносне подовження за максимальним навантаженням за чотирма основними напрямками: Уздовж полотна - 0°, 30°, 60° до повздовжнього напрямку; Поперек полотна - 90°, %, не більше	15	15	15
Відносне подовження за максимальним навантаженням за чотирма основними напрямками: Уздовж полотна - 0°; 30°; 60° до повздовжнього напрямку; Поперек полотна - 90°, % (ДСТУ EN ISO 10319:2009)	7 - 15	7 - 15	7 - 15
Радіальна січна жорсткість за 0,5% деформації, кН/м	360(-75)	390(-75)	480(-90)
Радіальна січна жорсткість за 2, 0 % деформації, кН/м, не менше	185	225	295
Коефіцієнт радіальної січної жорсткості	0,80(-0,15)	0,80(-0,15)	0,80(-0,15)
Ефективність вузла, %	100(-10)	100(-10)	100(-10)
Крок шестикутника, мм	80±4	80±4	80±4
Стандартний розмір рулона, м	3,8x75; 4x75/4x50	3,8x75; 4x75/4x50	3,8x50; 4x50/4x50
Примітка. Числове значення в дужках – допустиме значення відхилення параметра (характеристики) при 95-відсотковій забезпеченості			

2.2 Мета і завдання експериментальних досліджень

Метою проведених експериментальних і аналітичних досліджень є комплексне встановлення якісних та кількісних закономірностей роботи конструкцій нежорсткого дорожнього одягу, посилених жорсткими полімерними багатовісноорієнтованими геогратками, в умовах дії статичних штампових навантажень. Дослідження спрямовані на отримання повної та детальної картини взаємодії посилених елементів з матеріалами конструктивних шарів дорожнього одягу та ґрунтовою основою, а також на визначення впливу геограток на формування та розвиток деформацій. Особлива увага приділяється встановленню ефективності використання геограток у незв'язних шарах, зокрема щебеневих, з огляду на підвищення несної здатності конструкції, забезпечення рівномірного розподілу навантажень та зменшення залишкових деформацій, що формуються у процесі експлуатації.

Для досягнення поставленої мети у рамках дисертаційної роботи вирішувалися наступні науково-практичні завдання:

- отримання та аналіз графічних залежностей осідання штампів від величини прикладеного тиску;
- визначення деформаційних характеристик традиційних та посилених конструкцій дорожнього одягу;
- оцінка впливу типу геогратки на ефективність посилення;
- вивчення впливу геограток на форму чаші прогину дорожнього одягу;
- встановлення оптимального типу геогратки з точки зору підвищення міцності дорожнього одягу;
- розроблення регресійних залежностей для прогнозування ефективності посилення.

Для вирішення першої задачі – отримання та аналізу графічних залежностей осідання штампів від величини прикладеного тиску передбачалося проведення серії штампових випробувань дорожніх конструкцій (як без посилення, так і з використанням різних типів геограток). Побудовані залежності дозволили кількісно оцінити вплив посилення на роботу конструкції в умовах зростаючих навантажень.

В процесі вирішення другої задачі – визначення деформаційних характеристик традиційних та посилених конструкцій дорожнього одягу виконувалося визначення еквівалентного модуля пружності ($E_{\text{екв}}$) конструкцій дорожнього одягу, що дало можливість інтегрально оцінити жорсткість та несну здатність. Порівняння значень $E_{\text{екв}}$ для різних варіантів конструкцій дозволяє визначити ступінь впливу ефекту стабілізації на загальну деформативність системи.

В процесі оцінки впливу типу георатки на ефективність посилення досліджувалась робота дорожнього одягу з використанням геораток полімерних жорстких багатовісноорієнтованих марок TX 150, TX 160, TX 170. Порівняльний аналіз отриманих результатів дозволив встановити які з досліджуваних типів забезпечують найбільше зростання еквівалентного модуля пружності та підвищення стійкості до накопичення залишкових деформацій.

На основі даних штампових випробувань проводився аналіз форми деформаційної поверхні в зоні навантаження та дослідження впливу геораток на форму чаші прогину дорожнього одягу. Це дозволило оцінити, наскільки георатка змінює характер розподілу напружень у шарах конструкції та у ґрунтовій основі.

Для встановлення оптимального типу георатки з точки зору підвищення міцності дорожнього одягу було виконано порівняльний аналіз отриманих деформаційних і міцнісних показників. Було встановлено тип георатки, який забезпечує найбільший техніко-економічний ефект, із врахуванням не тільки підвищення несної здатності, а і можливість економії матеріалів при забезпеченні нормативних вимог.

В процесі розроблення регресійних залежностей для прогнозування ефективності посилення було виконано кореляційно-регресійний аналіз експериментальних даних, у результаті якого отримано рівняння залежності відносного підвищення еквівалентного модуля пружності $E_{\text{екв.пос.}} / E_{\text{екв}} = f(h_{\text{до}} / D, E_{\text{гр}} / E_{\text{до}})$ від відносної глибини закладення георатки та співвідношення модулів

пружності. Отримані рівняння можуть бути використані при розрахунку посиленних конструкцій в практиці проектування нових та реконструйованих дорожніх одягів.

Перед початком виконання експериментальних досліджень була складена структурно-логічна схема.

Структурно-логічна схема експериментальних досліджень – це графічно або текстово оформлена модель, яка відображає повну послідовність та взаємозв'язок етапів наукового експерименту, починаючи від постановки мети та формулювання гіпотези і закінчуючи інтерпретацією результатів та їх впровадженням.

Структурно-логічна схема виконує дві ключові функції:

1. Методологічну – допомагає системно спланувати експеримент так, щоб усі етапи були логічно пов'язані й не виникало прогалин між збиранням даних і отриманням висновків.
2. Комунікативну – слугує наочним інструментом для пояснення структури дослідження іншим фахівцям, рецензентам або комісії, яка оцінює роботу.

Зазвичай схема включає:

- Вхідні передумови: аналіз проблеми, формулювання мети й завдань, наукової гіпотези.
- Вибір об'єкта і предмета дослідження.
- Визначення керованих і некерованих факторів, їх діапазонів та критеріїв оцінки.
- Методи і план експерименту: вибір типу планування (повнофакторний, частковий, центрально-композиційний тощо).
- Проведення експерименту: організація, засоби вимірювань, порядок виконання випробувань.
- Обробку результатів: статистичний аналіз, побудова моделей, верифікація.
- Інтерпретацію та практичне впровадження: формування висновків, рекомендацій, методичних документів.

Для вирішення поставлених завдань повний цикл експериментів складався з двох етапів (рис. 2.4)

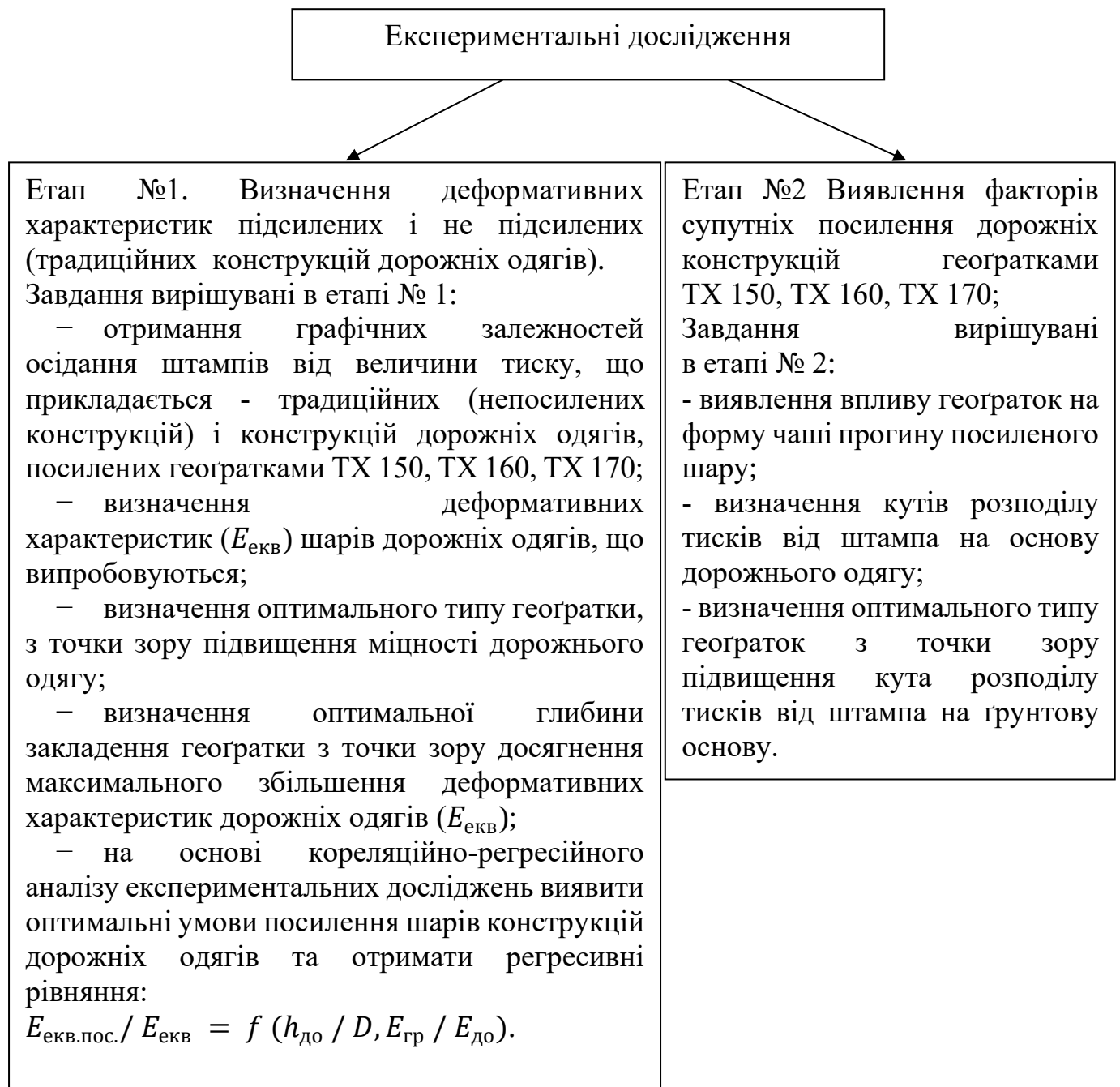


Рисунок 2.4 – Структурно - логічна схема проведення експериментальних досліджень

2.3 Планування експерименту

2.3.1 Вибір значимих чинників та інтервалів варіювання

Визначення комплексу значущих чинників та встановлення меж їх варіювання є одним із ключових етапів планування експерименту, оскільки від правильності

цього вибору безпосередньо залежить достовірність та репрезентативність отриманих результатів. Для формування вихідних параметрів дослідження було проведено багатофакторний аналіз, який поєднує в собі вивчення практичного досвіду застосування геосинтетичних матеріалів у конструкціях нежорсткого дорожнього одягу, критичний огляд сучасних наукових публікацій, а також систематизацію результатів уже виконаних експериментальних і теоретичних досліджень у цій галузі.

Зокрема, враховувалися дані про поведінку дорожніх конструкцій при посиленні геогратками різних типів, що були отримані в ході попередніх наукових експериментів як в Україні, так і за кордоном. Було проаналізовано вплив таких чинників, як геометричні характеристики геогратки, її фізико-механічні властивості (модуль пружності, міцність на розрив, опір зсуву), умови закладення у конструкцію (глибина розміщення, взаємодія з шаром щебеню або піску), а також гідрогеологічні умови ділянки.

Особливу увагу приділено реальним умовам реалізації експериментальної програми. Було враховано:

- тип та масу транспортного засобу, що імітується при навантаженні;
- геологічні умови;
- гідрогеологічні характеристики;
- технологічні аспекти будівництва (методи укладання шарів, ущільнення, можливість використання місцевих матеріалів).

Інтервали варіювання обраних чинників (наведені у табл. 2.2) визначалися таким чином, щоб з одного боку охопити усі можливі значення параметрів, характерних для практичного дорожнього будівництва, а з іншого – забезпечити технічну можливість їх відтворення в лабораторних і натурних умовах. Це дозволило зберегти баланс між науковою точністю та інженерною реалізованістю досліджень.

У результаті проведеного аналізу було сформовано остаточний перелік керованих факторів і встановлено їх допустимі межі зміни. Такий підхід забезпечує комплексність експериментальної програми та дозволяє отримати результати, що

можуть бути безпосередньо інтегровані у методики проєктування дорожніх конструкцій з посиленням георатками.

Таблиця 2.2 – Фактори та інтервали варіювання

№ п.п	Фактор	Нижній рівень	Основний рівень	Верхній рівень	Інтервал варіювання
X ₁	Відношення модуля деформації ґрунтової основи ($E_{гр}$) до модуля пружності шару із щебеня ($E_{до}$) - $E_{гр}/E_{до}$	0,038	0,259	0,48	0,221
X ₂	Відносна глибина закладення геораток - $h_{до} / D$, де $h_{до}$ - шару із щебеня, см; D - діаметр штампа, см.	0,26	0,52	0,78	0,26

2.3.2 Матриця планування

Планування експерименту є однією з ключових складових сучасної методології наукових досліджень у галузі транспортного будівництва. Правильно сформована матриця планування дозволяє системно та цілеспрямовано вивчати вплив окремих факторів і їх комбінацій на поведінку конструкцій дорожнього одягу, що, у свою чергу, забезпечує отримання достовірних і статистично обґрунтованих результатів.

У випадку проведення повнофакторного експерименту розглядаються всі можливі комбінації значень обраних керованих факторів. Це дає змогу не лише виявити вплив кожного параметра окремо, але й визначити синергетичний ефект їх взаємодії, що особливо важливо при дослідженні складних багатокомпонентних систем, якими є конструкції нежорсткого дорожнього одягу з геосинтетичним посиленням.

Необхідність проведення повнофакторного експерименту у даному дослідженні зумовлена кількома ключовими причинами:

1. Комплексність впливу факторів. Поведінка дорожньої конструкції визначається не лише одним параметром, а сукупністю факторів, серед яких – глибина закладання елемента, співвідношення деформативних характеристик матеріалів, товщина несного шару, умови навантаження тощо.
 2. Необхідність оцінки взаємодії факторів. Деякі параметри, взяті окремо, можуть демонструвати незначний вплив на кінцевий результат, але у поєднанні з іншими призводять до суттєвих змін у несній здатності та деформаційних характеристиках дорожнього одягу.
 3. Отримання математичної моделі. Повнофакторний підхід забезпечує створення емпіричних моделей, які з високим рівнем достовірності описують досліджуваний процес. У подальшому такі моделі можуть бути використані у проектних розрахунках і нормативних документах.
 4. Забезпечення відтворюваності та наукової коректності результатів. Планування експерименту в матричній формі дозволяє організувати проведення дослідів у чіткій послідовності, мінімізуючи вплив випадкових чинників та похибок вимірювань.
- Важливою особливістю даного дослідження є те, що для кожної комбінації факторів виконувалося визначення ключових параметрів напружено-деформованого стану дорожньої конструкції: еквівалентного модуля пружності, величин вертикальних і зсувних напружень, форми чаші прогину та коефіцієнта посилення. Таким чином, кількість досліджуваних станів конструкції n безпосередньо визначається кількістю факторів та рівнів їх варіювання, що відображається у матриці планування.

Використання матриці планування у повнофакторному експерименті дозволить: забезпечити системний підхід до виконання досліджень; скоротити загальну кількість експериментів без втрати повноти інформації; отримати комплексну оцінку впливу факторів на міцність та деформативність; підвищити ефективність обробки експериментальних даних.

У підсумку, реалізація повнофакторного експерименту стала основою для побудови регресійних залежностей та оптимізаційних моделей, що можуть бути

застосовані у практиці проектування та підвищення довговічності конструкцій нежорсткого дорожнього одягу з посиленням геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими.

Для проведення повнофакторного експерименту необхідно досліджувати n - станів конструкції:

$$n = p^k = 3^2 = 9 \text{ експериментів,} \quad (2.1)$$

де k - кількість факторів;

$p = 3$ - число рівнів.

Для реалізації всіх можливих поєднань рівнів чинників визначена матриця планування (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Матриця планування експерименту

№ досліджу	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	X_1^2	X_2^2	Y
1	+	-	-	+	+	+	Y_1
2	+	0	-	0	0	+	Y_2
3	+	+	-	-	+	+	Y_3
4	+	-	0	0	+	0	Y_4
5	+	0	0	0	0	0	Y_5
6	+	+	0	0	+	0	Y_6
7	+	-	+	-	+	+	Y_7
8	+	0	+	0	0	+	Y_8
9	+	+	+	+	+	+	Y_9
Примітка: X_1 - фактор (відношення модуля деформації ґрунту до модуля пружності посиленого шару із щебеню- $E_{гр} / E_{до}$); X_2 - фактор (відносна глибина закладення геогратки - $h_{до} / D$); Y - відгук ($K_{пос} = E_{екв.пос} / E_{екв}$ - коефіцієнт збільшення модуля пружності щебеневого шару).							

Мінімальна кількість експериментів «близнюків» в серії прийнято – 3.

Таким чином, для проведення однієї серії експериментів ($N_{сер}$) необхідно:

$$N^{\text{серії}} = n \times 3 = 9 \times 3 = 27 \text{ експериментів.} \quad (2.2)$$

Так як в функцію відгуку (Y) входить значення еквівалентного модуля пружності непосиленої конструкції ($E_{\text{екв}}$), то для того, щоб серію експериментів можна було вважати закінченою, необхідно провести випробування традиційної конструкції в тих же вихідних станах, що і посиленої, тобто виконати 9 експериментів. Крім того, перед випробуванням конструкцій необхідно визначити деформативні характеристики ґрунтової основи ($E_{\text{гр}}$), тобто провести 3 експерименту. Разом загальна кількість експериментів (N) в серії приймається:

$$N = (N^{\text{серії}} + 3) + 9 = 30 + 9 = 39 \text{ експериментів.} \quad (2.3)$$

У дослідженнях використовувалося 4 типа конструкцій дорожнього одягу, тому загальна кількість експериментів становить – 129 шт.

2.4 Обладнання, методика і техніка проведення експерименту

Для виконання експериментальних досліджень використовувалася сертифікована лабораторія ТОВ «Уніпром». Статичний штамп марки Infratest 130 kN із круглим жорстким штампом діаметром 300 мм, наведений на рисунку 2.5.

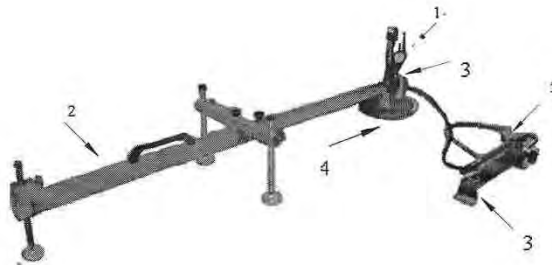


Рисунок 2.5 – Конструкція установки для випробування ґрунту штампом.

До складу установки для випробування ґрунту штампом повинні входити:

1. прогиномір (індикатор) годинникового (важільного) типу;
2. станина - рейка (реперний пристрій);
3. система навантаження (гідродомкрат гідронасос);
4. круглий жорсткий штамп;
5. силівимірювач (манометр)

Конструкція установки повинна забезпечувати:

- можливість навантаження штампа 5 ступенями тиску по 0,10 МПа до максимального тиску 5,00 МПа;
- центровану передачу навантаження на штамп;
- сталість тиску на кожному ступені навантажування і розвантажування.

Штамп повинен бути жорстким, круглої форми з плоскою підшоною (діаметр штампа 300 мм).

Навантаження штампа здійснюють домкратом. Домкрат повинен бути попередньо відкалібрований.

В якості противаги (упора для гідродомкрата) може служити:

- транспортний засіб масою не менше 14 т;
- Навантаження вимірюють з похибкою не більше 1% від максимального навантаження при випробуванні.

Прогиномір для вимірювання осідання штампа повинен бути закріплений на реперній системі. Штамп повинен бути з'єднаний з прогиноміром недеформуємим зв'язком. Вимірювальна система повинна забезпечувати вимір осідання з похибкою не більше 0,01 мм. Реперна система, на якій кріплять прогиномір, повинна забезпечувати нерухомість системи в процесі випробування.

Випробування втискуванням плити навантаження (штампа) проводилось на крупнозернистих ґрунтах, ґрунтах зі змішаною зернистістю, а також на жорстких і міцних ґрунтах. Зерна крупніше 1/4 діаметра плити навантаження повинні бути відсутніми безпосередньо під плитою навантаження.

При швидко висихаючих пісках однакової зернистості, залишки продуктів, розм'якшених на поверхні ґрунтах, а також на ґрунтах, верхня зона яких порушена іншим чином, порушена зона перед проведенням випробування втискуванням плити навантаження видаляється. Щільність досліджуваного ґрунту повинна, по можливості, залишатися без змін.

Поверхня ґрунту розрівнюється за допомогою відповідних допоміжних засобів (лопати, кельми або за допомогою пересування і повороту плити навантаження).

Плита навантаження повинна повністю прилягати до випробувальної поверхні. Для усунення нерівностей при необхідності наноситься шар сухого піску середньої крупності або гіпсовий розчин товщиною кілька міліметрів. До його поверхні обертанням або легким постукуванням притирається плита навантаження. При використанні гіпсового розчину поверхню плити навантаження змащується маслом. Виступаючий з боків гіпсовий розчин до його затвердіння видаляється. Випробування втискуванням плити навантаження не проводиться до тих пір, поки гіпсова основа не затвердіє.

Після установки штампа монтують пристрій для навантаження штампа та вимірювальну систему.

Гідравлічний циліндр встановлюється під контропору навантаження по центру плити навантаження і під прямим кутом до неї і оберігається від перекидання. Відстань між плитою навантаження і поверхнею контропори має становити не менше 0,75 м для плити навантаження діаметром 300 мм. Контропори оберігається від зсуву в поперечному напрямку до навантаження. Забезпечується достатня стійкість контропори.

Вимірювання просідання здійснюються за допомогою індикатора годинникового типу або датчика переміщень.

Для вимірювання просідання плити навантаження вимірювальний пристрій розміщується в середині плити навантаження. Відстань між опорою станини і поверхнею контропори має становити не менше 1,25 м. Станина має бути розташована

горизонтально. Датчик переміщень або індикатор годинникового типу повинні бути розташовані вертикально до випробувальної поверхні.

При вирівнюванні плити навантаження необхідно стежити, щоб вимірювальний наконечник пристосування для вимірювання осідання безперешкодно входив в вимірювальний тунель цоколя плити навантаження і міг бути встановлений в середині плити навантаження.

До початку випробування вдавлюванням плити навантаження датчик зусилля і індикатор годинникового типу встановлюються на нуль. Потім плита навантаження приблизно на 30 с піддається попередньому навантаженню з напругою 0,01 МН / м при використанні плити навантаження діаметром 300 мм.

Після чого навантаження скидається і датчик зусилля та індикатор годинникового типу знову встановлюються на нуль.

Для визначення модуля (E_{v1}), проводиться навантаження при шести ступенях навантаження з однаковими інтервалами навантаження до досягнення напруги 0,8 МПа. Зміна навантаження від ступеня до ступеня має бути завершено протягом 1 хв. Плита навантаження розвантажується в 3 ступені – 50%, 25%, 0% від максимального навантаження. Після розвантаження проводиться подальший цикл навантаження для визначення модуля (E_{v2}), проте до передостанньої ступені навантаження первинного циклу навантаження, щоб залишатися в діапазоні попереднього навантаження.

Якщо при навантаженні помилково була прикладене навантаження більше, ніж передбачене, то його більше не можна знижувати, а слід залишити і занести до журналу (протоколу) випробувань.

Дані вимірювань осідання штампа заносяться в журнал випробувань поруч з відповідним навантаженням.

Момент, коли записується показання прогиноміра, будь то кожна сходинка навантаження або розвантаження штампа - момент «умовної стабілізації» основи під штампом.

Під «умовною стабілізацією» розуміється момент, коли зміна повної або залишкової осадки основи не становитиме більше 0,02 мм / хвилину.

Час витримки кожному наступному рівні навантаження (розвантаження) має бути не менше витримки попереднього ступеня.

Таким чином, при одному штамповому випробуванні за методикою згідно ДСТУ Б В.2.3-42:2016 виконується 6 ступенів навантаження і 3 ступені розвантаження при першому етапі і 5 ступенів навантаження при другому етапі, разом фіксується 11 значень повної і 3 значення залишкової деформації.

Обробка отриманих результатів штампових випробувань.

За даними просідань окремих ступенів навантаження і розвантаження будують графіки ліній просадки під тиском (криві вирівнювання).

На графіку проводять вирівнюючу лінію по ступенях навантаження. Ці лінії описуються багаточленом другого ступеня, константи якого отримують шляхом підбору до зміненим значенням помилок за методом найменших квадратів:

$$s = a_0 + a_1 \cdot \sigma_0 + a_2 \cdot \sigma_0^2, \quad (2.4)$$

де s – усадка навантажувальної пластини в мм;

σ_0 – середнє стандартне зусилля стиснення під навантажувальною пластиною в МПа;

a_0 – постійна величина багаточлена другого ступеня в мм;

a_1 – постійна величина багаточлена другого ступеня в мм;

a_2 – постійна величина багаточлена другого ступеня в мм.

Стандартні рівняння для розрахунку постійних величин для даного рівняння, отримані на підставі результатів випробувань $s_1, \sigma_{0i}, s_2, \sigma_{0i} \dots s_n, \sigma_{0n}$ перераховані нижче:

$$a_0 \cdot n + a_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} + a_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 = \sum_{i=1}^n S_i ;$$

$$\begin{aligned} a_0 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i} + a_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 + a_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^3 &= \sum_{i=1}^n S_i \cdot \sigma_{0i}; \\ a_0 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^2 + a_1 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^3 + a_2 \sum_{i=1}^n \sigma_{0i}^4 &= \sum_{i=1}^n S_i \cdot \sigma_{0i} \cdot \sigma_{0i}^2. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Для визначення констант супеня первинного ущільнення точка $s = 0$ до уваги береться.

$$E_V = 1,5 \times r \times \frac{1}{a_1 + a_2 \times \sigma_{max}}, \quad (2.6)$$

де E_V – модуль пружності в МПа

r – радіус навантажувальної пластини в мм;

σ_{max} – максимальне середнє стандартне зусилля стиснення в МПа.

Модуль пружності E_V визначається за графіком осідань під час стискання, виходячи з кута нахилу січної лінії, проведеної між точками, що відповідають навантаженням $0,3 \times \sigma_{1max}$ и $0,7 \times \sigma_{1max}$.

Згідно ДСТУ Б В.2.3-42:2016 Автомобільні дороги. Методи визначення деформаційних характеристик земляного полотна та дорожнього одягу модулю пружності E_V при першому навантаженні присвоюється коефіцієнт 1, модулю пружності при другому навантаженні - коефіцієнт 2.

Визначення щільності шару щебеню методом заміщення об'єму.

Щільність шару щебеню визначається методом заміщення об'єму апаратом з гумовим балоном відповідно до ДСТУ Б В.2.1-21:2009. «Ґрунти. Визначення щільності ґрунтів методом заміщення об'єму».

Суть методу полягає у встановленні відношення маси проби ґрунту до його об'єму за умови, що з шару ґрунту, який випробовується відбирають пробу необхідного обсягу, яку заміщують однорідним середовищем з відомою щільністю.

Масу проби вимірюють з похибкою не більше 0,2%, а її обсяг - з похибкою не більше 1%. Для проведення випробування згідно п. 2.6 ДСТУ Б В.2.1-21:2009, дозволяється використовувати будь-які прилади за умови забезпечення зазначеної точності.

Обсяг проби повинен складати 3000 см^3 , що відповідає нормативу для ґрунту з максимальною крупністю зерен 40 мм.

Щільність ґрунтів визначають на основі результатів двох паралельно проведених випробувань. Заміщення об'єму слід проводити в місцях, розташованих на відстані не більше 1 м один від одного.

Для проведення випробування застосовують такі основні і додаткові обладнання та інструменти:

- апарат з гумовим балоном, зовнішній вигляд і схема якого приведена на рисунку 2.6 та рисунку 2.7. Розміри апарату призначають такими, щоб забезпечити вимір мінімального обсягу проби;
- засоби для розрівнювання поверхні ґрунту і поглиблення лунки (наприклад, металева лінійка, різець, молоток, ложка і щітка);
- сосуди для відбору проби;
- штирі для фіксації листа основи від зсуву;
- технічні ваги з межею зважування 5 і 20 кг.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд щільноміра водобаллонного типу БПД-КМ

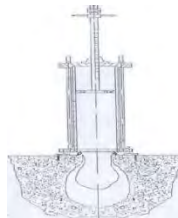


Рисунок 2.7 – Схема щільноміра водобаллонного типу БПД-КМ

Проведення випробування:

На поверхні, яка підлягає випробуванню шару розрівнюють необхідну площу, після чого встановлюють лист основи і закріплюють його, щоб він не зміщувався.

Апарат через повний стержень поршня заливають водою, потім, злегка вдавивши поршень, витісняють з циліндра повітря. Після цього перекривають отвір для наповнення.

Апарат поміщають на лист основи і, віджавши циліндр, підтискають балон на вирівняну ґрунтову поверхню. За шкалою визначають значення H_1 .

Відтягують поршень і знімають апарат з листа основи. Через круглий отвір в аркуші основи викопують лунку з приблизно вертикальними стінками.

Глибина лунки повинна забезпечувати мінімальний обсяг проби (як правило, глибина становить 10-20 см). У стінках і дні лунки слід видалити виступаючі гострі частини великих уламків ґрунту для уникнення порушень природного складу ґрунту. Вилучений при цьому ґрунт слід ретельно зібрати в посудину.

Апарат знову встановлюють на аркуші основи і закріплюють, після чого поршень вдавлюють до тих пір, поки балон не притулиться до стінки порожнини. Після цього на шкалі зчитують значення H_2 . Без зміни положення приладу витягуванням поршня воду з гумового балона направляють в апарат і повторно визначають H_2 . Якщо два визначених значення H_2 відрізняються один від одного не більше ніж на 2%, то за основу слід брати їх середнє значення. В іншому випадку слід повторити випробування.

Видалений з лунки матеріал слід зважити з точністю до 50 г.

Обробка результатів:

Фактична щільність щебеню γ_f розраховується за формулою:

$$\gamma_f = \frac{P}{V} = \frac{P}{F_{\text{ц}}(H_2 - H_1)}, \text{ г/см}^3, \quad (2.7)$$

де P – маса щебеню, витягнутого з лунки, г;

V – об'єм щебеню, витягнутого з лунки, см³;

$F_{\text{ц}}$ – площа перерізу циліндра щільноміра (183 см²);

H_1 – перший відлік;

H_2 – другий відлік.

Необхідна щільність шару щебеню $\gamma_{\text{тр}}$ визначається відповідно до ДБН В.2.3-4.

2.5 Результати експериментальних досліджень та їх аналіз

2.5.1 Визначення деформативних характеристик посилених і традиційних конструкцій дорожнього одягу етап №1

Експериментальна робота проводилася з метою вивчення поведінки дорожніх конструкцій під дією навантаження та визначення їхніх деформативних характеристик як для традиційних варіантів, так і для варіантів, що були посилені геогратками.

У рамках даного етапу експерименти виконувалися за двома основними напрямками:

1. Випробування традиційних конструкцій дорожніх одягів – тобто таких, що не містять у своєму складі додаткових армувальних елементів (рис. 2.7). Ці конструкції представляють собою класичну шарову систему дорожнього покриття, яка включає в себе шар асфальтобетону або щебеневу основу, під якою розташовані основні та додаткові шари підстильного ґрунту.
2. Випробування конструкцій дорожніх одягів, посилених багатовісно орієнтованими геогратками різних типів: ТХ 150, ТХ 160 та ТХ 170 (див. рис. 2.8–2.11). Застосування таких матеріалів передбачалося з метою підвищення несної здатності дорожнього одягу та зменшення його деформацій під дією навантаження.

Під час проведення експериментів для імітації дії колісного навантаження на поверхню дорожнього одягу використовувався жорсткий металевий штамп круглого

перерізу діаметром 300 мм. Це дозволяло рівномірно передавати тиск на досліджувану ділянку та забезпечувало повторюваність результатів у серії випробувань.

В ході експериментів варіювалися два ключові параметри:

Товщина щебеневого шару конструкції змінювалася у діапазоні від 10 см до 60 см. Це дозволяло дослідити, як змінюється робота дорожньої конструкції при різній глибині розташування елементів посилення та при різній несній здатності ґрунтової основи.

Модуль деформації ґрунтової основи варіювався від 5 МПа (що відповідає слабким і малостійким ґрунтам) до 60 МПа (що характерно для добре ущільнених та міцних основ). Такий діапазон дозволив оцінити ефективність застосування георіток у різних інженерно-геологічних умовах.

Зведені характеристики та параметри досліджуваних дорожніх конструкцій наведені у табл. 2.4, де по кожному варіанту зафіксовані дані про товщину шарів, тип посилення, модуль деформації основи та інші показники.

Для зручності аналізу результатів були побудовані порівняльні зведені графіки (рис. 2.12–2.20), на яких показано різницю у поведінці посилених та неосилених конструкцій під дією навантаження. Графічні залежності дозволяють швидко оцінити вплив посилення на зменшення величини осідання та підвищення жорсткості дорожньої конструкції.

Таким чином, перший етап досліджень забезпечив порівняння двох типів дорожніх конструкцій – традиційних та посилених – за однакових умов навантаження та при різних характеристиках ґрунтової основи, що стало базою для подальшого глибшого аналізу та оптимізації конструктивних рішень.

