

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Факультет інженерно-технологічний»**

**Кафедра будівництва та професійної освіти**

**Пояснювальна записка**

до кваліфікаційної роботи

на тему: **«Вплив нанодобавки Nanoalps® System SOIL на  
формування властивостей ґрунтоцементного дорожнього  
покриття»**

КР.192 БЦмд\_11 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
«Технології будівельних конструкцій,  
виробів і матеріалів» спеціальності  
192 «Будівництво та цивільна інженерія»  
ступеня вищої освіти магістр  
групи 192БЦмд\_21  
Квасневський Юрій Віталійович  
Керівник: Шульгін Володимир Васильович

**Полтава 2025 року**



| Зміст                                                                                                                  | Стор. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| ВСТУП.....                                                                                                             | 5     |
| РОЗДІЛ 1 .....                                                                                                         | 7     |
| ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....                                                                                                 | 7     |
| 1.1 Коротка характеристика інженерно-геологічних умов.....                                                             | 7     |
| 1.2 Використання ґрунтоцементу для зведення фундаментів будівель та споруд                                             | 8     |
| 1.3 Використання ґрунтоцементу в індивідуальному будівництві.....                                                      | 11    |
| 1.4 Ґрунтоцемент у будівництві дорожніх одягів.....                                                                    | 15    |
| РОЗДІЛ 2 .....                                                                                                         | 33    |
| МЕТА РОБОТИ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ .....                                                                                 | 33    |
| РОЗДІЛ 3 .....                                                                                                         | 34    |
| МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....                                                                                              | 34    |
| 3.1 Планування дослідів експерименту .....                                                                             | 34    |
| 3.2 Розробка та виготовлення форми .....                                                                               | 35    |
| 3.3 Розробка та виготовлення установки для формування зразків ґрунтоцементу .....                                      | 36    |
| РОЗДІЛ 4 .....                                                                                                         | 43    |
| ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ.....                                                                                | 43    |
| 4.1 Характеристики ґрунту .....                                                                                        | 43    |
| 4.2 Характеристики цементу.....                                                                                        | 45    |
| РОЗДІЛ 5 .....                                                                                                         | 46    |
| АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ .....                                                                                    | 47    |
| 5.1 Підбір складу ґрунтоцементу .....                                                                                  | 47    |
| 5.2 Дослідження впливу витрат добавки, цементу і поліпропіленової фібри на властивості ґрунтоцементу .....             | 48    |
| 5.2.1 Дослідження впливу витрат добавки, цементу і поліпропіленової фібри на міцність при стиску ґрунтоцементу.....    | 49    |
| 5.2.2 Дослідження впливу витрат цементу, добавки, фібри на міцність ґрунтоцементу на розтяг при згині .....            | 56    |
| 5.2.3 Дослідження впливу витрат цементу, добавки, фібри на модуль деформування ґрунтоцементу на розтяг при згині ..... | 66    |
| РОЗДІЛ 6 .....                                                                                                         | 70    |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ .....                                                   | 70 |
| 6.1 Правила охорони праці під час будівництва, ремонту та утримання<br>автомобільних доріг ..... | 70 |
| РОЗДІЛ 7 .....                                                                                   | 76 |
| Висновки та рекомендації за результатами досліджень .....                                        | 76 |
| Список використаних джерел .....                                                                 | 78 |

## ВСТУП

Сучасний розвиток транспортної інфраструктури України відбувається в умовах обмежених фінансових ресурсів, підвищених вимог до довговічності дорожніх конструкцій та необхідності раціонального використання місцевих матеріалів. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають технології влаштування дорожніх одягів із застосуванням ґрунтоцементу, який поєднує економічність, технологічну простоту та можливість використання ґрунтів місцевого походження. Разом з тим, традиційні ґрунтоцементні матеріали мають низку недоліків: зокрема обмежену міцність при розтязі та згині, підвищену чутливість до вологості, нерівномірність структури та знижену тріщиностійкість, що негативно впливає на експлуатаційні характеристики дорожніх покриттів.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності ґрунтоцементних матеріалів є застосування наномодифікуючих добавок, здатних впливати на процеси структуроутворення, гідратації цементу та взаємодії в системі «ґрунт – цемент – вода». Використання нанодобавок дозволяє цілеспрямовано керувати фізико-механічними властивостями матеріалу, зменшувати пористість, підвищувати щільність структури та водостійкість, а також забезпечувати стабільність властивостей упродовж експлуатаційного терміну.

Особливий науковий і практичний інтерес становить нанодобавка **Nanoalps® System SOIL**, яка призначена для модифікації ґрунтоцементних систем і застосовується в технологіях дорожнього будівництва. За рахунок нанорозмірних компонентів та поверхнево-активних властивостей дана добавка сприяє активізації процесів зчеплення між частинками ґрунту та цементного каменю, покращенню рівномірності розподілу в'язучого, зниженню водопоглинання та підвищенню міцнісних характеристик матеріалу. Водночас наявні наукові дані щодо механізмів впливу Nanoalps® System SOIL на формування структури та властивостей ґрунтоцементу є недостатніми та потребують систематизованого експериментального підтвердження.

У цьому контексті актуальним є проведення комплексних досліджень впливу нанодобавки Nanoalps® System SOIL на фізико-механічні та експлуатаційні

властивості ґрунтоцементного дорожнього покриття. Особливу увагу доцільно приділити оцінюванню міцності при стиску та згині, деформаційних характеристик, водостійкості та однорідності структури матеріалу, що безпосередньо визначає довговічність і надійність дорожніх конструкцій.

Результати даної роботи мають практичне значення для впровадження інноваційних технологій у дорожньому будівництві, оптимізації складів ґрунтоцементних сумішей з наномодифікуючими добавками та підвищення експлуатаційних показників дорожніх покриттів при зниженні матеріало- та енерговитрат. Отримані наукові висновки можуть бути використані при проектуванні та будівництві автомобільних доріг, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців будівельного профілю.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

#### 1.1 Коротка характеристика інженерно-геологічних умов.

Територія України характеризується складними інженерно-геологічними умовами: слабкими, структурно-нестійкими ґрунтами, лесовими просідковими суглинками і супісками, в щільній міській забудові часто доводиться стикатись із пливунами, схилами, що спричинює подорожчання зведення будівель і споруд через додаткові витрати на підготовку основ та зведення фундаментів. Смолизація, бітумізація, сипкатизація - це агресивні методи закріплення ґрунтів основи, більш екологічне використання цементу. Змішування місцевих ґрунтів із цементом, вапном, гіпсом, шлаками і з введенням різних добавок дозволяє отримати матеріал – ґрунтоцемент, який останнім часом широко використовується для підготовки основ під фундаменти, зведення фундаментів, а також для основ дорожніх покриттів. Підготовка основ під фундаменти під час зведення будівель і споруд на слабких, структурно-нестійких ґрунтах (просідних ґрунтах І типу просідання, насипних, затвердіваних, текучих пилувато-глинистих), як правило, конструктивно виконується армуванням ґрунту вертикальними жорсткими ґрунтоцементними елементами з достатньо високим відсотком вмісту цементу. Такі рішення приймаються на основі технічних характеристик будівельної техніки, поширеної в нашій країні, а також проектних вимог, при цьому закріплення ґрунтової товщі основи виконується на досить велику глибину. Досліджено раціональність застосування ґрунтоцементних конструкцій з низьким вмістом цементу в слабких, водонасичених та лесових ґрунтах І типу просідання. Застосування сучасних механізмів і обладнання для виготовлення ґрунтоцементних елементів дає можливість використовувати конструктивні схеми з меншою витратою цементу для зведення фундаментів будівель, дорожніх покриттів та споруд. У разі зменшення кількості цементу підвищується деформативність і тріщиностійкість ґрунтоцементу, в результаті він уже не може розглядатися як елемент конструкції фундаменту, але може ефективно

використовуватися як штучна основа дорожніх покриттів. Числовими методами розрахунку встановлено вплив параметрів ґрунтоцементу на роботу системи «дорога - ґрунтоцементна основа».

## **1.2 Використання ґрунтоцементу для зведення фундаментів будівель та споруд.**

Ґрунтоцементні елементи виконуються двома методами: вологого і сухого змішування ґрунту, вибір яких залежить від ґрунтових умов і специфікації проєкту. Метод вологого змішування ґрунту застосовується в різних ґрунтових умовах: від слабких пластичних глин до середньої щільності піску і гравію з включеннями кругляків[6]. Метод сухого змішування застосовується в ґрунтах із достатнім вмістом вологи, щоб забезпечити фізико-хімічну реакцію сухого в'язучого з ґрунтом, оскільки цей метод дозволяє зменшити вміст води у ґрунті. З метою ресурсозбереження та завдяки розвитку нових методів улаштування ґрунтоцементні конструкції все більше набирають популярності в фундаментобудуванні. Це: - улаштування набійових паль бурозмішувальним методом, струменевою цементацією, струменево-змішувальною цементацією; - улаштування підпірних стін котлованів. Для кріплення вертикальних стін котлованів і захисту існуючих фундаментів від будівництва використовуються, як правило, ґрунчкі огороджувальні конструкції з стічних і дотичних паль, які в оголовках об'єднані залізобетонним поясом та фіксовані анкерами. Огороджувальні конструкції проєктують на дію горизонтального навантаження від тиску ґрунту і підземних вод, а також за необхідності на вертикальне прикладене до поверхні ґрунту навантаження поблизу огорожі. До огороджувальних конструкцій пред'являються особливі вимоги щодо міцності матеріалу ґрунтоцементних елементів і герметичності їх стиків;- улаштування ґрунтоцементних анкерів; - улаштування фундаментів мілкового закладення. Улаштування стрічкових і пальових фундаментів із ґрунтоцементу рекомендується для будинків не більше трьох поверхів із несучими стінами III класу відповідальності, а також для будівель II класу відповідальності висотою до двох

поверхів включно. Будівництво стрічкових ґрунтоцементних фундаментів заборонене в сейсмічних і карстових районах, а також на підроблюваних територіях, вічно мерзлих і не відталих після сезонного промерзання ґрунтах, заторфованих, чабряклих і просадкових ґрунтах II типу;

- улаштування протифільтраційних завіс. За конструктивними особливостями протифільтраційні завіси можуть бути вертикальними і горизонтальними. Товщина протифільтраційних завіс перебуває в діапазоні 0,5...2 м і залежить від фільтраційної міцності, міцності ґрунтоцементу, градієнта напору;
- улаштування бурових шламових амбарів, штучних родойм, басейнів, резервуарів;
- зміцнення зсувонебезпечних схилів;
- підсилення основи існуючих фундаментів похилими та вертикальними ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ).

Але у випадках реконструкції будівель і споруд, у стиснених умовах доцільно закріплювати ґрунт горизонтальними ґрунтоцементними елементами на незначній глибині безпосередньо під фундаментом у зоні активних деформацій основи;

- улаштування розділних екранів для захисту фундаментів споруд від впливу нового будівництва;
- закріплення масиву ґрунту від розв'язання за сейсмічних навантажень;
- улаштування дорожнього полотна;
- улаштування залізничних насипів;
- поліпшення будівельних властивостей торф'яних, лесових ґрунтів, насипних, слабких ґрунтів ( $E < 5$  МПа);
- закріплення ґрунтів;
- захист підземних виробок у процесі виконання різних інженерно-технічних заходів;
- армування основи фундаментів.