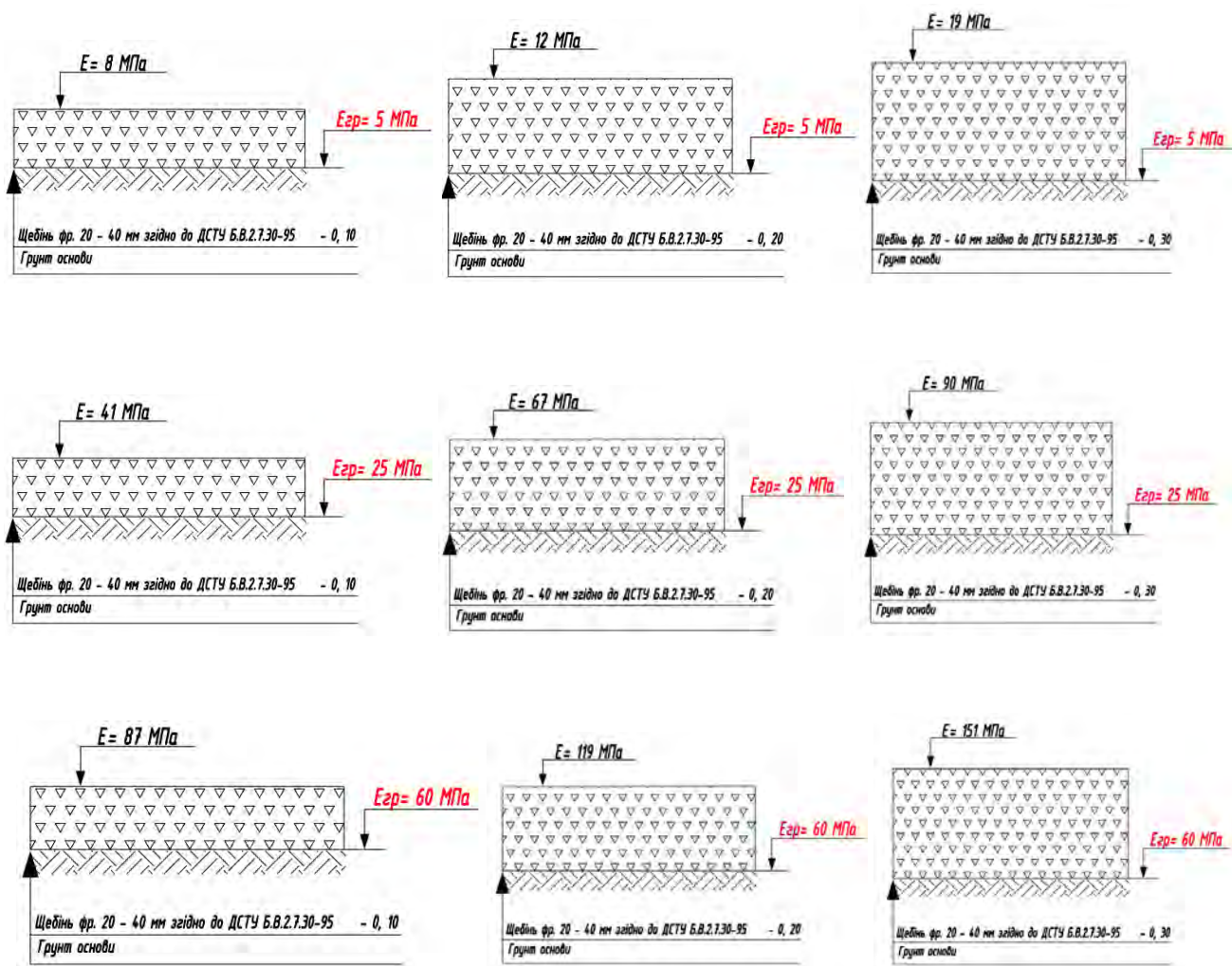
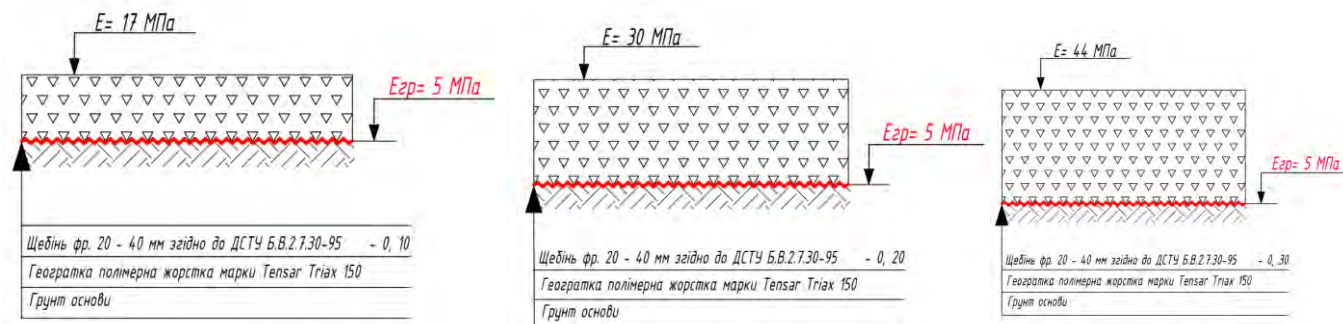


Рисунок 2.8 – Традиційні конструкції щебеневого шару



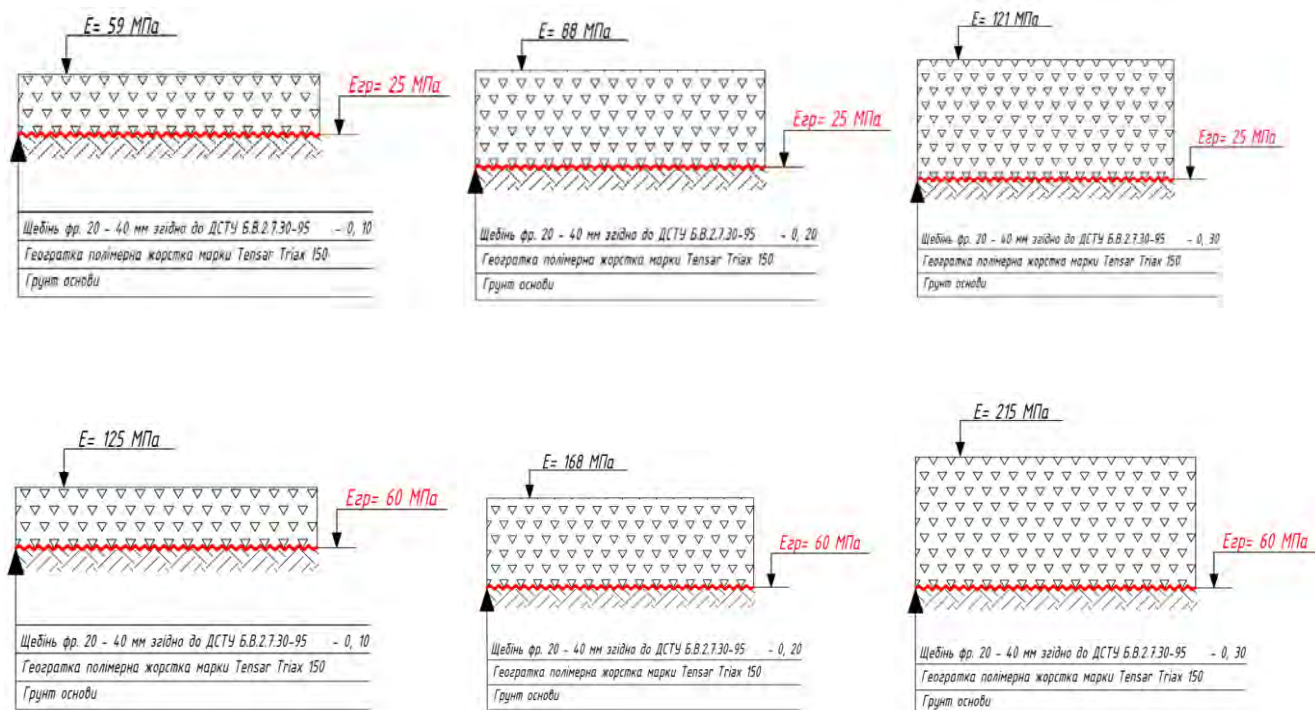
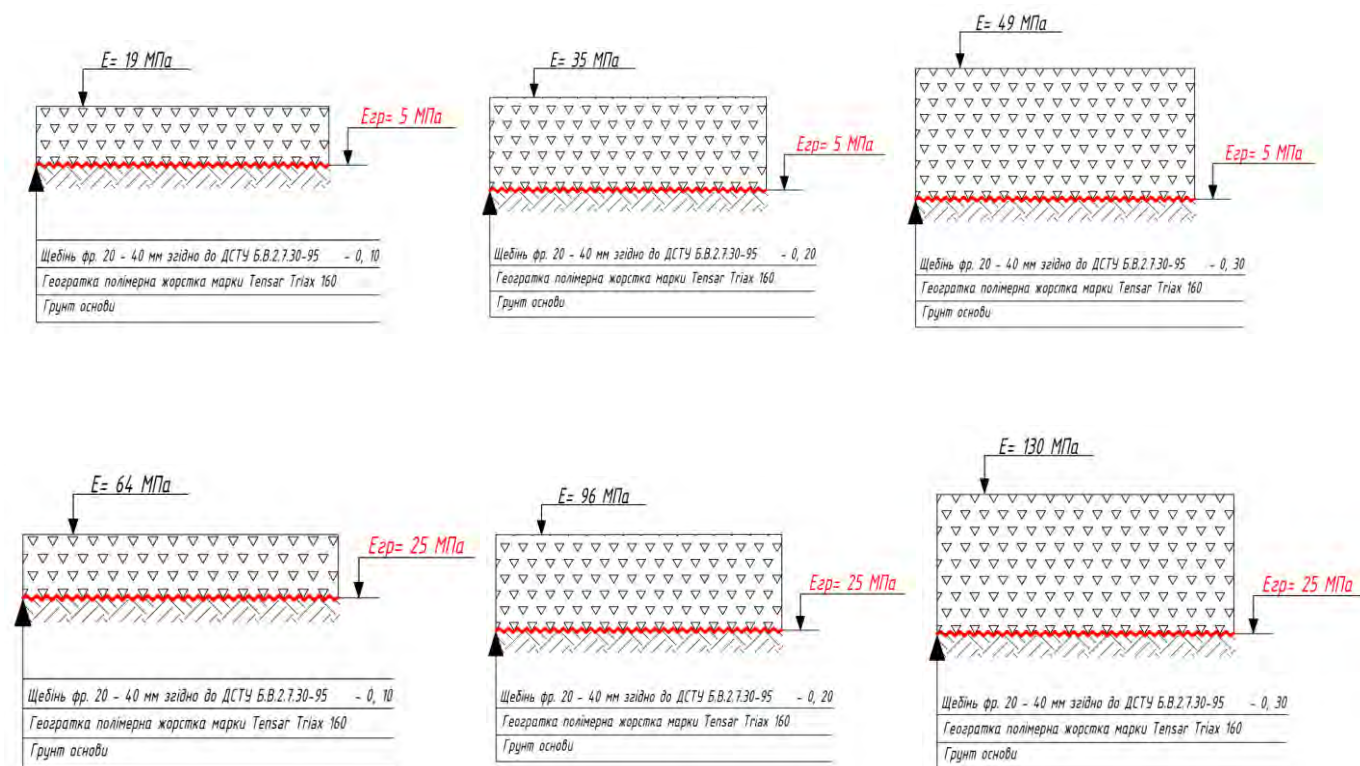


Рисунок 2.9 – Посиленні конструкції щелевеного шару геотраткою Tensar TriAx 150



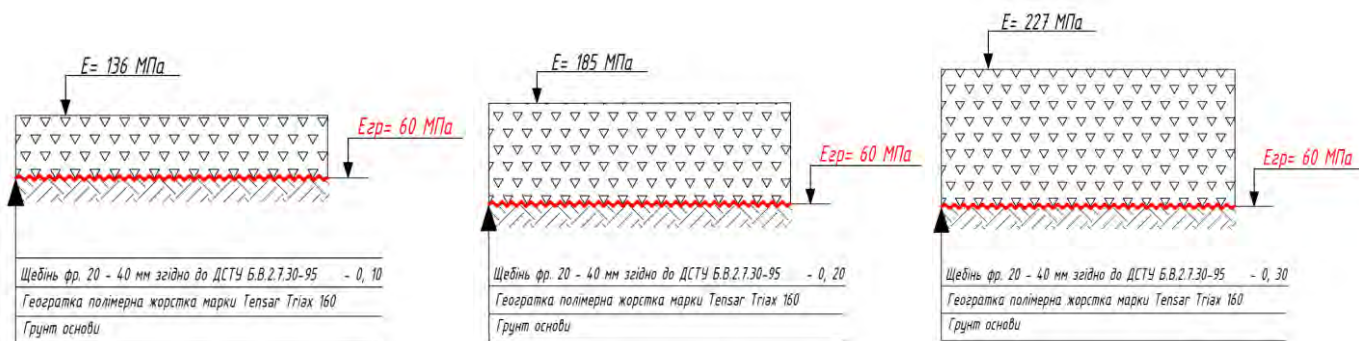


Рисунок 2.10 – Посиленні конструкції щебеневого шару геораткою Tensar TriAx 160

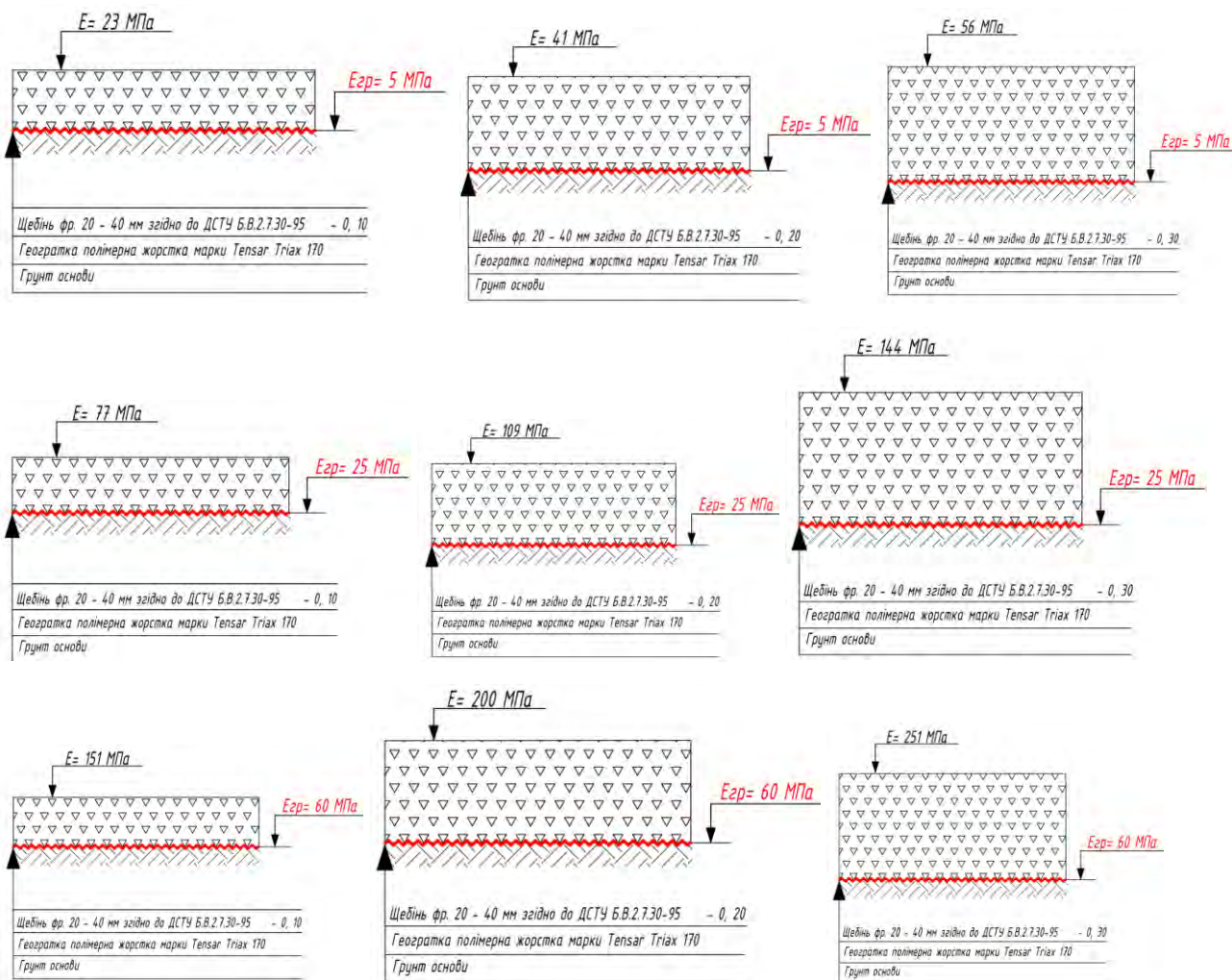


Рисунок 2.11 – Посиленні конструкції щебеневого шару геораткою Tensar TriAx 170

Таблиця 2.4 – Зведені характеристики конструкцій дорожнього одягу, що досліджувалися

Номер точки	Традиційна конструкція дорожнього одягу			Конструкція дорожнього одягу з геораткою ГТ ТХ 150			Конструкція дорожнього одягу з геораткою ГТ ТХ 160			Конструкція дорожнього одягу з геораткою ГТ ТХ 170		
	Значення загального модуля деформації при первинному навантаженні	Значення загального модуля деформації при вторинному навантаженні	Співвідношення модулів первинного та вторинного навантаження	Значення загального модуля деформації при первинному навантаженні	Значення загального модуля деформації при вторинному навантаженні	Співвідношення модулів первинного та вторинного навантаження	Значення загального модуля деформації при первинному навантаженні	Значення загального модуля деформації при вторинному навантаженні	Співвідношення модулів первинного та вторинного навантаження	Значення загального модуля деформації при первинному навантаженні	Значення загального модуля деформації при вторинному навантаженні	Співвідношення модулів первинного та вторинного навантаження
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1}	E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1}	E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1}	E_{v1}	E_{v2}	E_{v2}/E_{v1}
	МПа	МПа	Коеф.	МПа	МПа	Коеф.	МПа	МПа	Коеф.	МПа	МПа	Коеф.
Товщина конструкції 10 см, основа E=5 МПа												
1.	4	7	-	8	17	2,1	9	19	2,10	11	23	2,10
2.	3	8	2,6	8	18	2,2	9	19	2,10	12	23	1,90
3.	4	7	-	9	18	2,0	11	21	1,90	12	25	1,90
Товщина конструкції 20 см, основа E=5 МПа												
1.	8	22	-	14	30	2,1	18	35	2,0	20	41	2,1
2.	6	20	3,3	16	32	2,0	20	37	1,9	22	44	2,0
3.	8	21	-	17	30	1,8	20	37	1,9	22	43	2,0

Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Товщина конструкції 30 см, основа E=5 мПа												
1.	11	33	2,8	22	44	2,0	25	49	2,0	29	56	1,9
2.	12	33	2,8	23	45	2,0	25	50	2,0	28	56	2,0
3.	10	30	3,0	22	42	1,9	27	52	1,9	31	60	2,1
Товщина конструкції 10 см, основа E=25 мПа												
1.	16	43	2,7	30	59	2,0	33	64	1,9	39	77	2,0
2.	13	41	3,1	30	60	2,0	32	64	2,0	39	78	2,0
3.	13	41	3,1	30	60	2,0	34	67	2,0	41	80	1,9
Товщина конструкції 20 см, основа E=25 мПа												
1.	24	70	2,9	45	88	2,0	48	96	2,0	55	109	1,9
2.	24	70	2,9	45	90	2,0	49	98	2,0	55	110	2,0
3.	22	69	3,1	47	91	1,9	49	99	2,0	58	112	1,9
Товщина конструкції 30 см, основа E=25 мПа												
1.	34	92	2,7	60	121	2,0	67	130	1,9	71	144	2,0
2.	33	90	2,7	60	121	2,0	65	132	2,0	74	145	1,9
3.	31	89	2,8	63	123	1,9	68	132	1,9	74	146	2,0
Товщина конструкції 10 см, основа E=60 мПа												
1.	40	87	2,2	62	125	2,0	69	136	1,9	75	151	2,0
2.	39	87	2,2	60	125	2,1	69	137	2,0	75	151	2,0
3.	37	88	2,4	63	127	2,0	70	139	2,0	77	155	2,0
Товщина конструкції 20 см, основа E=60 мПа												
1.	51	119	2,3	84	168	2,0	93	185	2,0	99	200	2,0
2.	50	117	2,3	85	168	2,0	92	185	2,0	101	200	2,0
3.	55	121	2,2	87	170	1,9	95	188	2,0	102	203	2,0
Товщина конструкції 30 см, основа E=60 мПа												
1.	66	151	2,4	107	215	2,0	113	227	2,0	125	251	2,0
2.	65	150	2,3	108	217	2,0	115	230	2,0	125	252	1,9
3.	65	150	2,3	110	218	2,0	116	230	2,0	128	254	1,9

Порівняльні графіки (рис. 2.12–2.20) відображають залежність осідання та деформацій дорожнього одягу від прикладеного навантаження для двох основних типів конструкцій:

1. Традиційних (непосилених) дорожніх конструкцій.
2. Посилених георатками типів TX 150, TX 160 та TX 170.

На кожному графіку наведено криві, які показують зміну вертикальних переміщень щебеневого шару в залежності від збільшення навантаження.

У всіх випадках крива для традиційної конструкції розташована вище, ніж для посиленої, що вказує на більші значення осідання при тих самих рівнях навантаження. Це свідчить про меншу міцність традиційної конструкції та її більшу сприйнятливність до накопичення деформацій.

Для посилених варіантів криві мають більш пологий нахил, особливо на початковій ділянці навантаження (до 0,3–0,4 МПа). Це вказує на підвищення пружної складової деформацій та кращу здатність розподіляти навантаження.

На графіках видно, що зі збільшенням товщини шару (від 10 до 60 см) для обох типів конструкцій величина осідання зменшується.

- Для непосилених конструкцій цей ефект є, але не настільки виражений: навіть при товщині 60 см спостерігаються значні деформації при високих навантаженнях.
- Для посилених конструкцій збільшення товщини покриття у поєднанні з посиленням призводить до помітного зменшення нахилу кривої, тобто до зростання загальної жорсткості системи.

3. Модуль деформації ґрунтової основи

При низькому модулі деформації основи (5–10 МПа) різниця між посиленою та непосиленою конструкцією є найбільшою. Це пояснюється тим, що у слабких основах георатка працює як посилюючий елемент, який ефективно розподіляє напруження та запобігає локальним просіданням. При високих значеннях модуля основи (50–60 МПа) загальні деформації і так незначні, але навіть у цьому випадку криві посилених

конструкцій знаходяться нижче, що підтверджує ефективність від геогратки навіть на міцних основах.

Геогратка ТХ 150 показує помітне покращення характеристик.

Геогратка ТХ 160 дає ще більший ефект у зниженні деформацій, особливо при середніх навантаженнях.

Геогратка ТХ 170 забезпечує найкращий результат – крива для цього типу розташована найнижче серед усіх посилених варіантів, що свідчить про максимальне підвищення несної здатності конструкції.

На графіках чітко простежується трифазний характер роботи дорожніх конструкцій:

1. Початкова (пружна) ділянка – лінійне збільшення осідання при наростанні навантаження. У посилених варіантах ця ділянка довша.
2. Перехідна зона – початок накопичення залишкових деформацій, нахил кривої зростає.
3. Інтенсивне деформування – крутий підйом кривої, що відповідає втраті стійкості шарів і виходу конструкції з робочого стану. Для посилених конструкцій ця фаза настає пізніше, ніж для непосилених.
4. Посилення геогратками багатовісноорієнтованими зменшує величину осідання на 20–45 % залежно від типу матеріалу, товщини покриття та модуля основи.
5. Найбільший ефект від посилення проявляється при слабких основах.
6. Георешітка ТХ 170 є найбільш ефективною серед досліджених.
7. Навіть у випадку міцної основи та значної товщини покриття посилення сприяє стабілізації та підвищенню довговічності конструкції.

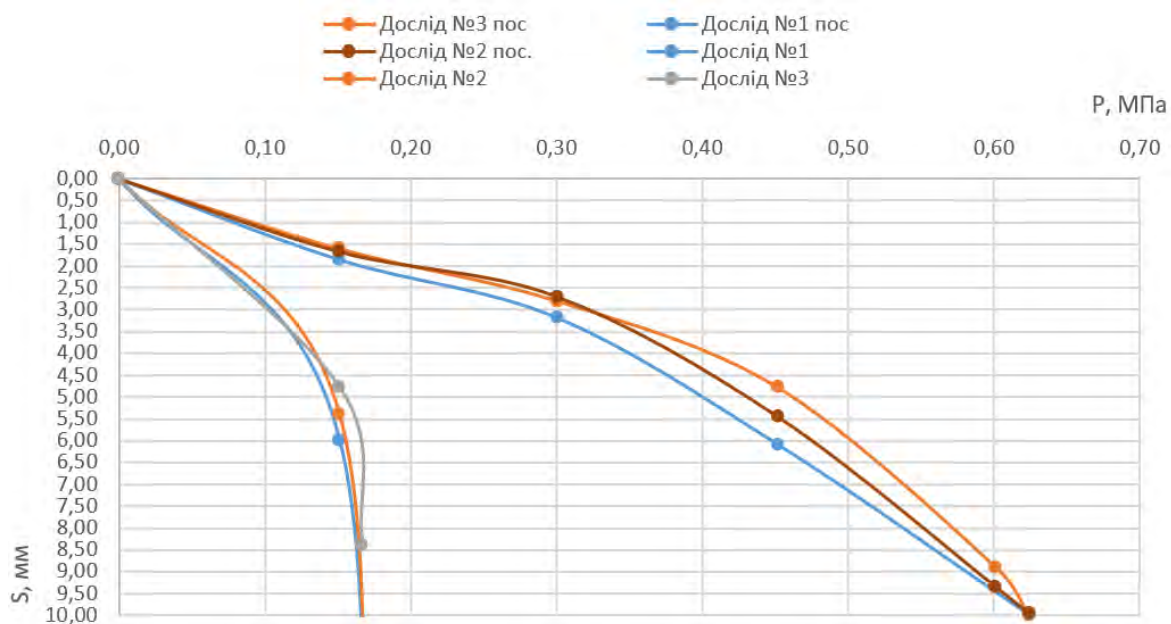


Рисунок 2.12 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непосиленої конструкції: щебінь фракції 20-40 (h-10 см), $E_{гр} = 5$ МПа

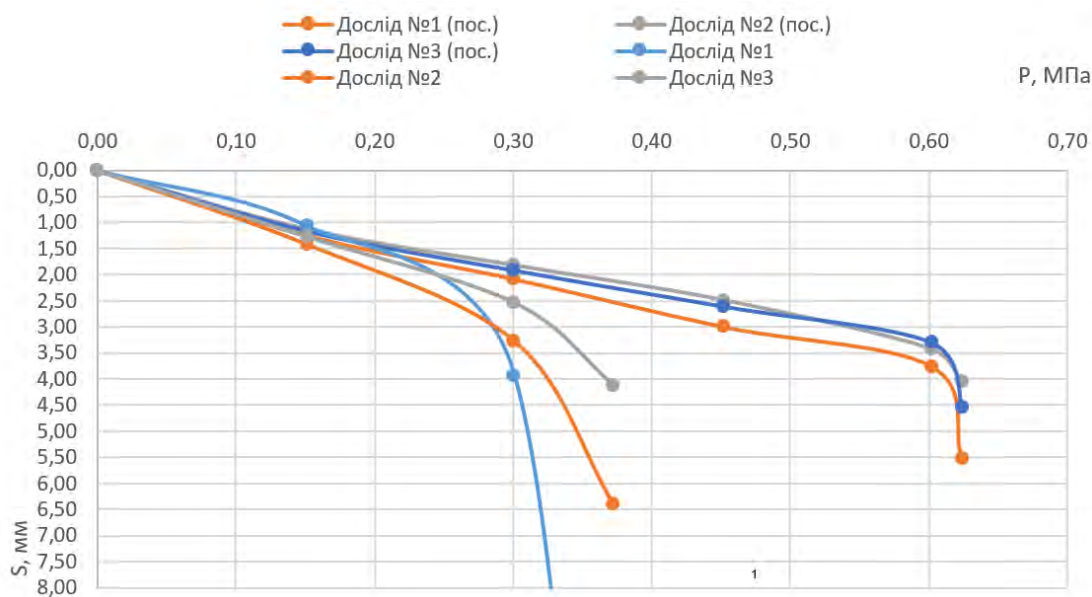


Рисунок 2.13 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непосиленої конструкції: щебінь фракції 20-40 (h-10 см), $E_{гр} = 25$ МПа

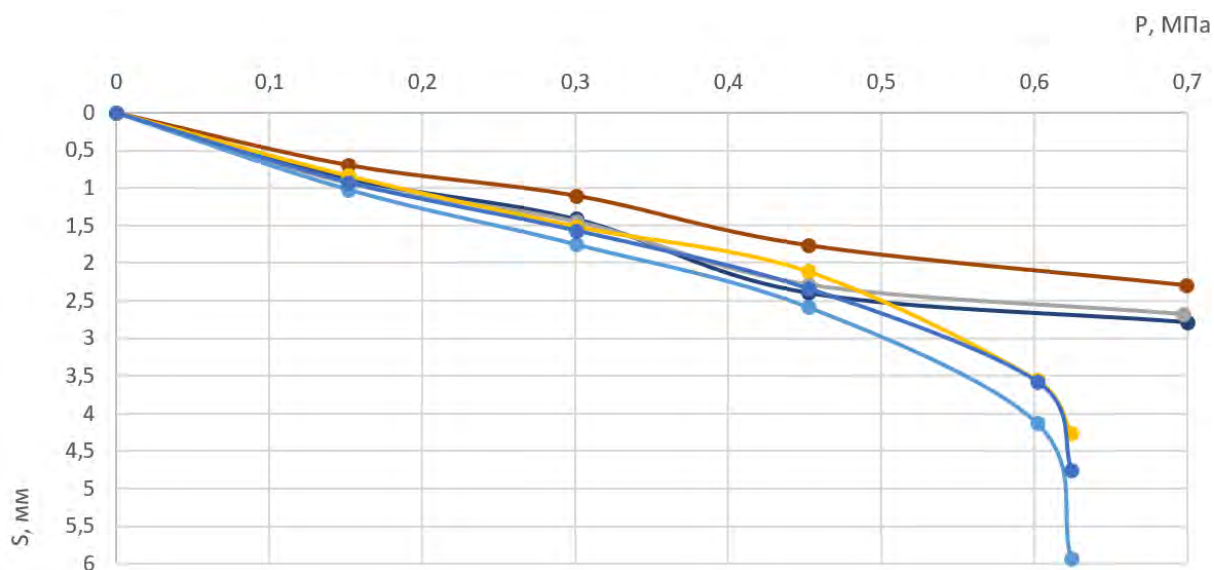


Рисунок 2.14 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непосиленої конструкції: щебінь фракції 20-40 ($h=10$ см), $E_{gr} = 60$ МПа

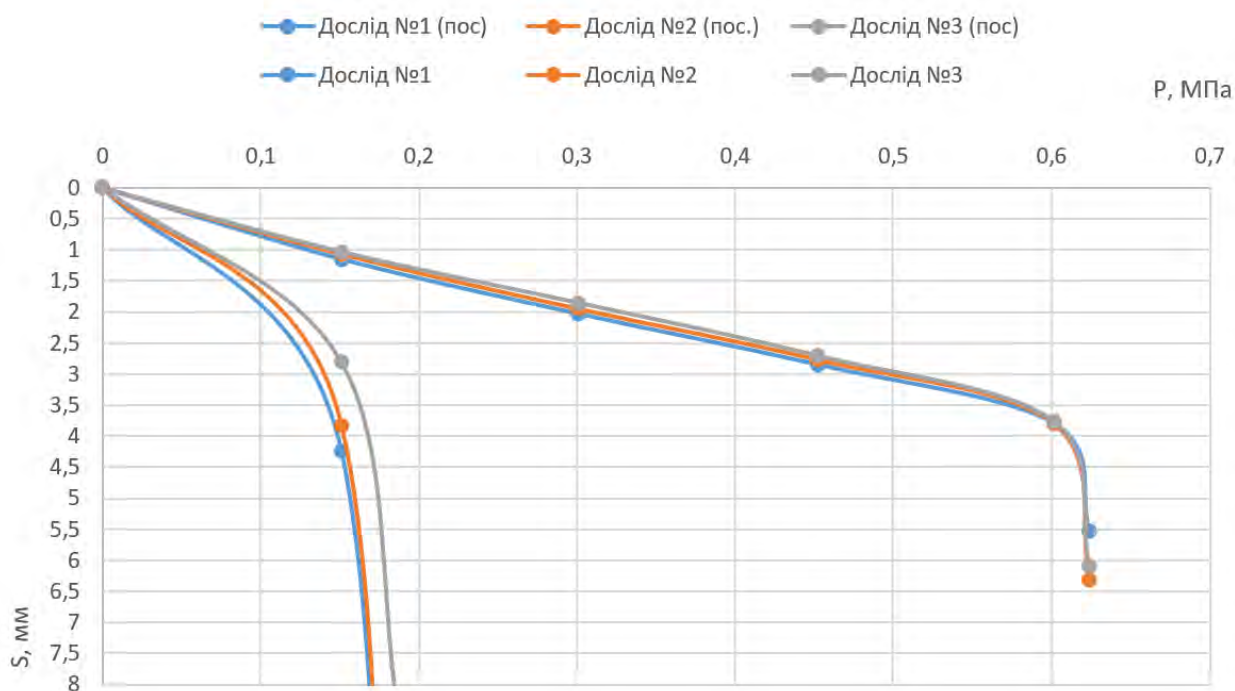


Рисунок 2.15 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непосиленої конструкції: щебінь фракції 20-40 ($h=20$ см), $E_{gr} = 5$ МПа

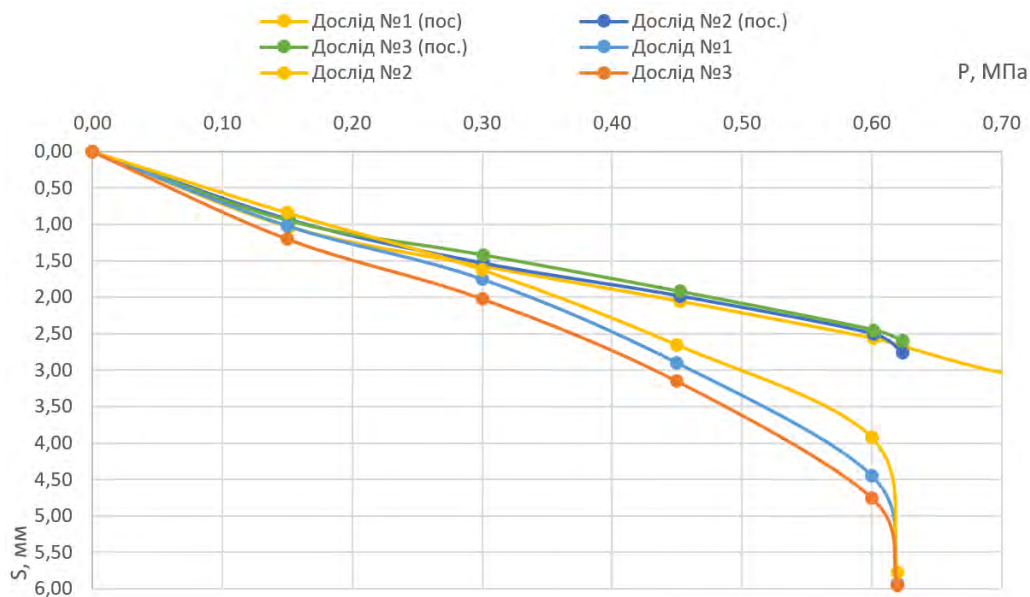


Рисунок 2.16 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непоміченої конструкції: щебінь фракції 20-40 (h-20 см), $E_{гр} = 25$ МПа

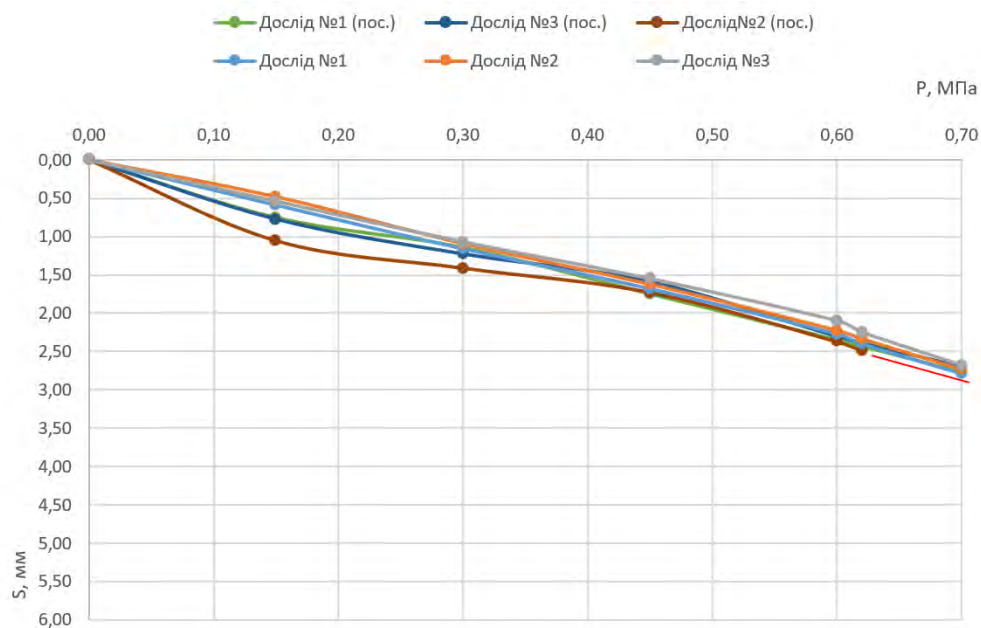


Рисунок 2.17 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непоміченої конструкції: щебінь фракції 20-40 (h-20 см), $E_{гр} = 60$ МПа