Закріплення ґрунтів ґрунтоцементними елементами можливе різними конструктивними рішеннями. Це улаштування окремих розташованих ґрунтоцементних палей циліндричного перетину, панелей, сітчастих блоків з окремо розташованих палей, сітчастих палей або суцільних елементів, які влаштовуються «різально-змішувальним» методом [8]. Широко застосовуються три методи закріплення ґрунту цементом: бурозмішувальний метод, струменеві цементация, струменево-змішувальна цементация. Найбільш поширений в нашій країні бурозмішувальний метод – завдяки простоті механізмів для його реалізації. Його

суть полягає в механічній розробці і перемішуванні ґрунту з в'язучим, яке подається у вигляді розчину. Перемішування ґрунту з в'язучим, як правило, відбувається в робочій свердловині (без виймання ґрунту), але також може виконуватися із частковим вийманням або в спеціальних бункерах – змішувачах. Перевага цього методу – в економії в'язучого, постійній теретин ґрунтоцементного елемента відповідно до діаметра застосованого робочого шнека [10]. Недолік – у граєлистих ґрунтах необхідне громіздке обладнання з великими обертовими моментами. Метод струменевої цементації поділяється на три види: однокомпонентна цементація, двокомпонентна цементація, трикомпонентна цементація. У методі однокомпонентної цементації розробка ґрунту відбувається за рахунок енергії струменя цементного розчину. Робочим інструментом для улаштування ґрунтоцементних елементів постає струменевий монітор, із форсунок якого виходить струмінь цементного розчину під тиском до 70 МПа.

Високонапірний струмінь цементного розчину може різати практично будь-який ґрунт. Діаметр ґрунтоцементних елементів 350...500 мм. Для збільшення радіуса різання ґрунту і руйнівної дії в двокомпонентній цементації додатково використовується енергія стисненого повітря. Струменевий монітор обладнаний двома форсунками, одна з яких служить для подачі цементного розчину, а друга – для подачі стисненого повітря під тиском 0,6...1,2 МПа [1]. Міцність і щільність ґрунтоцементних елементів порівняно з однокомпонентною технологією знижується, діаметр досягає – 1 500 мм. У трикомпонентному методі струменевий монітор обладнаний трьома форсунками, які служать для роздільної подачі в'язучого, води і повітря. Руйнування ґрунту проводиться високонапірним струменем води під тиском 20...30 МПа і повітряним потоком, а цементний розчин подається окремим струменем. Діаметр ґрунтоцементних елементів 1 300...2 500 мм. Перевага такого методу висока продуктивність і можливість застосування практично в будь-яких ґрунтах. Недолік – висока витрата цементу.

Струменево-змішувальна цементація – це комбінований метод струменевої і бурозмішувальної цементації, коли одночасно використовується механічна та

гідромоніторна розробка ґрунту, що у свою чергу, сприяє досягненню більшої однорідності суміші і збільшенню діаметра ґрунтоцементного елемента. Перевага методу – можливість використання в будь-яких ґрунтових умовах; універсальність, у разі зменшення тиску струменя гідромонітора метод працює як бурозмішувальний. Для улаштування огорожувальних конструкцій і фундаменту «стіна в ґрунті» був розроблений різально-змішувальний метод [13]. Робочими органами служать різальні кільця або ланцюгова фреза, які вертикально обертаються відносно горизонтальної осі. За такого методу влаштовують неперервні ґрунтоцементні панелі товщиною, рівною товщині робочих органів. Принципову відмінність має місце об'ємного закріплення, коли обробці піддається весь масив ґрунту. Об'ємне закріплення ґрунту "Mass Stabilization" - відносно новий метод поліпшення будівельних властивостей слабких ґрунтів, який може виконуватися на глибину 5...7 м, захватками 10...25 м<sup>2</sup>. Діаметр робочого інструменту становить 0,6...0,8 м. У цьому випадку в'язуче переважно використовується у вигляді сухих порошкових сумішей, але також може бути вигляді розчину і складатися з одного компонента: вапно, цемент, шлак або їх комбінації. Процес перемішування відрізняється від інших методів тим, що в'язучий матеріал подається в область змішування в той час як міксер обертається і одночасно переміщується у вертикальній та горизонтальних площинах, щоб забезпечити оптимальне перемішування ґрунту [14].

### **1.3 Використання ґрунтоцементу в індивідуальному будівництві.**

Ґрунтоцемент має досить широке застосування для індивідуального будівництва. Якість ґрунтоцементних блоків залежить від дотримання правил приготування та укладання сумішей, контролю за твердінням блоків. При виготовленні ґрунтоцементних блоків є необхідність використання значної кількості води, яка потрібна для доведення ґрунту, який переміщується із цементом, до напіврідкого стану. Влаштування стрічкових і пальових фундаментів з ґрунтоцементу рекомендується для будівель не більше трьох поверхів з несучими стінами III класу відповідальності, а також для

будівель II класу відповідальності заввишки до двох поверхів включно. В даний час відома технологія, де ґрунт прямо в місці залягання подрібнюють і змішують із в'язучою речовиною. Потім цю масу зволожують та трамбують. Таким чином влаштовують основи під різними спорудами та будівлями. Також відома технологія влаштування плит перекриття із ґрунтоцементних блоків. В даному випадку використовується ґрунтоцемент отриманий напівсухим способом зі зв'язних ґрунтів (глини, суглинку), мінеральних в'язучих води та домішок. Товщина ґрунтоцементного перекриття варіюється в межах від 50 – 80 мм. Подібні рішення дозволяють знизити вагу конструкції перекриття, і позбутися від ефекту екранування електромагнітних випромінювань, виключивши з неї арматуру. Пропонується виготовлення готових блоків та плит, необпаленої цегли. Щоб збільшити міцність, виробу пропонується обробляти парою з температурою 100 – 300°C. Основною перевагою ґрунтоцементних блоків є низька ціна. Доведено, що при високому вмісті цементу матеріал стає крихким, на його поверхні з'являються тріщини. У свою чергу зайва вода може негативно вплинути на міцність матеріалу. Основна перевага ґрунтоцементу – це низька вартість його виготовлення. Адже близько 70% його складу – це ґрунт майданчика будівництва. Тому такий матеріал найчастіше використовують із метою економії коштів [15].

Зола виносення є одним із найпоширеніших видів відходів теплових електростанцій. В Україні її не переробляють в достатній кількості, що призводить до її накопичення на значних площах. Запаси золи на майданчиках для зберігання відходів забруднюють атмосферу, ґрунтові води та ґрунт. Зола виносення (або летюча зола) – це тонкодисперсний залишок мінеральних домішок, що залишилися після спалювання палива. Цей залишок, зважений у димовому газі, забруднює атмосферу і подібно до наждачного паперу стирає зсередини димоходи та труби котелень. Величезні маси золи та шлаків, що складаються біля ТЕЦ у безпосередній близькості від міст, виключають з господарського обороту великі ділянки земель, а солі важких металів, що вилучуються з неї, забруднюють ґрунтові води та ґрунт. Таким чином, у

результаті діяльності підприємств вугільної енергетики сформувалися штучні та зовсім не безпечні для навколишнього середовища родовища золи та шлаків, що безперервно поповнюються. Загальне річне виробництво золи віднесення у світі сягає 700 – 800 мільйонів тон [16]. У країнах Європи близько 43% золи використовують для виробництва будівельних матеріалів, тоді як в Україні частка золи, що переробляється, становить не більше п'яти відсотків. Великі витрати потрібні для складування золи у відвали. У вартості електроенергії та тепла, вироблених теплоелектроцентралями (ТЕЦ), закладено десятки відсотків, що йдуть на обслуговування відвалів золи та мокре транспортування золи. Існуючі на ринку пропозиції щодо утилізації золи часто не враховують технологічні можливості виробника, не відрізняються комплексністю та мають достатньо вузьку сферу застосування – бетонні та штукатурні розчини, розчини для оздоблення. Відомо, що застосування золи принесення у складі суміші при виготовленні дає позитивний ефект ґрунтоцементу. Встановлено, що оптимальною кількістю золи у складі ґрунтоцементної суміші є вміст золи принесення в діапазоні від 5 до 12% від ваги ґрунту. За допомогою додавання оптимальної кількості золи може бути досягнута потрібна міцність ґрунтоцементних блоків та утилізовано певну кількість відходів теплоелектростанцій (ТЕС). Відомо, введення до складу будівельних розчинів до 20% тонкодисперсної легкої золи з метою економії портландцементу високих марок. У даному випадку золі відводиться роль мінерального мікрозаповнювача цементу, який сприяє збільшенню пластичності розчинів. Деякими виробниками пропонується виготовляти блоки із ґрунтоцементу за такою технологією: цементна суспензія готується в бетонозмішувачі безперервної дії із портландцементу марки 400 в кількості 20% від маси ґрунту, води. Таким чином отримували «цементне молоко». Потім в отриманий розчин додавали та золу-принесення у кількості 5% від вмісту цементу та перемішували. До «цементного молока» з додаванням золи принесення додавали ґрунт (суглинок лесовий) з вологістю 14%. При проведенні лабораторних досліджень використали ґрунт м. Полтави, що

розташована у межах Полтавського лесового плато [17]. На глибині до 25 м переважають лесові та лесовані суглинки з числом пластичності до 17 %. У цих ґрунтах переважають пилюваті частинки каолінітів і гідролітів – до 87%, глинистих частинок – до 20%, піщаних – до 10%. Пористість їх досягає 47%. Модуль деформації їх у природному стані досягає  $E = 12 \text{ МПа}$  [6, с. 10]. Глини малоприсадибні для виготовлення блоків із ґрунтоцементу. Середня міцність матеріалу на їх основі у 2-2,5 рази менша, ніж на основі супісків. Причиною обмеження застосування ґрунтів з числом пластичності більше 14 є значна трудомісткість робіт з їх подрібнення. Однорідність ґрунту суттєво впливає на міцність та морозостійкість ґрунтоцементних блоків (вміст частинок понад 5 мм допускається до 25%, а більших за 10 мм до 5%). Однак, для будь-яких типів ґрунтів вміст органічних часток має бути не більше 6% [18].

В Україні відмічається зростання використання ґрунтоцементу у загальному обсягу будівництва основ, фундаментів і підземних споруд. Окрім армованих основ і ґрунтоцементних набивних паль ґрунтоцемент з успіхом використовується у якості розділювальних екранів для захисту існуючих будівель і споруд від впливу новобудов. При цьому маємо не тільки економічні переваги проти залізобетонних паль, шпунта і металевих труб, а також відзначається їх перевага саме у захисних якостях за рахунок варіювання площею спірання екрану на ґрунт. Високі водонепроникність і хімічна стійкість ґрунтоцементу, а також досконала технологічність його виготовлення за бурозмішувальним методом ставлять ґрунтоцемент на перше місце як гідроізоляційний матеріал при спорудженні підземних сховищ токсичних і хімічно активних відходів побудов і виробництва. Запропоновані конструкції шламових амбарів для буріння і експлуатації нафтогазових свердловин. Розглянута можливість гідроізоляції підземних каналізаційних колекторів за допомогою тунелів, що виготовляють з ґрунтоцементу бурозмішувальним способом. Таким чином можливо захищати довкілля від звалищ, розтікання нафти, аміаку, води тощо при аваріях відповідних колекторів.

Цей метод також захистить міста від розмиву ґрунтів і утворення підземних порожнин у містах України, які утворюються при прорізах напірних колекторів.

#### 1.4 Ґрунтоцемент у будівництві дорожніх одягів.

Як відомо з практики виникнення аварійних ситуацій на залізничному транспорті, необхідно приділяти більше уваги стану земляного полотна та його основи. Під час збільшення швидкості та навантаження на ось також значно зростає і навантаження на земляне полотно та ґрунтову основу, а нормативні документи, на основі яких виконується будівництво нових ліній та реконструкція вже існуючих, не дають чіткої оцінки ризиків, які при цьому виникають. Технологія спорудження земляного полотна в останні десятиріччя кардинально не змінилась [6]. Більшість робіт в ній пов'язана з розробкою і переміщенням ґрунтів для створення виїмки або будівництва насипу земляного полотна. Це потребує великої кількості механізмів і трудовитрат. Значний вплив на ці роботи мають кліматичні умови, оскільки ґрунти під впливом опадів змінюють свій стан. Найбільш залежним від кліматичних умов є земляне полотно та ґрунти його основи.

Спорудження земляного полотна виконується шляхом ущільнення ґрунту. Разом з тим необхідно, щоб під впливом кліматичних умов та різних інших факторів ґрунти мали стабільні фізико-механічні характеристики. Проте досягнути рекомендованого коефіцієнту ущільнення, що дорівнює 1,03...1,05, можливо тільки при оптимальній вологості ґрунту. Під час дощів, які призводять до перезволоження ґрунту, укладання й ущільнення зв'язних ґрунтів потрібно припиняти до їх висихання.

Відповідно до державних будівельних норм [4] модуль деформації ґрунту основної площини земляного полотна ділянок з швидкістю руху більше ніж 160 км/год повинен складати не менше 400 МПа, менше 160 км/год – 80 МПа. Досягти таких характеристик земляного полотна достатньо важко, тому виникають проблеми його реконструкції з утримання в належному експлуатаційному стані. Наслідком цього є значні вертикальні і горизонтальні деформації земляного полотна та зміна геометрії залізничної колії [8].

Деформації земляного полотна відбуваються тому, що його напружено-деформований стан змінюється під впливом різних факторів. Баласт, що складається з щебеню різних фракцій, є фільтруючим матеріалом. Його коефіцієнт фільтрації на декілька порядків більший від коефіцієнту фільтрації земляного полотна. Тому підготовку основної площадки земляного полотна необхідно виконувати так, щоб дощові та талі води стікали повністю. Такий варіант можливо реалізувати за рахунок застосування геотекстильного полотна під баластним шаром. Дана технологія реально використовується під час ремонту верхньої будови колії за допомогою машини RM-80. В знижених ділянках відбувається замочування ґрунту, і в нього проникає щебінь з баласту, утворюючи баластне поглиблення (ложе).

Найбільш складним є випадок, коли верхня частина насипу складена слабкими ґрунтами, що мають малі значення кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення. Дощові води через щебеновий баласт фільтруються, проникаючи на основну площадку. В її верхній шар під час ущільнення проникає щебінь, в результаті чого зменшується його водонепроникність і на ньому скопичується вода. Потім вода стікає та попадає в зворотню засипку, а потім відбувається фільтрація в природній ґрунт, що є основою земляного полотна. В залежності від кількості води, що фільтрується в ґрунти основи земляного полотна, змінюються його механічні характеристики в сторону їх зменшення, що призводить до негативних наслідків.

Накладання нерівномірних динамічних навантажень від рухомого потягу та значні конструктивно-технологічні похибки і неякісна експлуатація є одними з причин виникнення залостових лож. Крім того, причинами замкнутих поглиблень під шпалами є мала товщина баластного шару, недостатнє ущільнення або міцність ґрунту основної площадки, перезволоження ґрунту з-за незабезпечення відведення води. Якщо не ліквідувати ці поглиблення, то поступово вони збільшуються і захоплюють більшу довжину рейкового шляху.

Нормативною базою проведення випробувань з підсиленням земляного полотна та його основи армуваннями або неармуваними ґрунтоцементними палями є будівельні норми (ДБН В.2.1-45:2017; ДБН В.2.1-10:2018) [14]. І якщо в першому

з них надані основні положення виконання цих робіт, то другий ДБН містить конкретні вказівки по виконанню робіт. У вказаних державних нормах визначено, що масив, який підсилено ґрунтоцементними елементами, слід розглядати як умовний фундамент.

В нормах підкреслювалось, що модуль деформації  $E$  і розрахунковий опір підсиленої основи слід визначати за даними штампових випробовувань [10]. При цьому рекомендується використовувати штампи великих розмірів з діаметром 1000...1500 мм. Модуль деформації слід визначати за формулою з урахуванням масштабного коефіцієнту». В розділі 6 цього ж ДБН підкреслено, що для попередніх розрахунків стисливості підсиленої основи можна користуватися середньозваженим модулем деформації  $\bar{E}$ , який визначається за формулою:

$$\bar{E} = (A_{гг} E_{гг} + A_{гц} E_{гц}) / A, \quad (1)$$

де  $E_{гг}$  і  $E_{гц}$  – модулі деформації відповідно ґрунту і ґрунтоцементу, МПа;  $A_{гг}$  і  $A_{гц}$  – площі відповідно ґрунту і ґрунтоцементу в загальній площі  $A$  горизонтальної проєкції підсиленого масиву,  $m^2$ .

Таким чином, можливо попередньо визначати основні характеристики масиву шляхом виконання експериментів, які необхідно виконувати у ході інженерно-геологічних досліджень. З цією метою з ґрунту, що закріплюється, відбираються проби необхідного об'єму. З цих проб виготовляється зразки в формі рівностороннього куба з розрахунковою кількістю цементу і випробуються на одинісний стиск (табл. 1.1). Відповідно до цих результатів, згідно наведеної таблиці, можна прогнозувати поведінку ґрунтоцементу, що в подальшому дозволяє виконати розрахунок основи будь-якої споруди, в тому числі і земляного полотна.

Таблиця 1.1 Значення характеристик ґрунтоцементу (за ДБН В 2.1-10:2018, 2018)

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Основною характеристикою оцінки деформаційних властивостей паль слугує модуль деформації. Комплекс практичних дій, що надають можливості керування деформаційними характеристиками грунтоцементу за рахунок зміни кількості закріплюючого розчину, варіації діаметру та потужності необхідної глибини закріпленої товщі масиву, підсилення грунтоцементних елементів кармасами, є запорукою забезпечення надійності земляного полотна.

Оскільки виготовлення буронабивних паль є доволі трудомісткою та фінансово затратною операцією, то слід обирати спосіб виготовлення грунтоцементних паль, що забезпечують максимально ефективне використання матеріалів. Розглянемо це на прикладі спорудження земляного полотна на неоднорідній основі.

Інженерно-геологічне вивчення виявило геологічну будову з такими інженерно-геологічними елементами (ІГЕ):

ІГЕ-1 – насипні злежані ґрунти, що представлені щебенем, шлаком з супіщано-піщаним заповнювачем до 45 % та карманами пісків середньої щільності без органічних включень;

ІГЕ-1а – насипні ґрунти, супіски темно-сірі пластичні з карманами пісків та включенням будівельного бруду до 30 % та включенням органічних включень від 0,5 % до 22 %;

ІГЕ-4а – гравійно-галькові ґрунти з супіщаним та піщаним заповнювачем рижувато-сірого кольору, водонасичені, з тонкими прошарками суглинків та глин;

ІГЕ-5 – плагіограніти сірі, рожеві, середньозернисті масивні,  $R_c=21,29/21,84$  МПа, дуже тріщинуваті, вивітрілі, водонасичені [21]. Тріщини заповнені піском.

У геоструктурному відношенні територія спорудження земляного полотна розташована в межах Середньо-Придніпровського блоку Українського кристалічного щита. Поверхня кристалічного фундаменту хвиляста, на відносно невеликій довжині профілю глибина залягання нерівномірна, що виявлено під час виконання буріння свердловин та за допомогою геофізичних методів. Щоб відповідати поверхні кристалічного фундаменту, кожна палі мала бути різної довжини, що забезпечувалося необхідне заглиблення в ІГЕ-5.

Значною проблемою для виставлення палі була велика товща насипних неоднорідних ґрунтів, на які повинна опиратись палі. Крім того, вимогами було визначено, що несуча здатність палі повинна бути не менше 250 т/с, а максимальна осадка не повинна перевищувати 8 см. Таким чином слід застосувати споряджену технологію робіт, що забезпечить необхідні вимоги. Відповідно, прийнято улаштування буронабивних палі з цементацією основи палі.

Набивні палі можуть виготовлятися з пробурених свердловин (буронабивні палі) та з свердловин, улаштованих пробивкою, розкачуванням, віброзаглибленням інвентарного підiera чи обсадної труби. Зважаючи на таку складну інженерно-геологічну будову, було запропоновано виготовлення буронабивних палі на основі бурозмішувальної технології з армуванням. Ця технологія передбачає виконання буріння свердловини під захистом розчину бентонітової глини шаропісочними долотами.

Такі долота застосовуються під час геотехнічних розвідувальних робіт, виконання буріння для всюдозабезпечення, пошуку та розвідки корисних копалин. Долота дозволяють пробурити граніти, чим забезпечується обпирання палі на щільні ґрунти. Оскільки необхідно було виготовити палі діаметром 600 мм, було виготовлено спеціальне шаропісочне долото. Для цього було використано декілька стандартних долот, які були розрізані і потім зварені в суцільну конструкцію.

З огляду на складність інженерно-геологічних умов, розчин для буріння на основі бентонітової глини підбирався з розрахунку такої її питомої ваги, яка

забезпечує утримання стінок свердловини в слабких грунтах від обрушення. В функцію бурового розчину також входить охолодження бурового інструменту та видалення на поверхню часток зруйнованого ґрунту. Крім того, при бурінні гранітів на інтервалі 0,5 м від забою свердловини для промивки використовується суміш, основу якої складає цемент М400 з добавками. Її питома вага змінюється від глибини свердловини та повинна забезпечити витискування промивної розчину та води з щілин між обломками граніту. Завдяки такій технології на забої свердловини формується ядро з гранітного щебеню та цементної суміші, що забезпечує надійне обпирання палі. По інтенсивності буріння, швидкості заглиблення та характеристиці ґрунту визначається тип ґрунту, що буриться, а також забезпечується необхідне заглиблення в граніти.

Після виконання буріння свердловини в неї опускався арматурний каркас діаметром 420 мм і довжиною 12 м. Бетонна труба діаметром 100 мм спускалась в середині каркасу з таким розрахунком, щоб вона не доходила до забою свердловини на 0,5 м [22]. Труба заповнювалась цементним розчином, а потім бетономасою під тиском проводилось заповнення свердловини мілкозернистим бетоном до виходу на поверхню чистого бетону. Після 28 діб, необхідних для повного твердіння бетону, паля була підготовлена до випробування. Якщо навантаження під час статичного випробування палі на вдавлювання доведене до навантаження, що викликає безперервне зростання їх осідання  $s$  без збільшення навантаження (при  $s \leq 20$  мм), то це навантаження береться за окреме значення граничного опору  $F_u$  випробовуваної палі. У всіх інших випадках для фундаментів будівель і споруд (окрім мостів і гідротехнічних споруд) за окреме значення граничного опору палі  $F_u$  навантаженням вдавлювання необхідно приймати осьовий тиск, під впливом якого випробовувана паля отримає осідання  $s$ , що визначається за формулою:

$$s = z \cdot s_{u,mt}, \quad (2)$$

де  $z$  – коефіцієнт переходу від граничного значення середнього осідання фундаменту або земляного полотна  $s_{u,mt}$  до осідання палі, отриманого при статичних випробуваннях з умовною стабілізацією (загасанням) осідання;  $s_{u,mt}$  –

граничне значення середнього осідання фундаменту запроєктованої будівлі або споруди.

Виконання випробування палі ускладнювало виготовлення анкерів для монтажу стенда. Звичайно монтаж стенду для випробовувань виконується на анкерах, що закручені в ґрунтову основу. Однак склад ґрунту, що був чужим на майданчику, не дозволяв закручування анкера. Тому було прийнято рішення про випробування палі стендом з вантажною платформою, що була утвором для двох домкратів, які створювали навантаження по 200 т.с. В якості вантажу використовувалися фундаментні блоки. Проте, коли на стенд навантажили 350 т, він почав давати осадку, тому було вирішено обмежитись цим навантаженням. В програму випробувань було внесено корективи, на основі яких було вирішено завершувати випробування при значенні навантаження в 330 т.с [24].