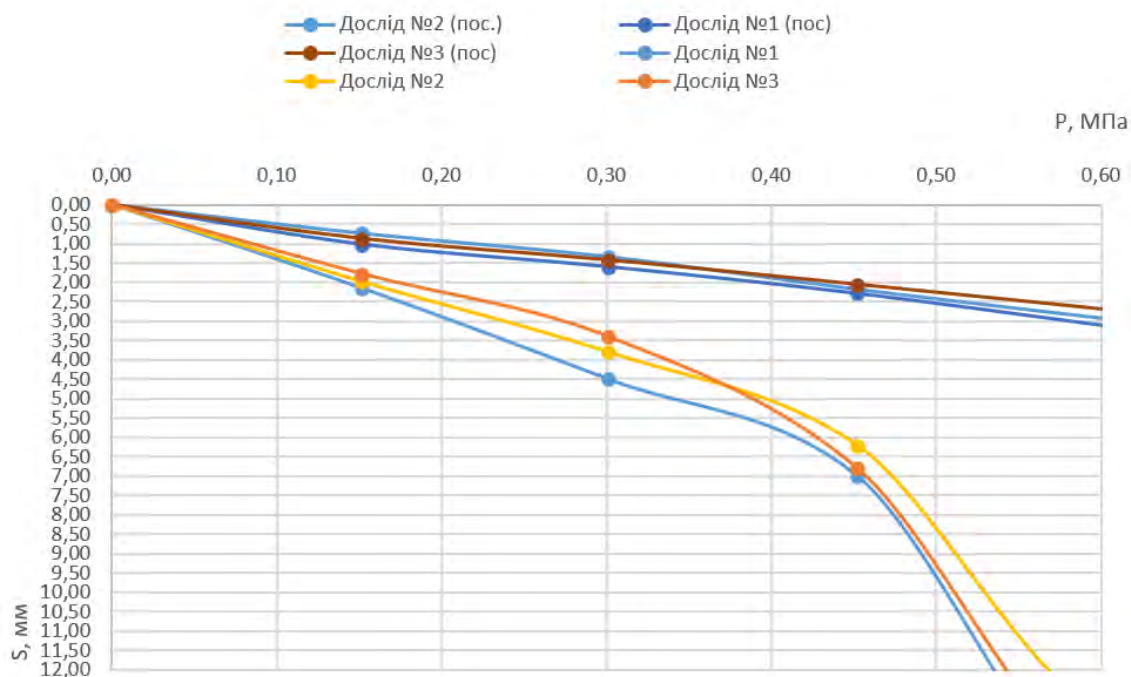


Рисунок 2.18 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непосиленої конструкції: щебінь фракції 20-40 (h-30 см), $E_{gr} = 5$ МПа

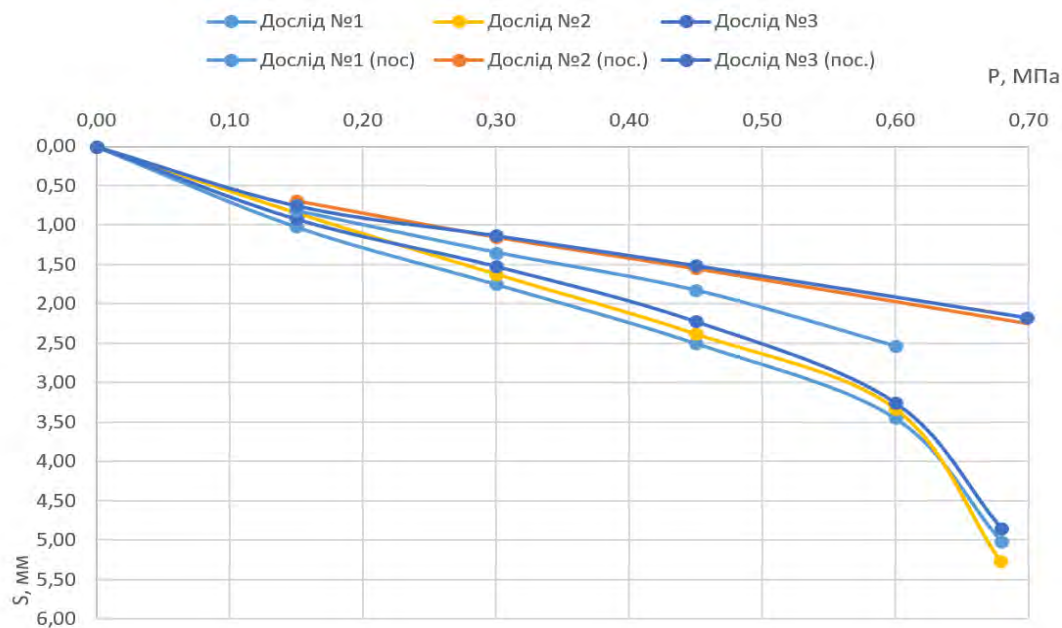


Рисунок 2.19 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непосиленої конструкції: щебінь фракції 20-40 (h-30 см), $E_{gr} = 25$ МПа

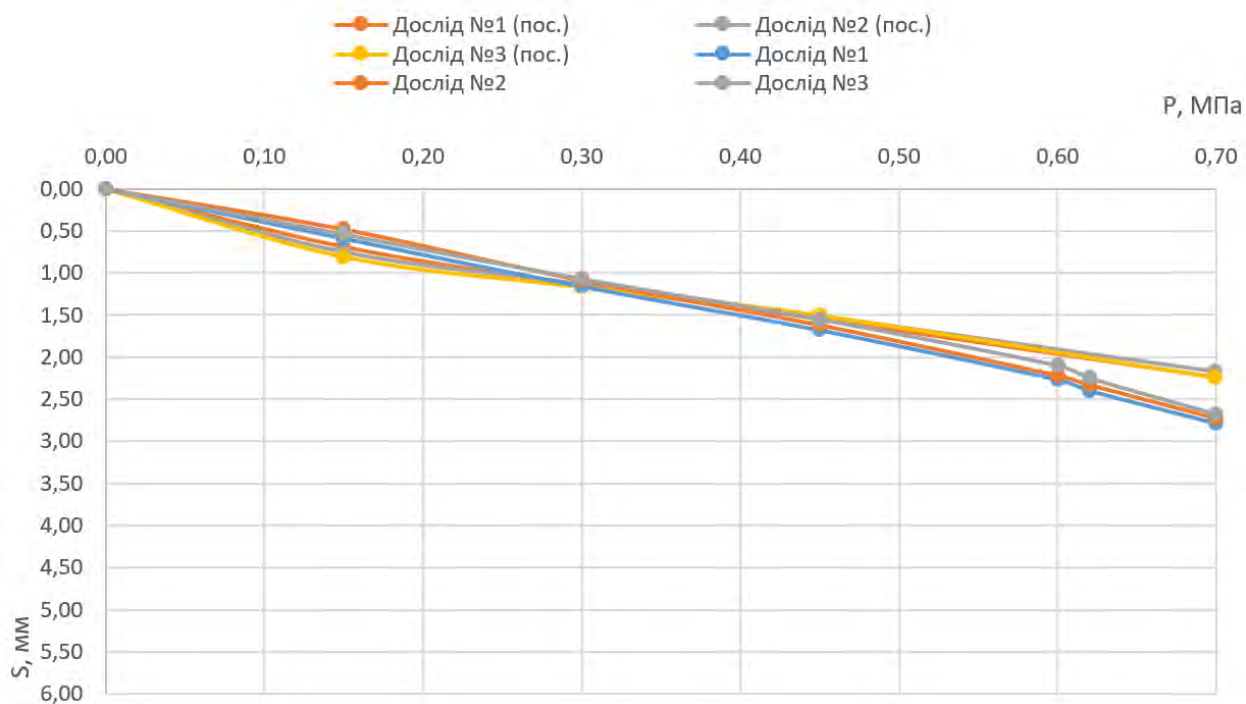


Рисунок 2.20 – Порівняльний зведений графік випробувань посиленої та непосиленої конструкції: щебінь фракції 20-40 (h-30 см), $E_{гр} = 60$ МПа

Еквівалентні модулі пружності традиційних дорожніх конструкцій, визначені експериментальним шляхом, мають добру збіжність (80 – 99%) з розрахунковими значеннями визначеними за залежністю (2.8).

$$E_{екв} = \frac{E_{гр}}{1 - \frac{2}{\pi} \left(1 - \left(\frac{E_{гр}}{E_{до}}\right)^{1,4}\right) \arctg \frac{h_{до}}{D} \left(\frac{E_{до}}{E_{гр}}\right)^{0,4}}, \quad (2.8)$$

де $E_{екв}$ – еквівалентний модуль пружності дорожнього одягу, МПа;

$E_{гр}$ – модуль деформації ґрунтової основи, МПа;

$E_{до}$ – модуль пружності покриття, МПа;

$h_{до}$ – товщина покриття, см;

D – діаметр штампа, см.

Результати порівняння розрахункових і експериментальних значень еквівалентних модулів пружності не посилених (традиційних) конструкцій наведені в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 Значення еквівалентного модуля пружності непосиленої конструкції

№ п.п	Конструкція	$E_{\text{екв(розр)}}$., МПа	$E_{\text{екв(експер)}}$., МПа	$\Delta = \frac{E_{\text{екв.експ}} - E_{\text{екв.розр}} \times 100\%}{E_{\text{екв.експер}}},$ %
1.	$E_{\text{гр}} = 5 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,26$	9,6	12,1	20
2.	$E_{\text{гр}} = 25 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,26$	44,9	46,7	3,85
3.	$E_{\text{гр}} = 60 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,26$	72,9	70	4,14
4.	$E_{\text{гр}} = 5 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,52$	15,9	18,7	15
5.	$E_{\text{гр}} = 25 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,52$	57	56	1,78
6.	$E_{\text{гр}} = 60 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,52$	83,6	84	0,5
7.	$E_{\text{гр}} = 5 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,78$	22,6	22,1	2,26
8.	$E_{\text{гр}} = 25 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,78$	69,1	64,7	6,8
9.	$E_{\text{гр}} = 60 \text{ МПа}$ $h_{\text{до}}/D = 0,78$	93,6	89,1	5,05

З огляду на те, що еквівалентні модулі пружності ($E_{\text{екв}}$) традиційних конструкцій дорожнього одягу, визначені розрахунковим шляхом, не дуже різняться від модулів пружності (за винятком ґрунтів з модулем деформації 5 МПа), отриманих експериментально, в подальшому значення $E_{\text{екв}}$ визначалися за залежністю 2.8.

Результати експериментів порівнювали за двома критеріями:

— за величиною, яка характеризує збільшення еквівалентного модуля пружності конструкції дорожнього одягу.

$$K_{\Pi} = \frac{E_{\text{екв.пос}}}{E_{\text{екв}}}, \quad (2.9)$$

де K_{Π} — коефіцієнт посилення дорожньої конструкції;

$E_{\text{екв.пос}}$ — еквівалентний модуль пружності посиленої конструкції, МПа;

$E_{\text{екв}}$ — еквівалентний модуль пружності конструкції, МПа.

За величиною відносної несної здатності конструкції дорожнього одягу (P)

$$\bar{P} = \frac{P_{\text{нос}}}{P_0}, \quad (2.10)$$

де $P_{\text{нос}}$ — питомий тиск при якому зберігається лінійна залежність між тиском і осадкою (посилена конструкція дорожнього одягу);

P_0 — питомий тиск при якому зберігається лінійна залежність між тиском і осадкою (без посилення).

При посиленні конструкцій георатками відбувається значне збільшення еквівалентного модуля пружності в порівнянні з традиційними непосиленими конструкціями. Причому явно виражена тенденція збільшення коефіцієнта посилення від «міцних» ґрунтів до більш «слабких».

Так посилення конструкції дорожніх одягів георатками ТХ 150 привело до збільшення еквівалентного модуля пружності конструкцій в 1,07 рази (на ґрунтах з $E_{\text{гр}}$ - 60 МПа), в 1,54 рази (на ґрунтах з $E_{\text{гр}}$ - 25 МПа) і в 3,5 разів (на ґрунтах з $E_{\text{гр}}$ - 5 МПа).

При розгляді графіків очевидно, що приріст тисків на кожному ступені викликає нерівномірно зростаючий приріст осідання. Причому у посиленої конструкції швидкість збільшення осадок значно знижується зі збільшенням прикладаємого

тиску. Відбувається виположування графіків, що свідчить про збільшення абсолютного значення визначається еквівалентного модуля пружності зі збільшенням ступеня навантаження.

Отже геогратка перерозподіляє тиск від штамп на більшу площу, тим самим знижує напруження в ґрунтовій основі та запобігає випору ґрунту.

Регресійно-кореляційний аналіз результатів експериментальних досліджень конструкцій дорожніх одягів, посилених геограткою ТХ 150

Для побудови регресійного рівняння типу $Y = f(X_1, X_2)$, де Y -відгук, X_1, X_2 - фактори впливу, а так само для перевірки його адекватності був проведений регресійно-кореляційний аналіз.

Оскільки був обраний повнофакторний експеримент і по ньому зібрані всі необхідні спостереження, то доступні для розрахунку всі головні ефекти і двофакторні взаємодії моделі 2-го порядку (залежність 2.11).

Модель другого порядку:

$$Y = b_0 - b_1 \times X_1 + b_2 \times X_2 + b_{11} \times X_1^2 - b_1^2 \times X_1 X_2 - b_2^2 \times X_2^2. \quad (2.11)$$

Регресійно-кореляційний аналіз результатів експериментальних досліджень конструкцій дорожніх одягів, посилених геограткою ТХ 150

З метою кількісної оцінки впливу основних факторів на деформаційні характеристики нежорстких дорожніх одягів, посилених геограткою типу ТХ 150, було проведено регресійно-кореляційний аналіз результатів повнофакторного експерименту. Цей етап дослідження мав на меті побудову математичної моделі, що описує функціональний зв'язок між вихідним параметром (відгуком) та керованими факторами впливу, а також перевірку адекватності побудованої моделі шляхом статистичного аналізу.

Метою аналізу було визначення аналітичного виразу залежності вигляду:

Вибір цих факторів ґрунтувався на попередньому теоретичному аналізі, результатах лабораторних і натурних штампових випробувань, а також на даних з технічної літератури та нормативно-технічних документів.

Оскільки у дослідженні було реалізовано повнофакторний експеримент із заздалегідь визначеними рівнями варіювання факторів, було отримано повний набір експериментальних спостережень, що дозволяє: обчислити всі головні ефекти кожного фактора окремо; визначити двохфакторні взаємодії, що показують, як зміна одного фактора впливає на результат залежно від рівня іншого; побудувати регресійну модель другого порядку, яка здатна врахувати як лінійні, так і квадратичні ефекти факторів.

Перевірка адекватності моделі

Після побудови регресійного рівняння було проведено комплексну оцінку його адекватності, яка включала:

розрахунок коефіцієнта детермінації, що показує ступінь поясненої варіації результату моделлю;

дисперсійний аналіз для перевірки статистичної значущості моделі та окремих коефіцієнтів;

оцінку залишків моделі для виявлення можливих систематичних похибок або нелінійних ефектів, не врахованих рівнянням.

Отримані результати показали, що модель другого порядку адекватно описує експериментальні дані.

Побудоване регресійне рівняння дозволяє не лише прогнозувати величину коефіцієнта підсилення для заданих параметрів конструкції, але й виконувати оптимізацію конструктивних рішень дорожнього одягу, підбираючи найбільш ефективну комбінацію глибини закладання георатки та характеристик матеріалів.

Оцінені ефекти впливу факторів і їх взаємодій на відгук Y наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Зведення результатів експериментальних досліджень

№ п.п	Ефекти та взаємодії	Значення ефектів та взаємодій	С тандартна помилка
1	Середнє число	1,59037	+/- 0,0499878
2	X_1	-2,15	+/- 0,0547589
3	X_2	0,154444	+/- 0,0547589
4	X_1^2	1,38556	+/- 0,0948452
5	X_1X_2	-0,188333	+/- 0,0670657
6	X_2^2	-0,401111	+/- 0,0948452

Стандартизована діаграма Парето – це графічний метод аналізу результатів експериментів, який використовується для виявлення найзначущіших факторів впливу на досліджуваний відгук. Вона є модифікацією класичної діаграми Парето та поєднує принципи правила Парето (80/20) з методами статистичної обробки даних.

Основне призначення стандартизованої діаграми Парето: виявлення факторів, що роблять найбільший внесок у варіацію вихідного параметра; відокремлення статистично значущих впливів від несуттєвих; визначення напрямків подальшої оптимізації досліджуваної системи.

Стандартизований ефект – це безрозмірна величина, яка характеризує вплив певного фактора на відгук з урахуванням дисперсії похибок. Обчислюється як відношення оціненого коефіцієнта ефекту до його стандартної похибки. Таким чином, стандартизований ефект є по суті t-статистикою, що використовується для перевірки статистичної значущості фактора.

Процес побудови включає такі етапи:

Проведення експерименту – збір даних згідно з планом (повнофакторний експеримент).

Розрахунок коефіцієнтів регресії для кожного фактора та взаємодії факторів.

Обчислення стандартизованих ефектів.

Побудова діаграми – фактори розташовуються у порядку спадання величини їх стандартизованого ефекту.

Нанесення критичної лінії, що відповідає критичному значенню t-розподілу при обраному рівні значущості. Стовпчики, що перевищують цю лінію, відповідають факторам зі статистично значущим впливом.

Парето-карта – це візуальне поєднання діаграми Парето та кумулятивної кривої впливів факторів. Ліва вісь Y показує величини стандартизованих ефектів. Права вісь Y використовується для побудови накопичувальної частки сумарного впливу факторів. Вертикальні стовпчики розташовані в порядку спадання ефектів, а поверх них прокладена лінія накопичення.

Цей інструмент дозволяє швидко оцінити, який мінімальний набір факторів забезпечує основну частку впливу на відгук (зазвичай 80 %).

Науково-практичне значення

У контексті дослідження конструкцій дорожнього одягу, посилених георатками, стандартизована діаграма Парето є ефективним інструментом для: ідентифікації найбільш впливових конструктивних параметрів (наприклад, глибина закладання георатки, тип георатки, співвідношення модулів пружності); виключення несуттєвих факторів з подальшого моделювання; підвищення точності та спрощення математичної моделі.

Графіки головних ефектів і нормальності також підтверджують цей висновок (рис. 2.21, 2.22).

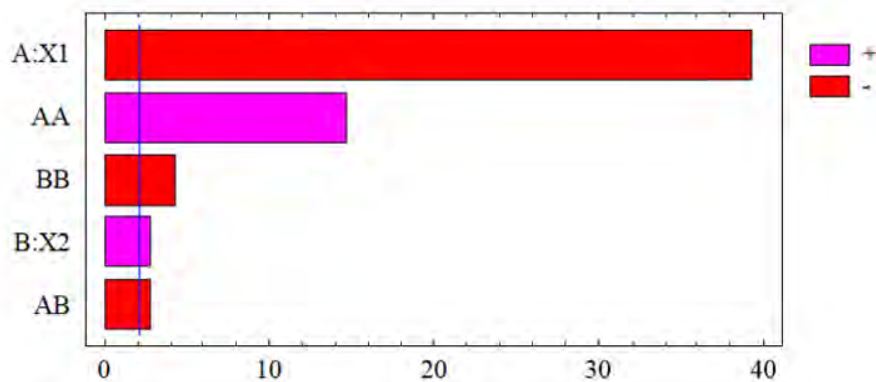


Рисунок 2.21 – Парето-карта. Стандартизований ефект

Парето-карта показує, що відношення модулів деформації ґрунту і модуль пружності щебеневого шару (X_1), їх взаємодія (X_1^2) а також взаємодія відносної глибини закладення георатки (X_2^2) мають статистично значущі ефекти, що підтверджується фактом перетину відповідних стовпців з вертикальною лінією, що представляє 95% довірчий рівень.

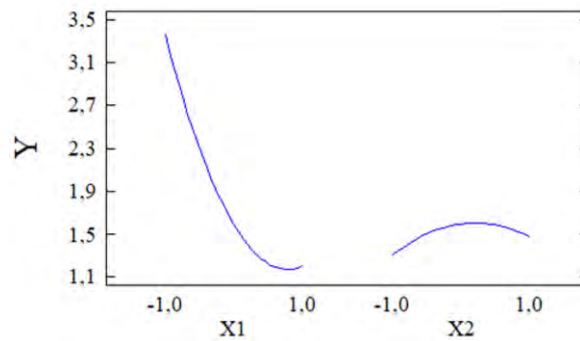


Рисунок 2.22 – Головні ефекти

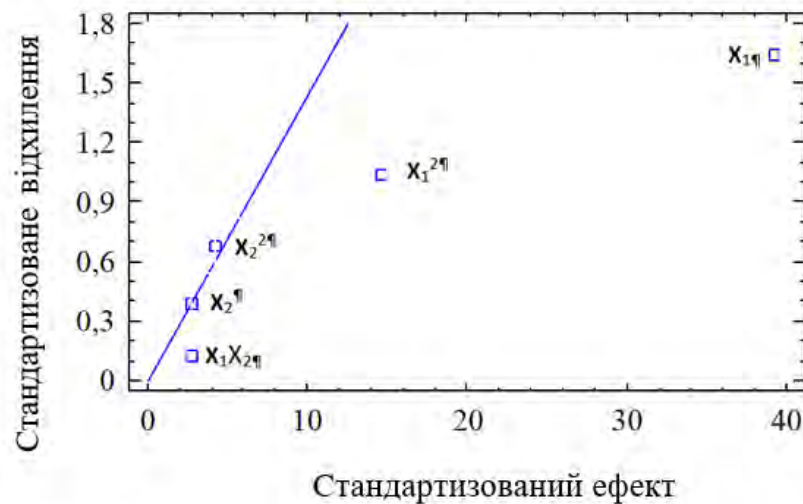


Рисунок 2.23 – Графік ефектів для нормального розподілу імовірностей

Фактори X_1 , X_1^2 , а також взаємодія X_1X_2 сильно відхиляються від лінії нормального розподілу, що свідчить про їх більш сильному впливі на цільовий параметр.

Для перевірки адекватності обраної моделі, був проведений дисперсійний аналіз (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 – Дисперсійний аналіз

Фактори і взаємодії	Сума квадратів	Ступінь свободи	Середній квадрат	F-відношення	P-значення
X_1	20,8013	1	20,8013	1541,58	0,0000
X_2	0,107339	1	0,107339	7,95	0,0102
X_1^2	2,87965	1	2,87965	213,41	0,0000
X_1X_2	0,106408	1	0,106408	7,89	0,0105
X_2^2	0,241335	1	0,241335	17,89	0,0004
Повна помилка	0,283362	21	0,0134934		
Повна поправка	24,4193	26			

Для побудови регресійного рівняння (2.11) були обчислені коефіцієнти рівняння регресії (табл. 2.8), і побудовані графіки відгуку (рис. 2.23)

Таблиця 2.8 – Коефіцієнти регресійного рівняння

№ п.п	Фактори	Значення коефіцієнтів
1	Const (b_0)	1,59037
2	X_1	- 1,075
3	X_2	0,0772222
4	X_1^2	0,692778
5	X_1X_2	-0,0941667
6	X_1X_2	- 0,200556

Регресійне рівняння:

$$Y = 1,59037 - 1,075 \times X_1 + 0,0772222 \times X_2 + 0,692778 \times X_1^2 - 0,0941667 \times X_1X_2 - 0,200556 \times X_2^2 . \quad (2.11)$$

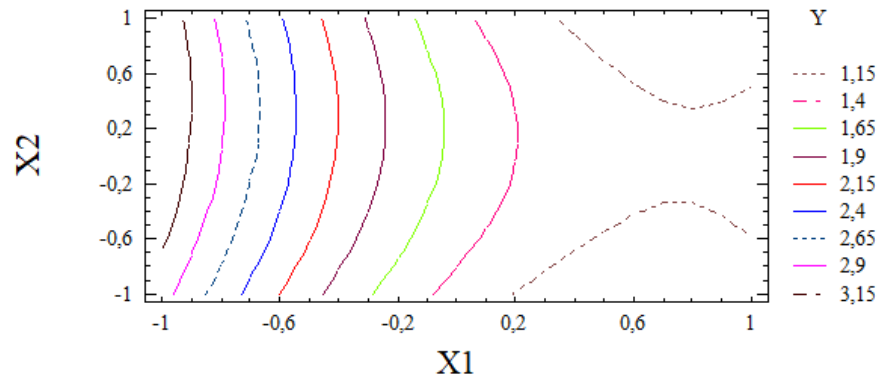


Рисунок 2.24 – Поверхня відгуку

Отримані після розкодування значення Y представлені в табл. 2.9 і співставлені з експериментально отриманими даними.

Таблиця 2.9 – Оцінки для передбачення значень коефіцієнта посилення

№ п/п	Значення що спостерігається	Передбачене середнє значення	Передбачене значення на нижньому рівні (95% рівень довіри)	Передбачене значення на верхньому рівні (95% рівень довіри)
1	2,87	2,9862	2,86102	3,11138
2	1,38	1,31259	1,20864	1,41655
3	1,07	1,02454	0,899358	1,14972
4	3,56	3,35815	3,25419	3,4621
5	1,54	1,59037	1,48641	1,69433
6	1,07	1,20815	1,10419	1,3121
7	3,25	3,32898	3,2038	3,45416
8	1,46	1,46704	1,36308	1,57099
9	1,08	1	0,865469	1,11583

Як зазначено в табл. 2.9 передбачені і розрахункові значення мають між собою хорошу збіжність, що дає можливість вважати регресійні рівняння адекватним.

Максимальна передбачене значення для Y становить $3,8 \div 3,4$ і відповідає значенням факторів $X_1 = -1, X_2 = 0,2 \div 0,427$, що при розкодування складе:

$$\left(\frac{E_{zp}}{E_{\partial o}}\right) = 0,038,$$

$$\left(\frac{h_{\partial o}}{D}\right) = 0,572 \div 0,63.$$

Таким чином, оптимум (максимальне значення $K_{\text{пос}} = \frac{E_{\text{екв.пос}}}{E_{\text{екв}}}$) для посиленої конструкції становить:

$$\left(\frac{E_{zp}}{E_{\partial o}}\right) = 0,038, \quad (2.12)$$

де $E_{zp} = 5$ МПа;

$$E_{\partial o} = 130 \text{ МПа}$$

$$\left(\frac{h_{\partial o}}{D}\right) = 0,57 \div 0,63, \quad (2.13)$$

де $h_{\partial o} = 22 \div 24$ см,

$$D = 30,00 \text{ см}$$

В процесі аналізу результатів проведених випробувань посилених дорожніх конструкцій встановлений характер їх роботи конструкцій. Для конструкцій, посилених геогратками ТХ 160 та ТХ 170, характер роботи залишився таким же, як і при посиленні геограткою ТХ 150. Змінилася тільки кількісна картина. Отримані в дослідях значення еквівалентних модулів пружності наведені в табл. 2.10.

На рис. 2.25 наведено порівняльний графік збільшення еквівалентного модуля пружності конструкцій дорожніх одягів, посилених геогратками ТХ 150, ТХ 160, ТХ 170 на ґрунтах з модулями деформації від 5 до 60 МПа при $h_{\text{до}}/D = 0,57$.

Як видно з рисунку 2.25 функціональна залежність $K_{\text{пос}}$ від факторів $\left(\frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}}\right)$ та $\left(\frac{h_{\text{до}}}{D}\right)$ залишилася незмінною. Отже, для побудови регресійних рівнянь справедливих для аналізованих конструкцій, можна скористатися рівнянням (2.14), справедливим для конструкції, посиленої геограткою ТХ 150.

Таблиця 2.10 – Порівняльні дані конструкцій, посилені геогратками ТХ 160, Тх 170 і традиційних (непосилених) конструкцій за еквівалентним модулем пружності

Тип геогратки	Відношення модуля деформації ґрунтової основи до модуля пружності щебеневого шару $\frac{E_{gp}}{E_{до}}$	Відносна глибина закладення геогратки $\lambda = h_{од}/D$	$E_{екв.пос.},$ МПа	$K_{пос} = \frac{E_{екв.пос}}{E_{екв}}$
ТХ 160	0,038	0,57	61,8	61,8/15,9=3,89
	0,259	0,57	95,0	95,0/57,0=1,67
	0,48	0,57	105,0	105,0/83,6=1,26
ТХ 170	0,038	0,57	64,6	64,6/15,9=4,05
	0,259	0,57	116,0	116,0/57,0=2,03
	0,48	0,57	131,0	131/83,6=1,57

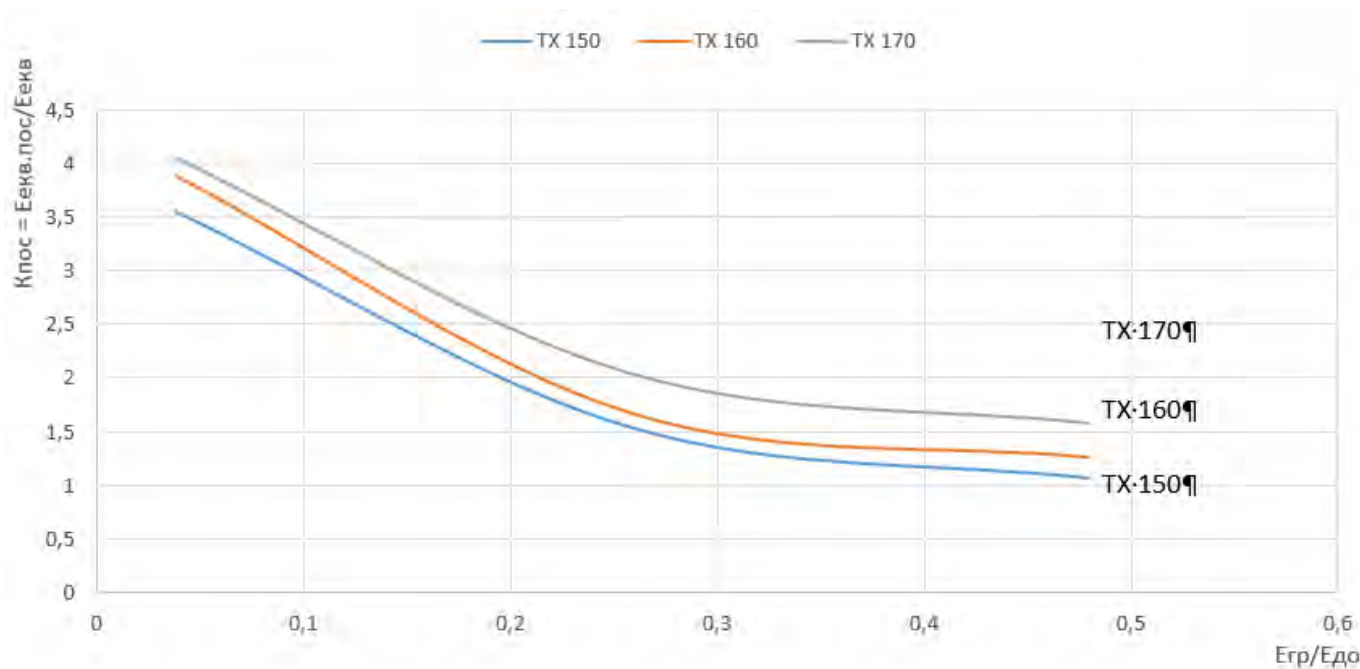


Рисунок 2.25 – Коефіцієнти посилення ($K_{пос}$) при $h_{до}/D = 0,57$

Так для конструкцій дорожніх одягів, посилених геограткою ТХ 160 буде справедлива залежність:

$$Y = 1,94 - 1,075 \times X_1 + 0,0772222 \times X_2 + 0,692778 \times X_1^2 - 0,0941667 \times X_1 X_2 - 0,200556 \times X_2^2. \quad (2.14)$$

Для конструкцій дорожніх одягів, посилених геограткою ТХ 170 буде справедлива залежність:

$$Y = 2,3 - 1,075 \times X_1 + 0,0772222 \times X_2 + 0,692778 \times X_1^2 - 0,0941667 \times X_1 X_2 - 0,200556 \times X_2^2. \quad (2.15)$$

Таблиця 2.11 – Порівняльні дані конструкцій, посилених геогратками ТХ 160, ТХ 170 і традиційних (непосилених) конструкцій по еквівалентному модулю пружності визначений експериментальним і теоретичним шляхом.

Тип геогратки	Відношення модуля деформації ґрунтової основи до модуля пружності щебеневого шару $\frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}}$	Відносна глибина закладення геогратки $\lambda = h_{\text{до}}/D$	$E_{\text{екв.пос.}},$ МПа	$K_{\text{пос}} = \frac{E_{\text{екв.пос}}}{E_{\text{екв}}}$ експериментальний	$K_{\text{пос}}$ теоретичний
ТХ 160	0,251	0,57	51,0	51/28 = 1,82	1,85
ТХ 170	0,092	0,57	61,0	61/28 = 2,18	2,2

Як видно з порівняльної таблиці 2.11 розрахункові значення коефіцієнтів посилення $K_{\text{пос}}$ і коефіцієнтів отриманих емпіричним шляхом мають в даному випадку добру збіжність, що підтверджує правильність обраних моделей.

2.5.2 Виявлення факторів, що супроводжують посилення конструкцій дорожніх одягів етап № 2.

Вплив типу геогратки на форму чаші прогину на ґрунтовій основі

Для виявлення кількісної картини впливу типу геогратки на форму чаші прогину, було проведено ряд експериментів.

Під час виконання експериментів на геогратку відсипали шар щебеню. Для визначення осідань конструкції з геограткою, брали відлік за прогиноміром.

На рис. 2.26 - 2.29 наведені графіки утворення чаші прогину в залежності від величини тиску, що прикладається.

На основі експериментальних дослідження, форми чаші прогину для аналізованих типів геограток змінюються в залежності від їх деформативних і міцнісних характеристик. У табл. 2.12 зведені результати за виникненням чаші прогину для трьох типів геограток при чотирьох ступенях навантаження.

Метою даного етапу досліджень було встановлення закономірностей зміни геометрії чаші прогину дорожніх конструкцій залежно від типу застосованої геогратки. Це дозволяє не лише кількісно оцінити вплив елементів посилення на розподіл навантаження в конструкції, але й виявити оптимальні характеристики геосинтетичних матеріалів для конкретних умов експлуатації.

Основними завданнями були: проведення експериментів з різними типами геограток; вимірювання осідань конструкцій при різних рівнях навантаження; визначення зміни форми чаші прогину залежно від типу геограток; побудова залежностей між величиною прикладеного тиску та параметрами чаші прогину.