При конструюванні і будівництві шарів дорожнього одягу необхідно максимально використовувати місцеві маломіцні кам'яні матеріали, зміцнені неорганічним в'язучим (цемент, вапно, активні золи та ін.). Нескільки ми ґрунтами вважаються великоуламкові, піщані і глинисті ґрунти. Великоуламкові ґрунти (щебінь, гравій, галька) являють собою шматки, що утворилися в результаті руйнування скельних порід, з розмірами частинок більше 2 мм. Вони поступаються по міцності скельним ґрунтам. Якщо великоуламкові ґрунти не схильні до дії ґрунтових вод, вони також є надійною основою. Для укріплення цементом застосовують усі види природних дисперсних ґрунтів, в тому числі з відносною деформацією здирання до 0,07 згідно з [1]. Під зміцненням ґрунтів розуміють комплекс заходів, спрямованих на створення, по суті, нових будівельних матеріалів з новими фізико-механічними властивостями в порівнянні з властивостями вихідних ґрунтів. З огляду на, що зміцнений ґрунт є матеріальною системою, в якій її складові частини – ґрунтові зерна і зв'язуючі речовини зберігають свою хімічну індивідуальність, а процеси фізико-хімічної взаємодії протікають головним чином на границях розділу фаз.

Під обробці ґрунту цементом процеси гідратації, а також інші хімічні реакції будуть посилюватися або уповільнюватися в залежності від хімічного та

мінерального складів цементу, природи ґрунту та його фізико-хімічного стану в момент обробки (рисунк 1) [2, 3].

Властивості матеріалу залежать від структури укріпленого ґрунту і, головним чином, ґрунтової зони контакту (ГЗК).

Найбільш активною частиною цементоґрунтової суміші, яка забезпечує створення нової структури укріпленого ґрунту, є цемент. На міцність та морозостійкість цементоґрунту впливає не тільки марка цементу, але і його мінеральний склад. При зміцненні ґрунтів цементами однакових марок, але різного мінерального складу будуть отримані цементоґрунти з різними властивостями.

В результаті взаємодії цементу з водою, з присутніми в ґрунті солями та частково з дрібнодисперсною частиною ґрунту, в зміцненому ґрунті виникає нова водостійка кристалізаційна структура. Процеси зволоження та адсорбції є першочерговими при формуванні адгезійних контактів та ГЗК, між мінеральними складовими ґрунту (МСГ) та гідратами, що утворюються при використанні портландцементу [3].

Вони залежать від адсорбційних та електроповерхневих властивостей МСГ та в'язучого, що зумовлюють особливості ГЗК та структури укріпленого ґрунту.

Розщеплення зв'язків  $\text{SiOSi}$  (рисунк 2) в процесі утворення МСГ та подальших механічних впливів на ґрунт (механічна активація) супроводжується гідроксилюванням мінеральної поверхні, сорбцією потенціаловизначальних іонів  $\text{H}^+$  і  $\text{OH}^-$ . Катіони, що надходять у ґрунт з рідкою фазою при зміцненні ґрунтів цементом, беруть участь в іонному обміні з протонами  $\text{H}^+$ . Крім того, вони можуть компенсувати негативний заряд мінеральної поверхні.

Тверді частинки гетерогенних систем, що беруть участь у процесі утворення цементних матеріалів, характеризуються різними на кілька порядків величинами питомої поверхні від десятків (мінеральні зерна ґрунту) до тисяч (пилуваті частинки) і десятків тисяч (глинисті частинки) квадратних сантиметрів на грам. Загальна площа поверхні МСГ складається із зовнішньої та внутрішньої – визначається різною будовою кристалічної решітки МСГ, яка зростає в напрямку: силіко-силікатне скло золь – плаків – кварц – польові шпати – амфіболи – (піроксен,

меліліт) – карбонати – слюди – гідроксики заліза – глинисті мінерали. Тому по відношенню до рідкої фази ці мінерали поведуться по-різному, зумовлюючи протікання конкуруючих процесів адсорбції та «поверхневого осмосу» [2]. Перші 4-8 діб усі мінерали виявляють максимальну адсорбційну здатність, після чого, для деяких із них, вона згасає по-різному. Результати досліджень показників міцності та кінетики структуроутворення великоуламкових ґрунтів з різною концентрацією цементу.

Аналіз результатів досліджень вказує на те, що при збільшенні вмісту цементу у складі сумішей показники їх міцності зростають.

Не меншою мірою, ніж адсорбція, відповідальна за характер процесів контактування в укріпленому ґрунті та щільну ГВК, електрична природа поверхні мінералів ґрунту та гідратів, яка залежить від їх кристалічної природи і проявляється в рідкій фазі неорганічних в'язучих [3-4].

Для основного мінералу піщаних ґрунтів – кварцу характерна присутність на поверхні гідроксильних груп та адсорбованої води. При контакті з водою відбувається часткова дисоціація гідроксильних груп із втратою водню та придбанням негативного заряду за рахунок легкого руйнування зв'язків O-H з енергією розриву 4,35 eV порівняно з Si-O (7,20 eV) [2].

Глинисті мінерали – каолітин (галуазит, дикіт), монтморилоніт (бейделіт, нонтроніт), гідрослюди (гідробіотит, гідромусковіт, глауконіт) відносяться до силікатів, основу яких становлять тетраедричні кремнійкиснева та октаедрична  $Al_3^{3+}$  або  $Mg_2^{2+}$  -  $O_6^{4-}$  -  $OH^-$  сітки [4, 5].

У них катіони  $Mg^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$  не повністю справляються зі своєю роллю компенсаторів. Обмінні катіони  $Na^{+}$  і  $Ca^{2+}$  також не усувають дисбаланс і можуть змінити негативний заряд. Тільки на бічних сколах глини спостерігається позитивний заряд [2]. Ковалентність зв'язку  $Fe^{3+} - O_6^{4-}$  і  $Al^{3+} - O_6^{4-}$  складає 44,7 % і 40,7 %, відповідно тоді як у гідроксильній групі – 66,05 %. Отже, міцність зв'язку в перших випадках в 1,5 рази більша, ніж міцність зв'язку в гідроксильній групі, що свідчить про велику можливість прояву позитивного заряду розглянутих гідроксидів.

Для гідратів цементного каменю сумарний знак та величина заряду визначаються інтегральним розподілом електричних зарядів поверхні клінкерних реліктів та гідратів. Вони залежать від мінерального складу в'язучого, хімізму, води замішування, умов та тривалості гідратації [5].

На стадії формування коагуляційної структури гідратованого цементу, переважна кількість гідралюмінату і гідросульфалюмінату кальцію зумовлює утворення сумарного позитивного заряду гідратів. Подальше збільшення кількості гідросилікатів кальцію на стадії утворення кристалізаційної структури сприяє зменшенню заряду з наступною зміною на негативний, що підтверджено численними дослідженнями [2].

На основі проведеного аналізу, можна зробити висновок, що процеси змочування та адсорбції залежать від адсорбційних та електроповерхневих властивостей ґрунту та в'язучого, що зумовлюють особливості ГЗК та структури укріпленого ґрунту. Через однаковий негативний заряд поверхні мінералів ґрунту і гідратів не досягається повністю реалізованого зміцнення ґрунтів неорганічними матеріалами. В даному випадку найбільш ефективним слід вважати кероване контактоутворення [2], засноване на використанні розчинів електролітів для попередньої активації ґрунтів, що передуює зміцненню.

### **1.5 Стабілізація ґрунту для дорожнього покриття**

Результати, досягнуті в галузі стабілізації ґрунтів за останні роки, створили передумови для широкого використання методів стабілізації для створення стійких дорожніх основ. Це стало актуально в тих районах, де відсутні кам'яні або піщані матеріали, а перевезення спричинює подорожання робіт в декілька разів.

Основними шляхами підвищення стійкості дороги є збільшення товщини дорожнього покриття та збільшення несної здатності дорожньої основи і підстильного ґрунту, що дозволяє зменшити товщину покриття. Останній є більш доцільним, в основу якого покладено ідея максимального використання властивостей матеріалів, тобто є більш економічним.

Можливістю зниження вартості будівництва і витрат ресурсів стало використання в конструктивних шарах дорожніх будів укріплених ґрунтів і інших

місцевих матеріалів. Подальший розвиток цієї технології йде по шляху вдосконалення існуючих і розробки нових методів укріплення із застосуванням відомих і нетрадиційних в'язких і вторинних ресурсів, створення нових ефективних ґрунтозмішувальних машин, розробки сучасних методів експрес контролю.

Науковий пошук в області укріплення ґрунтів починали в 20 - 30-і роки минулого сторіччя з використанням в якості в'язучого бітумів, вапна, цементу, а пізніше синтетичних смол [1].

Методи стабілізації та укріплення ґрунтів

Стабілізація ґрунту – це комплекс заходів, спрямованих на надання ґрунту стійкого стану, постійності, збереження незмінних властивостей за допомогою стабілізатора.

Укріплення ґрунту – це комплекс заходів, спрямованих на підвищення механічної міцності та водостійкості ґрунту. Включає ряд послідовних технологічних операцій, забезпечує в результаті активного впливу на ґрунт добавок в'язких та інших речовин – високу щільність, міцність та довготривалу стійкість як в сухому так і в водонасиченому стані.

В результаті багаторічних лабораторних досліджень і різнобічних дослідів у виробничих умовах розроблений і широко застосовується на практиці ряд дозволів різноманітних методів укріплення ґрунтів.

Одним з найпоширеніших методів є зміцнення ґрунтів мінеральними в'язкими у вигляді цементу або вапна, що характеризується формуванням кристалізаційної структури. Ця структура виникає в результаті зрощування кристалів нової твердої фази, що постає з пересиченого розчину, як це, наприклад, буває при гідратаційному твердінні мінеральних в'язких матеріалів.

У процесі розробки різних методів укріплення ґрунтів вони вдосконалювалися, і при цьому знаходилися ефективні нові рішення по суттєвому поліпшенню їх структурно-механічних властивостей. Було встановлено і підтверджено багаторічними спостереженнями у виробничих умовах, що при укріпленні ґрунтів двома різними в'язкими матеріалами, що характеризуються

досить різними, але неантагоністичними властивостями і структурою, вони набувають підвищеної зсуво-, морозо-, температуростійкості і при необхідності можуть бути менш твердими і більш деформативними матеріалами. Так з'являється комплексний метод укріплення ґрунтів.

Крім зазначених вище причин у завдання комплексних методів, що розробляються і застосовуються на практиці, входить розв'язання наступних найбільш важливих питань для дорожнього будівництва:

- розширення ряду ґрунтів, що придатні для ефективного їх укріплення в'язними матеріалами (кислі, гумусовані, засолені ґрунти);
- продовження будівельного сезону за рахунок можливості обробки перезволожений ґрунтів і виконання робіт при несприятливих температурах;
- підвищення деформативності;
- розширення застосування укріплених ґрунтів при влаштуванні дорожніх основ і покриттів на дорогах різних категорій.

Найбільше поширення у практиці дорожнього будівництва одержав комплексний метод укріплення ґрунтів цементом у сполученні із хлористим кальцієм, їдким сірчаноокислим натрієм [2].

Особливо широко в практиці дорожнього будівництва розповсюджений комплексний метод укріплення ґрунтів цементом у сполученні з органічними добавками [3]. Цей метод, був розроблений В.М. Бєзруком і його учнями, створює одержанню оптимальних показників укріпленого ґрунту, які забезпечують тривалий термін служби конструктивного шару у дорожній конструкції. У якості органічних добавок використовують бітумні емульсії і пасти, рідкі бітуми і гудрони, сиру високосмолисту нафту, а в останні роки – спінений бітум.

У практиці дорожнього будівництва для поліпшення властивостей цементоґрунту знаходять застосування різні поверхнево-активні речовини (ПАР), їх вводять у суміш із метою пластифікації і наступної гідродобізації матеріалу, що сформувався.

При укріпленні цементом дрібних однорозмірних пісків і супісків для забезпечення необхідних міцнісних показників матеріалу потрібна досить велика

витрата цементу, внаслідок збільшення питомої поверхні матеріалу. Поліпшити якість матеріалу можливо введенням різних добавок, що утворюють в ньому додаткову структуру, спільну зі структурою в'язучого. Досить ефективно у цьому відношенні застосовувати калійні золи, шлаки і зола-шлакові суміші, які можуть одночасно бути гранулометричними і активними добавками [4].

Кращі показники при укріпленні зв'язних ґрунтів одержуються при використанні в якості зв'язних гашеного або негашеного вапна. Глиниста частина ґрунту грає стосовно вапна роль своєрідної гідралічної добавки. У результаті цього вапно, що представляє собою повітряне в'язне, здобуває властивості гідралічного в'язучого.

Ефективність дії добавок залежить від виду ґрунту, його хіміко-мінералогічного складу, виду добавки і її кількості.

Підвищення розрахункових характеристик поліпшення фізико-механічних характеристик укріплених ґрунтів можна досягнути за рахунок введення в суміш різних синтетичних матеріалів у вигляді ниток або смужок.

Невеликий об'єм досліджень у цьому напрямку дозволить встановити, що введення в цементоґрунт арматури із синтетичних матеріалів впливає на його фізико-механічні властивості і розрахункові характеристики. Велике значення при цьому має вміст цементу в суміші. Характерно, що міцність зразків при стиску і їх морозостійкість при введенні синтетичних матеріалів підвищується.

Основним принципом будь-якого методу стабілізації ґрунтів є активна дія на глинисто-колоїдальну частину ґрунту, яка є найбільш дієвою і чутливою до в'язучих матеріалів, які вносяться в ґрунт. Цей основний принцип стабілізації ґрунтів "дія на вискодисперсну частину ґрунту докорінним чином змінює фізико-механічні властивості ґрунту в цілому" вперше був сформульований проф. М.М. Філатовим. Тому покращання властивостей ґрунтів можливе тільки на основі вивчення властивостей і складу їх тонкодисперсної частини – поглинального комплексу. Правильно використовуючи адсорбційну здатність ґрунту, активно діючи на його тонкодисперсну частину добавками різних в'язучих речовин, можна збудувати такий дорожній одяг, який відповідатиме технічним вимогам.

При розробці будь-якого методу укріплення ґрунтів треба виходити з того, що головною задачею є надання ґрунтам високої та довготривалої міцності. При цьому до стабілізаційних ґрунтів, що застосовуються для влаштування дорожніх основ та покриттів, пред'являють дві основні вимоги. По-перше, ґрунт повинен після завершення періоду твердіння та структуроутворення набувати такої ступінь стійкості і незворотної зв'язності між частинками, при якому забезпечується надійний опір зовнішнім навантаженням без виникнення деформацій (прогину та зсуву), що перевищує допустимі границі. По-друге, він повинен протягом тривалого часу протистояти напруженням, які виникають від дії зовнішнього середовища, наприклад, набрякання під час зволоження та замерзання, зберігати набуту ним структуру під час довготривалого зволоження, підвищення температури і т.п. [5].

Міцність укріпленого ґрунту і його опір дії природним факторам, необхідні для виконання вищезазначених вимог, можуть бути різним в залежності від інтенсивності руху та навантажень на вісь автомобілів та місцевих природних умов. Це вказує на необхідність диференційованого підходу при оцінці міцнісних і деформаційних властивостей укріплених ґрунтів. Тому в будь-якому випадку, піддаючи ґрунти укріпленню в'язними матеріалами та добавками інших речовин, необхідно надати ґрунтам стійку зв'язність, міцність та щільність, які не змінюватимуться під дією навантажень і клімату протягом довготривалого терміну. Використання новітніх добавок для стабілізації та укріплення ґрунту.

Аналіз виробничого досвіду, а також лабораторних випробувань показує, що для того, щоб отримати хороший матеріал з структурно-механічними властивостями (високою зв'язністю, механічною міцністю та водостійкістю), необхідне чітке виконання установлених вимог до в'язних матеріалів і інших реагентів до ґрунту, що стабілізується, послідовності виконання установлених технологічних операцій по його обробці, укладці та витримуванню суміші. Щоб отримати матеріал з заданими міцнісними показниками, необхідно визначити властивості ґрунту, правильно використовувати його активність, оскільки ґрунти, особливо зв'язні, являють собою дуже складні полімінеральні, полідисперсні

системи з дуже різноманітною тектодисперсною частинкою. Фізико-хімічна і хімічна активність ґрунту в залежності від їх природи та умов середовища, яка утворюється і змінюється в процесі обробки ґрунту, може бути або корисною або агресивною у відношенні до процесів структуроутворення, які протікають в укріпленому ґрунті [6].

На сьогоднішній день існує велика кількість речовин, які сприяють перетворенню ґрунту або дрібних малоцінних мінеральних матеріалів у монолітний матеріал.

Використовувати стабілізатори для поліпшення стану і якості ґрунтів без застосування неорганічних в'язких доцільно тільки за умови, коли на оброблений ґрунт активно не діятиме вода. В Україні використовуються стабілізатори ґрунту: Roadbond EN -1 (виробництва США); RRP-235 Special — Рейнольд і Роуд Маккер (виробництва Німеччини і Канади); Roadbond SPF (виробництва ПАР і Росії); стабілізатори ГРБ-1, ГРБ-2, ГРБ-3, ГРБ-4, ГРБ-5 (виробництва інституту високомолекулярних з'єднань НАН України), стабілізатор СГ (виробництва НАН України); стабілізатор Solitac (виробництва компанії Soilworks США); стабілізатор Solitac (виробництва компанії Soilworks США); гідрофобізатори рідини ГКЖ-11Б, ГКЖ-12, КЖ-94 (виробництва Запорізького АТ «Кремнійполімер»); стабілізатор ґрунтів Ferma-Zyme 11x (виробництва США); рідке скло; хлористий кальцій ( $\text{CaCl}_2$ ); ТОВ «Дніпровська асоціація-К» ферментного стабілізатора Дорзан. Стабілізатори рекомендують застосовувати у вигляді розбавленого водного розчину. Стабілізатори для ґрунтів доцільно використовувати у поєднанні з цементом при спорудженні будь-яких складових дорожнього одягу. Речовини для укріплення ґрунту можуть бути різного походження, відрізнятися за властивостями, але їх об'єднує те, що вони збільшують міцність, волого- і морозостійкість, що, в свою чергу, дозволяє використовувати їх в суворих кліматичних умовах. На сьогоднішній день в Україні застосовують в'язні RBI-81, Infra Crete, що підвищують фізико-механічні властивості ґрунту та надають матеріалам морозо- і водостійкість [7, 8].

Різні методи укріплення ґрунтів, що ґрунтовані на докорізному зміні та покращанні властивостей ґрунтів шляхом введення в них добавок в'язких матеріалів та інших активних речовин, знайшли практичне застосування з позитивними результатами в різних природних та ґрунтово-геологічних умовах.

Важливим фактором при оцінці будівельних (фізико-механічних) властивостей (здатності до покращання властивостей) ґрунтів є вміст та мінералогічний склад найбільш активної і найважливішої тонкої - дисперсної частини ґрунту - глинистих часток.

Враховуючи перспективність укріплення та стабілізації ґрунтів різними методами, необхідно проводити гідробування в напрямку – підвищення адгезійного щеплення в'язких речовин та їх новоутворень в місці контакту з ґрунтовими частинами та їх макро- і мікросегрегатами.

- покращання структурно-механічних властивостей укріплених ґрунтів (підвищення або зменшення їх деформативності в залежності від типу їх структури), підвищення їх морозота водостійкості;
- вивчення ефективності впливу різних поверхнево-активних речовин та інших хімічних речовин для підвищення гідрофобності укріплених ґрунтів різного генезису та хімікомінералогічного складу;
- розробка технічно обґрунтованих характеристик та показників властивостей укріплених ґрунтів, котрі відповідають сучасним вимогам, пред'явленим до проектування дорожніх одягів.

Великі техніко-економічні переваги дорожніх основ та покриттів з укріплених ґрунтів можуть бути повністю реалізовані лише при чіткій організації робіт і використанні сучасних засобів механізації, а саме, важливу роль в формуванні властивостей укріпленого ґрунту відіграють фізичні та механічні процеси, що виникають при подрібненні ґрунту, його поєднанні з в'язким 149 та іншими речовинами, а також при зрощенні та ущільненні суші з забезпеченням тривалого оптимального вологого та температурного режиму твердіння

## Висновки

Головними позитивними технологічними особливостями ґрунтоцементних елементів є: висока водонепроникність; швидкість зведення; відсутність вібраційних навантажень, менша вартість матеріалу тіла палі, порівняно з бетоном, і, відповідно більша висока економічна ефективність.

У процесі конструювання й будівництва дорожніх одягів необхідно максимально повно використовувати місцеві маломіцні кам'яні матеріали, зміцнені неорганічним в'язучим (цемент, вапно, активні золи та ін.) [1, 2].

У таких монолітних основ є низка переваг порівняно з класичними дискретними (щебеневими) основами:

- зсувостійкість, більш високий модуль пружності;
- функції переривання каплярів, що не дозволяють ґрунтовим водам проникати в тіло дорожнього одягу;
- підвищені теплоізоляційні показники, що покращує морозостійкість усієї конструкції.

Особливо відчутна економічна доцільність використання цементоґрунтів для влаштування дорожніх одягів у районах, не забезпечених місцевими кам'яними матеріалами. У цих умовах вартість 1 м<sup>2</sup> цементоґрунтового шару нерідко в 1,5–2 рази нижча за вартість 1 м<sup>2</sup> рівномірного шару із прирізних матеріалів[4].

У використанні технології зміцнення ґрунтів неорганічними в'язучими матеріалами відпадає необхідність у залученні значної кількості транспорту, оскільки зміцнювати можна місцевий ґрунт, який знаходиться на місці, а доставити до місця робіт тільки в'язучий матеріал. Розвантажувати цемент у машину для розподілу в'язучого можна безпосередньо на місці проведення робіт. Зміцнюючи місцеві ґрунти, можна отримувати міцну основу [2].

## Аналіз публікацій

Ґрунти, придатні до зміцнення цементом, поширені значно більше, ніж кам'яні матеріали.

Для укріплення цементом застосовують усі види природних дисперсних ґрунтів, зокрема великоуламкові ґрунти з відносною деформацією зминання до 0,07.

Для влаштування дорожніх основ і покриттів можна застосовувати всі види й різновиди великоуламкових, піщаних і глинистих ґрунтів [3].

Як показали багаторічні обстеження доріг, побудованих у кількох південних областях України, такий матеріал усуває переміщення окремих частинок під впливом змінних навантажень і природно-кліматичних факторів, має гарну розподільну здатність [5].

## РОЗДІЛ 2

### МЕТА РОБОТИ ТА ЗДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета роботи:

Встановити закономірності впливу нанодобавки Nanoalps®System Soll на фізико-механічні, деформаційні властивості ґрунтоцементних композицій і на основі отриманих результатів обґрунтувати оптимальні технологічні параметри виготовлення ґрунтоцементного дорожнього покриття з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Завдання магістерської роботи:

1. Проаналізувати сучасний стан технологій стабілізації ґрунтів цементом, використання модифікуючих та нанодобавок в дорожньому будівництві, визначити їхні переваги та обмеження.
2. Визначити фізико-механічні характеристики вихідних ґрунтів, що використовуються для виготовлення ґрунтоцементних сумішей (ологість, гранулометрія, межі пластичності, густина тощо).
3. Розробити склад ґрунтоцементних сумішей з різними дозуваннями нанодобавки Nanoalps®System Soll, поліпропіленових волокон та різних витрат цементу. Визначити оптимальне співвідношення компонентів.
4. Встановити вплив нанодобавки на:
  - міцність на стиск і згин зразків,
  - модуль деформації,
  - середня густина.