Дослідження виконувалося у вигляді серії польових випробувань, у ході яких модельні ділянки дорожнього одягу влаштовувалися з використанням трьох типів геограток – TX 150, TX 160 та TX 170. Конструкції формувалися таким чином:

1. На підготовлену ґрунтову основу укладали геогратку відповідного типу.
2. Поверх геогратки відсипався та ущільнювався шар щебеню заданої товщини, що імітував конструктивний шар дорожнього одягу.
3. Навантаження на дослідний зразок створювалося за допомогою штампа, який передавав на конструкцію вертикальний тиск у кілька етапів.

Для фіксації вертикальних переміщень у різних точках конструкції використовувався прогиномір, що забезпечував високу точність вимірювань.

У процесі досліджень були отримані дані про залежність форми чаші прогину від величини прикладеного тиску. Ці залежності наведено на графіках (рис. 2.26–2.29). Для кожного типу геогратки спостерігалася характерна форма прогину, що пояснюється відмінностями у їх деформативних і міцнісних характеристиках.

Геогратка TX 150 забезпечувала відносно рівномірний розподіл деформацій у межах досліджуваної площі.

Геогратка TX 160 показала кращу здатність до обмеження локальних деформацій у центральній частині чаші прогину, що вказує на вищу згинальну жорсткість та ефективність у перерозподілі навантаження.

Геогратка TX 170 виявила найбільшу стійкість до формування глибокої чаші прогину навіть при максимальних навантаженнях, що обумовлено її підвищеною міцністю та жорсткістю.

Аналіз експериментальних даних дозволив встановити, що:

Форма чаші прогину змінюється пропорційно жорсткості геогратки: зі збільшенням міцності та модулю пружності посиленого шару глибина прогину зменшується, а зона розподілу навантаження розширюється.

При застосуванні більш жорстких типів геораток відбувається збільшення кута розподілу тиску, що забезпечує зниження концентрації напружень у центральній частині конструкції.

Встановлено, що навіть при однаковій товщині шару щебеню ефективність посилення значною мірою визначається співвідношенням деформативних характеристик георатки та ґрунтової основи.

Як видно з табл. 2.12 приріст осідань під штампом і утворення чаші прогину (за ступенями навантаження) інтенсивніше відбувається у георатці ТХ 150. У конструкціях, з георатками ТХ 160 та ТХ 170 аналогічних результатів можна досягти тільки на наступному рівні навантаження, до третього ступеня включно.

Результати проведеного експерименту засвідчують що для порівняння розподіляючої здатності геораток величину чаші прогину необхідно визначати при однакових осіданнях для всіх конструкцій, посиленіх різними типами геораток.

Таблиця 2.12 – виникнення чаші прогину на ґрунтовій основі, посиленій георатками ТХ 150, ТХ 160, ТХ 170 за ступенями навантаження.

Тип георатки	ТХ 150	ТХ 160	ТХ 170	ТХ 150	ТХ 160	ТХ 170	ТХ 150	ТХ 160	ТХ 170	ТХ 150	ТХ 160	ТХ 170
Ступінь навантаження	I			II			III			IV		
Тиск під штампом, МПа	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4,3	4,3	4,3
Абсолютная осадка під штампом, мм	5	1	2	17	5	7	32	17	17	51	39	35
Радіус розподілу осадки на ґрунтову основу, см	8	4	8	14	8	10	20	14	12	45	20	18

Кути розподілу напружень у випробуваній конструкції (для кожного типу георіграток) визначалися при однакових осіданнях.

Для досягнення рівності осідання конструкцій, які посилені різними типами георіграток, варіювалася кількість прикладання навантаження. Навантаження на штамп прикладалися циклічно, із забезпеченням зростання тиску під штампом від 0 до 0,6 МПа за 60 секунд і моментальним розвантаженням. Експеримент вважався закінченим при досягненні осідання під штампом 6 см. Для цього показання прогиномірів фіксувалися фотофіксацією і після 10 циклів навантаження і розвантаження знімався контрольний відлік. Після цього конструкція розбиралася і за відбитком на ґрунтовій основі вимірювалася чаша прогину, а по ній обчислювався кут розподілу тиску.

Випробування дорожніх конструкцій, посилені георігратками ТХ 150, ТХ 160, ТХ 170 проводилися при $\left(\frac{h_{до}}{D}\right) = 0,52$ і $\left(\frac{E_{зр}}{E_{до}}\right) = 0,12$.

В експерименті застосовувався штамп діаметром 300 мм, щебінь фракції 20 - 40 мм, пісок середньої крупності.

На рис. 2.26 – 2.29 наведені форми чаші прогину і кути розподілу тиску випробовуваних конструкцій.

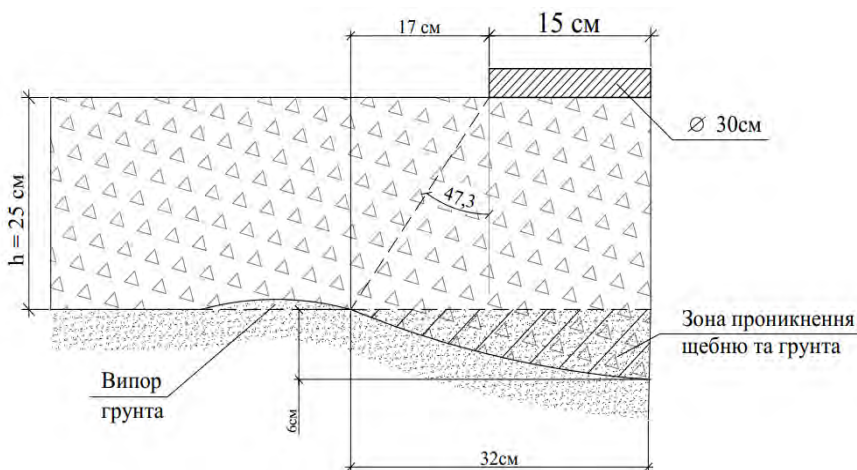


Рисунок 2.26 – Зона розподілу тиску від штампа на основу дорожнього одягу (традиційна конструкція)

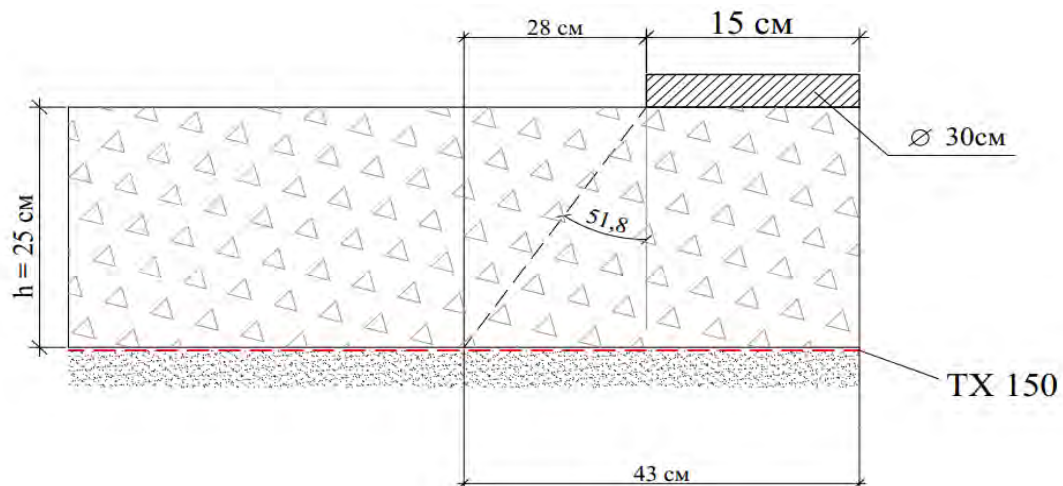


Рисунок 2.27 – Зона розподілу тиску від штампа на основу дорожнього одягу (конструкція посилена геораткою TX 150)

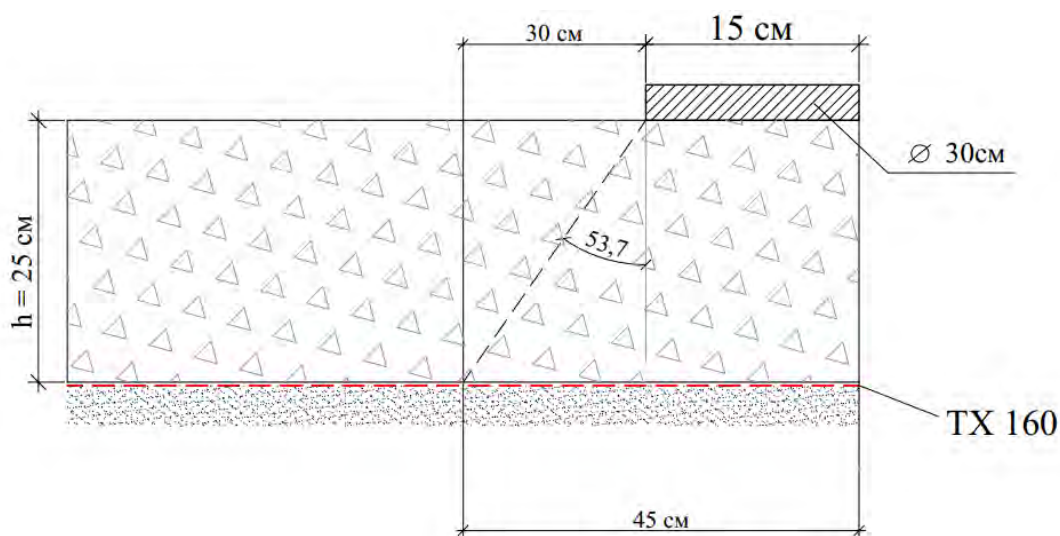


Рисунок 2.28 – Зона розподілу тиску від штампа на основу дорожнього одягу (конструкція посилена геораткою TX 160)

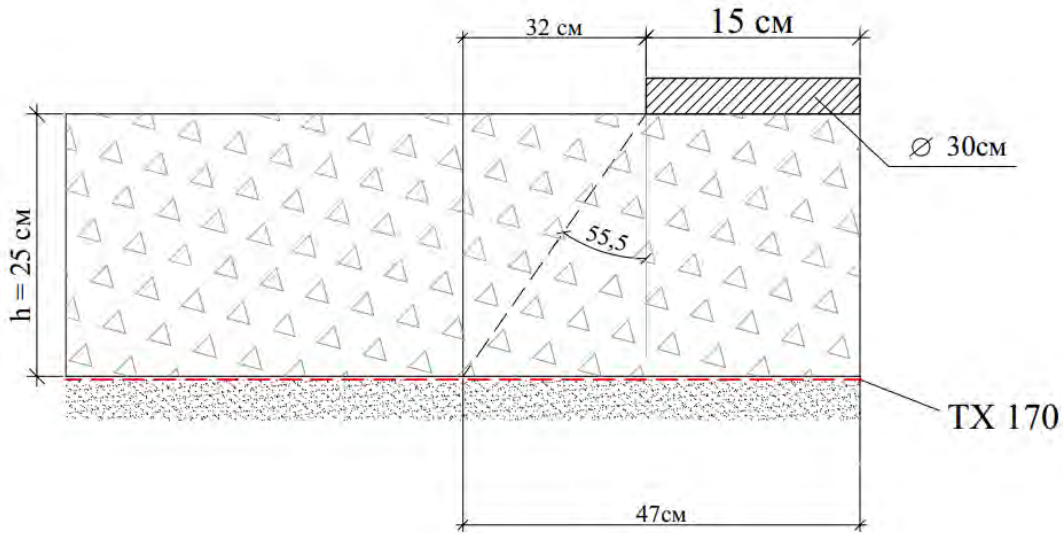


Рисунок 2.29 – Зона розподілу тиску від штампа на основу дорожнього одягу (конструкція посилена геораткою TX 170)

Розбирання конструкцій після випробувань показало, що включення в конструкцію дорожнього одягу геораток призводить до значного збільшення чаші прогину на ґрунтовій основі (більше 2 діаметрів штампа), що свідчить про значний перерозподіл тисків на ґрунтову основу. Безпосередньо це можна інтерпретувати як поява нового шару, що володіє згинальною жорсткістю. Цей шар утворюється при спільній роботі щебеню і георатки, перешкоджає випору ґрунту і володіє новими, власними фізико-механічними характеристиками.

На основі проведених експериментів зроблено висновок, що включення в конструкцію дорожнього одягу геораток збільшує кут розподілу тиску під штампом на ґрунтову основу. Так кут розподілу тиску для традиційної конструкції становить 47° , тоді як у конструкції, посиленої геораткою TX 170 він відповідає - 55° . Відповідно відбувається збільшення чаші прогину під штампом з $R = 32$ см (у традиційної конструкції) до $R = 47$ см (конструкція посилена геораткою TX 170), тобто збільшує радіус чаші прогину більш, ніж в 1,5 рази.

Крім цього, під час проведення експерименту (в момент розвантаження), візуально спостерігалось моментальне відновлення деформацій посилених конструкцій, що підтверджувалося відліком прогиноміра.

Проте на ґрунтовій основі спостерігалось накопичення залишкових деформацій. Це явище, вказує на те, що практично тільки еквівалентна конструкція, щебінь, посилений геограткою, працювала в пружній стадії (за рахунок міцних властивостей геогратки, сил тертя і зчеплення щебеневого шару з геограткою).

Висновки до розділу 2

У результаті проведених серій експериментальних досліджень з вивчення роботи нежорстких дорожніх одягів, посилених геогратками, встановлено такі науково-практичні положення:

1. Доведено ефективність посилення конструкцій дорожніх одягів за допомогою геограток, що підтверджується зростанням еквівалентного модуля пружності дорожнього одягу у межах від 1,07 до 4,1 раз залежно від типу геогратки та деформативних характеристик ґрунтової основи.
2. Встановлено залежність ефективності посилення від співвідношення деформативних характеристик дорожнього одягу та ґрунтів основи ($\frac{E_{gp}}{E_{\partial o}}$), а також від відносної глибини закладання геогратки ($\frac{h_{до}}{D}$). При цьому більшому значенню відношення ($\frac{E_{gp}}{E_{\partial o}}$) відповідає менша оптимальна глибина закладання геогратки.
3. Обґрунтовано закономірність впливу глибини розташування геогратки в щебеновому шарі на ефективність конструкції: оптимальна глибина закладання визначається комплексом параметрів системи «дорожній одяг – ґрунт основи» і має зворотну залежність від жорсткості дорожнього одягу.
4. Встановлено, що ефективність роботи геограток найбільш виражена при значних деформаціях, тобто в умовах слабких ґрунтів основи. Це підтверджує доцільність їх

застосування переважно на проблемних ділянках доріг із низькою несучою здатністю підстиляючих шарів.

5. Експериментально доведено здатність геограток перерозподіляти навантаження на ґрунтову основу: тиск поширюється на площу, що перевищує діаметр штампа у два рази, а кут розподілу напружень зростає у 1,5 рази.

6. Підтверджено, що геогратки практично виключають проникнення щебеневого матеріалу у ґрунтову основу, що сприяє збереженню стабільності структури конструкції дорожнього одягу.

7. За результатами регресійно-кореляційного аналізу отримані рівняння, які описують залежність ефективності посилення дорожніх одягів від основних параметрів системи ($E_{gr}/E_{до}$, $h_{до}/D$). Це дозволяє кількісно оцінювати вплив посилення та використовувати результати для удосконалення методів розрахунку дорожніх конструкцій із геогратками.

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ НЕЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПОСИЛЕНОГО ГЕОГРАТКАМИ БАГАТОВІСНООРІЄНТОВАНИМИ

3.1 Обґрунтування розрахункової схеми та математичної моделі

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено особливості деформування дорожніх одягів традиційної конструкції (без посилення) та конструкцій, посилених геограткою. Це дозволило визначити принципи відмінності у роботі конструктивних шарів під дією транспортних навантажень і сформулювати основні критерії оцінки їх міцності. До таких критеріїв належать:

- величина деформацій, що виникають у конструктивних шарах та ґрунтовій основі;
- рівень напружень, які передаються на ґрунтову основу.

Проведений аналіз дозволив обґрунтувати підхід до оцінки напружено-деформованого стану (НДС) дорожніх конструкцій – як традиційних, так і посилених геогратками – під дією навантаження від транспортних засобів. У межах цього підходу послідовно вводяться низка спрощуючих припущень, що забезпечують можливість побудови аналітичної моделі. Зокрема, розглядається пружна робота шарів у робочому діапазоні навантажень, приймається умова плоскої деформації для локального навантаження з урахуванням задачі симетрії, а також рівномірність розподілу тиску між колесом і поверхнею дорожнього одягу.

На основі таких припущень встановлюються зв'язки між прикладеним тиском і напруженнями на різних глибинах конструкції. Далі ці залежності трансформуються у вирази для визначення деформацій та величини осідань. За основні критерії перевірки прийнято: допустимі значення напружень у ґрунтовій основі, зсувостійкість шарів, втому шару та граничні значення осідань. Це дозволяє проводити комплексну оцінку працездатності дорожнього одягу з урахуванням реальних умов експлуатації.

У межах підходу запропоновано алгоритм підбору розрахункової товщини конструктивних шарів із урахуванням наявності або відсутності посилення геогратками. Такий алгоритм передбачає оцінку ефекту посилення через співставлення напружено-деформованого стану традиційної та посиленої конструкції за однакових умов навантаження.

На розрахунковій схемі (рис. 3.1) представлено зовнішнє навантаження від колеса транспортного засобу, яке моделюється як еквівалентний відбиток пневматика на поверхні дорожнього одягу. Схема відображає геометрію та послідовність розташування шарів конструкції дорожнього одягу з урахуванням їх механічних характеристик. Також визначені характерні глибини, на яких проводиться оцінка розподілу напружень і деформацій у товщі конструкції.

Таким чином, побудована розрахункова схема дозволяє встановити кількісні залежності між зовнішнім тиском і внутрішнім напружено-деформованим станом дорожнього одягу. Це створює підґрунтя для формування практичної інженерної методики, яка може бути використана для проєктування дорожніх конструкцій як традиційного типу, так і з урахуванням ефекту посилення за допомогою геограток. Запропонований підхід має прикладне значення, оскільки дозволяє одночасно забезпечити дотримання критеріїв міцності та довговічності та оптимізувати конструктивні рішення шляхом зменшення товщини шарів при збереженні необхідного рівня надійності.

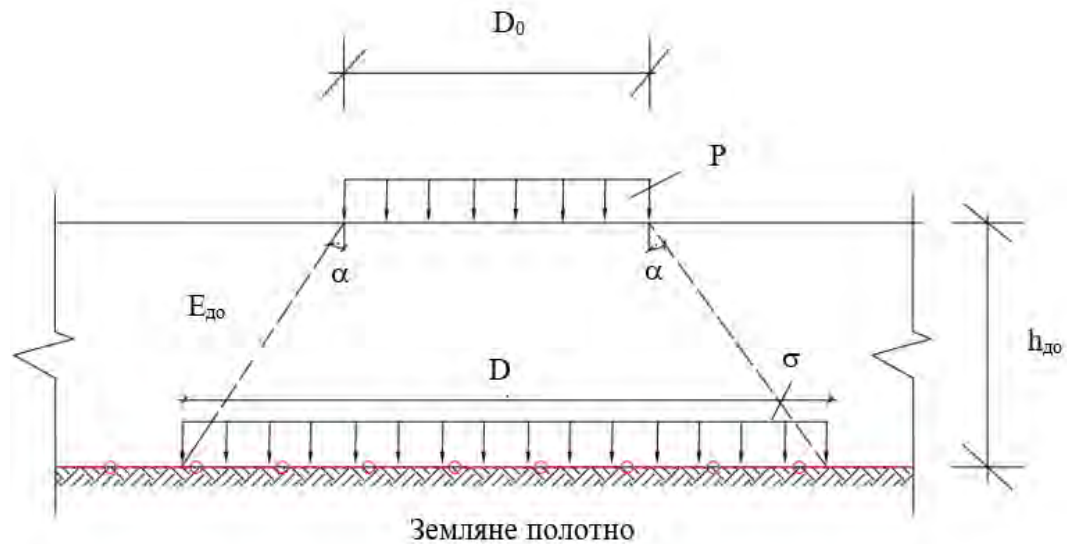


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема дорожнього одягу

D_0 – діаметр відбитка пневматика, см; D – діаметр відбитка пневматика з урахуванням розподільчої здатності на покриття, см; P – тиск на покриття від пневматика, МПа; σ – тиск на поверхні підстилаючого ґрунту, МПа; $h_{до}$ – товщина дорожнього одягу, см; α – кут розподілу тиску; $E_{до}$ – модуль пружності дорожнього одягу, МПа; $E_{гр}$ – модуль деформації ґрунту (земляного полотна), МПа.

При дії пневматики автомобіля з тиском на покриття P_0 , дорожній одяг і ґрунт деформуються, причому передбачається, що напруження, які виникають, змінюються по глибині відповідно до залежності [67]:

$$\sigma_z = P_0 f(z), \quad (3.1)$$

де σ_z – напруження на певній глибині конструкції, МПа;

P_0 – питомий тиск при якому зберігається лінійна залежність між тиском і осадкою (без посилення), МПа;

$f(z)$ – деяка функція зменшення вертикальних напружень з глибиною.

Формула (3.1) описує вертикальні напруження у товщі конструкції як функцію глибини й параметрів навантаження. Вона коректна за умов пружної роботи матеріалів шарів і відсутності суттєвих пластичних деформацій у зоні, що розглядається. Отриманий розподіл відображає передачу навантаження у глибину та

слугує базою для переходу до деформацій і розрахунку осідання. У подальшому параметри затухання уточнюються емпірично.

Далі виконується перехід від напружень до деформацій з інтегруванням по товщині шарів. Такий підхід дозволяє послідовно врахувати відмінності в жорсткості матеріалів та їхній внесок у сумарне осідання, про це свідчать вирази (3.2) та (3.3).

Вертикальні переміщення елементів конструкції дорожнього одягу під дією навантаження можуть бути визначені на основі співвідношення між прикладеним тиском, деформативними властивостями матеріалу та функцією розподілу напружень за глибиною. Для елементарного шару товщиною dz зміна величини вертикального переміщення dS описується виразом:

$$dS = \frac{p_0 f(z) dz}{E} \quad (3.2)$$

де dS – зміна величини вертикального переміщення, мм;

E – модуль пружності шару, МПа.

Загальне вертикальне осідання конструкції дорожнього одягу можна подати як суму деформацій, що виникають у межах конструктивного шару дорожнього одягу та у ґрунті основи.

$$S = \frac{p_0}{E_{до}} \int_0^h f(z) dz + \frac{p_0}{E_{гр}} \int_h^\infty f(z) dz; \quad (3.3)$$

де h – товщина щєбеневого шару дорожнього одягу, см;

S – осідання шару, мм;

$E_{до}$ – модуль пружності дорожнього одягу, МПа;

$E_{гр}$ – модуль деформації ґрунту (земляного полотна), МПа.

Таким чином, вираз (3.3) відображає суперпозицію деформацій двох елементів системи «дорожній одяг – ґрунт основи». Він дозволяє кількісно оцінити внесок

кожного з них у загальну деформацію та визначити, яка частина осідань формується у межах верхніх конструктивних шарів, а яка – у ґрунтовій основі. Це має суттєве значення для оцінки працездатності дорожніх конструкцій, оскільки дає змогу обґрунтувати вибір товщини та жорсткісних характеристик дорожнього одягу з урахуванням фактичного впливу ґрунтових умов.

В результаті обробки багатьох чисельних експериментів М. Якунін отримав значення функції $f(z)$:

$$f(z) = \frac{1}{1 + a\left(\frac{z}{D_0}\right)^2}, \quad (3.4)$$

де D_0 – діаметр відбитка пневматика, см;

z – справжня глибина розглянутої точки від поверхні дорожнього одягу, мм;

a – коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних характеристик шарів і умов на їх контакт.

Залежність (3.4) уточнює форму функції затухання напружень із глибиною через параметр, що підбирається за відомими даними. Така ідентифікація параметрів робить модель чутливою до фактичної побудови конструкції й діапазону навантажень, не виходячи за межі прийнятих пружних припущень. Вона використовується далі для стабільного узгодження розрахунку напружень та осідань.

Якщо прийняти умову, що матеріали працюють в пружній стадії деформування, і розглядати шари дорожнього одягу і замінюючий її шар ґрунту, як «балки» рівної ширини і довжини, що лежать на ґрунтовій основі, то при рівній жорсткості прогини цих «балок» дорівнюватимуть один одному (метод еквівалентного шару), тобто

Вводиться концепція еквівалентного модуля пружності, що дозволяє компактно описати спільну роботу багатошарової системи. Умови (3.5)–(3.7) визначають межі, в яких таке узагальнення не спотворює розподіли напружень і залишається фізично

коректним. Ці співвідношення потрібні для подальших спрощень і розрахункових формул на осідання.

$$E_{до} I_{до} = E_{гр} I_{гр}, \quad (3.5)$$

де $I_{до}$ $I_{гр}$ – відповідні моменти інерції.

Підставляючи значення моментів інерції (з поправкою на пластичний характер деформування), еквівалентна товщина шару ґрунту ($h_{екв.гр.}$) визначається за формулою (3.6):

$$h_{екв.гр.} = h_{до} \sqrt[2,5]{\frac{E_{до}}{E_{гр}}}, \quad (3.6)$$

де, $h_{екв.гр.}$ – еквівалентна товщина шару ґрунту, см.

Формула (3.6) справедлива, якщо виконується умова:

$$\frac{E_{до}}{E_{гр}} \leq 35. \quad (3.7)$$

Підставивши вираз (3.4) в залежність (3.1) отримаємо:

$$\Sigma_z = \frac{P}{1 + a \left(\frac{z_{екв}}{D_0} \right)^2}, \quad (3.8)$$

де Σ_z – сумарне вертикальне напруження, МПа;

$z_{екв}$ – еквівалентна глибина розглянутої точки при заміні дорожнього одягу еквівалентним шаром ґрунту, мм.

Для визначення ($z_{екв}$) можна прийняти вираз (3.9) [67]:

$$z_{екв} = z + h_{екв} - h_{до}. \quad (3.9)$$

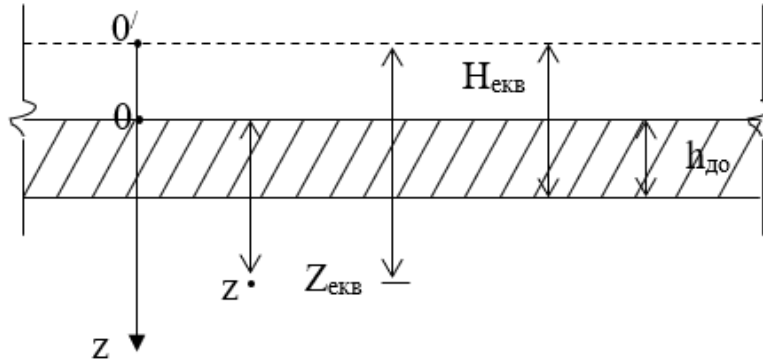


Рисунок 3.2 – Схема для визначення границь інтегрування

$$z + h_{\text{екв}} - h = z + h_{\text{до}} \sqrt[2.5]{\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}}} - h_{\text{до}} = z + h_{\text{до}} \left(\sqrt[2.5]{\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}}} - 1 \right). \quad (3.10)$$

Позначимо

$$n = \sqrt[2.5]{\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}}}. \quad (3.11)$$

Тоді
$$z_{\text{екв}} = z + h_{\text{до}}(n - 1). \quad (3.12)$$

У формулах (3.8)–(3.12) показано послідовність підстановок, вибір меж інтегрування для кожного шару та отримання компактних виразів на сумарні напруження та деформації. Цей блок пов’язує початкову схему навантаження з практично застосованими формулами.

Підставивши в рівняння загальної осадки одношарового дорожнього одягу (3.3) замість $f(z)$ значення (3.4) отримаємо вираз для розрахунку величини осідання (3.13):

$$S = S_{\text{до}} + S_{\text{зр}} = P_o \left[\frac{1}{E_{\text{до}}} \int_0^h \frac{dz}{1 + a \frac{z E_{\text{до}}^2}{D_o^2}} + \frac{1}{E_{\text{зр}}} \int_0^\infty \frac{dz}{1 + a \frac{z E_{\text{зр}}^2}{D_o^2}} \right], \quad (3.13)$$

де $S_{до}$ – осідання дорожнього одягу, мм;

$S_{гр}$ – осідання ґрунтової основи, мм;

$z_{E_{до}}$ – приймаємо рівним $z + h_{до} (n - 1)$ оскільки деформація шарів покриття становить порівняно незначну частку від загальної деформації дорожньої конструкції, мм. Після інтегрування і підстановки границь для одношарового одягу маємо:

$$S = \frac{p_0 D_0}{E_{гр}} \left[\frac{\pi}{2} - \left(1 - \frac{1}{\sqrt[2,5]{\left(\frac{E_{до}}{E_{гр}}\right)^{3,5}}} \right) \arctg \left(\frac{h_{до}}{D_0} \sqrt[2,5]{\frac{E_{до}}{E_{гр}}} \right) \right]. \quad (3.14)$$

Тоді для однорідної системи з модулем деформації $E_{екв}$ величину S можна визначити, прийнявши $h_{до} = 0$ [52].

Тоді з формули (3.14),

$$S = \frac{\pi p_0 D_0}{2 E_{екв}} \quad (3.15)$$

Підставивши формулу (3.15) у вираз (3.14) виразимо еквівалентний модуль пружності:

$$E_{екв} = \frac{E_{гр}}{1 - \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt[2,5]{\left(\frac{E_{до}}{E_{гр}}\right)^{3,5}}} \arctg \left(\frac{h_{до}}{D_0} \sqrt[2,5]{\frac{E_{до}}{E_{гр}}} \right) \right)}. \quad (3.16)$$

Отримані вирази дозволяють означити еквівалентний модуль, що зручно характеризує жорсткість системи в цілому. Еквівалентний модуль показує, який однорідний шар дав би те саме осідання при такому ж навантаженні. Цей параметр прямо використовується в подальших оцінках товщини конструкції та у порівнянні варіантів традиційних конструкцій та посиленних.

Оскільки під час розрахункового періоду на дорогу впливає певна кількість автомобілів, що приводить до поступового накопичення пластичних деформацій, приймаємо, що еквівалентний модуль пружності конструкції дорожнього одягу при впливі N автомобілів на добу (або за розрахунковий період) повинен бути більше еквівалентного модуля пружності від одиночного статичного навантаження [16] і дорівнює:

$$E_{еквN} = E_{екв}(0,5 + 0,65 \lg \gamma N), \quad (3.17)$$

де $E_{еквN}$ – еквівалентний модуль пружності конструкції при N навантаженню, МПа

N – сумарна перспективна інтенсивність руху розрахункового автомобіля в добу по одній смузі авт.добу;

γ – коефіцієнт, що враховує вплив ширини проїзної частини на повторність прикладання навантажень (при двосмуговому русі $\gamma = 1$, при односмуговому русі $\gamma = 2$).

Подальший аналіз враховує повторюваність навантажень. Це необхідно для коректної оцінки накопичених деформацій та втомних ефектів у покритті. Параметри повторності впливають на вибір розрахункових коефіцієнтів у наступних формулах.

3.2 Методичні принципи визначення коефіцієнта посилення та отримання аналітичної залежності для обчислення еквівалентного модуля пружності

На основі проведених експериментальних досліджень, при посилення дорожніх одягів георатками відбувається збільшення еквівалентного модуля пружності:

$$E_{екв.пос.} = K_{пос} E_{екв}, \quad (3.18)$$

де $K_{\text{пос}}$ – коефіцієнт посилення (величина коефіцієнта залежить від типу геогратки, глибини її залягання і співвідношень деформаційних характеристик ґрунтової основи і вищого шару).

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що при посиленні конструкцій дорожніх одягів геогратками спостерігається зростання еквівалентного модуля пружності щебеневого шару. Коефіцієнти посилення $K_{\text{пос}}$ для різних типів геограток були визначені на основі аналізу даних натурних штампових випробувань шляхом порівняння величин деформацій (осадок), зафіксованих у посилених і непосилених конструкціях, при однакових навантаженнях. Для різних типів геограток коефіцієнт $K_{\text{пос}}$ дорівнює:

Так для різних типів геограток коефіцієнт $K_{\text{пос}}$ дорівнює:

- для геогратки типу Tensar TriAx 150

$$K_{\text{пос}} = 1,59 - 1,075 \times \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} + 0,0772 \times \frac{h_{\text{до}}}{D} + 0,693 \times \left(\frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} \right)^2 - 0,0942 \times \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} \times \frac{h_{\text{до}}}{D} - 0,201 \times \left(\frac{h_{\text{до}}}{D} \right)^2 ; \quad (3.19)$$

- для геогратки типу Tensar TriAx 160

$$K_{\text{пос}} = 1,94 - 1,075 \times \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} + 0,0772 \times \frac{h_{\text{до}}}{D} + 0,693 \times \left(\frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} \right)^2 - 0,0942 \times \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} \times \frac{h_{\text{до}}}{D} - 0,201 \times \left(\frac{h_{\text{до}}}{D} \right)^2 ; \quad (3.20)$$

- для геогратки типу Tensar TriAx 170

$$K_{\text{пос}} = 2,3 - 1,075 \times \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} + 0,0772 \times \frac{h_{\text{до}}}{D} + 0,693 \times \left(\frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} \right)^2 - 0,0942 \times \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}} \times \frac{h_{\text{до}}}{D} - 0,201 \times \left(\frac{h_{\text{до}}}{D} \right)^2 . \quad (3.21)$$

Коефіцієнти, наведені у виразах (3.18)–(3.21), кількісно характеризують ефективність посилення щебеневого шару геограткою та відображають складний комплекс процесів, що відбуваються у конструкції дорожнього одягу. Їх основна роль

полягає у підвищенні ефективної жорсткості посиленого шару та стабілізації зони потенційних зсувних деформацій, які виникають унаслідок дії вертикальних навантажень від транспортних засобів.

Фізично це проявляється у значному зниженні зсувних деформацій завдяки взаємодії гранульованого матеріалу щебеневого шару з жорсткою структурою геогратки. Комірки геогратки створюють своєрідний «каркас» для щебеню, що підвищує його опір зміщенню під дією дотичних напружень. Таким чином, відбувається перерозподіл напружень у шарі: частина вертикального навантаження передається безпосередньо на основу через геогратку, що знижує концентрацію напружень у локальних зонах контакту зерен щебеню з ґрунтом.

Результатом такої взаємодії є підвищення еквівалентного модуля пружності посиленого шару, що свідчить про зростання його деформативної стійкості. З практичної точки зору це означає, що конструкція дорожнього одягу краще протидіє утворенню колій, надмірних осідань та нерівномірних деформацій. Посилення забезпечує стабілізацію конструкції на слабких неоднорідних ґрунтах в основі.

Подальше проєктне використання встановлених коефіцієнтів дозволяє раціонально зменшувати товщину щебеневого шару без втрати його міцнісних характеристик і довговічності. Це є результатом зростання несної здатності посиленої системи, яка при меншій товщині шару забезпечує високий рівень надійності. Такий підхід не лише забезпечує економію матеріалів та скорочення обсягів земляних робіт, але й дозволяє оптимізувати конструктивні рішення дорожнього одягу з урахуванням довготривалих експлуатаційних вимог.

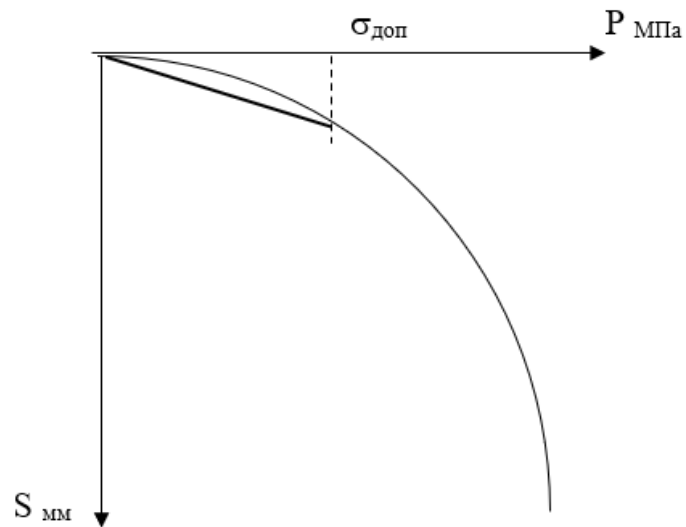


Рисунок 3.3 – Графік залежності осідання (S) від тиску (P)

У процесі аналітичного моделювання напружено-деформованого стану конструкцій дорожніх одягів важливим є визначення величини вертикальних напружень, що передаються на поверхню ґрунтової основи. Відомо, що ці напруження залежать як від прикладеного навантаження P , так і від здатності дорожнього одягу перерозподіляти навантаження між своїми шарами. Якщо у вираз (3.7) замість еквівалентної глибини $z_{\text{екв}}$ підставити залежність (3.6), то для визначення напружень на поверхні підстилаючого ґрунту отримується співвідношення:

$$\sigma_{\text{гр}} = \frac{P}{1 + a \left(\frac{h_{\text{до}}}{D_0} \right)^2 \left(\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}} \right)^{0,8}}, \quad (3.22)$$

де $\sigma_{\text{гр}}$ – напруження на поверхні підстилаючого ґрунту з урахуванням розподіляючої здатності дорожнього одягу.

Отриманий вираз (3.22) свідчить, що величина напружень у ґрунтовій основі зменшується зі зростанням товщини дорожнього одягу $h_{\text{до}}$ жорсткісних характеристик його матеріалів. Водночас відношення $\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}}$ відображає узгодженість

деформативних властивостей шару одягу та основи: чим більша жорсткість дорожнього одягу відносно основи, тим нижчими є напруження, що передаються на ґрунтове середовище.

Для забезпечення працездатності конструкції необхідно виконувати умову міцності основи:

$$\sigma \leq \sigma_{\text{доп}}). \quad (3.23)$$

Таким чином, співвідношення (3.22)–(3.23) дозволяють не лише оцінити напружений стан у ґрунтовій основі, але й встановити необхідну товщину та жорсткісні характеристики конструкції дорожнього одягу для забезпечення надійної експлуатації. Застосування цієї моделі є особливо актуальним при проєктуванні нежорстких дорожніх одягів із використанням геораток, оскільки вона дає змогу враховувати ефект посилення та більш раціонально визначати конструктивні параметри.

Так як осідання (прогин) дорожнього одягу визначається теорією лінійно-деформованих тіл, то необхідне напруження, що діє на підстиляючий ґрунт (σ) слід обмежити допустимими напруженнями ($\sigma_{\text{доп}}$) на рисунку 3.3.

У процесі розрахунку дорожніх конструкцій важливим етапом є визначення допустимих напружень ($\sigma_{\text{доп}}$), при яких ще не відбувається формування пластичних зон у ґрунтовій основі, тобто не виникають зсуви та залишкові деформації. Це дозволяє забезпечити роботу дорожнього одягу в межах пружної стадії деформації та попередити розвиток незворотних процесів у ґрунтового середовищі.

Допустимі напруження ($\sigma_{\text{доп}}$), при яких ще не утворюються пластичні зони (відсутні зсуви), можуть бути визначені за формулою [67]:

$$\Sigma_{\text{доп}} = \frac{\pi \gamma_{\text{до}} h_{\text{до}} + \frac{\pi c}{\tan \phi}}{\tan \phi + \phi - \frac{\pi}{2}} + \gamma_{\text{до}} h_{\text{до}}, \quad (3.24)$$

де $\gamma_{\text{до}}$ – щільність щебеню;

c – питоме зчеплення ґрунту основи;

ϕ – кут внутрішнього тертя ґрунту основи;

$\gamma_{\text{до}} h_{\text{до}}$ – величина пригрузки від ваги дорожнього одягу.

Формула (3.24) відображає складну взаємодію між конструктивними параметрами дорожнього одягу та механічними характеристиками ґрунтової основи. Збільшення товщини щебеневого шару $\gamma_{\text{до}} h_{\text{до}}$ та його щільності сприяє підвищенню допустимого рівня напружень у ґрунті. Натомість низькі значення коефіцієнтів зчеплення c та кута внутрішнього ϕ тертя призводять до зниження несної здатності ґрунту, що вимагає збільшення товщини дорожнього одягу або застосування геораток для підсилення

На цій стадії визначаються напруження на межі з основою та порівнюються з допустимими значеннями, що впливають із міцнісних характеристик ґрунту.

Конструкція дорожнього одягу вважається працездатною в умовах заданих навантажень. У випадку перевищення цього критерію необхідним є коригування конструктивних параметрів: збільшення товщини шару щебеню тощо.

Таким чином, співвідношення (3.24) є ключовим при проектуванні дорожніх конструкцій, оскільки воно дозволяє пов'язати реальні характеристики ґрунтової основи з необхідними параметрами дорожнього одягу, забезпечуючи баланс між міцністю, довговічністю та економічною доцільністю.

Для подальшої зручності записів приймемо:

$$B = \frac{\pi c}{\tan \phi}; \quad C = \tan \phi + \phi - \frac{\pi}{2}; \quad (3.25)$$

$$A = a \left(\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}} \right)^{0,8} \frac{1}{D_0^2}. \quad (3.26)$$

При граничному стані використовуючи вираз (3.21) і (3.24), отримаємо:

$$\begin{aligned}
\frac{P}{1+h_{\text{од}}^2 A} &= \frac{\pi\gamma_{\text{од}}h_{\text{од}}+B}{C} + \gamma_{\text{од}}h_{\text{од}}; \quad P = (1+h_{\text{од}}^2 A) \left(\frac{\pi\gamma_{\text{од}}h_{\text{од}}+B}{C} + \gamma_{\text{од}}h \right); \\
P &= (1+h_{\text{од}}^2 A) \left(\frac{\pi\gamma_{\text{од}}h_{\text{од}}}{C} + \frac{B}{C} + \gamma_{\text{од}}h \right); \\
P &= \frac{\pi\gamma_{\text{од}}h_{\text{од}}}{C} + \frac{B}{C} + \gamma_{\text{од}}h + \frac{h_{\text{од}}^2 A \pi\gamma_{\text{од}}h_{\text{од}}}{C} + \frac{h_{\text{од}}^2 AB}{C} + \frac{h_{\text{од}}^2 AB}{C} + h_{\text{од}}^2 A \gamma_{\text{од}}h_{\text{од}}; \\
P &= \frac{\pi\gamma_{\text{од}}h_{\text{од}}}{C} + \frac{B}{C} + \gamma_{\text{од}}h + \frac{h_{\text{од}}^3 A \pi\gamma_{\text{од}}}{C} + \frac{h_{\text{од}}^2 AB}{C} + h_{\text{од}}^3 A \gamma_{\text{од}}; \\
P &= h_{\text{од}}^3 \left(\frac{A \pi\gamma_{\text{од}}}{C} + A \gamma_{\text{од}} \right) + h_{\text{од}}^2 \frac{AB}{C} + h_{\text{од}} \left(\frac{\pi\gamma_{\text{од}}}{C} + \gamma_{\text{од}} \right) + \frac{B}{C}. \quad (3.27)
\end{aligned}$$

Для спрощення виразу (3.27) приймаємо:

$$L = \frac{A \pi\gamma_{\text{од}}}{C} + A \gamma_{\text{од}} = A \gamma_{\text{од}} \left(1 + \frac{\pi}{2} \right), \quad M = \frac{AB}{C}, \quad N = \frac{\pi\gamma_{\text{од}}}{C} + \gamma_{\text{од}}, \quad K = \frac{B}{C}. \quad (3.28)$$

Тоді вираз (3.20) набуде вигляду:

$$\begin{aligned}
P &= h_{\text{до}}^3 L + h_{\text{до}}^2 M + h_{\text{до}} N + K; \\
h_{\text{до}}^3 L + h_{\text{до}}^2 M + h_{\text{до}} N + K - P &= 0. \quad (3.29)
\end{aligned}$$

Вирішенням рівняння (3.29) отримаємо товщину дорожнього одягу ($h_{\text{до}}$), необхідну за умовою (3.22).

Позначимо $K = 1 + \left(\frac{h_{\text{до}}}{D_0} \right)^2 \left(\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}} \right)^{0,8}$, тоді формула (3.21) набуде вигляду:

$$\sigma_{\text{гр}} = \frac{P}{K}. \quad (3.30)$$

У виразах (3.27)–(3.30) наведено залежності, що дозволяють визначити розрахункову товщину робочого шару дорожнього одягу як функцію прикладеного

навантаження, жорсткісних характеристик матеріалів та коефіцієнтів підсилення. На практиці ці рівняння, як правило, розв'язуються чисельними методами або прямим ітераційним підбором із послідовною перевіркою критеріїв міцності та деформативності, що гарантує працездатність конструкції.

У випадку прикладання тиску від колеса величиною P , цей тиск передається через площу відбитка пневматика діаметром D_0 . Завдяки розподільчій здатності покривного шару, еквівалентне напруження σ передається на ґрунтову основу через умовний штамп діаметром D . Виходячи з умови статичної рівноваги системи, отримаємо:

$$\frac{\pi D^2 \sigma}{4} = \frac{\pi D_0^2 P}{4},$$

звідси

$$D = D_0 \sqrt{\frac{P}{\sigma}}. \quad (3.31)$$

Підставивши у вираз (3.32) формулу (3.31) отримаємо вираз для визначення діаметра поверхні, що передає тиск на підстиляючий ґрунт:

$$D = D_0 \sqrt{K}. \quad (3.32)$$

Відповідно до експериментальних досліджень, при посиленні дорожніх одягів геогратками відбувається збільшення площі передачі тиску на ґрунтову основу в 1,3 – 1,7 рази (в залежності від типу геогратки) в порівнянні з традиційними конструкціями. Позначимо це збільшення як коефіцієнт β :

$$\beta = \frac{D_{\text{пос}}}{D}, \quad (3.33)$$

де D_{noc} – діаметр поверхні, що передає тиск на ґрунт для посиленої конструкції.

Формулу (3.34), але вже для посилених конструкцій можна записати як

$$D_{noc} = D_0 \sqrt{K'}, \quad (3.34)$$

$$\text{де } K' = 1 + a \left(\frac{h_{до}}{D_0} \right)^2 \left(\frac{E_{до}}{E_{гр}} \right)^{0,8}.$$

Підставивши у вираз (3.33) замість D і D_{noc} залежності (3.32) і (3.34), відповідно отримаємо:

$$\beta = \frac{\sqrt{K'}}{\sqrt{K}} = \frac{\sqrt{1 + a \left(\frac{h_{до}}{D_0} \right)^2 \left(\frac{E_{до}}{E_{гр}} \right)^{0,8}}}{\sqrt{1 + \left(\frac{h_{до}}{D_0} \right)^2 \left(\frac{E_{до}}{E_{гр}} \right)^{0,8}}}, \quad (3.35)$$

де β – коефіцієнт, що отриманий експериментально.

Таким чином, отримане співвідношення (3.35) дозволяє аналітично відобразити ефект від підсилення дорожніх одягів геогратками. Відомо, що експериментальні значення β знаходяться у межах 1,3–1,5, що підтверджує достовірність запропонованої моделі. Це означає, що при використанні геограток відбувається суттєве зростання коефіцієнта α , який у розрахунках традиційних (непідсилених) конструкцій приймається рівним 1. Іншими словами, геогратка забезпечує додаткову міцність, що враховується при визначенні розрахункової товщини шару.

У науковому аспекті введення коефіцієнта β має важливе значення, оскільки воно узагальнює результати експериментальних досліджень і дозволяє включити ефект посилення геогратками у розрахункову модель дорожнього одягу. Це робить модель не лише більш реалістичною, але й дає можливість зменшити товщину робочого шару без втрати міцності та довговічності конструкції.

Оскільки значення коефіцієнта β нам відомо з експериментальних досліджень ($\beta = 1,3 \div 1,5$), то з формули (3.35) отримуємо, що при посиленні дорожніх одягів геогратками відбувається збільшення коефіцієнта α , який при розрахунку міцності традиційних (не підсилених) дорожніх одягів дорівнює 1.

З формули (3.35) отримуємо:

$$\alpha = \frac{\beta^2 (1 + (\frac{h_{до}}{D_0})^2 (\frac{E_{до}}{E_{гр}})^{0,8}) - 1}{(\frac{h_{до}}{D_0})^2 (\frac{E_{до}}{E_{гр}})^{0,8}} \quad (3.36)$$

Коефіцієнт β описує збільшення ефективної площі впливу навантаження з глибиною, що зменшує локальні пікові напруження в основі. Врахування β узгоджується з фізичною картиною навантаження і необхідне для реалістичної оцінки та наступних перевірок міцності.

Таким чином, підставивши значення коефіцієнта α в формулу (3.21) можна буде знайти напруження, що діють на ґрунт для посиленних конструкцій:

$$\sigma_{zp} = \frac{P}{1 + a (\frac{h_{до}}{D_0})^2 (\frac{E_{до}}{E_{zp}})^{0,8}}. \quad (3.37)$$

Покрив перевіряється за втомним критерієм із урахуванням напружень згину та кількості циклів навантаження. На цьому етапі застосовуються отримані раніше еквівалентні модулі пружності для визначення розтягувальних напружень.

В основу визначення відносної деформації геогратки покладена наближена теорія вигину пластинок і балок, в якій коефіцієнт посилення α_1 визначається за формулою:

$$\alpha_1 = \left[a_0 + a_1 \frac{h_{п}}{D} + a_2 \frac{h_{осн}}{D} + b_1 \cdot E_{п} + b_2 \cdot E_{осн} + b_3 \cdot E_{гр} \right]^{-1}, \quad (3.38)$$

де $h_{п}$ – сумарна товщина монолітних шарів покритву, см;

$h_{осн}$ – сумарна товщина несних шарів основи, см;

D – діаметр відбитка колеса розрахункового транспортного засобу, см;

$E_{п}$ – середньозважений модуль пружності монолітних шарів покритву, МПа;

$E_{\text{осн}}$ – середньозважений модуль пружності несних шарів основи, МПа;

$E_{\text{гр}}$ – загальний модуль пружності на поверхні ґрунтової основи, МПа;

$a_0, a_1, a_2, b_1, b_2, b_3$ – коефіцієнти рівняння, що призначаються на основі експериментальних досліджень та наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти для визначення α_1

коефіцієнт	a_0	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3
значення	0,3237	0,247	0,352	0,00033	0,00035	0,000131

Критерій зсувостійкості ґрунту, що підстиляє композитний шар «шар з нез'язних матеріалів разом з геограткою», забезпечується при дотриманні умови:

$$\frac{1}{\alpha_3} \cdot T \leq \frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{мц}}}, \quad (3.39)$$

де T – активне розрахункове напруження зсуву;

$T_{\text{пр}}$ – гранична величина активного напруження зсуву;

$T_{\text{мц}}$ – необхідний коефіцієнт міцності;

α_3 – коефіцієнт посилення (коефіцієнт зниження активного напруження зсуву), визначається за рівнянням:

$$\begin{aligned} \alpha_3 = & (b_0 + b_1 \frac{h_{\text{п}}}{D} + b_2 \frac{h_{\text{осн}}}{D} + b_3 \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пос}}} + b_4 \frac{E_{\text{осн}}}{E_{\text{пос}}} + b_5 \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{пос}}} + b_{11} \left(\frac{h_{\text{п}}}{D} \right)^2 + b_{12} \frac{h_{\text{п}}}{D} \frac{h_{\text{осн}}}{D} + b_{13} \frac{h_{\text{п}}}{D} \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пос}}} + \\ & + b_{14} \frac{h_{\text{п}}}{D} \frac{E_{\text{осн}}}{E_{\text{пос}}} + b_{15} \frac{h_{\text{п}}}{D} \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{пос}}} + b_{22} \left(\frac{h_{\text{осн}}}{D} \right)^2 + b_{23} \frac{h_{\text{осн}}}{D} \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пос}}} + b_{24} \frac{h_{\text{осн}}}{D} \frac{E_{\text{осн}}}{E_{\text{пос}}} + b_{25} \frac{h_{\text{осн}}}{D} \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{пос}}} + \\ & + b_{33} \left(\frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пос}}} \right)^2 + b_{34} \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пос}}} \frac{E_{\text{осн}}}{E_{\text{пос}}} + b_{35} \frac{E_{\text{п}}}{E_{\text{пос}}} \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{пос}}} + b_{44} \left(\frac{E_{\text{осн}}}{E_{\text{пос}}} \right)^2 + b_{45} \frac{E_{\text{осн}}}{E_{\text{пос}}} \frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{пос}}} + b_{55} \left(\frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{пос}}} \right)^2)^{-1}, \end{aligned} \quad (3.40)$$

де $E_{\text{пос}}$ – умовний модуль пружності посиленого шару (шар з нез'язних матеріалів із геограткою), що призначаються на основі експериментальних досліджень [8], та наведені в табл. 3.1;

$b_0, b_1, \dots (b_{ij})$ – коефіцієнти, що приймають залежно від значень кута внутрішнього тертя ґрунту основи і призначаються на основі експериментальних досліджень (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти для визначення α_3

Коефіцієнти	ϕ , град						
	2-5	6-10	11-15	16-20	21-25	26-30	31-35
b_0	0,1674	0,1650	0,1607	0,1546	0,1452	0,1314	0,1098
b_1	0,3045	0,2895	0,2703	0,2497	0,2267	0,2010	0,1744
b_2	0,1533	0,1207	0,0801	0,0339	-0,0174	-0,0742	-0,1342
b_3	-0,0089	-0,0060	-0,0016	0,0047	0,0138	0,0270	0,0465
b_4	1,0089	1,0051	0,9983	0,9871	0,9705	0,9433	0,9015
b_5	3,0644	3,2141	3,4207	3,6658	3,9781	4,3842	4,9121
b_{11}	-0,0613	-0,0581	-0,0534	-0,0492	-0,0442	-0,0390	-0,0343
b_{12}	-0,1488	-0,1475	-0,1464	-0,1454	-0,1450	-0,1447	-0,1459
b_{13}	0,0507	0,0548	0,0601	0,0664	0,0738	0,0831	0,0942
b_{14}	-0,2140	-0,1994	-0,1806	-0,1594	-0,1352	-0,1069	-0,0748
b_{15}	-0,1394	-0,1685	-0,2089	-0,2573	-0,3123	-0,3888	-0,4813
b_{22}	0,0135	0,0247	0,0387	0,0547	0,0727	0,0926	0,1137
b_{23}	-0,0027	-0,0071	-0,0126	-0,0194	-0,0278	-0,0385	-0,0522
b_{24}	-0,0394	-0,0058	0,0369	0,0865	0,1439	0,2112	0,2902
b_{25}	-0,5233	-0,5608	-0,6109	0,6644	-0,7313	-0,8142	-0,9145
b_{33}	0,0073	0,0076	0,0078	0,0075	0,0067	0,0048	0,0013
b_{34}	-0,0517	-0,0544	-0,0575	0,0608	-0,0645	-0,0678	-0,0702
b_{35}	0,0382	0,0351	0,0275	0,0179	0,0030	-0,0210	-0,0618
b_{44}	-0,1391	-0,1426	-0,1457	-0,1480	-0,1494	-0,1477	-0,1434
b_{45}	-5,2945	-5,3866	-5,4889	-5,5664	-5,6081	-5,5865	-5,4449
b_{55}	-7,2670	-7,4487	-7,7980	-8,4032	-9,4184	-11,0547	-13,6543

Критерій опору матеріалів монолітних шарів руйнуванню на втому від розтягування при згині для конструкцій, посилених геоґраткою, дотримується при забезпеченні умови:

$$K_{\text{мц}} \leq \frac{R_{\text{зг}}}{\sigma_r}, \quad (3.41)$$

де $K_{\text{мц}}$ – коефіцієнт міцності;

$R_{\text{зг}}$ – гранично допустиме напруження розтягу матеріалу шару з урахуванням втоми, МПа, яке визначають за температури 0°C та тривалості дії навантаження 0,1с.;

σ_r – найбільше напруження розтягу у розглянутому шарі, що встановлюється розрахунком, МПа.

Найбільші розтягуючі напруження при згині в монолітному шарі посиленої конструкції σ_r^{noc} визначають за залежністю:

$$\sigma_r^{\text{noc}} = 1,53 \cdot P \cdot \frac{h_1}{D} \cdot \frac{E_1}{E_{\text{заг.пос}}} \cdot \left(1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \frac{h_2}{D}\right) \cdot \arctg^2 \frac{D}{h_e}, \quad (3.42)$$

де P – питомий тиск колеса розрахункового автомобіля, МПа;

D – розрахунковий діаметр відбитка колеса, см;

h_1 – товщина покриття, см;

E_1 – модуль пружності матеріалу покриття, МПа;

h_e – еквівалентна товщина шару, см;

$E_{\text{заг.пос}}$ – загальний модуль пружності посиленої основи, що підстиляє покриття, МПа;

Наведені вирази (3.43)–(3.45) узагальнюють ефект підсилення через посилений еквівалентний модуль. Підвищення цього показника зменшує осідання та підвищує запас за критеріями міцності. Параметр використовується для підсумкового вибору конструкції.

При посиленні несного шару основи геораткою загальний модуль пружності основи слід визначати за залежністю

$$E_{\text{заг.пос}} = \alpha_2 \cdot E_{\text{заг}}, \quad (3.43)$$

де $E_{\text{заг}}$ – загальний модуль пружності, МПа;

α_2 – коефіцієнт посилення, що визначається за формулою:

$$\alpha_2 = \left[c_0 + c_1 \frac{h_{\text{п}}}{D} + c_2 \frac{h_{\text{осн}}}{D} + d_1 \cdot E_{\text{п}} + d_2 \cdot E_{\text{осн}} + d_3 \cdot E_{\text{гр}} \right]^{-1}, \quad (3.44)$$

де $h_{\text{п}}$ – сумарна товщина монолітних шарів покриву, см;

$h_{\text{осн}}$ – сумарна товщина несних шарів основи дорожнього одягу, см;

D – діаметр відбитка колеса розрахункового автомобіля, см;

$E_{\text{п}}$ – середньозважений модуль пружності монолітних шарів покриву, МПа;

$E_{\text{осн}}$ – середньозважений модуль пружності несних шарів основи, МПа;

$E_{\text{гр}}$ – загальний модуль пружності основи, що підстиляє посилений шар, МПа;

$c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ – коефіцієнти рівняння, що призначаються на основі експериментальних робіт, та наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти для визначення α_2

c_0 (TX150/TX160/TX170)	c_1	c_2	d_1	d_2	d_3
0,03331/0,3234/0,3137	0,1153	0,2864	-7,22222E-07	0,000341	-0,0000025

За результатами проведених експериментальних досліджень встановлено, що, при посиленні дорожніх одягів геогратками відбувається збільшення еквівалентного модуля пружності:

$$E_{\text{екв.п.}} = K_{\text{пос}} \cdot E_{\text{екв}}, \quad (3.45)$$

де $K_{\text{пос}}$ - коефіцієнт посилення (величина коефіцієнта залежить від типу геограток, глибини її залягання і співвідношень деформаційних характеристик ґрунтової основи і шару засипки).

В результаті проведеного аналізу напружено-деформованого стану конструкцій дорожнього одягу, посилених геогратками полімерними жорсткими

багатовісноорієнтованими, встановлено, що включення геосинтетичних елементів у конструкцію дорожнього одягу суттєво змінює розподіл внутрішніх напруг та знижує концентрацію деформацій у найбільш навантажених зонах. Зафіксовано зменшення величин активних зсувних напруг у щєбеневому шарі, що безпосередньо впливає на стійкість конструкції до зсувних деформацій.

Крім того, встановлено зростання еквівалентного модуля пружності дорожнього одягу внаслідок взаємодії геогратки з щєбеневим шаром. Посилення сприяє формуванню композитної структури з покращеними механічними характеристиками, що проявляється у підвищенні загальної жорсткості конструкції. Це підтверджується результатами натурних штапових випробувань, які порівняно з традиційними конструкціями демонструють зменшення величин вертикальних осідань при однакових рівнях навантаження.

Розроблена математична модель розрахунку конструкції дорожнього одягу посиленого геограткою полімерною жорсткою багатовісноорієнтованою дозволяє комплексно оцінити роботу багатошарової системи конструкції дорожнього одягу в умовах дії транспортних навантажень та природно-кліматичних факторів. Врахування просторової роботи посиленого елемента забезпечує підвищення точності прогнозування напружено-деформованого стану дорожнього одягу та дозволяє адекватно описати процеси взаємодії між шарами конструкції. Це, у свою чергу, створює передумови для науково обґрунтованого вибору параметрів посилення та оптимізації геометричних характеристик шарів дорожнього одягу.

Застосування багатовісноорієнтованих геограток у конструкції дорожнього одягу сприяє більш рівномірному розподілу транспортних навантажень у площині, зменшенню пікових напружень у зонах контакту покриття з основою, а також підвищенню стійкості основи до накопичення залишкових деформацій. Результати моделювання свідчать, що посилення сприяє зниженню напружень у критичних ділянках та дозволяє зменшити товщину несних шарів без втрати загальної міцності конструкції, що забезпечує як технічний, так і економічний ефект.

Крім того, використання математичної моделі підтверджує, що наявність багатовісноорієнтованої геогратки у конструкції дорожнього одягу дозволяє збільшити несну здатність дорожнього одягу та подовжити його міжремонтний термін експлуатації. Посилення знижує ризик утворення колійності, тріщиноутворення та пластичних деформацій у нижніх шарах конструкції.

Отже, математична модель, що враховує посилення дорожнього одягу багатовісноорієнтованою геограткою, має суттєве значення для розвитку сучасної теорії дорожніх конструкцій. Вона може слугувати основою для подальшої розробки методичних рекомендацій з проектування та нормування, а також створює передумови для формування більш енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій дорожнього будівництва.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі проведено комплексний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) нежорстких дорожніх одягів, посилених геогратками, що дало змогу сформулювати такі наукові положення:

1. Визначено вплив геограток різних типів на напружено-деформований стан конструкцій дорожнього одягу, зокрема встановлено умови, за яких забезпечується зниження накопичення залишкових деформацій у конструктивних шарах.
2. Досліджено НДС дорожніх одягів, посилених геогратками, під дією статичних. Встановлено закономірності зміни параметрів НДС залежно від типу геогратки та характеристик основи.
3. На підставі аналізу НДС посилених конструкцій оцінено вплив геограток на розвиток активних зсувних напружень у посилених шарах дорожнього одягу, а також визначено їх роль у збільшенні еквівалентного модуля пружності конструкції.
4. Отримано коефіцієнт посилення та розрахункова модель конструкцій дорожнього одягу для різних геограток типу Tensar TriAx, який складає

$K_{\text{пос}} = 1,59 - 2,30$. Це дозволяє кількісно оцінити ефект підвищення несної здатності конструкцій дорожніх одягів.

5. Запропоновано математичну модель яка стала основою для розроблення інженерної методики розрахунку нежорстких дорожніх одягів, посилених геогратками, що працюють у стадії пружних деформацій. Розроблена модель дозволяє враховувати деформативні характеристики конструкції дорожнього одягу та може бути використана у практиці проєктування транспортних споруд.

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА КОНСТРУЮВАННЯ ДОРОЖНІХ ОДЯГІВ ПОСИЛЕНИХ ГЕОГРАТКАМИ

4.1 Інженерна методика розрахунку нежорстких дорожніх одягів

У розділі розглядається підхід до підбору товщин і перевірок нежорстких дорожніх одягів посилених геораткою.

Методика застосовується для:

- визначення необхідних товщин конструкцій дорожніх одягів посилених георатками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими;
- виявлення оптимальних конструкцій дорожніх одягів і пошуку шляхів скорочення витрат на дорожнє забезпечення.

Методика враховує такі умови роботи:

термін експлуатації доріг; навантаження на вісь автомобіля та тиск у пневматиці; інтенсивність руху автотранспорту; можливість використання місцевих щебеневих матеріалів.

Методика розрахунку дорожнього одягу, із георатками не суперечить галузевому нормативному документу ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Дана методика базується на принципах забезпечення довговічності конструкції, основою для проєктування є розрахункова інтенсивність руху, прогнозований термін експлуатації, категорія дороги та фізико-механічні характеристики матеріалів конструктивних шарів. У процесі проєктування визначається товщина кожного шару дорожнього одягу з урахуванням модуля пружності матеріалів та допустимих деформацій. Метод передбачає використання коефіцієнтів надійності та переходу між шарами з різними модулями жорсткості. Для перевірки міцності конструкції виконується розрахунок напружень та деформацій у відповідних точках. Окремо враховуються кліматичні умови (зона морозостійкості, зволоження), а також характеристики земляного полотна.

Конструкція дорожнього одягу задовольняє вимогам надійності та міцності при виконанні умови:

$$E_{\text{екв}}/E_{\text{потр}} \geq 1, \quad (4.1)$$

де $E_{\text{екв}}$ – еквівалентний модуль пружності конструкції дорожнього одягу, МПа;

$E_{\text{потр}}$ – потрібний модуль пружності конструкції дорожнього одягу, МПа.

Для посилення щибених шарів конструкції дорожнього одягу додатково вводиться коефіцієнт посилення, який залежить від деформаційних властивостей георатки, товщини шарів основи, механічних властивостей матеріалів дорожнього одягу та ґрунтів робочого шару земляного полотна.

Ефект посилення дорожніх конструкцій георатками виражається коефіцієнтом зміцнення конструкції $K_{\text{пос}}$.

Модуль пружності посиленої конструкції дорожнього одягу визначається за залежністю (4.2).

$$E_{\text{заг.пос}} = \alpha_2 \cdot E_{\text{заг}}. \quad (4.2)$$

Проектування конструкції дорожнього одягу і земляного полотна полягає в подальших етапах конструювання конкурентоспроможних варіантів та розрахунків із техніко-економічним обґрунтуванням і вибором раціональної конструкції.

Конструкція дорожнього одягу визначається розрахунками на деформовативність, на міцність.

Розрахункова схема показує багатошарову конструкцію дорожнього одягу. На ній також позначено характерні глибини, на яких виконують оцінювання напружень і деформацій. Така схема дає змогу наочно простежити, як зовнішній тиск від колеса передається крізь шари конструкції в глибину, і забезпечує базу для розрахунку осідань, визначення розподілу напружень та перевірки умов міцності.

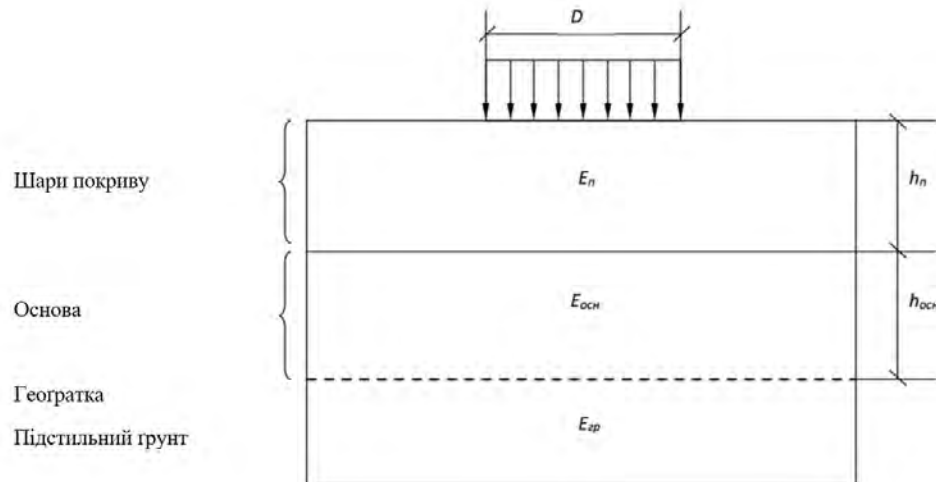


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема дорожніх одягів капітального та удосконаленого полегшеного типів, посилені геораткою

Необхідний модуль пружності конструкції дорожнього одягу визначається з умови, щоб деформація одягу, що накопичується під дією повторних навантажень, не перевищила нормовану величину.

Необхідний модуль пружності призначається за залежністю:

$$E_{\text{необх}} = 1,57 \cdot \frac{P \cdot D}{S} \cdot k, \quad (4.2)$$

де 1,57 – коефіцієнт, що враховує шаруватий характер дорожніх одягів;

P – питомий тиск на покриття від пневматиків автотранспорту, МПа;

D – діаметр відбитка пневматиків осі автотранспорту, см;

S – допустиме вертикальне осідання поверхні покриття, см;

k – коефіцієнт, що відображає повторні навантаження в період будівництва, які викликають наростання колії.

Залежність (4.2) задає необхідний модуль пружності конструкції так, щоб накопичена деформація не перевищила допустиме осідання покриття при заданому тиску.

$$k = [0,5 + 0,65 \lg(N_c \cdot \gamma)], \quad (4.3)$$

де N_c – інтенсивність за розрахунковий період;

γ – коефіцієнт, що враховує вплив ширини проїжджої частини на повторне докладання навантажень (двосмуговий рух $\gamma = 1$, односмуговий рух $\gamma = 2$).

Вираз (4.3) враховує накопичення деформацій від повторних навантажень протягом розрахункового періоду та перерозподіл навантаження смугами руху.

Визначення еквівалентного модуля пружності шаруватої конструкції здійснюється за залежністю:

$$E_{\text{екв}} = \frac{E_{\text{гр}}}{1 - \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}}\right)^{1,4}}\right) \arctg\left(\frac{h_{\text{до}}}{D} \left(\frac{E_{\text{до}}}{E_{\text{гр}}}\right)^{0,4}\right)}, \quad (4.4)$$

де $E_{\text{екв}}$ – еквівалентний модуль пружності двошарової системи МПа;

$E_{\text{гр}}$ – модуль деформації ґрунтової основи МПа;

$E_{\text{до}}$ – модуль пружності щебеневого шару дорожнього одягу МПа;

$h_{\text{до}}$ – товщина одягу, см;

D – діаметр відбитка, рівновеликого сліду колеса розрахункового автомобіля, см.

Залежність (4.4) дає еквівалентний модуль для поєднання щебеневого шару та ґрунтової основи з урахуванням товщини та діаметра відбитка.

Знаючи відношення $\frac{E_{\text{гр}}}{E_{\text{до}}}$ та $\frac{h_{\text{до}}}{D}$, визначається відношення $\frac{h_{\text{до}}}{D}$ і після множення на D обчислюється необхідна товщина шару $h_{\text{до}}$.

Ефект посилення дорожніх конструкцій геогратками виражається коефіцієнтом зміцнення конструкції $K_{\text{пос}}$.

Модуль пружності посиленої конструкції дорожнього одягу визначається за залежністю:

$$E_{\text{екв. пос.}} = K_{\text{пос.}} E_{\text{екв.}}, \quad (4.5)$$

де $E_{\text{екв. пос.}}$ – еквівалентний модуль пружності посиленої конструкції дорожнього одягу, МПа;

$E_{\text{екв.}}$ – модуль пружності традиційної конструкції дорожнього одягу МПа;

$K_{\text{пос.}}$ – коефіцієнт посилення, значення цих коефіцієнтів визначаються за допомогою регресійних рівнянь (2.5 – 2.7), отриманих за результатами експериментальних досліджень.