**Об'єкт дослідження:**

Компоненти ґрунтоцементу: ґрунт-лесовий суглинок, поліпропіленові волокна, портландцемент, нанодобавка Nanoalps®System Soll.

**Предмет дослідження:** Закономірності зміни міцності, деформаційних характеристик ґрунтоцементних композицій під впливом нанодобавки Nanoalps®System Soll, поліпропіленових волокон а також цементу, технологічні параметри виробництва модифікованого ґрунтоцементу.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Планування дослідів експерименту

Планування дослідів експерименту - це комплексна процедура вибору числа дослідів й умов їх проведення, необхідних та достатніх для розв'язання поставленої задачі з необхідною точністю.

З метою досконалого вивчення особливостей зміни міцнісних і деформативних характеристик ґрунтоцементу прийнято за доцільне провести серію експериментальних досліджень з використанням методу математичного планування трьох факторного експерименту в таблиця 3.1. Матриця проведення дослідів експерименту наведена в таблиця 3.1.

Таблиця 3.1. Матриця проведення дослідів експериментів

| № дослідів | Матриця планування (x <sub>i</sub> ) |                |                | Квадрати змінних (x <sup>2</sup> <sub>i</sub> ) |                             |                             | Властивості ґрунтоцементу (вихід) |                 |                |    |    |
|------------|--------------------------------------|----------------|----------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------|----|----|
|            | x <sub>1</sub>                       | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sup>2</sup> <sub>1</sub>                     | x <sup>2</sup> <sub>2</sub> | x <sup>2</sup> <sub>3</sub> | R <sub>ст</sub>                   | R <sub>зг</sub> | ρ <sub>m</sub> | E  | W  |
| 1          | 2                                    | 3              | 4              | 5                                               | 6                           | 7                           | 8                                 | 9               | 10             | 11 | 12 |
| 1          | -                                    | +              | +              | +                                               | +                           | +                           |                                   |                 |                |    |    |
| 2          | -                                    | +              | +              | +                                               | +                           | +                           |                                   |                 |                |    |    |
| 3          | +                                    | +              | +              | +                                               | +                           | +                           |                                   |                 |                |    |    |
| 4          | -                                    | +              | -              | +                                               | +                           | +                           |                                   |                 |                |    |    |
| 5          | +                                    | -              | -              | +                                               | +                           | +                           |                                   |                 |                |    |    |
| 6          | -                                    | -              | -              | +                                               | +                           | +                           |                                   |                 |                |    |    |
| 7          | +                                    | -              | -              | +                                               | +                           | +                           |                                   |                 |                |    |    |
| 8          | -                                    | -              | -              | +                                               | +                           | +                           |                                   |                 |                |    |    |
| 9          | +                                    | 0              | 0              | +                                               | 0                           | 0                           |                                   |                 |                |    |    |
| 10         | -                                    | 0              | 0              | +                                               | 0                           | 0                           |                                   |                 |                |    |    |

|    |   |   |   |   |   |   |  |  |  |  |  |  |
|----|---|---|---|---|---|---|--|--|--|--|--|--|
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 |  |  |  |  |  |  |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | + | 0 |  |  |  |  |  |  |
| 13 | 0 | + | + | 0 | 0 | + |  |  |  |  |  |  |
| 14 | 0 | - | - | 0 | 0 | + |  |  |  |  |  |  |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |  |  |  |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |  |  |  |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |  |  |  |  |  |  |

Примітка. При проведенні дослідних замісів згідно з вибраним планом досліди в нульовій точці (всі фактори на основному рівні) були рівномірно розподілені між всіма іншими, дублюючи їх через кожні 3 - 5 замісів.

Результати дослідів обробляються з використанням методів математичної статистики за допомогою MCOM. Отримане алгебраїчне рівняння, відображає зв'язок між досліджуваними властивостями матеріалів і вихідними факторами.

Рівняння має вид:

$$Y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (3.1)$$

Дальше проводиться перевірка рівняння на адекватність за критерієм

Фішера ( $F_p < F_{\text{т}}$ ).

### 3.2 Розробка та виготовлення форми

Для виготовлення зразків ґрунтоцементу була взята форма-балочка розміром 4\*4\*16 см.

1. Виготовлена форма має розміри 4х4х16 см.

Фото виготовленої форми наведено на рисунку 1.



Рис.3.1 Фото форми

### **3.3 Розробка та виготовлення установки для формування зразків ґрунтоцементу**

Для формування зразків-балочок ґрунтоцементу в лабораторних умовах використовується механічна пресувальна установка вертикальної дії, закріплена на сталевій рамній конструкції (рис. 3.2-3.3).



Рис.3.2 Механічна пресувальна установка вертикальної дії

## **Конструктивна схема установки**

Установка складається з таких основних елементів:

### **1. Несуча рама**

Виконана зі сталевих профілів зварної конструкції, забезпечує жорсткість та стійкість установки під час навантаження. Рама сприймає зусилля пресування та передає їх на основу.

### **2. Матриця (форма)**

Металева знімна форма, призначена для формування ґрунтоцементних зразків балочок заданих геометричних розмірів (відповідно до вимог чинних стандартів). Матриця забезпечує фіксовану форму зразка та рівномірний розподіл тиску по перерізу.

### **3. Пуансон**

Сталевий формувальний елемент, який входить у матрицю та безпосередньо передає зусилля пресування на ґрунтоцементну суміш. Поверхня пуансона вирівнює верхню грань зразка та забезпечує його геометричну точність.

### **4. Наставка**

Проміжний елемент між пуансоном і пресувальним механізмом, який забезпечує правильне позиціонування зусилля та компенсацію висоти при формуванні зразків різної товщини.

### **5. Гідравлічний домкрат вантажопідймальністю 12 т**

Домкрат створює необхідне пресувальне зусилля та забезпечує плавне прикладання навантаження. Максимальне зусилля дозволяє досягати тисків, достатніх для ущільнення ґрунтоцементних сумішей різного складу.

## **Принцип роботи установки**

Формування зразків-балочок здійснюється шляхом **статичного пресування**.

Попередньо підготовлена ґрунтоцементна суміш укладається в матрицю пошарово з легким ущільненням. Після встановлення пуансона та наставки гідравлічним домкратом прикладається вертикальне зусилля.

Навантаження збільшується поступово до заданого значення та витримується протягом 3 хвилин, що забезпечує:

- ущільнення суміші;
- зменшення пористості;
- формування однорідної структури зразка.

Після зняття навантаження зразок виймається з матриці та направляється на подальше тверднення в необхідних умовах.

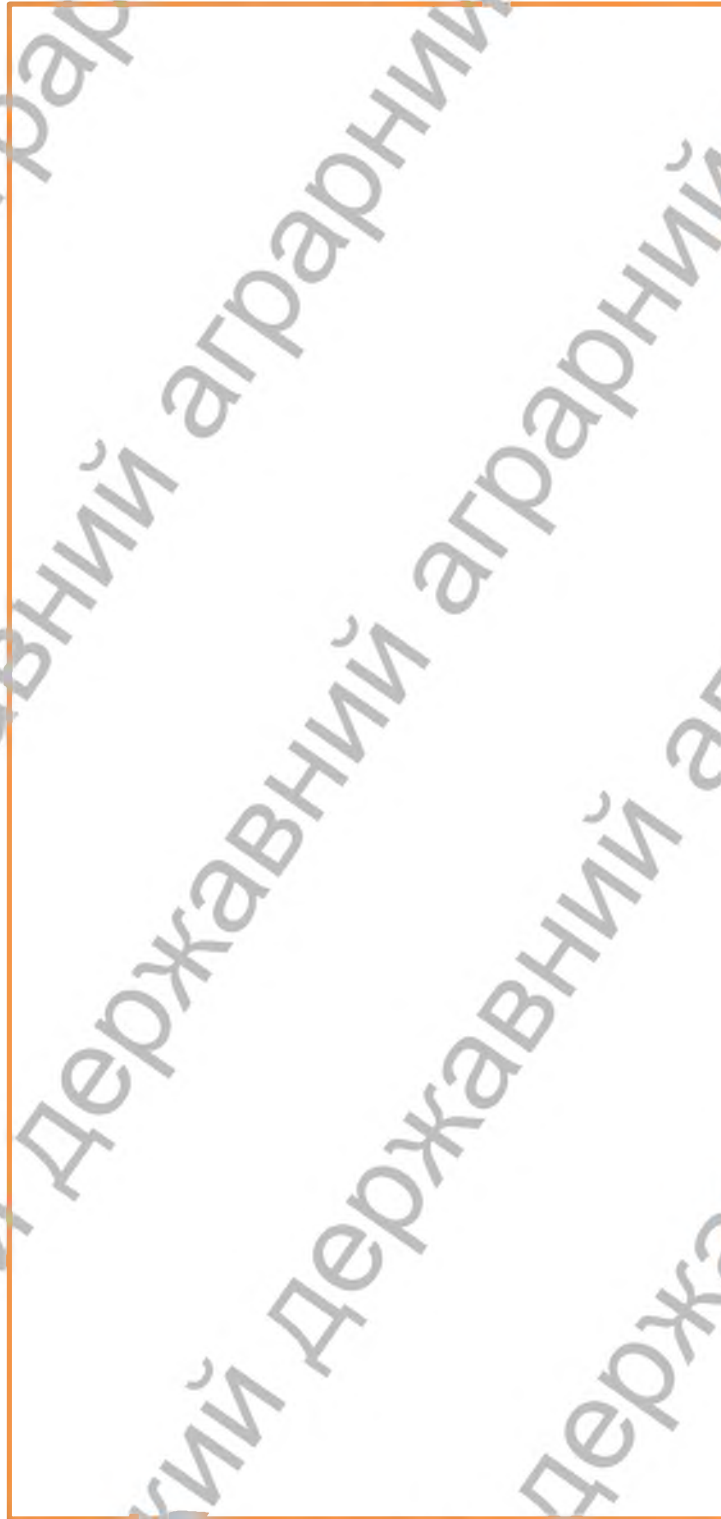


Рис. 3.3 Формування зразків-балочок на установці

## Призначення та переваги установки

Використання даної установки дозволяє:

- отримувати зразки-балочки з відтворюваними фізико-механічними характеристиками;
- моделювати умови ущільнення ґрунтоцементу, наближені до реальних умов дорожнього будівництва;
- забезпечити точність геометричних параметрів зразків;
- проводити порівняльні дослідження впливу складу суміші та добавок (зокрема Nanoalps®System Soil) на властивості ґрунтоцементу.

### 3.4 Розробка та виготовлення пристосування для визначення модуля деформації ґрунтоцементу

Метою експериментального визначення модуля деформації ґрунтоцементу у процесі стискання було розроблено та виготовлено спеціальне вимірювальне пристосування, яке забезпечує фіксацію малих осьових деформацій зразків під дією прикладеного навантаження (рис. 3.4).





рис.3.4 Пристосування для визначення модуля деформації ґрунтоцементу

### **Конструкція пристосування**

Пристосування являє собою **жорстку металеву рамну конструкцію**, виготовлену зі сталевих елементів, та складається з таких основних частин:

#### **1. Опорна основа**

Виконана у вигляді сталевого П-подібного профілю, що забезпечує стійке встановлення пристосування на плиті випробувальної машини або преса. Основа сприймає реактивні зусилля, які виникають під час навантаження зразка.

#### **2. Верхня поперечна балка**

Сталева пластинка, жорстко з'єднана з опірною частиною, слугує несучим елементом для кріплення вимірювального приладу та передавання навантаження.

#### **3. Напрямні елементи (циліндричні упори)**

Розміщені симетрично по краях верхньої балки, забезпечують стабільність положення пристосування та унеможливають його перекіс під час навантаження.

#### **4. Вимірювальний індикатор годинникового типу**

Закріплений у центральній частині верхньої балки. Індикатор призначений

для вимірювання осьових деформацій ґрунтоцементного зразка з високою точністю. Контактний шток індикатора спирається безпосередньо на верхню поверхню зразка і є передавальний елемент.