Розрахунок дорожніх одягів за величиною вертикального тиску на поверхні ґрунтової основи.

Рівняння (4.5) відображає зростання еквівалентної модуля пружності за рахунок посилення. Коефіцієнт посилення береться з регресій і залежить від типу геогратки, товщин шарів та властивостей матеріалів.

Дорожній одяг необхідно проєктувати з розрахунком, щоб напруження на підстиляючому ґрунті (σ) не перевищували допустимі напруження ($\sigma_{\text{доп}}$), тобто:

$$\sigma \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (4.6)$$

де σ – напруження, що діють на ґрунт основи з урахуванням розподільчої здатності покриття, МПа;

$\sigma_{\text{доп}}$ – максимальна допустима напруження на ґрунтову основу, за якої зберігається лінійна залежність між тиском і осіданням МПа.

Напруження, що діють на ґрунт основи, визначаються за залежністю:

$$\sigma = \frac{P}{K}, \quad (4.7)$$

де P – тиск на покриття від пневматика МПа;

K – коефіцієнт, що характеризує зменшення вертикальних напружень у покритті і визначається за залежністю:

Величина σ зменшується завдяки навантаженню в конструкції. У формулах застосовано коефіцієнт, що враховує зниження пікових напружень у нижчих шарах саме він і є ключем до адекватної оцінки впливу конструкції на основу:

$$K = 1 + \alpha \left(\frac{h_{до}}{D} \right)^2 \left(\frac{E_{до}}{E_{гр}} \right)^{0,8}, \quad (4.8)$$

де $\alpha = 1,0$ – для традиційних конструкцій дорожніх одягів;

$$\alpha = \frac{\left(\frac{D_{п}}{D} \right)^2 \left(1 + \left(\frac{h_{од}}{D} \right)^2 \left(\frac{E_{од}}{E_{гр}} \right)^{0,8} \right) - 1}{\left(\frac{h_{од}}{D} \right)^2 \left(\frac{E_{од}}{E_{гр}} \right)^{0,8}}, \quad (4.9)$$

де $D_{п} = 1,37$; $D_{п} = 1,42$; $D_{п} = 1,51$ для дорожніх одягів, посиленних георатками Tensar TriAx 150, Tensar TriAx 160, Tensar TriAx 170 відповідно.

Коефіцієнт у виразах (4.8)–(4.9) показує, як підсилення знижує піки напружень на основі. Для різних типів геораток задані відповідні значення.

Допустимі напруження на поверхні ґрунтової основи визначаються за залежністю:

$$\sigma_{доп} = \gamma_{до} h_{до} \eta + C \xi, \quad (4.10)$$

де $\gamma_{до}$ – питома вага конструкції дорожнього одягу, кгс/см³;

$h_{до}$ – товщина конструкції дорожнього одягу, см;

C – питоме зчеплення ґрунту земляного полотна, МПа;

η, ξ – коефіцієнти, що визначаються за номограмою.

У разі невиконання вимог для попередньо прийнятої конструкції дорожнього одягу, необхідно здійснити один із таких заходів:

Зміна товщини дорожнього одягу; посилення конструкції дорожнього одягу георатками; уточнення (коригування) марки георатки; комплексне рішення (пп. а) і б), або пп. а) і в)).

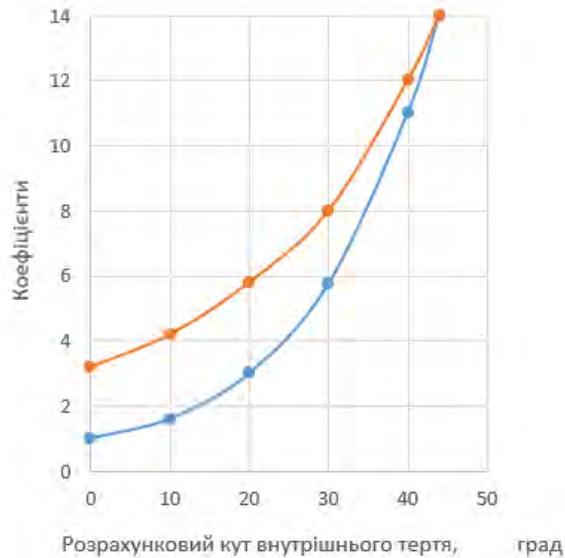


Рисунок 4.2 – Графік для визначення коефіцієнтів

Розрахунок за величиною напружень на поверхні ґрунтової основи вважається закінченим, коли розрахункові значення σ відрізняються від $\sigma_{дон}$ не більше ніж на 5%.

4.2 Рекомендації щодо конструювання нежорстких дорожніх одягів

Під час посилення дорожнього одягу георатка укладається в основі конструкції дорожнього одягу, для того щоб інертний матеріал не просідав в основу, якщо ґрунти слабкі. Проектування конструкції дорожнього одягу і земляного полотна полягає в подальших процесах конструювання конкурентоспроможних варіантів і наступних міцнісних і деформаційних розрахунків із техніко-економічним обґрунтуванням і вибором оптимальної конструкції.

В залежності від несної здатності ґрунтів основи, категорії дороги, терміну служби дорожнього одягу може застосовуватись, як одношарова конструкція так і багатошарова. Основним конструктивним шляхом зниження товщини щебених шарів є застосування геоґратки в конструкції дорожнього одягу (рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Конструкція дорожнього одягу

1 – земляне полотно; 2 – геоґратка; 3 – щебенеve покритв; 4 – шари покритву.

Конструкцію дорожнього одягу необхідно розробляти для кожної з ділянок дороги, що мають різні ґрунтово-гідроґеологічні умови та розрахункові навантаження.

Геоґратка, укладена на межі з основою, запобігає проникненню інертного матеріалу в слабкий ґрунт і стабілізує зону зсуву.

Використання принципу посилення дає змогу вирішити такі практичні завдання:

- підвищення надійності ділянок автомобільної дороги в місцях, де в процесі експлуатації можливе посилення вологості земляного;
- зниження товщини конструкцій дорожніх одягів;
- продовження терміну будівельного сезону;
- виключення проникнення інертного матеріалу в земляне полотно.

4.3 Основні технологічні операції з влаштування конструкції дорожніх одягів, посиленіх геоґратками

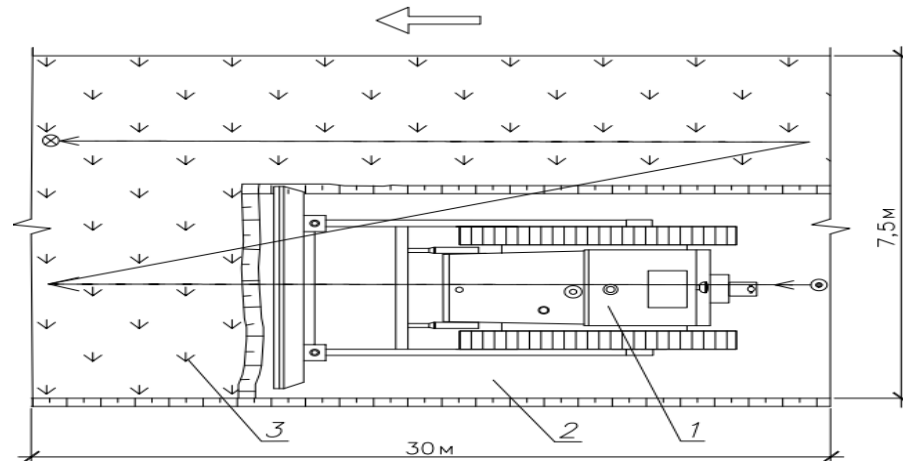
При виконанні робіт особлива увага приділяється операційному контролю якості на всіх етапах. Перед початком робіт з улаштування дорожнього одягу

необхідно виконати комплекс підготовчих заходів із планування та ущільнення земляного полотна.

Комплекс робіт із формування та підготовки земляного полотна включає такі технологічні операції:

- Доопрацювання фактичного поздовжнього профілю — усунення відхилень від проектної відмітки.
- Формування поперечного профілю.
- Ущільнення земляного полотна — виконання механічного ущільнення котками відповідного типу до досягнення проектного коефіцієнта ущільнення.
- Операційний контроль якості — регулярний замір висотних відміток, перевірка рівності, контроль ущільнення.

Дотримання вищезазначеної послідовності та контрольних операцій є критично важливим для забезпечення довговічності дорожнього одягу, оскільки якість підготовки земляного полотна безпосередньо впливає на його несну здатність та стійкість до деформацій у процесі експлуатації.



Експлікація:

- 1 - бульдозер
- 2 - спланована ділянка основи
- 3 - поверхня землі

Умовні позначення:

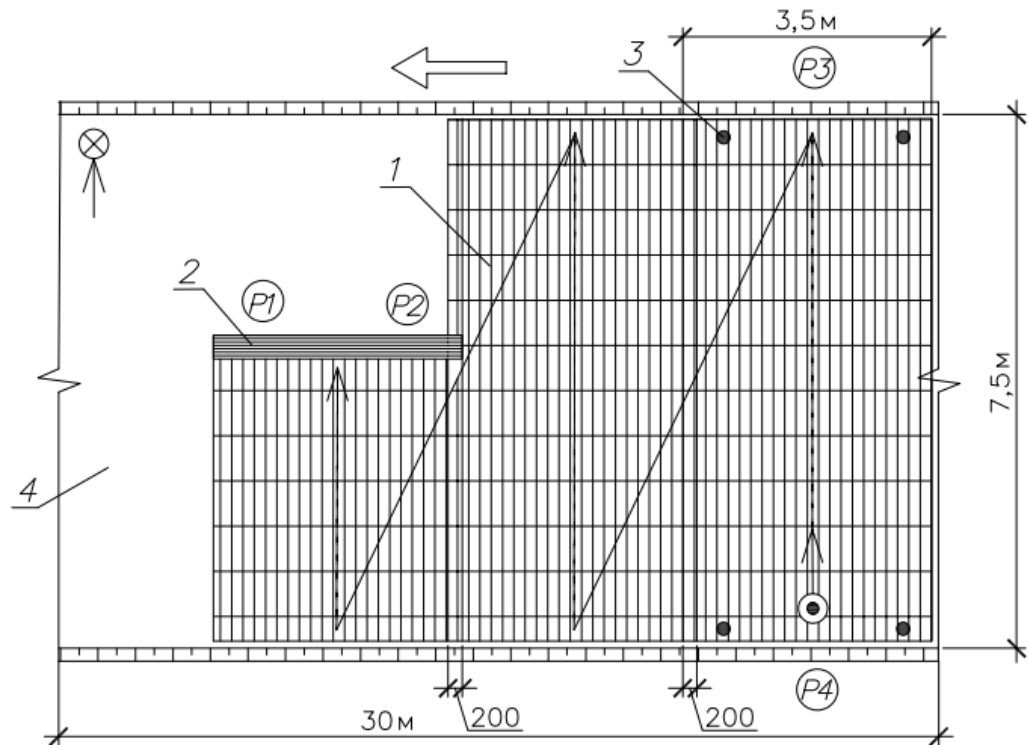
- ⊙→ - початок робіт
- ⊗← - закінчення робіт
- ← - загальний напрям робіт

Рисунок 4.4 – Технологічна схема зняття рослинного шару ґрунту

Таблиця 4.1 – Операційний контроль якості під час влаштування земляного полотна та влаштування геоґратки

№ п п	Основні операції, що підлягають контролю	Планування земляного полотна	Ущільнення ґрунту	Влаштування геоґраток
1	Склад контролю	1.Позначки поздовжнього та поперечного профілю. 2. Відстань між віссю та брівкою земляного полотна 3. Поперечний ухил. 4. Крутизна укосів. 5. Рівність поверхні земляного полотна.	Коефіцієнт ущільнення.	1. Рівність укладки. 2.Величина та напрямок напуску.
2	Методи і засоби контролю	Вимірювальний. Візуальний. 1. Нівелір. 2. Стрічка мірна. 3. Шаблон. 4. Ухиломір. 5. Рейка триметрова з мірним клином.	Вимірювальний. 1. Мірник товщини шару. 2.Щільномір, вологомір, радіометричний прилад. 3. ПГП-2	Вимірювальний, візуальний. 1. Рулетка. 2. Візуально.
3	Терміни контролю	1-5. Проміри кожні 30 м.	Проміри в трьох точках на поперечнику (по осі та 1,5-2 см від брівки) не рідше, ніж через 30 м	1,2. В процесі роботи
4	Посада особи, яка контролює операцію	Майстер	Майстер, лаборант	Майстер
5	Найменування служби, що залучається для контролю служби	-	Лабораторія	-
6	Посада особи, відповідальної за організацію та забезпечення контролю	Прораб	Прораб	Прораб
7	Документ, у якому реєструються результати контролю	Журнал виконання робіт	Журнал виконання робіт, журнал лабораторних робіт	Акт на приховані роботи

Підготовка земляного полотна повинна проводитись відповідно до проєкту виконання робіт. При цьому особливу увагу слід приділити:



Експлікація:

- 1 - полотно георатки багатовісноорієнтованої
- 2 - рулон георатки багатовісноорієнтованої
- 3 - арматурні стрижні $d=16\text{мм}$
- 4 - спланована ділянка основи

Примітка: напуски в суміжних полотнах георатки 0,20 - 0,60 м.

Умовні позначення:

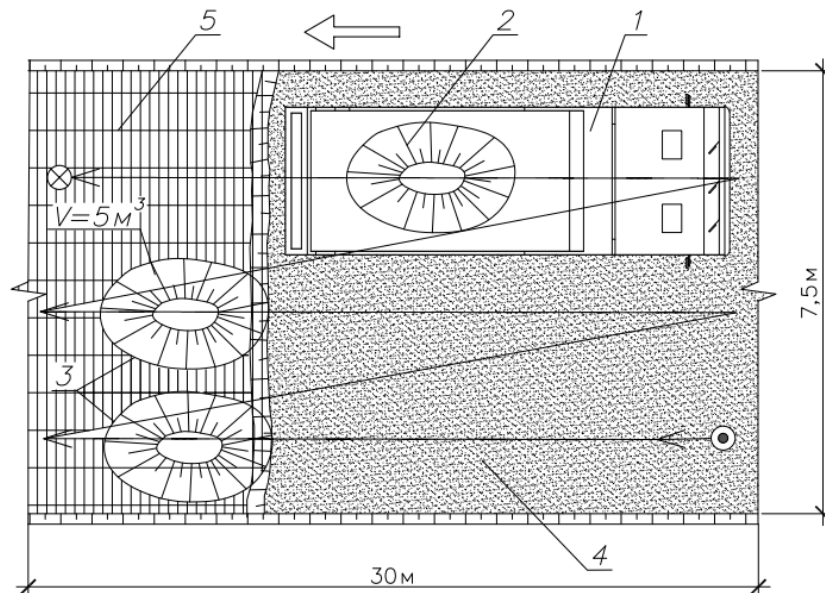
- ⊙→ - початок робіт
- ⊗← - закінчення робіт
- ← - загальний напрям робіт
- Ⓟ Ⓟ - робітники
- Ⓟ Ⓟ

Рисунок 4.5 – Технологічна схема влаштування геораток

Влаштування дорожніх одягів та їх посилення полягає у послідовному виконанні наступних операцій:

- підготовка поверхні земляного полотна (рис. 4.4);
- укладання георатки (рис.4.5);

- розподіл, профілювання та ущільнення інертного матеріалу (рис.4.6, 4.7);
- укладання наступних шарів з профілюванням та ущільненням (4.8);
- операційний контроль якості на всіх етапах виконуваних робіт.



Експлікація:

- 1 - автосамоскид
- 2 - щебінь
- 3 - штабель щебеню
- 4 - спланована ділянка
- 5 - полотно георатки багатовісноорієнтованої

Примітка: рух автосамоскидів тільки по розподіленому шару щебеню

Умовні позначення:

- ⊙→ - початок робіт
- ⊗← - закінчення робіт
- ← - загальний напрям робіт

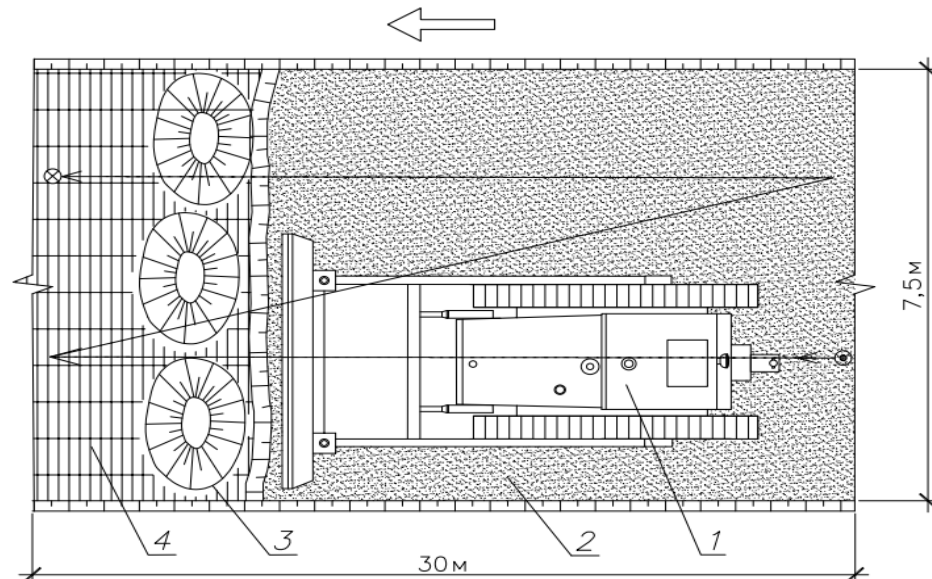
Рисунок 4.6 – Технологічна схема штабелювання щебеню

Укладання георатки здійснюється вручну шляхом розкочування рулону вздовж або впоперек осі земляного полотна. Вибір напрямку розкочування визначається геометричними параметрами об'єкта будівництва, зокрема шириною проїзної частини, формою та конфігурацією траси, а також конструктивними особливостями дорожнього одягу.

Полотна геогратки укладаються з поперечним або поздовжнім перекриттям суміжних рулонів, величина якого повинна становити не менше 20 см. При цьому додаткове механічне або зшивальне з'єднання полотен між собою не є необхідним.

Розподіл щебеневого шару проектної товщини виконується бульдозерами. Переміщення матеріалу здійснюється під гострим кутом до поздовжньої осі дороги з послідовним захопленням щебеню у невеликих об'ємах. Такий метод, відомий як подача матеріалу «від себе», мінімізує ризик зсуву або пошкодження геогратки.

Увагу приділяють дотриманню технологічної послідовності: переміщення щебеню повинно виконуватися поступово, щоб уникнути деформацій геогратки.



Експлікація:

- 1 - бульдозер
- 2 - спланований шар щебеню
- 3 - штабель щебеню
- 4 - полотно геогратки багатовісноорієнтованої

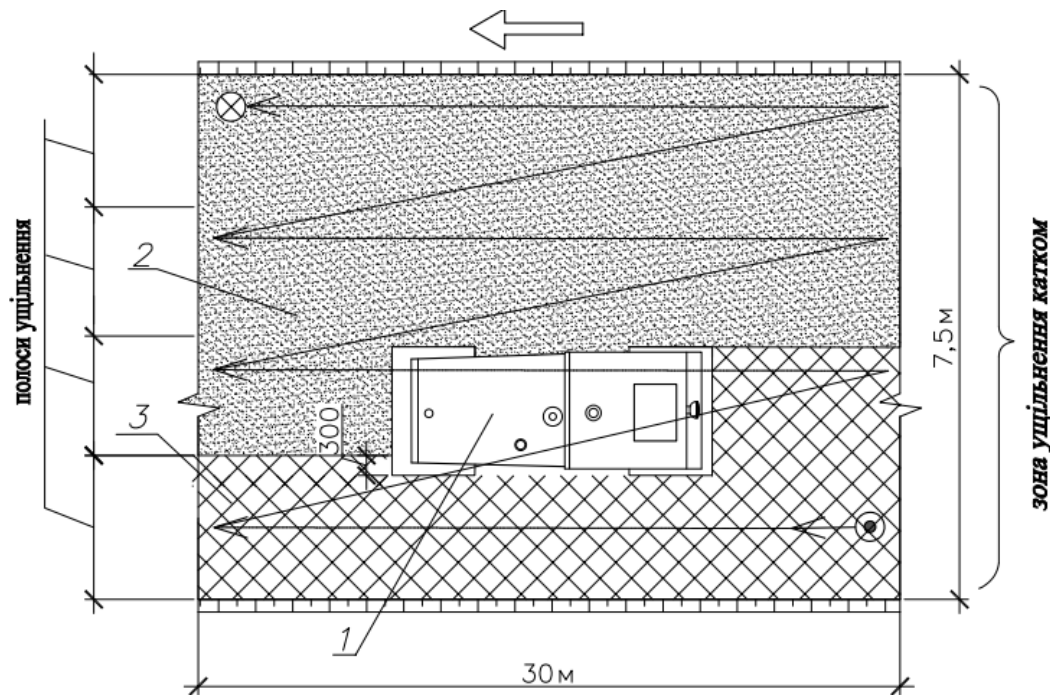
Примітка: мінімальна товщина шару 0,15 м.

Умовні позначення:

- ⊙→ - початок робіт
- ⊗← - закінчення робіт
- ← - загальний напрям робіт

Рисунок 4.7 – Технологічна схема розподілу щебеневого шару

Рух будівельного транспорту по геораткам забороняється. Ущільнення шару щебеню ведеться після його профілювання автогрейдером під кутом від центру до краю земляного полотна з досягненням щільності 70% від необхідної. Доущільнення до максимальних значень на довжині кожної захватки проводиться після того, як весь шар укладений і попередньо ущільнений. Остаточне ущільнення можна виконувати механізмами більш важких типів.



Експлікація:

- 1 - віброкаток
- 2 - спланована за проектом ділянка відсіпки
- 3 - ущільнена ділянка відсіпки

Примітка: кількість проходів по одному сліду - за проектом

Умовні позначення:

- ⊙→ - початок робіт
- ⊗← - закінчення робіт
- ← - загальний напрям робіт

Рисунок 4.8 – Технологічна схема ущільнення щебеневого шару

4.4 Економічна ефективність застосування геограток у конструкціях дорожнього одягу

Застосування геограток у конструкціях дорожнього одягу забезпечує не лише технічні переваги у підвищенні несної здатності та довговічності покриття, але й має суттєвий економічний ефект, обумовлений скороченням витрат на будівництво, ремонт та експлуатаційне утримання автомобільних доріг.

Основними показниками економічної ефективності є:

- Легкість у роботі та зручність транспортування. Геогратки постачаються у вигляді рулонів, що спрощує їх транспортування та логістику. Для виконання навантаження, розвантаження та переміщення достатньо залучити бригаду з 3–4 осіб. Це знижує трудові витрати, прискорює процес підготовки до будівництва та мінімізує простої техніки на об'єкті.
- Висока міцність і довговічність, можливість багаторазового використання. За потреби демонтажу або ремонту дорожньої конструкції геогратки можуть бути вилучені та повторно використані.
- Простота конструктивних рішень і технологічності виконання робіт. Їх монтаж можна виконувати як вручну, так і механізованим способом, що дозволяє адаптувати технологію під конкретні умови будівництва.
- Скорочення обсягів підготовчих робіт на земляному полотні. Завдяки властивостям посилення геограток зменшуються вимоги до ідеальної рівності та жорсткості земляного полотна. Таким чином, геогратки дають можливість виконувати будівництво на ґрунтах із нижчими несними характеристиками без значного збільшення вартості робіт.
- Можливість виконання робіт за будь-яких метеорологічних умов. Геогратки зберігають свої механічні властивості у широкому діапазоні температур і не втрачають ефективності навіть за умов підвищеної вологості. Це дозволяє здійснювати укладання та влаштування дорожніх конструкцій у міжсезоння або при

несприятливих погодних умовах, коли інші технології виявляються менш ефективними або економічно недоцільними.

Використання геораток у дорожніх конструкціях дозволяє знизити матеріаломісткість та енергозатрати будівництва, продовжити термін служби дорожнього одягу, зменшити витрати на його ремонт і утримання.

Загальний економічний ефект ($E_{\text{еф}}$) від застосування геораток у конструкціях дорожнього одягу визначається за виразом (4.11):

$$E_{\text{еф}} = E_{\text{Г}} + E_{\text{К}}, \quad (4.11)$$

де $E_{\text{Г}}$ – економічний ефект, що отримується в результаті застосування конструкцій дорожнього одягу, посиленних георатками, грн.;

$E_{\text{К}}$ – економічний ефект від скорочення кількості автомобілів, зайнятих доставкою інертного матеріалу, грн.

Показник $E_{\text{еф}}$ вказує фінансову вигоду від застосування геораток. Його доцільно трактувати як різницю витрат за життєвий цикл з поправкою на логістику та тривалість робіт.

Економічна ефективність ($E_{\text{Г}}$), використання геораток у дорожніх конструкціях розглядається як інтегральний показник, що відображає різницю у вартості між традиційним варіантом дорожнього одягу та варіантом, у якому конструкція посилена георатками.

$$E_{\text{Г}} = C_{\text{Т}} - C_{\text{Н}}, \quad (4.12)$$

де $C_{\text{Т}}$ – витрати на влаштування конструкції дорожнього одягу за традиційними варіантами (без посилення), грн.;

$C_{\text{Н}}$ – витрати на влаштування конструкції дорожнього одягу за запропонованим варіантом (з посиленням георатками), грн.

Різниця між витратами на будівництво традиційної конструкції та посиленої, відображає безпосередній ефект скорочення інертних матеріалів і спрощення робіт..

Економічний ефект (E_k) від скорочення кількості автосамоскидів, що забезпечують безперебійне будівництво доріг, визначається за формулою:

$$E_k = (n_T - n_H) \times C_{ac} \times E_H, \quad (4.13)$$

де C_{ac} – вартість автосамоскида, грн;

E_H – коефіцієнт нормативної економічної ефективності, $E_H = 0,25$;

n_T та n_H – кількість автосамоскидів, необхідних для зведення традиційних і посилених конструкцій дорожніх одягів, відповідно, шт.

Кількість автосамоскидів визначається за виразом:

$$n = \frac{V}{P_{ac}} K_{top}, \quad (4.14)$$

де K_{top} – коефіцієнт, що враховує кількість машин, що знаходяться на техобслуговуванні та ремонті, $K_{top} = 1,15$;

V – добова потреба в щебені для безперебійного будівництва доріг, що визначається за виразом (4.8), m^3 ;

P_{ac} – добова продуктивність автопоїзда, що визначається за виразом (4.16), $m^3/\text{добу}$.

Формули пов'язують вартість машин, нормативну ефективність і потрібну кількість рейсів. У результаті видно, як зменшення обсягів щебеню напряду скорочує потребу у транспорті та капіталовкладення в логістику:

$$V = \frac{S \times v}{t_{дн}}, \quad (4.15)$$

де S - площа покриття, що влаштовується, $S = 100\text{м}^2$;

v – нормативна потреба у щебені на 100 м^2 покриття, м^3 ;

$t_{\text{дн}}$ – кількість робочих днів.

$$\Pi_{\text{ас}} = V_{\text{к}} \times n_{\text{ез}}, \quad (4.16)$$

де $V_{\text{к}}$ - обсяг кузова автосамоскида з причепом, м^3 ;

$n_{\text{ез}}$ – кількість рейсів на добу, що визначається за виразом (4.17).

Розрахунок добової потреби в щебені та продуктивності автопоїзда слугує для планування графіка робіт. Уточнення швидкостей, відстаней та чистого часу роботи різко впливають на результат.

$$n_{\text{ез}} = \frac{T_{\text{см}}}{\frac{l}{V_{\text{гр}}} + \frac{l}{V_{\text{пр}}}}, \quad (4.17)$$

де $T_{\text{см}}$ – час безпосередньої роботи автопоїзда (без урахування часу на щоденне обслуговування, перезмінку та обід водіїв), год;

l – відстань транспортування щебеню, км;

$V_{\text{гр}}$ і $V_{\text{пр}}$ – середні швидкості завантаженого та порожнього автопоїзда відповідно, км/год.

Використання геограток у конструкціях дорожнього одягу формує поєднаний техніко-економічний ефект, який охоплює не лише зниження прямих витрат на будівництво, а й покращення експлуатаційних характеристик дороги протягом усього терміну експлуатації.

Перш за все, посилення незв'язних шарів дорожнього одягу геогратками дозволяє зменшити обсяг використання традиційних інертних матеріалів (щебеню, піску, мінеральних сумішей) без втрати несної здатності конструкції.

Другим важливим аспектом є зменшення логістичних витрат. Менший обсяг матеріалів означає менше рейсів вантажного транспорту. Це особливо важливо у випадках будівництва у віддалених районах, де логістика суттєво впливає на загальну вартість проекту.

Третій складник ефекту – скорочення термінів виконання робіт. Оскільки конструкція дорожнього одягу з геогратками потребує меншої товщини шарів, час на пошарове влаштування та ущільнення скорочується. Це дозволяє виконувати роботи навіть у стислі терміни.

Четвертий ефект – зниження витрат на ремонт і утримання. Завдяки рівномірному розподілу навантаження та зменшенню залишкових деформацій, дорожнє покриття зберігає свої експлуатаційні характеристики довше. Це призводить до зменшення частоти проведення ремонтів.

Для обґрунтування доцільності застосування геограток необхідно використовувати порівняльні кошторисні таблиці, у яких традиційний варіант дорожнього одягу та варіант з посиленням геогратками розглядаються за однакових умов.

Така порівняльна оцінка наочно демонструє, що навіть при додаванні вартості геограток загальна кошторисна вартість проекту у більшості випадків зменшується завдяки оптимізації товщини шарів, економії на транспортуванні та скороченню тривалості робіт. Більше того, врахування експлуатаційних заощаджень упродовж життєвого циклу дороги дозволяє виявити додатковий прихований економічний резерв, який значно підвищує загальний показник економічної ефективності.

Таким чином, застосування геограток у дорожньому будівництві слід розглядати не як витратний елемент, а як інвестицію у підвищення надійності та зменшення загальних витрат на весь період експлуатації дорожньої споруди.

Висновки до розділу 4

За результатами досліджень отримані наступні основні показники ефективності використання у конструкціях дорожнього одягу геораток: легкість в роботі, що допускає вільне навантаження, розвантаження та перенесення рулонів геораток (для перенесення потрібно не більше 4 осіб); простота конструкцій, що забезпечує швидкість і зручність влаштування та розбирання дорожніх одягів, легкість відновлення та ремонту; можливість механізації процесу укладання (при залученні); мінімальні об'єми робіт із підготовки земляного полотна; влаштування дорожнього одягу за будь-яких метеорологічних умов.

Розроблено та визначено наступне:

1. Розроблені рекомендації щодо технології зведення дорожніх одягів, посилених георатками.
2. Здійснено оцінку економічної ефективності, що показує доцільність застосування геораток у районах зі складними інженерно-геологічними умовами, при дефіциті місцевих дорожньо-будівельних матеріалів, а також в умовах необхідності зведення дорожніх конструкцій у найкоротші терміни.
3. Розроблені основні технологічні операції та технологічні карти для влаштування геораток при будівництві дорожнього одягу.
4. Визначена економічна ефективність, при влаштуванні дорожнього одягу, яка визначається як різниця витрати вартості конструкцій дорожнього одягу традиційних та посилених: витрати на влаштування традиційної конструкції дорожнього одягу (без георатки), складають 1650,00 грн. за м²; витрати на влаштування посиленої конструкції дорожнього одягу (з геораткою), складають 1300,00 грн. за м². Відповідно до наведених розрахунків економія коштів при влаштуванні посиленої конструкції дорожнього одягу складає 21 %.
5. Розроблено методику проєктування конструкцій дорожнього одягу із застосуванням геораток, що враховує отримані експериментальні та теоретичні результати роботи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання, що полягає в удосконаленні методу розрахунку конструкцій нежорсткого дорожнього одягу із незв'язними або слабозв'язними шарами, які стабілізовані геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими:

1. На основі аналізу наукових публікацій та результатів експериментальних досліджень встановлено, що застосування жорстких багатовісноорієнтованих геограток у конструкціях нежорстких дорожніх одягів забезпечує підвищення несної здатності та стійкості основи за рахунок перерозподілу напружень, що призводить до зменшення пластичних деформацій. Узагальненням існуючих підходів до опису взаємодії синтетичних матеріалів з інертними матеріалами основ дорожніх одягів встановлено, що ефективність посилення визначається комплексом чинників, а саме: міцнісними характеристиками геограток, властивостями заповнювача та характером навантаження. Проведений аналіз наукових джерел засвідчив недостатню розробленість теоретичних моделей та інженерних методик, здатних комплексно описати роботу жорстких багатовісноорієнтованих геограток у конструкціях нежорстких дорожніх одягів, що обумовило необхідність розроблення науково обґрунтованих підходів до їх раціонального застосування.

2. Отриманими результатами серії експериментальних досліджень підтверджено ефективність застосування геограток у конструкціях дорожнього одягу за рахунок підвищення еквівалентного модуля пружності ґрунтової основи, та посиленого шару (посилення щебеневого шару геогратками ТХ 150 привело до збільшення еквівалентного модуля пружності цього шару в 1,07 рази (на ґрунтах з $E_{zp} = 60$ МПа), в 1,54 рази (на ґрунтах з $E_{zp} = 25$ МПа) і в 3,5 разів (на ґрунтах з $E_{zp} = 5$ МПа)) та збільшення несної здатності дорожнього одягу. Встановлено, що ефективність підсилення залежить від співвідношення деформаційних характеристик дорожнього одягу та ґрунтів основи і відносної глибини закладання геогратки.

Використання геограток сприяє рівномірному розподілу навантаження на значну площу основи (до двох діаметрів штамп), при цьому кут розподілу тиску збільшується у 1,5 рази. Так кут розподілу тиску для традиційної конструкції становить 47° , тоді як у конструкції, посиленої геограткою ТХ 170 він відповідає – 55° . Відповідно відбувається збільшення чаші прогину під штампом з $R = 32$ см (у традиційної конструкції) до $R = 47$ см (конструкція посилена геограткою ТХ 170).

3. Удосконалено розрахункову схему конструкцій дорожнього одягу та математичну модель розрахунку нежорстких дорожніх одягів, підсилених геогратками. Отриманий коефіцієнт посилення для різних типів геограток полімерних жорстких багатовісноорієнтованих, який складає $K_{\text{пос.}} = 1,59 - 2,30$. Запропоновано метод визначення величини еквівалентного модуля пружності дорожнього одягу та коефіцієнта посилення. Проведено кореляційно-регресійний аналіз, на основі якого отримано регресійні рівняння, що дозволяють визначити ефективність посилення дорожніх одягів геогратками. На основі експериментальних досліджень встановлені критерії міцності дорожніх одягів, посиленних геогратками, розрахункові схеми, математична модель та інженерна методика розрахунку. На підставі аналізу напружено-деформованого стану посилених дорожніх конструкцій виконано оцінку впливу геограток на величину активних зсувних напруг у ґрунті основи та на величину еквівалентного модуля пружності дорожньої конструкції.

4. Запропоновано методику розрахунку дорожніх одягів із врахуванням коефіцієнта посилення, що дозволяє підвищити точність проєктних рішень. Отримані результати використані при розробленні нормативного документа СОУ 42.1–21483639-004:2017 «Методи проєктування дорожніх одягів та штучних основ з георешітками». Запропонована удосконалена методика розрахунку рекомендується для застосування як при проєктуванні нових конструкцій дорожнього одягу, так і для підсилення існуючих. Відповідно до наведених розрахунків економія при влаштуванні посиленої конструкції складає 21 %.

5. Матеріали досліджень було впроваджено у навчальний процес НТУ на факультеті транспортного будівництва. Основні теоретичні та прикладні результати реалізовані у межах науково-дослідних робіт і підтверджені відповідними довідками про впровадження із таких організацій: Служби відновлення та розвитку інфраструктури в Одеській області, ТОВ «НВФ «Мостопроєкт», ДП «Західний реабілітаційно-спортивний центр» та ТОВ «НТЦ» «Дорінжнаука».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Арсеньева Н. О. Удосконалення методу розрахунку нежорстких дорожніх одягів з урахуванням критерію міцності асфальтобетонних шарів на зсув : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.11. Харків, 2014. 212 с.
2. Балашова Ю. Б. Методика визначення несучої здатності слабких основ з урахуванням реологічних параметрів ґрунту. *Автодорожній комплекс України в сучасних умовах: проблеми і шляхи розвитку*. 1998. С. 88–92.
3. Батракова А. Г. Методологія моніторингу дорожніх одягів нежорсткого типу із застосуванням георадіолокаційних технологій : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.11. Харків, 2014. 390 с.
4. Білятинський О. А., Старовойда В. П. Проектування капітального ремонту і реконструкції доріг. Київ : Вища освіта, 2003. 343 с.
5. Богомолів В. О., Жданюк В. К., Богомолів С. В. Щодо необхідності розробки нової методики розрахунку напружено-деформованого стану дорожнього одягу. *Автошляховик України*. 2011. № 1. С. 23–26.
6. Бубела А. В. Вплив дорожніх умов на транспортно-експлуатаційний стан автомобільної дороги. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2018. Вип. 103. С. 61–65.
7. Бубела А. В. Дослідження зміни транспортно-експлуатаційного стану покриттів в умовах перезволоження. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019. Вип. 106. С. 6–12.
8. Варивода О.М., Харін П.Л. Механізм посилення насипів на слабких основах. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури збірник наукових праць*, 2018. Вип. 7. С. 161-169. https://drive.google.com/file/d/1DLnGV1YiL-1RvZcogF25OVF0c5_wdLMn/view
9. ВБН Г.1-218-050-2001. Міжремонтні строки експлуатації дорожніх одягів та покриттів на автомобільних дорогах загального користування. [Чинні від 2002-01-

01]. Київ : Українська державна корпорація по будівництву, ремонту та утриманню автомобільних доріг, 2001. 7 с.

10. Воловик О. О. Підвищення стійкості асфальтобетонних покриттів дорожніх одягів автомобільних доріг до утворення колії : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.11. Харків, 2016. 148 с.

11. Гамеляк І. П., Райковський В. Ф. Визначення інтенсивності руху та складу транспортного потоку на автомобільних дорогах загального користування. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019. Вип. 107. С. 13–22.

12. Гамеляк І. П., Райковський В. Ф. Дослідження руйнівного впливу перевантажених транспортних засобів на термін служби нежорстких конструкцій дорожнього одягу. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2022р. № 2. С. 99–107. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2022-2-99-107>.

13. Гамеляк І. П. Основи забезпечення надійності конструкцій дорожнього одягу : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.11. Київ, 2005. 33 с.

14. Гамеляк І. П., Волощук Д. В. Аналіз транспортно-експлуатаційних показників стану автомобільних доріг державного значення. *Вісник Національного транспортного університету*. 2014. № 26 (1). С. 52–57.

15. Гамеляк І. П., Волощук Д. В. Надійність конструкцій дорожнього одягу армованих геотратками. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2019. Вип. 105. С. 49–59.

16. Гамеляк І. П., Оксень Є. І., Дмитриченко А. М., Коц І. В. Розрахунок основ насипів автомобільних доріг на слабких лесових ґрунтах з ущільненням ударним методом. *Матеріали ІІІ наук.-техн. конф. підрозділів ВНТУ*. (м. Вінниця, 20–22 берез. 2024 р.). Вінниця, 2024. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20784>.

17. Гамеляк І. П., Цибульський В. М., Харченко А. М. Розвиток методів оцінки напружено-деформованого стану армованого жорсткого дорожнього одягу. *Technical sciences: the analysis of trends and development prospects* : Conference Paper. (Prague,

Czech Republic, July 2–3, 2021). Prague, 2021. С. 98–100. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-109-1-23>.

18. ГБН В.2.3-37641918-559:2019. Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. [Чинні від 2019-06-01]. Київ : Міністерство інфраструктури, 2019. 63 с.

19. Головка С. К. Дослідження фізико-механічних властивостей асфальтобетонів, що містять повторно використаний асфальтобетон. *Автошляховик*. 1998. № 3. С. 30–32.

20. Гришук Ю. С. Основи наукових досліджень : навч. посіб. Харків : НТУ «ХП», 2008. 232 с.

21. Гуртина Л. Г., Харін П. Л., Хлапук М. М., Шумінський В. Д. Ефективність роботи споруд з ґрунтових матеріалів, підсилених георешітками, з врахуванням сейсмічних впливів. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Технічні науки*. 2019. Вип. 2. С. 28-44. DOI: <https://doi.org/10.31713/vt220193>.

22. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. [Чинний від 2009-12-01]. Київ : ВАТ «Український науково-дослідний та проектний інститут сталевих конструкцій імені В. М. Шимановського», 2009. 48 с.

23. ДБН В.2.3-4:2015 Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. [Чинні від 2016-04-01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. 112 с.

24. Довідник № 4. Кліматичні характеристики та кліматичне районування території України для регулювання водно-теплового режиму в дорожньому будівництві. [Чинний від 2018-11-01]. Вид. офіц. Київ : Державне агентство автомобільних доріг України (Укравтодор), Національний транспортний університет, 2018. 98 с.

25. Дорожко Є. В. Удосконалення методу розрахунку тонких асфальтобетонних шарів на жорсткій основі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.11. Харків, 2016. 20 с.

26. Дослідження напружено-деформованого стану дорожнього одягу з укріпленою основою під поперечними тріщинами і швами / С. А. Баран та ін. *Вісник Національного транспортного університету. Технічні науки*. 2019. Вип. 1(43). С. 26–38.

27. ДСТУ 8747:2017. Автомобільні дороги. Види та переліки робіт з ремонтів та експлуатаційного утримання. [Чинний від 2020.01.01]. Київ : ДП «Державний дорожній науково-дослідний інститут ім. М. П. Шульгіна», Технічний комітет стандартизації «Автомобільні дороги і транспортні споруди», 2018. 14 с.

28. ДСТУ 8888:2019. Георешітки полімерні жорсткі тривісноорієнтовані. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2020-10-01]. Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019. 17 с.

29. ДСТУ 8954:2019. Автомобільні дороги. Оцінювання рівня дефектності дорожнього одягу. [Чинний від 2021.01.01]. Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019. 36 с.

30. ДСТУ Б В.2.7-127-2015. Суміші асфальтобетонні і асфальтобетон щебенево-мастикові. Технічні умови. [Чинний від 2016.07.01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку України, 2015. 30 с.

31. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. [Чинний від 1996-01-01]. Київ : Держкоммістобудування України, 1996. 44 с.

32. ДСТУ Б В.2.7-33-2001. Пісок кварцево-залізистий і тонкодисперсна фракція для будівельних робіт з відходів гірничозбагачувальних комбінатів України. Технічні умови. [Чинний від 2002-04-01]. Київ : Держбуд України, 2001. 39 с.

33. ДСТУ Б В.2.7-34-2001. Будівельні матеріали. Щебінь для будівельних робіт із скельних гірських порід та відходів сухого магнітного збагачення залізистих кварцитів гірничо-збагачувальних комбінатів і шахт України. Технічні умови [Чинний від 2002-04-01]. Київ : Держбуд України, 2001. 36 с.

34. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Будівельні матеріали. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови [Чинний від 1999-01-01]. Київ : Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1999. 39 с.

35. ДСТУ Б Д.2.2-27:2016. Ресурсні елементні кошторисні норми на будівельні роботи. Автомобільні дороги (Збірник 27). [Чинний від 2017.01.01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 86 с.

36. ДСТУ Б Д.2.7-1:2012. Ресурсні кошторисні норми експлуатації будівельних машин та механізмів. [Чинний від 2017-04-01]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2016. 75 с.

37. ДСТУ-Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). [Чинний від 2013-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 81 с.

38. Дубик О. М. Аналіз методів розрахунку на міцність дорожніх одягів нежорсткого типу при застосуванні технології холодного ресайклінгу. *Проблеми розвитку міського середовища*. 2014. Вип. 1 (11). С. 465–474

39. Дубик О. М. Дослідження напружено-деформованого стану ізотропного ґрунтового півпростору під конструкцію дорожнього одягу нежорсткого типу. *Покращення конструктивних, технологічних та експлуатаційних показників автомобільних доріг і штучних споруд на них в дослідженнях студентів і молодих науковців* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 6 листоп. 2014 р.). Харків, 2014. С. 16–21.

40. Дубик О. М. Розрахунок на міцність захисних залізобетонних обойм безнапірних труб дощових мереж від дії дорожнього покриття і тиску тягача НК – 80. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2013. Вип. 87. С. 23–28.

41. Дубик О. М., Талах С. М. Дослідження впливу параметрів дорожньої конструкції на її напружено-деформований стан під дією розрахункового навантаження. *Авіа-2015* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 28–29 квітня 2015 р.). Київ, 2015. С. 22.21–22.24.

42. Дубик О. М., Талах С. М. Модель загального процесу нелінійного деформування нежорстких дорожніх одягів. *Міське середовище ХХІ ст. Архітектура. Будівництво. Дизайн* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конгресу (м. Київ, 15–18 берез. 2016 р.). Київ, 2016. С. 29–30.

43. Дубик О. М., Талах С. М. Фізичне моделювання реологічних процесів в конструкціях нежорстких дорожніх одягів. *Проблеми і перспективи сталого розвитку та просторового планування територій* : матеріали Всеукр. Інтернет-конф. молодих учених і студ. (м. Полтава, 18 берез. 2015 р.). Полтава, 2015. С. 160–163.

44. Ігнатюк В. В. Управління програмами ремонтів дорожнього одягу автомобільних доріг : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.22. Київ, 2015. 20 с.

45. Каталог сучасних матеріалів для будівництва, ремонтів та експлуатаційного утримання автомобільних доріг загального користування. Київ : ДерждорНДІ. 2011, 111 с.

46. Кизима С. С. Експлуатація автомобільних доріг : навч. посіб. Київ : НТУ, 2009. 272 с.

47. Кизима С. С., Андреев С. І. Призначення робіт по ремонту дорожніх покриттів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1992. Вип. 50. С. 29–33.

48. Кизима С. С., Канін О. П., Лихоступ М. М., Андреев С. І. Загальна характеристика української системи управління станом нежорстких дорожніх одягів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2001. Вип. 62. С. 76–80.

49. Кірічек Ю. О., Балашова Ю. Б., Легка Н. В. Застосування армування при проектуванні автомобільних доріг на органогенних глинистих ґрунтах. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2010. Вип. 78. С. 114–120.
50. Кіяшко І. В., Смолянчук Р. В., Новаковський Д. М., Пархоменко О. Ю. Діагностика стану покриттів новітніми ходовими дорожніми лабораторіями: сучасний стан та перспективи розвитку. *Автошляховик України*. 2018. № 67. С. 31–36.
51. Кореляційні випробування засобів оцінки міцності дорожніх конструкцій / Д. О. Павлюк та ін. *Автошляховик України*. 2008. № 2. С. 26–33.
52. Корчевський Б. Б. Влаштування армованих основ під фундаменти : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02. Київ, 2002. 192 с.
53. Кузло М. Т. Моделювання деформацій ґрунтових масивів при зміні гідрогеологічних умов та дії техногенних факторів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02. Київ, 2014. 34 с.
54. Кузло М. Т. Напружено-деформований стан ґрунтових масивів в умовах фільтраційної консолідації сольових розчинів. *Вісник ОДАБА*. 2012. Вип. 48. Ч.1. С. 270–279.
55. Кузло М. Т. Оцінка напружено-деформованого стану багат шарового ґрунтового масиву при дії фільтраційного потоку. *Комунальне господарство міст*. 2012. № 105. С. 232–241.
56. Кушнір О. В., Гамеляк І. П., Райковський В. Ф., Клімов Ю. М. Проектування конструкції дорожнього одягу для перевезення великовагових та великогабаритних вантажів дорогами України. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2020. Vol. VIII(30), Is. 244. P. 53–58.
57. Лантух-Лященко А.І. Оцінка надійності споруди за моделлю марковського випадкового процесу з дискретними станами. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1999. Вип. 57. С. 183–188.
58. Лапач С. М. Теорія планування експериментів. Виконання розрахунково-графічної роботи : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с. URL:

<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e80b3665-5324-4155-a675-a1f0a11f9bdb/content>.

59. Лежнюк П.Д., Рубаненко О. Є., Лук'яненко Ю. В. Основи теорії планування експерименту. Лабораторний практикум. Вінниця : ВНТУ, 2006. 168 с.
60. Мішутін А. В., Смолянець В. В., Даценко В. М. Аналіз стану покриття на транспортних спорудах України. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2015. Вип. 93. С. 263–272.
61. МР В.2.3-03450778-847:2014. Методичні рекомендації з техніко-економічного порівняння конструкцій дорожнього одягу різного типу. [Чинні від 2015-01-01]. Київ : Державне агентство автомобільних доріг України, 2014.
62. Надійність конструкцій дорожнього одягу: навч. посіб. / М. Ф. Дмитриченко та ін. Київ : НТУ, 2012. 216 с.
63. Онищенко А. М., Гаркуша М. В. Заходи з підвищення колієстійкості асфальтобетонного покриття автомобільних доріг з інтенсивним рухом великовантажних транспортних засобів. *Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури*. 2013. Вип. 1 (99). С. 58–63
64. Особливості технології підсилення дорожніх покриттів шарами цементобетону / І. П. Гамеляк та ін. *Дороги і мости*. 2020. Вип. 22. С 63–78. DOI: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.22.063>.
65. Павленко Н. В. Удосконалення методу розрахунку дорожніх одягів перехідного типу із дискретних та малозв'язних матеріалів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.11. Київ, 2013. 21 с.
66. Посібник дорожніх «хвороб». Київ : CoST Україна, 2019. 198 с.
67. Розрахунок на міцність багатошарового дорожнього покриття нежорсткого типу на основі уточненої теорії / Н. В. Довгополова та ін. *Науковий вісник будівництва*. 2006. Вип. 39. С. 177–183.
68. Рубан О. А., Балашова Ю. Б. Розрахункові параметри армованих ґрунтових зразків під час стискання по одній осі. *Вісник ВІГІ*. 2000. № 6. С. 11–14.

69. Ряпухін В. М., Нечитайло Н. О. Вибір оптимальної теорії міцності асфальтобетону як термопластичного матеріалу. *Збірник наукових праць Донбаського Державного технічного університету*. 2010. Вип. 33. С. 284–290.
70. Ряпухін В. М., Нечитайло Н. О. Використання критерію міцності Писаренко-Лебедева (2) для оцінки міцності асфальтобетонних шарів нежорстких дорожніх одягів. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2012. Вип. 85. С. 9–19.
71. Савенко В. Я., Каськів В. І. Вплив опадів на розподіл вологості ґрунтів верхньої частини земляного полотна. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 1997. Вип. 54. С. 10–16.
72. Смірнова Н. В., Павленко Н. В. Визначення перспективної інтенсивності руху та розрахункового навантаження в задачах обґрунтування капітального ремонту. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2017. Вип. 100. С. 21–27.
73. Смолянець В. В. Удосконалення проектування асфальтобетонного покриття нежорсткого дорожнього одягу в умовах міст : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.11. Київ, 2005 108 с.
74. Смолянчук Р. В., Биценко Ю. П. Роль пересувних дорожніх лабораторій в структурі управління станом автомобільних доріг. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2013. Вип. 90. С. 149–153.
75. СОУ 45.2-00018112-042:2009. Автомобільні дороги. Визначення транспортно-експлуатаційних показників дорожніх одягів. [Чинний від 2009-08-01] Київ : Державна служба автомобільних доріг України, 2009.
76. Талах С. М., Дубик О. М. Моделювання конструкції дорожнього одягу нежорсткого типу при взаємодії з ґрунтовою основою. *Проблеми розвитку міського середовища*. 2015. Вип. 2 (14). С. 62–72.
77. Угрімов С. В. Однобічний контакт багатошарових конструкцій з пружною основою. *Коммунальное хозяйство городов*. 2007. № 79. С. 173–177.
78. Угрімов С. В., Шупіков О. М. Динамічна контактна задача для двох смуг. *Машинознавство*. 2003. № 4 (70). С. 13–17.

79. Урдзік С. М. Батракова А. Г. Моделювання впливу заходів щодо посилення конструкцій дорожніх одягів з підповерхневими тріщинами. *Науковий вісник будівництва*. 2018. № 4 (94). С 110–116.

80. Урдзік С. М. Оцінювання стану нежорсткого дорожнього одягу із залученням георадарної діагностики : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.11. Харків, 2019. 300 с.

81. Усиченко О. Ю., Барабанова Т. Г. Нормативна база по застосуванню геосинтетичних матеріалів в дорожньому будівництві. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2011. Вип. 81. С. 24–29.

82. Усиченко О.Ю., Харін П.Л. Огляд використання геосинтетичних матеріалів Tensar в транспортному будівництві. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: 2015 Вип. 93 С. 97-105.
http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/93/097-105.pdf

83. Усиченко О.Ю., Харін П.Л. Використання армоґрунтових конструкцій Тенсар на слабких перезволожених ґрунтах. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: 2016 Вип. 95 С. 97-103.
http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/95/096-103.pdf

84. Усиченко О.Ю., Смірнова Н.В., Кушнірова О.М., Харін П.Л. Обґрунтування моделі розрахунку незв'язних шарів дорожньої конструкції, що стабілізовані геограткою. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*: 2020 Вип. 108. С. 84–95. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/108/84.pdf

85. Усиченко О.Ю., Харін П.Л., Зарічний А.О. Експериментальні дослідження конструкцій дорожніх одягів посилених жорсткими багатовісноорієнтованими полімерними георешітками. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2024. Вип 115 С. 284 – 291.

86. Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів: навч. посіб. / В. І. Братчун, та ін.; за ред. В. І. Братчуна. 2-ге вид., перероб. і доповн. Макіївка – Харків : ДонНАБА, 2011. 336 с.

87. Харін П.Л., Плитус Р. М. Метод розрахунку нежорсткого дорожнього одягу посиленого геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво* 2025. Вип 115. С. 100-108. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2025-117.1-100-108>
88. Черний Г. І., Ковальський Р. К. Принципи застосування методу армування ґрунтів в складних ґрунтових умовах. *Будівельні конструкції*. 2001. № 55. С.154–158.
89. Черний Г. І., Ковальський Р. К., Шаповал А. В. Особливості визначення напружено-деформаційного стану армованих ґрунтових основ з використанням методу кінцевих елементів. *Будівельні конструкції*. 2001. № 55. С. 159–172.
90. Andrawes K. Z., McGown A. The Finite Element Method of Analysis Applied to Soil – Geotextile Systems. *Proc. of the 2nd int. conf. on geotextiles*, Las Vegas. 1982. Vol 2. P. 690–700.
91. Bender D.A., Barenbed E. J. Design and Behaviour of Soil-Fabric-Aggregate Systems. *Engineering, Environmental Science. Transportation Research Record*. 1978. Vol. 671. P. 64–75.
92. Binquet J., Lee K. L. Bering Capacity Analysis of Reinforced Earth Slabs. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1975. Vol. 101, no 12. P. 1241–1255. DOI: <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000220>.
93. Brown S. F., Jones C. R. D., Brodrick B. V. Use of Non-woven Fabrics in Permarent Road Pavements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. Part 2. Vol. 73. P. 541–563.
94. Coyn M. A. Murs de' soutenement et murs de quai a echelle. *Le Genie Civil. Paris*. 1945. Vol. 15.
95. Duddu S. R., Kommanamanchi V., Chennarapu H., Lees A. Performance of Granular Materials Stabilized with Triaxial Geogrid Reinforcement. 2024. *Indian Geotechnical Journal*. Vol. 54(6). P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40098-023-00834-0>.

96. Forsyth R. A. Alternative Earthwork Reinforcements. *Symposium on Earth Reinforcement*. ASCE. New York. 1978. P. 358–370.
97. Fragaszy R.I., Lawton E. Bearing Capacity of Reinforced Sand Subgrades. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1984. Vol. 110, no10. P. 1500–1507. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1984\)110:10\(1500\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1984)110:10(1500)).
98. Guido V. A. Bearing capacity of reinforced sand subgrades. *Journal of Geotechnical Engineering*. 1987. Vol. 113, no GT 5. P.541–544.
99. Hausmann M. R. Strength of Reinforced Soil. *Australian Road Research Board Conference Proc.* 1976. Vol. 15, no 1. P. 114–119.
100. Holicky M., Markova J., Sykora M. Partial factors for assessment of existing reinforced concrete bridges. *The 6th International Probabilistic Workshop*. Darmstadt, Germany. 2008. P. 117–133.
101. Huang C. C., Tatsuo F. Bearing Capacity of Reinforced Horizontal Sandy Ground. *Geotextiles and Geomembrans*. 1990. Vol. 9. P. 51–82.
102. Jay J. S., Robret O. J. Design and Use of Geotextiles in Road Construction. *The Third Conference of road Engineering Association of Asia and Australia*. 1981. P. 32–39.
103. Jenner C. G. The Reinforcement of the Granular Layers of Roads and Railways. *Railway Engineering Conference*. London. 2007. Vol. 6, no. 4. P. 261–282.
104. Jewell R. A. Some Effects of Reinforcement on the Mechanical Behavior of Soils. *PhD Thesis*. University of Cambridge, UK. 1980.
105. Jewell R. A. Some Factors which Influence the Shear Strength of Reinforced Sand. *Symposium on Computer Applications to Geotechnical Engineering. Problems in Highway Engineering*. 1985. CUED/D/Soils/TR85.
106. Jones C. J. F. P., Sims F. H. Earth Pressures Against the Abutments and Wingwalls of Standard Motorway Bridges. *Geotechnique*. 1975. Vol. 4. P. 436–482.
107. Jones C. R. D. Cracking the Pavement Taibire Problem. *The Consulting Engineer*. 1981. Vol. 45, no 7. P. 37–41.

108. Joy W. Geotextilien – Einsatz Textiler Haebren im End. *Wasser – und Strapenban. Prax. int.* 1983. Vol. 38, no 3. P. 209–211.
109. Kropáč O., Múcka P. Estimation of Road Waviness Using the IRI Algorithm. *Strojnícky casopis. Journal of Mechanical Engineering.* 2004. Vol. 55 (5). P. 308–313.
110. Lees A., Tutumluer E. Characterising Geomaterial Shakedown and Related Deformation Accumulation from Cyclic Tiaxial Tests. *Transportation Geotechnics.* 2024. Vol. 50(3):101455. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101455>.
111. Long N.T., Guegan Y., Legeay G. Etude de la Terre Armee Appereit Triaxial. *Rap. de Recher. du Labor. Central des ponts et Chosses.* 1980. Vol. 17. P. 6–11.
112. L. Gurtina, I. Mazur, V. Sedin, K. Bikus, V. Kovba, Y. Slyusarenko, V. Tytarenko, N. Kosheleva, P. Kharin, R. Plytus, I. Kaliukh Case study. Experimental and theoretical analysis of reinforcement of weak soils with geogrids at the foundation on the basis of field studies of a road embankment bypassing the city of Reni, Ukraine. *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet.* 2023. C. 1254-1260.
113. Mahmoud M. A., Abdrabbo F. M. Bearing Capacity Tests on Strip Footing on Reinforced Sand Syb Grade. *Canadian Geotechnical Journal.* 2011. Vol. 26(1). P. 154–159. DOI: <https://doi.org/10.1139/t89-015>.
114. Milovic D. Bearing Capacity Test on Reinforced Sand. *9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineerng.* Tokyo. Japan. 1977. Vol. 1. P. 651–654.
115. Missaroli R. Rucerca Sull dei Geotessili Nella Construzione di Strade. *Textilia.* 1983. Vol. 59, no 1. P. 37–47.
116. Narain T., Saran S., Talwar D. V. Laboratory Behaviour of Reinforced Earth Wall. *10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering.* Stocholm, Sweden. 1978. Vol. 12 (38). P. 753–756.
117. Potter J. F., Curren E. W. The Effekt of a Fabric Membrane on the Structural Behaviour of a Granular Road Pavement. *Transport and Road Research Laboratory (TRRL). Report No. LR996.* 1981.

118. Prediction of the Road Pavement Condition Index Using Stochastic Models. Roads and Bridges / A. G. Batrakova et al. *Drogi i Mosty*. 2020. Vol. 19, no 3. P. 225–242. DOI: <https://doi.org/10.7409/rabdim.020.015>.
119. Rakowski Z. Tests of Geo-Grids Reinforcement Effectiveness in Geomattresses integrated in the Foundation of Embankment on Soft Subsoil. Hungary : Technical University of GYÖR. 2007. 15 p.
120. Sahil A. Kuwano W. J., Regmi K. P., Yamato T. Laboratory Evaluation of Geogrid Confinement to Improve Road Pavement Structure. *Conference: IGs*. 2024. URL: <https://www.researchgate.net/publication/386429950>
121. Sakty J. P., Braje M. D. Model Test for Strip Foundation on Clay Reinforced with Geotextile Layers. *Journal of the Transportation research record*. 1978. Vol. 1. P. 42–45.
122. Saran S., Talwar D. V., Vaish U. S. Some Aspects of Engineering Behaviour of Reinforced Earth. Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practice. *Proc. symposium jointly organised by NSWT and Univ. of NSW Sydney, Australia*. 1978.
123. Smith A.K.C.F. Experimental and Computational Investigations of Model Reinforced Earth Retaining Walls. *Ph. D. Thesis*. Cambridge University, 1977.
124. Terzarioli J. S. Reinforced Clay Subject to Undrained Triaxial Loading. *Geotechn. Eng.* 1983. Vol. 109, no 5. P. 738–744.
125. UWB Signal Processing for the Road Pavements Assessment / D. Batrakov et al. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, Ukraine, 2019, July 2–6. P. 192–195. DOI: <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2019.8879866>.
126. Verma B. O., Char A. N. R. Bearing Capacity Tests on Reinforced Sand Subgrades. *Journal of Geotechnical engineering*. 1986. Vol. 112, no 7. P. 701–707.
127. Vidal H. The Development and Future of Reinforced Earth. *Keynote address. Symposium Earth Reinforcement*. ASCE, Pittsburgh. 1978. P. 1–61.

128. Westergaad H. M. A Problem of Elasticity Suggested by a Problem Soil Mechanics: Soft Material Reinforced by Numerous Strong Horizontal Sheets. *Contributions to the Mechanics of Solids Dedicated to Stephen Timoshenko by his Friends on the Occasions of the Sixtieth Birthday Anniversary*. The Mecomillan Company, New York, 1938.

129. Zamara K. A. R., Kawalec J., Wayne M. Cost Effective & Sustainable Solutions for Embankments on Soft Soils – Performance Review of Geocells in Embankment. *XVIII ECSMGE 2024. Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*. P. 2577–2580. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003431749-499>.

130. Zamara K. R., Moormann C., Kawalec J., Wayne M. Temporary Working Platforms Full Scale Testing – Review of Valid Methodology. *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet* / eds. By G. Biondi et al. London : CRC Press, 2023. P. 2044–2050. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003386889-275>.

ДОДАТОК А

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКЦІЇ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПОСИЛЕНОЇ ГЕОГРАТКОЮ

Вихідні дані для розрахунку

1. Категорія дороги – II;
2. Дорожньо-кліматична зона – II, Полтавська обл;
3. Розрахунковий строк служби дорожнього одягу $T_{сл} = 13$ років;
4. Задана надійність $K_H = 0,95$;
5. Навантаження на одиничну вісь $F = 115$ кН, $P = 0,6$ МПа;
6. Інтенсивність руху на кінець строку служби $N_p = 5000$ авт./д; збільшення інт. руху $q = 1,03$;
7. Ґрунт робочого шару земляного полотна – пісок пилюватий, $E = 5$ МПа;
8. Тип зволоження робочого шару земляного полотна – 2;
9. Матеріали штучної основи: несучий шар – щебенево пісчана суміш С-5.

Розрахунок дорожньої конструкції, посиленої геограткою Tensar TX 170 та Tensar TX 160

Розрахунок за допустимим пружним прогином

Розрахунок ведеться пошарово, починаючи з підстилаючого ґрунту.

Загальний модуль пружності традиційної конструкції складе:

$$E_{заг} = 349,15 \text{ МПа}$$

Матеріал шару	h, см	Модуль пружності E, МПа, при розрахунку:		Розрахунок монолітних шарів на розтяг при згині			
		за допустимим пружним прогином	за зсувостійкіс тю	E, МПа	R ₀ , МПа	α	m
ЩМА-15, бітум БНД60/90	5	3100	1800	4500	9,8	5,2	5,5
Гарячий щільний дрібнозернистий асфальтобетон марки I, бітум БНД 60/90	6	3200	1800	4500	9,8	5,2	5,5
Гарячий пористий крупнозернистий асфальтобетон марки I, бітум БНД 60/90	10	2000	1200	2800	8	5,9	4,3
Щебенево пісчана суміш С-7, оброблена цементом М 20	17	400	400	400	-	-	-
Щебенево пісчана суміш С-5 Геогратка «Tensar TX 160»	25	260	260	260	-	-	-
Щебенево пісчана суміш С-5 Геогратка «Tensar TX 170»	25	260	260	260	-	-	-

Посилення шару щебеневу пісчаною сумішшю С-5 геораткою «Tensar TX 160» та «Tensar TX 170» підвищує загальний модуль пружності конструкції дорожнього одягу:

$$E_{\text{заг}}^{\text{пос}} = \alpha_1 \cdot E_{\text{заг}}$$

де α_1 – коефіцієнт який визначається за формулою :

$$\alpha_1 = \left[0,3237 + 0,247 \cdot \frac{0,21}{0,39} + 0,352 \cdot \frac{0,21}{0,39} + 0,000006833 \cdot 2604,76 + 0,00035 \cdot 260 + 0,000131 \cdot 82,62 \right]^{-1} = 1,2659,$$

де

$$E_{\text{п}} = \frac{3100 \cdot 0,05 + 3200 \cdot 0,06 + 2000 \cdot 0,10}{0,05 + 0,06 + 0,10} = 2604,76 \text{ МПа};$$

$$E_{\text{осн}} = 260 \text{ МПа};$$

$$E_{\text{гр}} = 5 \text{ МПа};$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, b_1, b_2, b_3$ - коефіцієнти рівняння.

Таким чином, загальний модуль пружності дорожньої конструкції, посиленої георатками Tensar TX 170 та Tensar TX 160, дорівнює:

$$E_{\text{заг}}^{\text{пос}} = 1,2659 \cdot 349,15 = 442,25 \text{ МПа}$$

Перевірка виконання умови міцності за пружним прогином:

$$\frac{E_{\text{заг}}}{E_{\text{min}}} = \frac{442,25}{288,12} \approx 1,53 > K_{\text{пр}}^{\text{потр}} = 1,5$$

Умова міцності виконана.

Розрахунок конструкції за умовою зсувостійкості ґрунту

Середньозважений модуль пружності верхнього шару $E_{\text{в}} = 376,54 \text{ МПа}$.

За співвідношеннями $\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{н}}}$ та $\frac{h_{\text{в}}}{D}$ і при $\varphi = 8^\circ$ за допомогою:

$$\bar{\tau} = 0,01262, \text{ тоді } T = 0,01262 \cdot 0,6 = 0,00757 \text{ МПа.}$$

Гранична активна напруга зсуву $T_{\text{пр}}$ у ґрунті робочого шару:

$$T_{\text{пр}} = 1,0 \cdot (0,003 + 0,1 \cdot 0,00207 \cdot 104 \cdot \tan 33^\circ) = 0,01702 \text{ МПа}$$

Перевірка виконання умови міцності за зсувостійкістю ґрунту:

$$\frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,01702}{0,00757} \approx 2,25 > K_{\text{пр}}^{\text{тр}} = 1,1$$

Умова міцності виконана.

Розрахунок конструкції за умовою зсувостійкості

Діючі у шарі піску активні напруги зсуву вираховуються за формулою . Для визначення $\bar{\tau}$ попередньо визначена дорожня конструкція приводиться до двошарової розрахункової моделі.

Нижньому шару моделі присвоюються наступні характеристики:

$$E_{\text{заг}}^{\text{ГР}} = 39,62 \text{ МПа}, \varphi = 27^\circ; c = 0,002 \text{ МПа}.$$

Середньозважений модуль пружності верхнього шару $E_{\text{в}} = 626,09 \text{ МПа}$.

За співвідношеннями $\frac{E_{\text{в}}}{E_{\text{н}}}$ та $\frac{h_{\text{в}}}{D}$ і при $\varphi = 27^\circ$ за допомогою номограми рисунка 3.2 [2] вираховується одинична активна напруга зсуву:

$$\bar{\tau} = 0,02663, \text{ тоді } T = 0,02663 \cdot 0,6 = 0,01598 \text{ МПа}.$$

При посилені шару щебеневу пісчаною сумішшю С-5 геограткою Tensar TX 160 та Tensar TX 170 при динамічній дії навантаження величина активних напруг зсуву зменшиться в α_3 рази.

α_3 - коефіцієнт підсилення (коефіцієнт зниження активних напруг зсуву), який визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \alpha_3 = & (0,1314 + 0,2010 \frac{0,22}{0,4} - 0,0742 \frac{0,24}{0,4} + 0,0270 \frac{2709,09}{1770} + 0,9433 \frac{350}{1770} + 4,3842 \frac{104,62}{1770} \\ & - 0,0390 \left(\frac{0,22}{0,4} \right)^2 - 0,1447 \frac{0,22}{0,4} \frac{0,24}{0,4} + 0,0831 \frac{0,22}{0,4} \frac{2709,09}{1770} - \\ & - 0,1069 \frac{0,22}{0,4} \frac{350}{1770} - 0,3888 \frac{0,22}{0,4} \frac{104,62}{1770} + 0,0926 \left(\frac{0,24}{0,4} \right)^2 - 0,0385 \frac{0,24}{0,4} \frac{2709,09}{1770} + 0,2112 \frac{0,24}{0,4} \frac{350}{1770} \\ & - 0,8142 \frac{0,24}{0,4} \frac{104,62}{1770} + \\ & + 0,0048 \left(\frac{2709,09}{1770} \right)^2 - 0,0678 \frac{2709,09}{1770} \frac{350}{1770} - 0,0210 \frac{2709,09}{1770} \frac{104,62}{1770} - 0,1477 \left(\frac{350}{1770} \right)^2 \\ & - 5,5865 \frac{350}{1770} \frac{104,62}{1770} - 11,0547 \left(\frac{104,62}{1770} \right)^2)^{-1} = 1,83986 \end{aligned}$$

Тоді одиничне активне напруження зсуву становить:

$$T_{\text{а}} = \frac{T}{\alpha_3} = \frac{0,01598}{1,83986} = 0,00869 \text{ МПа}.$$

Граничне активне напруження зсуву $T_{\text{пр}}$:

$$T_{\text{пр}} = 2,0 \cdot (0,002 + 0,1 \cdot 0,0021 \cdot 46 \cdot \text{tg} 27^\circ) = 0,01648 \text{ МПа}.$$

Перевірка виконання умови міцності за зсувостійкістю:

$$\frac{T_{\text{пр}}}{T} = \frac{0,01648}{0,00869} \approx 1,89 > K_{\text{пр}}^{\text{ГР}} = 1,1$$

Умова міцності виконана.