#### 5. Кріпильний вузол індикатора

Забезпечує надійну фіксацію вимірювального приладу та можливість його юстування перед початком випробувань.

#### Принцип роботи пристосування

Пристосування використовується у складі випробувальної схеми разом із пресом або навантажувальною установкою. Ґрунтоцементний зразок встановлюється між плитами преса, після чого пристосування монтується таким чином, щоб вимірювальний індикатор контактував із поверхнею зразка.

Під час прикладання вертикального навантаження відбувається **осьове стиснення зразка**, яке супроводжується його деформацією. Переміщення штока індикатора фіксує зміну висоти зразка, що дозволяє визначити відносну деформацію при заданому рівні напружень.

На основі експериментально отриманих значень напружень і відповідних деформацій визначається **модуль деформації ґрунтоцементу** за загальноприйнятими розрахунковими залежностями.

#### Призначення та переваги пристосування

Розроблене пристосування дозволяє:

- проводити визначення модуля деформації ґрунтоцементу в лабораторних умовах;
- забезпечувати високу точність вимірювання малих деформацій;
- підвищити відтворюваність результатів випробувань;
- застосовувати пристосування для порівняльної оцінки впливу складу ґрунтоцементу та модифікуючих добавок на його деформаційні властивості.

Простота конструкції, надійність та можливість виготовлення з доступних матеріалів роблять пристосування доцільним для використання в навчально-наукових лабораторіях будівельного профілю.

### 3.5 Методика приготування цементно-ґрунтової суміші

Складається з змішування сухих елементів (цементу, ґрунту) та поступового додавання поліпропіленової фібри, води з нанодобавкою, для того щоб не відбувалося комкування суміші. Всі елементи для кожного замісу були попередньо зважені на вагах з відсотковому відношенні по таблиці 5.1

Випробування зразків ґрунтоцементу проводилися на відповідність ДСТУ EN 14227-15:2021 Суміші, укріплені гідравлічним в'язучим технічні умови. Частина 15. Ґрунти, стабілізовані гідравлічним в'язучим (EN 14227-15:2015, IDT) та за методикою ДСТУ Б В.2.7-309:2016 [24].

Дослідні елементи виготовлялися з ґрунту, цементу марки М500, поліпропіленової фібри довжинною 15 мм, як армуючий матеріал та нанодобавки Nano!ps System Soll.

### **3.6 Методика визначення характеристик цементу**

Для визначення характеристик цементу застосовується метод згідно ДСТУ Б В.2.7-187 [26].

Метод включає визначення міцності на згин і стиск зразків-балочок розмірами 40 мм x 40 мм x 100 мм.

## РОЗДІЛ 4

### ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Основні матеріали взяті для дослідження: ґрунт, цемент, добавки. Були визначені основні характеристики ґрунту та придатність його для виготовлення ґрунтоцементу. Цемент був перевірений на відповідність марці за міцністю на стиск. Перевірка добавок проводилася згідно технічних умов [10], заявлених виробником.

#### 4.1 Характеристики ґрунту

Основним матеріалом для ґрунтоцементу є ґрунт. Від типу ґрунту та його властивостей майже повністю залежать вихідні характеристики ґрунтоцементу.

Згідно технічного звіту ґрунт є суглинком лесовим, високопористим, твердим просадочним.

Фізико-механічні розрахункові властивості ґрунтів:

$$\gamma_{II}=14,29 \text{ кН/м}^3$$

$$C_{II}=9 \text{ кПа}$$

$$\varphi_{II}=25^\circ$$

$$E=15,7 \text{ МПа}$$

$$k_f=0,35 \text{ м/с}$$

В лабораторних умовах було проведено аналіз ґрунту та визначення інших необхідних характеристик ґрунту.

#### Гранулометричний склад.

Гранулометричний склад ґрунту визначався за методом Б. І. Рутковського, [12] за допомогою якого було виділено три основні фракції:

- глинисту (розмір часток  $<0,005 \text{ мм}$ ),
- пилувату (розмір часток  $0,005-0,05 \text{ мм}$ ),
- піщану (розмір часток  $0,05-2 \text{ мм}$ )

Для випробувань було відібрано три проби ґрунту, на яких були визначені глиниста та піщана фракції.

Визначення вмісту глинистих часток, піщаних часток



Рис. 4.1 Визначення вмісту  
глинистих часток

Рис. 4.2 Визначення вмісту  
піщаних часток

За отриманими даними розрахунково була визначена гилувата фракція ґрунту. Так як коефіцієнт варіації для отриманих результатів не перевищив 5 % було взято середнє арифметичне значення.

Кількість глинистих часток склала 19,27 %, гилуватих – 33,73 %, піщаних – 47 %.

Дані аналізу градулометричного складу були нанесені на потрібну діаграму Охотіна [10] ()



Рис. 4.3 Потрібна діаграма розподілу фракцій «глина–гилуваті–пісок»

В результаті було підтверджено що даний ґрунт є суглинком легким піщанистим.

Для визначення природної вологості ґрунт був доставлений згідно ДСТУ Б В.2.1-8. [23] Для висушування використовувалися сушильна шафа з біскіт

Природна вологість.

Визначення вологості проводилося на трьох зразках, які були висушені до повного висихання. В результаті було отримано природну вологість ґрунту, яка дорівнює  $W=17,91\%$ .

При випробуванні в лабораторних умовах ґрунту для максимальної відповідності природному стану для кожної фізичної моделі визначалася вологість ґрунту.

Дані про визначену вологість та порівняння її з природною наведені в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Вологість ґрунту

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

Аналізуючи наведені дані можна зробити висновок, що відхилення вологості від природної в межах допустимої похибки 5%. Це означає що всі виготовлені зразки ґрунтоцементу за вологістю відповідають природному та придатні для використання.

#### 4.2 Характеристики цементу

Цемент перевіряємо на відповідність вимогам ДСТУ Б В.2.7-187:2009 [26]. Згідно з яким для випробування виготовляємо по три балочки 40x40x160 мм для цементу.

У даному випадку випробовувався цемент ПЦ 500-1-Н, результати випробувань занесені до таблиці 4.2

Таблиця 4.2 Результати випробувань цементів

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

### 4.3 Властивості поліпропіленової фібри

Поліпропіленова фібра – це синтетичне волокно, що додається в будівельні суміші для «мікроармування», яке значно підвищує їхні експлуатаційні характеристики: запобігає усадковій тріщинотворюванню, збільшує ударну міцність, стійкість до стирання, морозостійкість та водонепроникність бетону чи розчинів, зберігає при цьому хімічну інертність та не піддається корозії.

#### 1. Фізичні характеристики

- Густина:  
0,91–0,92 г/см<sup>3</sup> (900–920 кг/м<sup>3</sup>)
- Діаметр волокна:  
18–50 мкм (0,018–0,05 мм)
- Довжина волокна:  
12 мм
- Питома поверхня:  
200–300 м<sup>2</sup>/кг

#### 2. Механічні властивості

- Міцність при розтягу:  
300–700 МПа
- Модуль пружності (Юнга):  
3–5 ГПа
- Подовження при розриві:  
15–25 %
- Зменшення усадочних тріщин:  
на 60–90 %
- Підвищення тріщиностійкості:  
у 1,5–2,5 рази.

## РОЗДІЛ 5

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 5.1 Підбір складу ґрунтоцементу

За основу підбору складу ґрунтоцементу була взята витрата ґрунту, яка при оптимальній вологості має найбільшу середню густину. Далше всі компоненти визначалися у відсотках до відношенню до маси ґрунту. Результати розрахунків витрати матеріалів на один заміс для балочки розміром 4x4x16 см наведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1. Витрати компонентів ґрунтоцементу на один заміс

| №  | Витрати компонентів ґрунтоцементу на один заміс |        |       |        | Витрати компонентів ґрунтоцементу на один заміс |        |       |        |
|----|-------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------------------------------------------------|--------|-------|--------|
|    | ґрунт                                           | цемент | пісок | ґравій | ґрунт                                           | цемент | пісок | ґравій |
| 1  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 2  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 3  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 4  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 5  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 6  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 7  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 8  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 9  |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 10 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 11 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 12 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 13 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 14 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 15 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 16 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 17 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 18 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 19 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |
| 20 |                                                 |        |       |        |                                                 |        |       |        |

## 5.2 Дослідження впливу витрат добавки, цементу і поліпропіленової фібри на властивості ґрунтоцементу

Проведення дослідів проводилося з використанням математико-статистичних методів планування експериментів у відповідності з розділом 5. В якості факторів були вибрані витрати добавки, цементу і фібри. Значення інтервалів варіювання факторів наведені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Значення інтервалів варіювання

| Фактор | Відмінності між факторами | Відмінності між факторами |        |       |
|--------|---------------------------|---------------------------|--------|-------|
|        |                           | Додаток                   | Цемент | Фібра |
| 1      | 2                         | 3                         | 4      | 5     |
| 6      | 7                         | 8                         | 9      | 10    |
| 11     | 12                        | 13                        | 14     | 15    |
| 16     | 17                        | 18                        | 19     | 20    |

Досліди проводилися у відповідності з прийнятим планом експеримента. План експериментів та результати дослідів наведені у таблиці 5.3. Термін твердіння зразків 14 діб.

Таблиця 5.3. План експериментів та результати дослідів

| Фактор | Відмінності між факторами | Відмінності між факторами |        |       |
|--------|---------------------------|---------------------------|--------|-------|
|        |                           | Додаток                   | Цемент | Фібра |
| 1      | 2                         | 3                         | 4      | 5     |
| 6      | 7                         | 8                         | 9      | 10    |
| 11     | 12                        | 13                        | 14     | 15    |
| 16     | 17                        | 18                        | 19     | 20    |
| 21     | 22                        | 23                        | 24     | 25    |
| 26     | 27                        | 28                        | 29     | 30    |
| 31     | 32                        | 33                        | 34     | 35    |
| 36     | 37                        | 38                        | 39     | 40    |

|  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

В результаті обробки експериментів на ГП.ОМ отримані алгебраїчні рівняння фізико-механічних властивостей в досліджуваних межах зміни факторів.

### 5.2.1 Дослідження впливу витрат добавки, цементу і поліпропіленової фібри на міцність при стиску ґрунтоцементу

Алгебраїчне рівняння міцності при стиску:

$$\begin{aligned}
 Y = & 1.8761 - 0.3209X_1 - 0.6586X_2 + 17.0356X_3 \\
 & + 0.0406X_1^2 + 0.5643X_2^2 - 22.8571X_3^2 \\
 & + 0.0250X_1X_2 + 0.1460X_1X_3 + 0.2506X_2X_3
 \end{aligned} \quad (5.1)$$

Рівняння з критерієм Фішера придатне для описання вихідної залежності в досліджуваних межах зміни факторів, так як  $13,56 < 19,3$ .

За рівнянням (3) побудовані графіки на рис. 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6.



Рис.5.1. Карта ефектів Парето для оцінки статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії



Рис. 5.2. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та дошки на значення міцності ґрунтоцементу при стиску з витратою фібри 0,3%.



Рис. 5.3. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та добавки на значення міцності ґрунтоцементу при стиску з витратою фібри 0,2%.



Рис. 5.4. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та добавки на значення міцності ґрунтоцементу при стиску з витратою фібри 0,1%.



Рис. 5.5 Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та фібри на значення міцності ґрунтоцементу при стиску з витратою добавки 1%.



Рис. 5.6 Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та фібри на значення міцності ґрунтоцементу при стиску з витратою добавки 1,5%

## Опис графіка поверхні відгуку

На рисунку наведено поверхню відгуку, що відображає залежність міцності при стиску від двох основних факторів:

- витрати цементу, % (вісь X);
- витрати хімічної добавки, % (вісь Y)  
за фіксованого значення третього фактора — витрати фібри 0,3 %  
(зазначено у верхній частині графіка).