Розрахунок посиленої конструкції на опір монолітних шарів втомному руйнуванню від розтягу при згині Розрахунок проводиться наступним чином:

а) Конструкція приводиться до двохшарової моделі, у якій нижній шар – частина конструкції, розташована нижче пакету асфальтобетонних шарів, тобто шари основи та ґрунт робочого шару. Модуль нижнього шару визначається як загальний модуль шарів основи та ґрунту робочого шару.

Загальний модуль пружності нижнього шару

$$E_{\text{заг.пос.}} = \alpha_2 \cdot E_{\text{заг.}};$$

де $E_{\text{заг.}}$ - модуль пружності нижнього шару без урахування ефекту посилення несучого шару основи георешіткою.

$$E_{\text{заг.}} = 173,75 \text{ МПа.}$$

α_2 - коефіцієнт підсилення (коефіцієнт збільшення загального модуля пружності основи армованої дорожньої конструкції), який визначається формулою:

$$\alpha_2 = \left[0,3234 + 0,1153 \frac{0,22}{0,4} + 0,2864 \frac{0,24}{0,4} - 7,222 \cdot 10^{-7} \cdot 2709,09 + 3,41 \cdot 10^{-4} \cdot 350 - 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 104,62 \right]^{-1} = 1,4775$$

$$\text{де } E_{\text{п}} = \frac{3100 \cdot 0,05 + 3200 \cdot 0,06 + 2000 \cdot 0,10}{0,05 + 0,06 + 0,10} = 2709,09 \text{ МПа;}$$

$$E_{\text{осн}} = 5 \text{ МПа;}$$

$$E_{\text{гр}} = \frac{60}{1 - \frac{2}{3,1416} \left[1 - \left(\frac{60}{120} \right)^{\frac{4}{3}} \right] \cdot \arctg \left[1,1 \cdot \left(\frac{120}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \cdot \frac{0,58}{0,4}} = 104,62 \text{ МПа}$$

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, b_1, b_2, b_3$ - коефіцієнти рівняння;

Таким чином, загальний модуль пружності основи посиленої дорожньої конструкції дорівнює:

$$E_{\text{заг.пос.}} = 1,4775 \cdot 173,75 = 256,72 \text{ МПа.}$$

До верхнього шару відносяться усі асфальтобетонні шари.

Модуль пружності верхнього шару $E_1 = 3804,55 \text{ МПа.}$

$$\text{б) За співвідношеннями } \frac{E_1}{E_{\text{заг}}} = \frac{3804,55}{256,72} = 14,82 \text{ та } \frac{h_1}{D} = \frac{0,22}{0,4} = 0,55 \text{ визначається}$$

$$\bar{\sigma}_r = 1,3679.$$

Розрахункова розтягуюча напружка вираховується за формулою :

$$\bar{\sigma}_r = \bar{\sigma}_r \cdot p \cdot k_b = 1,3679 \cdot 0,6 \cdot 0,85 = 0,69763 \text{ МПа.}$$

в) Розраховується гранична розтягуюча напружка :

$$\text{при } R_0 = 8,0 \text{ МПа; } \nu R = 0,1; t = 2,19; \alpha = 5,9; m = 4,3;$$

$$k_1 = \frac{\alpha}{(\sum N_p)^{\frac{1}{m}}} = \frac{5,9}{6494614^{\frac{1}{4,3}}} \approx 0,154$$

$$k_2 = 0,8;$$

$$R_N = 8,0 \cdot 0,154 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,1 \cdot 2,19) \approx 0,76801 \text{ МПа.}$$

Перевірка виконання умови міцності за опором монолітних шарів втомному руйнуванню від розтягу при згині:

$$\frac{R_N}{\sigma_r} = \frac{0,76801}{0,69763} = 1,1 = K_{\text{пр}}^{\text{потр}} = 1,1. \text{ Умова міцності виконана.}$$

ДОДАТОК Б

РОЗРАХУНОК РЕСУРСНИХ КОШТОРИСНИХ НОРМ

Назва норми: Стабілізація ґрунтової основи земляного полотна геограткою полімерною жорсткою багатовісноорієнтованою ТМ Tensar

Склад робіт: Розкладання рулонів геогратки полімерної жорсткої багатовісноорієнтованої по довжині ділянки. Розкочування рулонів вручну із забезпеченням перекриття.

Вимірник: 1000 м²

Шифр ресурсу	Найменування ресурсу	Одиниця виміру	
1	2	3	4
1	Витрати труда робітників-будівельників	люд.-год	2,38
2	Середній розряд робіт		3
	М а т е р і а л и		
П	Геогратка полімерна жорстка багатовісноорієнтована	м ²	1080

Зведений кошторисний розрахунок в сумі 1361,701 тис. грн.
В тому числі зворотних сум 0 тис. грн.

кошторис
Традиційна конструкція дорожнього одягу (без посилення)
Улаштування шарів дорожнього одягу, площа 1000 м2 (без верхніх шарів)

Основа:	Кошторисна вартість	1130,086 тис. грн.
креслення (специфікації) №	Кошторисна трудомісткість	0,36738 тис.люд.год.
	Кошторисна заробітна плата	45,581 тис. грн.
	Середній розряд робіт	2,7 розряд

Складений за поточними цінами станом на “26 квітня” 2024 р.

№ Ч.ч. .	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										тих, що обслуговують машини	
					заробітної плати	в тому числі заробітної плати				на одиницю	всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ДБ2-9-3	Улаштування нижнього шару двошарової основи зі щебеню, товщиною 15 см	1000 м2	1	<u>273128,06</u> 2710,75	<u>14079,44</u> 2141,16	273128	2711	<u>14079</u> 2141	<u>28,2900</u> 15,0801	<u>28,29</u> 15,08
2	ДБ2-9-6 К=10	При зміні товщини на кожен 1 см додавати або виключати за РВР 2-9-1 - 2-9-3 (до 25см)	1000 м2	1	<u>171842,18</u> -	<u>1174,80</u> 163,86	171842	-	<u>1175</u> 164	<u>-</u> 1,4300	<u>-</u> 1,43
3	КБ27-15-1	Улаштування основи зі щебенево-піщаної суміші автогрейдером, за товщини шару 15 см	1000м2	1	<u>13803,79</u> 2457,78	<u>10903,96</u> 2415,56	13804	2458	<u>10904</u> 2416	<u>25,6500</u> 17,3387	<u>25,65</u> 17,34
4	КБ27-15-2 к=6	Улаштування основи зі щебенево-піщаної суміші автогрейдером, за зміни товщини на кожен 1 см додавати або вилучати до/з норми 27-15-1 (до 21см)	1000м2	1	<u>1482,80</u> -	<u>1305,98</u> 240,95	1483	-	<u>1306</u> 241	<u>-</u> 1,8408	<u>-</u> 1,84
5	С1421-9656-3 варіант 6	Щебенево-піщана суміш С-5 кількість: 189+75,6	м3	264,6	<u>1128,75</u> -	<u>-</u> -	298667	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
6	КБ27-14-1	Улаштування основи зі щебеню, обробленого піщано-цементною сумішшю, за товщини шару 18 см	1000м2	1	<u>19432,08</u> 3573,52	<u>15016,56</u> 3277,81	19432	3574	<u>15017</u> 3278	<u>37,6200</u> 24,1650	<u>37,62</u> 24,17
7	КБ27-14-2	Улаштування основи зі щебеню, обробленого піщано-цементною сумішшю, за зміни товщини на кожен 1 см додавати або вилучати до/з норми 27-14-1 (до 17 см)	1000м2	-1	<u>195,65</u> -	<u>148,92</u> 26,23	-196	-	<u>-149</u> -26	<u>-</u> 0,2289	<u>-</u> -0,23
8	С1421-9656-3 варіант 7	Щебенево-піщана суміш С-7 укріплена цементом М20 кількість: (214+51,5)X1-(11,9+2,86)x1	м3	250,74	<u>1324,69</u> -	<u>-</u> -	332153	-	<u>-</u> -	<u>-</u> -	<u>-</u> -
		Разом прямі витрати по кошторису					1110313	8743	<u>42332</u> 8214		<u>91,56</u> 59,63
		Разом будівельні роботи, грн.					1110313				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					1059238				
		трудомісткість в транспортуванні, люд.год.					175,21				
		заробітна плата в транспортуванні, грн.					21562				
		всього заробітна плата, грн.					38519				
		Загальновиробничі витрати, грн.					19773				
		трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.					40,98				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					7062				
		Всього будівельні роботи, грн.					1130086				

		Всього по кошторису					1130086				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					367,38				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					45581				
Разом по главах 1-12:							1130086				
Настанова [4.38]		Кошторисний прибуток (П)					3060				
Настанова [4.39]		Кошти на покриття адміністративних витрат будівельних організацій (АВ)					1605				
Разом (гл. 1-12 + П + АВ + Р + І)							1134751				
Разом:							1134751				
Податок на додану вартість							226950				
Всього по зведеному кошторисному розрахунку							1361701				

Примітки :

Керівник проектної організації _____

Головний інженер проекту
(Головний архітектор проекту) _____

Керівник відділу _____

Зведений кошторисний розрахунок в сумі 967,086 тис. грн.
В тому числі зворотних сум 0 тис. грн.

кошторис
Конструкція дорожнього одягу посилена геограткою ГТ ТХ 160
Улаштування шарів дорожнього одягу, площа 1000 м2 (без верхніх шарів)

Основа:	Кошторисна вартість	802,897 тис. грн.
креслення (специфікації) №	Кошторисна трудомісткість	0,23684 тис.люд.год.
	Кошторисна заробітна плата	28,730 тис. грн.
	Середній розряд робіт	2,7 розряд

Складений за поточними цінами станом на “26 квітня” 2025 р.

№ Ч.ч. ·	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кіль- кість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.				
					Всього	експлуа- тації машин	Всього	заробіт- ної плати	експлуа- тації машин	не зайнятих обслуговуванням машин				
										заробіт- ної плати	в тому числі за- робітної плати	в тому числі за- робітної плати	тих, що обслуговують машини	
													на одини- цю	всього
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ДБ1-31-2	Стабілізація ґрунтової основи земляного полотна при використанні геотекстильного матеріалу	1000 м2	1	<u>378,12</u> 378,12	- -	378	378	- -	<u>3,8400</u> -	<u>3,84</u> -
2	C111-792 варіант 11	Георешітка ТН 160 кількість: 1,080х1000	10м2	108	<u>1052,22</u> -	- -	113640	-	- -	- -	- -
3	& C1545-44- 1	Цвях Х-Р кількість: r0(311х1)	100шт	3,11	<u>316,52</u> -	- -	984	-	- -	- -	- -
4	& C1545- 163-1	Патрони DX 6.8/11 M10 кількість: r0(311х1)	100шт	3,11	<u>353,07</u> -	- -	1098	-	- -	- -	- -
5	ДБ2-9-3	Улаштування нижнього шару двошарової основи зі щебеню, товщиною 15 см	1000 м2	1	<u>273128,06</u> 2710,75	<u>14079,44</u> 2141,16	273128	2711	<u>14079</u> 2141	<u>28,2900</u> 15,0801	<u>28,29</u> 15,08
6	КБ27-15-1	Улаштування основи зі щебенево-піщаної суміші автогрейдером, за товщини шару 15 см	1000м2	1	<u>13803,79</u> 2457,78	<u>10903,96</u> 2415,56	13804	2458	<u>10904</u> 2416	<u>25,6500</u> 17,3387	<u>25,65</u> 17,34
7	КБ27-15-2 к=3	Улаштування основи зі щебенево-піщаної суміші автогрейдером, за зміни товщини на кожен 1 см додавати або вилучати до/з норми 27-15-1 (до 12 см)	1000м2	-1	<u>741,40</u> -	<u>652,99</u> 120,48	-741	-	-653 -120	- 0,9204	- -0,92
8	C1421-9656- 3	Щебенево-піщана суміш С-7 кількість: 189-37,8	м3	151,2	<u>894,03</u> -	- -	135177	-	- -	- -	- -
9	КБ27-14-1	Улаштування основи зі щебеню, обробленого піщано-цементною сумішшю, за товщини шару 18 см	1000м2	1	<u>19432,08</u> 3573,52	<u>15016,56</u> 3277,81	19432	3574	<u>15017</u> 3278	<u>37,6200</u> 24,1650	<u>37,62</u> 24,17
10	КБ27-14-2 к=6	Улаштування основи зі щебеню, обробленого піщано-цементною сумішшю, за зміни товщини на кожен 1 см додавати або вилучати до/з норми 27-14-1 (до 12 см)	1000м2	-1	<u>1173,89</u> -	<u>893,50</u> 157,37	-1174	-	-894 -157	- 1,3734	- -1,37
11	C1421-9656- 3 варіант 7	Щебенево-піщана суміш С-7 укріплена цементом М20 кількість: (214+51,5)X1-(11,9+2,86)х6	м3	176,94	<u>1324,69</u> -	- -	234391	-	- -	- -	- -
		Разом прямі витрати по кошторису					790117	9121	<u>38453</u> 7558		<u>95,4</u> 54,3
		Разом будівельні роботи, грн.					790117				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					742543				
		трудомісткість в транспортуванні, люд.год.					60,16				
		заробітна плата в транспортуванні, грн.					7403				
		всього заробітна плата, грн.					24082				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Загальновиробничі витрати, грн. трудоємність в загальновиробничих витратах, люд.год. заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн. Всього будівельні роботи, грн. ----- Всього по кошторису					12780 26,98 4648 802897 802897				
		Кошторисна трудоємність, люд.год. Кошторисна заробітна плата, грн.					236,84 28730				
Разом по главах 1-12:							802897				
Настанова [4.38]		Кошторисний прибуток (П)					1973				
Настанова [4.39]		Кошти на покриття адміністративних витрат будівельних організацій (АВ)					1035				
		Разом (гл. 1-12 + П + АВ + Р + І)					805905				
		Разом:					805905				
		Податок на додану вартість					161181				
		Всього по зведеному кошторисному розрахунку					967086				

Примітки :

Керівник проєктної організації _____

Головний інженер проєкту _____

(Головний архітектор проєкту)

Керівник відділу _____

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ДБ1-31-2	Стабілізація ґрунтової основи земляного полотна при використанні геотекстильного матеріалу	1000 м2	1	<u>378,12</u> 378,12	- -	378	378	- -	<u>3,8400</u> -	<u>3,84</u> -
2	С111-792 варіант 6	Георешітка ТН 170 кількість: 1,080х1000	10м2	108	<u>1177,22</u> -	- -	127140	-	- -	- -	- -
3	& С1545-44-1 варіант 1	Цвях Х-Р кількість: r0(311х1)	100шт	3,11	<u>316,52</u> -	- -	984	-	- -	- -	- -
4	& С1545-163-1	Патрони DX 6.8/11 M10 кількість: r0(311х1)	100шт	3,11	<u>353,07</u> -	- -	1098	-	- -	- -	- -
5	ДБ2-9-3	Улаштування нижнього шару двошарової основи зі щебеню, товщиною 15 см	1000 м2	1	<u>273128,06</u> 2710,75	<u>14079,44</u> 2141,16	273128	2711	<u>14079</u> 2141	<u>28,2900</u> 15,0801	<u>28,29</u> 15,08
6	ДБ2-9-6 к=5	При зміні товщини на кожен 1 см додавати або виключати за РВР 2-9-1 - 2-9-3 (до 20см)	1000 м2	1	<u>85921,09</u> -	<u>587,40</u> 81,93	85921	-	<u>587</u> 82	- 0,7150	- 0,72
7	КБ27-14-1	Улаштування основи зі щебеню, обробленого піцано-цементною сумішшю, за товщини шару 18 см	1000м2	1	<u>19432,08</u> 3573,52	<u>15016,56</u> 3277,81	19432	3574	<u>15017</u> 3278	<u>37,6200</u> 24,1650	<u>37,62</u> 24,17
8	КБ27-14-2 к=6	Улаштування основи зі щебеню, обробленого піцано-цементною сумішшю, за зміни товщини на кожен 1 см додавати або вилучати до/з норми 27-14-1 (до 12 см)	1000м2	-1	<u>1173,89</u> -	<u>893,50</u> 157,37	-1174	-	<u>-894</u> -157	- 1,3734	- -1,37
9	С1421-9656-3 варіант 7	Щебенево-піщана суміш С-7 укріплена цементом М20 кількість: (214+51,5)X1-(11,9+2,86)х6	м3	176,94	<u>1324,69</u> -	- -	234391	-	- -	- -	- -
		Разом прямі витрати по кошторису					741298	6663	<u>28789</u> 5344		<u>69,75</u> 38,6
		Разом будівельні роботи, грн.					741298				
		в тому числі:									
		вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.					705846				
		трудомісткість в транспортуванні, люд.год.					60,16				
		заробітна плата в транспортуванні, грн.					7403				
		всього заробітна плата, грн.					19410				
		Загальновиробничі витрати, грн.					10224				
		трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.					21,52				
		заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.					3707				
		Всього будівельні роботи, грн.					751522				

		Всього по кошторису					751522				

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Кошторисна трудомісткість, люд.год.					190,03				
		Кошторисна заробітна плата, грн.					23117				
Разом по главах 1-12:							751522				
Настанова [4.38]		Кошторисний прибуток (П)					1583				
Настанова [4.39]		Кошти на покриття адміністративних витрат будівельних організацій (АВ)					830				
Разом (гл. 1-12 + П + АВ + Р + І)							753935				
Разом:							753935				
Податок на додану вартість							150787				
Всього по зведеному кошторисному розрахунку							904722				

Примітки :

Керівник проєктної організації

Головний інженер проєкту
(Головний архітектор проєкту)

Керівник відділу

ДОДАТОК В
СТАНДАРТИ (СОУ), ТЕХНІЧНІ УМОВИ (ТУ), РОЗРОБЛЕНІ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ ГЕОГРАТОК

СТАНДАРТ ОРГАНІЗАЦІЇ УКРАЇНИ

ГЕОРЕШІТКИ ПОЛІМЕРНІ ЖОРСТКІ ТРИВІСНООРІЄНТОВАНІ
«TENSAR TX»

Методи проектування дорожніх одягів та штучних основ з георешітками

СОУ 42.1-21483639 – 004 : 2017

ПОГОДЖЕНО

ТК 307 «Автомобільні дороги і споруди»

Голова  **В.К.Вирожемський**

« 03 »  2017 р.

КИЇВ
ТОВ «УНІПРОМ»
2017

ПЕРЕДМОВА

1. РОЗРОБЛЕНО: ТОВ «УНІПРОМ»

РОЗРОБНИКИ: П. Айзман, Л. Гуртіна, Т. Хрипушина,

П. Харін (керівник розробки)

2. ПРИЙНЯТО ТА НАДАНО ЧИННОСТІ: від 04 березня 2017р.

3. УВЕДЕНО ВПЕРШЕ

Право власності на цей документ належить ТОВ «УНІПРОМ». Відтворювати, тиражувати і розповсюджувати цей документ повністю чи частково на будь – яких носіях інформації без офіційного дозволу ТОВ «УНІПРОМ» заборонено.

ДКПП 17.52.12. 590

УКТ ЗЕД 3026

УКНД 93.080.01

ПОГОДЖЕНО

Технічний комітет 307
«Автомобільні дороги і
Транспортні споруди»



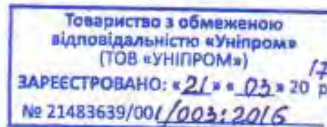
Голова
ДП
«Держтрансбуд»
«28»
код 03450778
В.Вирожемський
22 2016 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «УНІПРОМ»

П.Б.Айзман

«30» грудня 2016 р.



**ГЕОРЕШТКИ ПОЛІМЕРНІ ЖОРСТКІ
ТРИВІСНООРІЄНТОВАНІ «TENSAR TX»**

Технічні умови

ТУ У В.2.7-17.5-21483639-003:2016

(Введено вперше)

Дата надання чинності 2017.03.21

Чинні до 2027.03.20

ПОГОДЖЕНО

Міністерство охорони
здоров'я України
Висновок від

№ 602-123-20-17/4834
виз 06.03. 2017 р.

РОЗРОБЛЕНО

Технічний директор

Т.В.Хрипушина
09 грудня 2016 р.

Завідувач групою-керівник
розробки

П.Л.Харін
01 грудня 2016 р.

ДК 016:2010 17.52.12.590
УКТ ЗЕД 3926

НК 004:2020 93.080.01

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «Уніпром»

«11» грудня 2023 року

П. Б. Айзман

ТЕОРЕТИЧНІ (ГЕОГРАФІЧНІ) ПОСІМЕРНІ ЖОРСТКІ
КОМПОЗИТНІ БАГАТОВІСНООРІЄНТОВАНІ ГЕКСАГОНАЛЬНІ
Технічні
умови



ТУ У 17.5-21483639-009-2023

(Введено вперше)

Дата надання чинності 2023.12.15
Чинні до 2028.12.14

РОЗРОБЛЕНО

Технічний директор
ТОВ «Уніпром»

«04» грудня 2023 року. Т. В. Хрипушина

Головний інженер ТОВ
«Уніпром»

«04» грудня 2023 року. Л. Г. Гуртіна

ПОГОДЖЕНО

Національний транспортний
університет
Кафедра дорожньо-будівельних
матеріалів і хімії
завідувач кафедри, доктор технічних
наук, професор

«08» грудня 2023 року. В. В. Мозговий

Продовження титульного аркуша на наступній сторінці

ТУ У 17.5-21483639-009-2023

Продовження титульного аркуша

РОЗРОБЛЕНО

Начальник відділу наукового супроводу
і проектування ТОВ «Уніпром»

«04» грудня 2023 року. П. Л. Харін

Директор ТОВ «НТЦ «Дорінжнаука»

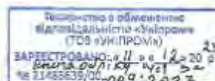
«04» грудня 2023 року. О. В. Гаріян

Національний транспортний
університет
доцент, канд. техн. наук

«05» грудня 2023 року. О. Ю. Усиченко

Національний транспортний
університет
аспірант

«05» грудня 2023 року. Р. М. Плітус



ДК 016:2010 17.52.12.590

НК 004:2020 93.080.01

УКТ ЗЕД 3926

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «УНІПРОМ»

 П. Б. Айзман
«15» листопада 2023 р.

ГЕОРЕШІТКИ ПОЛІМЕРНІ ЖОРСТКІ ОДНООСНООРІЄНТОВАНІ

Технічні умови

ТУ У 17.5-21483639-010:2023

(Введено вперше)

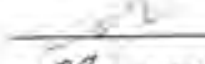
Дата надання чинності 2023.12.01
Чинні до 2028.12.01

РОЗРОБЛЕНО

Технічний директор
ТОВ «Уніпром»

 Т. В. Хрипушина
«07» листопада 2023 р.

Головний інженер ТОВ «Уніпром»

 Л. Г. Гуртіка
«07» листопада 2023 р.

Продовження титульного аркушу на наступній сторінці



Продовження титульного аркуша

РОЗРОБЛЕНО

Начальник відділу наукового
супроводу і проектування ТОВ
«Уніпром»


П.Л. Харін

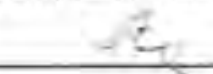
« 07 » 11 2023 р.

Директор ТОВ «НТЦ «Дорінжнаука»


О.В. Гаріян

« 07 » 11 2023 р.

Національний транспортний
університет
доцент, канд. техн. наук

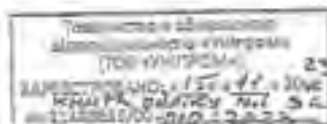

О. Ю. Усиченко

« 09 » 11 2023 р.

Національний транспортний
університет
аспірант


Р. М. Плитус

« 09 » 11 2023 р.



ДОДАТОК Г
ДОВІДКИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРОБОК



026544
УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

вул. М.Омеляновича-Павленка, 1, м. Київ, Україна, 01010, т.ф. +38 (044) 280 82 03, т. +38 (044) 280 87 63
e-mail: general@ntu.edu.ua, код ЄДРПОУ 02070915

28.04.2025 № 918/13

на № _____

Довідка

Про впровадження результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи Харіна Павла Леонідовича «Удосконалення методу розрахунку конструкцій нежорсткого дорожнього одягу із геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими» було впроваджено у навчальний процес під час викладання дисциплін: «Технологія будівництва земляного полотна автомобільних доріг» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти та «Механіка земляного полотна» для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітньо-професійні програми «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів», а також як теоретико-науковий базис під час підготовки кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів зі спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, освітньо-професійні програми «Автомобільні дороги, вулиці та дороги населених пунктів».

Проректор з навчальної роботи та міжнародних зв'язків НТУ
канд. техн. наук, професор

Декан факультету
транспортного будівництва НТУ
д-р. техн. наук, професор



Віталій ХАРУТА

Андрій БУБЕЛА



ДЕРЖАВНЕ АГЕНТСТВО ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ
ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

**СЛУЖБА ВІДНОВЛЕННЯ ТА РОЗВИТКУ ІНФРАСТРУКТУРИ
В ОДЕСЬКІЙ ОБЛАСТІ**

вул. М. Грушевського, 49, м. Одеса, 65031,
тел.(048) 753-15-56, факс (048) 753-15-18
E-mail: info.od@restoration.gov.ua Код ЄДРПОУ 25829550

25.11.2024 № 01-2009/15

На № _____ від _____

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

наукових розробок дисертаційної роботи

аспіранта кафедри транспортного будівництва та управління майном

Харіна Павла Леонідовича

Данною довідкою підтверджується, що розробки Харіна П.Л. щодо забезпечення стійкості всієї конструкції дорожнього покриття із застосуванням геограток багатовісноорієнтованих отримали практичне застосування на об'єктах автомобільних доріг Одеської області, а саме:

- Будівництво автомобільної дороги Обхід м. Рені, км 0+000 – км 5+600;
- Капітальний ремонт мосту на автомобільній дорозі загального користування державного значення М-15 Одеса – Рені, км 52+789 з підходами;
- Поточний ремонт автомобільної дороги загального користування державного значення Т-16-27 КПП «Серпневе» - Таврутинне – Арциз – Сарата, на ділянці км 61+650- км 70+414 та інших об'єктах.

При виконанні робіт на даних ділянках автомобільної дороги в основі конструкції були присутні слабкі перезволожені ґрунти.

Застосування геограток у незв'язних шарах конструкції дорожнього одягу дозволило швидко та надійно виконати будівельні роботи.

Начальник Служби

Андрій ДОНЧЕНКО



ТОВ «НВФ «МОСТОПРОЕКТ»

КОД ЄДРПОУ 30604691

04208, м. Київ,

проспект Гонгадзе Георгія, буд. 7, к. 33

Тел.: (044) 333-84-73

E-mail: office@mostoproekt.com.ua

Kepler Catalog: RA 19h44m16.5s, Dec +47°27'44"

Довідка

Про впровадження розробок аспіранта кафедри транспортного будівництва та управління майном

Харінім П.Л. вирішена важлива проблема розрахунку конструкцій дорожнього одягу із застосуванням геограток полімерних жорстких багатовісноорієнтованих, що в подальшому дає змогу проєктувальникам розраховувати посилені конструкції дорожнього одягу.

Впровадження конструкцій дорожнього одягу із застосуванням геограток знайшли практичне застосування під час розробки проектно-кошторисної документації по об'єкту: «Поточний середній ремонт автомобільної дороги державного значення М-22 Полтава – Олександрія на ділянці км 89+345 – км 92+345, Полтавська область».

Конструкція дорожнього одягу, яка була запроєктована для даного об'єкту, дозволила раціонально використати інертні матеріали та досягти потрібної розрахункової міцності, що в цілому дає змогу заощаджувати при виконанні будівельних робіт та в подальшому при експлуатаційному утриманні.

Директор



Дмитро КАПЛІНСЬКИЙ



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР
«ДОРІНЖНАУКА»

01133, м. Київ, вул. Коновальця, 29
Адреса листування
03150, м. Київ, вул. Велика Васильківська, 102. а/с 304

Телефон: +38(095)142-31-97
E-mail: dorinzhnauka@ukr.net

Вих. №3 від 25.03.2025

Довідка

Про впровадження розробок аспіранта кафедри транспортного будівництва та управління майном

Видана Харіну Павлу Леонідовичу, про те що тема дисертаційної роботи вирішує важливу проблему при проектуванні та будівництві конструкцій дорожніх одягів автомобільних доріг на слабких та перезволожених ґрунтах.

Застосування конструкцій дорожнього одягу із застосуванням георешіток жорстких багатовісноорієнтованих знайшли практичне застосування під час розробки проектно – кошторисної документації на об'єкті:

Капітальний ремонт дорожнього одягу на території припортового господарства в м. Чорноморськ Одеської області.

При капітальному ремонті ділянки дороги були вирішені проблеми при зведенні конструкцій дорожніх одягів з георешітками на слабких ґрунтах.

Директор ТОВ «НТЦ«Дорінжнаука»





Західний
реабілітаційно-спортивний
центр НКСІУ

82536, Україна, Львівська обл., Турківський р-н, с. Яворів, вул. Рівних прав та можливостей, 1
Підприємство «Західний реабілітаційно-спортивний центр» НКСІУ СДРПОУ 34105878, e-mail: turkavzsc@ukr.net тел./факс (03269)3- 36-40

вих. № 463 від 06. 12. 2024 р.

Довідка

Про впровадження наукових розробок дисертаційної роботи

Харіна Павла Леонідовича

Довідка Видана Харіну П.Л., про те, що тема дисертаційної роботи вирішує важливу проблему при будівництві конструкцій дорожніх одягів у гірських умовах і сейсмічних районах та під дією навантаження від технологічних механізмів.

Будівництво конструкцій дорожнього одягу із використанням георешіток жорстких багатовісноорієнтованих знайшли практичне застосування під час розробки проектно – кошторисної документації та будівництві об'єкта: «Будівництво лижеролерної асфальтованої спортивно - реабілітаційної траси» «Західного реабілітаційно-спортивного центру» с. Яворів, вул. Рівних прав та можливостей 1, Турківського р-ну, Львівської області».

При будівництві об'єкта вирішені проблеми при зведенні конструкцій дорожніх одягів з георешітками на слабких ґрунтах в сейсмічному районі. Під час експлуатації об'єкта деформацій не спостерігається.

Директор ЗРСЦ НКСІУ



Н. П. Рода

ДОДАТОК Д
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у виданнях іноземних держав або у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Plytus R., Kharin P., Modeling of polymeric rigid geogrid performance in the Plaxis 2D software package. *Veda a perspektivy* № 11(42) (2024): science and perspectives. DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-11\(42\)-375-382](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-11(42)-375-382)

Статті у фахових виданнях України:

2. Усиченко О.Ю., Харін П.Л. Огляд використання геосинтетичних матеріалів Tensar в транспортному будівництві. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник.* 93 випуск. 2015. С. 97-105. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/93/097-105.pdf

3. Усиченко О.Ю., Харін П.Л. Використання армогрунтових конструкцій Тенсар на слабких перезволожених ґрунтах. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник.* 95 випуск. 2016. С. 97-103. http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/95/096-103.pdf

4. Варивода О.М., Харін П.Л. Механізм посилення насипів на слабких основах. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури збірник наукових праць*, 2018. Випуск № 71, С. 161-169. https://drive.google.com/file/d/1DLnGV1YiL-1RvZcogF25OVF0c5_wdLMn/view

5. Гуртіна Л.Г., Хлапук М.М., Шумінський В.Д., Харін П.Л. Ефективність роботи споруд з ґрунтових матеріалів, підсилених георешітками, з врахуванням сейсмічних впливів. *Вісник Національного університету водного господарства та*

http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vnuvgp_tekhn_2019_2_5

bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILEA=&2_S21STR=Vnuvgp_tekhn_2019_2_5

6. Усиченко О.Ю., Смірнова Н.В., Кушнірова О.М., Харін П.Л. Обґрунтування моделі розрахунку незв'язних шарів дорожньої конструкції, що стабілізовані геограткою. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Науково-технічний збірник*. Вип. 108. 2020. С. 84–95. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-284-291

http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/108/84.pdf

7. Усиченко О.Ю., Харін П.Л., Зарічний А.О. Експериментальні дослідження конструкцій дорожніх одягів посилених жорсткими багатовісноорієнтованими полімерними георешітками. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. 2024. Випуск 115. Частина 1. С. 284 – 291. DOI:10.33744/0365-8171-2024-115.1-284-291

8. Харін П.Л., Плитус Р. М. Метод розрахунку нежорсткого дорожнього одягу посиленого геогратками полімерними жорсткими багатовісноорієнтованими. *Науковий журнал «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво»*. 2025. Випуск 115. Частина 1. С. 100-108. <https://doi.org/10.33744/0365-8171-2025-117.1-100-108>

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

9. L. Gurtina, I. Mazur, V. Sedin, K. Bikus, V. Kovba, Y. Slyusarenko, V. Tytarenko, N. Kosheleva, P. Kharin, R. Plytus, I. Kaliukh Case study. Experimental and theoretical analysis of reinforcement of weak soils with geogrids at the foundation on the basis of field studies of a road embankment bypassing the city of Reni, Ukraine. *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet*. 2023. С. 1254-1260. DOI: 10.1201/9781003386889-159

Свідоцтва та патенти:

10. Патент України на корисну модель, реєстраційний номер заявки u 2024 02591 Дамба з ґрунтових матеріалів. Шуминський В.Д., Домбровський Я.І., Шаповал В.Г., Харін П.Л. Дата реєстрації 26 листопада 2024 р.

11. Патент України на корисну модель, реєстраційний номер заявки u 2025 00306. Земляна дамба на перезволожених ґрунтах. Шуминський В.Д., Домбровський Я.І., Шаповал В.Г., Харін П.Л. Дата реєстрації 24 січня 2025 р.

ДОДАТОК Е
СВІДОЦТВО ПРО ВІДПОВІДНІСТЬ СИСТЕМ ВИМІРЮВАНЬ
ВИМОГАМ ДСТУ ISO 10012:2005

УКРАЇНЬСЬКА СИСТЕМА ДОБРОВІЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ВИМІРЮВАНЬ

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО “КИЇВСЬКИЙ ОБЛАСНИЙ НАУКОВО-
ВИРОБНИЧИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ, МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ”
(ДП “КИЇВОБЛСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ”)**

вул. Січневого прориву, 84, м. Біла Церква, Київської обл.

СВІДОЦТВО

ПРО ВІДПОВІДНІСТЬ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАНЬ
ВИМОГАМ ДСТУ ISO 10012:2005

№ 06-0025 /2024 від 03 травня 2024 року

Це свідоцтво засвідчує, що за результатами аудиту стан системи вимірювань

ВИПРОБУВАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРІЇ
ТОВ “УНІПРОМ”

*Адреса розміщення лабораторії:
03150, Київ, вул. Предславинська, 37*

відповідає вимогам ДСТУ ISO 10012:2005 “Системи керування вимірюванням.
Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання.”

Сферу об’єктів вимірювань та процесів системи вимірювань, на які поширюється свідоцтво, наведено у додатку, який є невід’ємною частиною цього свідоцтва. Без додатку свідоцтво недійсне.

Свідоцтво чинне протягом трьох років з дати реєстрації.

Генеральний директор
ДП “Київоблстандартметрологія” Ірина КРАВЧЕНКО

Керівник групи експертів з оцінки відповідності
Заступник генерального директора з наукової роботи Лариса БАРТКІВ

Перевірка чинності свідоцтва http://khsms.com/primaryactivity/metrology/about/type/gos_isp/id/20/lang/ua