Вертикальна вісь (Z) демонструє значення міцності при стиску, МПа.

Колірна шкала праворуч позначає рівні міцності: від темно-зелених зон (< 4 МПа) до червоних (> 9 МПа).

Аналітичний опис поведінки поверхні

### 1. Загальна форма поверхні

Поверхня має чітко виражений нелінійний характер.

- у зоні малих витрат цементу (6–8 %) та низької витрати добавки (0,2–0,4 %) спостерігається мінімум міцності: 3,5–4,5 МПа;
- зі зростанням одного або двох факторів поверхня піднімається, набуваючи випуклої форми, що відповідає квадратичній моделі другого порядку.

### 2. Вплив витрати цементу

У напрямку осі X міцність зростає найбільш інтенсивно.

При переході від 8 до 16 % цементу графік демонструє різкий перехід:

- від зелених і жовтих зон (4–6 МПа)
- до світло-оранжевих і червоних зон (8–10 МПа).

Це підтверджує наявність домінуючого впливу цементу на рівень міцності.

### 3. Вплив витрати добавки

Вплив витрати добавки значно слабший.

- зміна дозування в межах 0,2–1,0 % майже не змінює характер поверхні;
- із збільшенням добавки з 0,2 до 1,0 % спостерігається лише незначне підвищення міцності (збільшення градієнта приблизно на 0,3–0,8 МПа).

Це узгоджується з результатами регресійного аналізу, де коефіцієнти  $X_2$  і  $X_3$  виявилися статистично незначущими.

#### 4. Комбінований вплив $X_1$ – $X_2$

Найвищі значення міцності ( $> 9$  МПа) формуються у зоні

- високих значень цементу (14–16 %),
- середніх або високих значень добавки (0,6–1,0 %).

Це місцева область оптимізації першого порядку, де градієнт поверхні найбільший.

Узагальнюючі висновки щодо графіка

1. Цемент є ключовим фактором, що визначає міцність при стиску.  
Поверхня різко зростає саме у напрямку збільшення його витрати.
2. Добавка має другорядний вплив, її зміна незначно змінює величину міцності, особливо у центральній області плану.
3. Область максимальних значень міцності ( $> 9$  МПа) спостерігається при:
  - витраті цементу 14–16 %,
  - добавці 0,6–1,0 %,
  - фіксації витраті фібри 0,3 %.
4. Мінімальна міцність ( $< 4,5$  МПа) фіксується у зоні:
  - цемент 6–8 %,
  - добавка  $< 0,4$  %.
5. Характер поверхні відгуку підтверджує адекватність квадратичної моделі та наявність локального максимуму міцності у напрямку збільшення цементу.



Рис. 5.7 Графік середніх значень для міцності ґрунтоцементу при стиску від витрат цементу

Аналіз графіку показує, що на міцність при стиску впливає витрата цементу і чим вона більше тим і міцність вища.



Рис. 5.8 Графік середніх значень для міцності ґрунтоцементу при стиску від витрат фібри

### 5.2.2 Дослідження впливу витрати цементу, добавки, фібри на міцність ґрунтоцементу на розтяг при згині

Оброблено результати досліджень у програмі Statistica 12 та отримано рівняння регресії.

(5.2)

Фізичний зміст коефіцієнтів

- Вільний член  $(-0,285821)$

Характеризує умовне значення міцності при нульових рівнях усіх факторів в у кодованому вигляді.

Вплив окремих факторів:

- Витрата цементу ( $X_1$ ):
  - Лінійний ефект  $+0,093857X_{1L}+0,093857 X_{1L}+0,093857X_{1L}$  — збільшення витрати цементу призводить до зростання міцності.
  - Квадратичний ефект  $+0,000007X_{1K}+0,000007 X_{1K}+0,000007X_{1K}$  — практично відсутній, тобто нелінійний вплив цементу в дослідженому діапазоні незначний.
- Витрата нанодобавки ( $X_2$ ):
  - Лінійний ефект  $+0,634571X_{2L}+0,634571 X_{2L}+0,634571X_{2L}$  — найбільш вагомий позитивний вплив на міцність.
  - Квадратичний ефект  $-0,299286X_{2K}-0,299286 X_{2K}-0,299286X_{2K}$  — свідчить про наявність оптимальної витрати нанодобавки; надмірна кількість може знижувати міцність.
- Витрата фібри ( $X_3$ ):
  - Лінійний ефект  $+0,058929X_{3L}+0,058929 X_{3L}+0,058929X_{3L}$  — помірно підвищує міцності зі збільшенням вмісту фібри.

- Квадратичний ефект  $+2,607143X_3K+2,607143 X_3K+2,607143X_3K$  — вказує на суттєву нелінійність впливу фібри та можливе різке зростання міцності при певних концентраціях.

#### Взаємодія факторів

- $-0,016500(X_1LX_2L)-0,016500 (X_1LX_2L)-0,016500(X_1LX_2L)$  — одночасне збільшення цементу і нанодобавки дещо знижує позитивний ефект кожного з них.
- $-0,032505(X_1LX_3L)-0,032505 (X_1LX_3L)-0,032505(X_1LX_3L)$  — надлишок цементу разом із фіброю може зменшувати приріст міцності.
- $+1,125000(X_2LX_3L)+1,125000 (X_2LX_3L)+1,125000(X_2LX_3L)$  — виражений синергетичний ефект нанодобавки та фібри, що істотно підвищує міцність при її спільному використанні.

#### Узагальнений висновок

Міцність на розтяг при згині найбільше залежить від витрати нанодобавки, а також від спільного впливу нанодобавки та фібри. Витрата цементу позитивно впливає на міцність, проте її роль менш суттєва і проявляється переважно у взаємодії з іншими компонентами.



Рис. 5.9. Карта ефектів Парето для оцінки статистичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії

На графіку 5.9 показано вплив факторів на міцність на розтяг при згині (МПа) у вигляді горизонтальної діаграми стандартизованих ефектів.

Основні елементи графіка:

- По вертикалі наведені фактори та їх взаємодії (витрата цементу, фібри, добавки; лінійні (L), квадратичні (K) ефекти та взаємодії типу 1Lha2L, 2Lha3L).
- По горизонталі — величина впливу фактора (стандартизований ефект).
- Червона вертикальна лінія ( $p = 0,05$ ) — межа статистичної значущості: стовпчики, що її перевищують, є статистично значущими.

Інтерпретація результатів:

- Найбільший і статистично значущий вплив має витрата цементу (лінійний ефект, %L) — найвищий стовпчик ( $\sim 5,01$ ).
- Другий за значущістю фактор — витрата фібри (лінійний ефект, %L) ( $\sim 2,84$ ), також перевищує поріг значущості.
- Інші фактори та взаємодії (витрата добавки, квадратичні ефекти, взаємодії між факторами) мають значно менший вплив і не досягають рівня статистичної значущості (не перетинають лінію  $p=0,05$ ).

Висновок:

Міцність на розтяг при згині найбільше залежить від лінійної витрати цементу, а також помітно — від лінійної витрати фібри. Решта факторів у дослідженому діапазоні мають другорядний або статистично незначущий вплив.



Рис. 5.10. Загальний вид поверхні функції відгук впливу витрати цементу та добавки на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині з витратою фібри 0,2%.



Рис. 5.11. Загальний вид поверхні функції відгук впливу витрати цементу та добавки на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині з витратою фібри 0,3%.

Опис графіка “Поверхня відгуку міцності на розтяг при згині ґрунтоцементу при витраті фібри 0,3 %”

На рисунку представлено поверхню відгуку міцності на розтяг при згині ґрунтоцементу за фіксованої витрати фібри 0,3 %. Графік відображає сумісний вплив витрати цементу, % та витрати нанодобавки, % на зміну показника міцності, МПа.

По осі X відкладено витрату цементу, %, по осі Y — витрату нанодобавки, %, по осі Z — міцність на розтяг при згині, МПа. Колірна шкала відповідає рівню міцності: від мінімальних значень (зелені та сині відтінки,  $< 0,7$  МПа) до максимальних (червоні відтінки,  $> 1,6$  МПа).

Аналіз поверхні відгуку

- За низької витрати цементу (4–6 %) та мінімальної кількості добавки спостерігаються найменші значення міцності (до 0,7–0,9 МПа).  
Зі збільшенням витрати цементу міцність на розтяг при згині монотонно зростає, що свідчить про визначальний вплив цементної складової на формування структури матеріалу.
- Підвищення витрати нанодобавки також позитивно впливає на міцність, особливо в зоні середніх і високих витрат цементу, що проявляється у підйомі поверхні відгуку.
- Максимальні значення міцності (понад 1,6 МПа) досягаються при високій витраті цементу ( $\approx 14$ – $15$  %) та підвищеній витраті добавки ( $\approx 1,2$ – $1,5$  %).

Загальні висновки

- Поверхня відгуку має нелінійний характер, що підтверджує наявність квадратичних ефектів і взаємодії факторів.
- Витрата цементу є домінуючим фактором, тоді як нанодобавка виконує функцію підсилювача ефекту, особливо за достатньої кількості в'язучого.
- Отримані результати свідчать про існування раціональної області параметрів, у якій забезпечується підвищена тріщиностійкість і міцність ґрунтоцементу.



Рис. 5.12. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та добавки на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині з витратою фібри 0,1%.



Рис. 5.13. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та фібри на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині з витратою добавки 1%.



Рис. 5.14. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та фібри на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині з витратою добавки 1,5%.



Рис. 5.15. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати цементу та фібри на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині з витратою добавки 0,5%.



Рис. 5.16. Загальний вид поверхні функції відносно впливу витрати добавки та фібри на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині з витратою цементу 15%.

Графік (діаграма контурів) ілюструє залежність міцності на розтяг при згині (ЗП Міцність на розтяг при згині, МПа) від витрати фібри (%) та витрати добавки (%) при фіксованій витраті цементу 15%.

Залежності на графіку

- Міцність на розтяг при згині. Змінюється від 0,10 МПа до понад 1,7 МПа, що позначено різними кольорами (від темно-зеленого до темно-червоного).
- Витрата фібри (%). Показана по вертикальній осі, діапазон від 0,08% до 0,32%.
- Витрата добавки (%). Показана по горизонтальній осі, діапазон від 0,4% до 1,6%.
- Розподіл міцності:
  - Найнижча міцність (< 1,2 МПа, темно-зелена область) спостерігається в нижньому правому куті, де витрата добавки висока (> 1,4%) і витрата фібри низька (< 0,10%).
  - Найвища міцність (> 1,7 МПа, темно-червона область) досягається у верхній частині графіка, де витрата фібри перевищує приблизно 0,26%, незалежно від витрати добавки в межах 0,4%–1,6%.
  - Оптимальні значення: Області з високою міцністю (помаранчеві та червоні зони) вимагають вищої витрати фібри.

Графік допомагає визначити оптимальні комбінації витрати фібри та добавки для досягнення бажаної міцності при зміні для конкретного складу цементу.



Рис. 5.17. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати добавки та фібри на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при зміні з витратою цементу 10%.



Рис. 5.18. Загальний вид поверхні функції відгуку впливу витрати добавки та фібри на значення міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині з витратою цементу 5%.



Рис. 5.19 Графік середніх значень для міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині від витрат фібри



Рис. 5.20 Графік середніх значень для міцності ґрунтоцементу на розтяг при згині від витрат добавки

### 5.2.3 Дослідження впливу витрат цементу, добавки, фібри на модуль деформації ґрунтоцементу на розтяг при згині

Алгебраїчне рівняння модуля деформації ґрунтоцементу на розтяг при згині

(5.3)

Рівняння з критерієм Фішера придатне для описання ризичної залежності в досліджуваних межах зміни факторів, так як  $1,4 < 19,3$ .

#### Аналіз коефіцієнтів

- **Константа (226.41):** Це базове (початкове) значення модуля деформації, коли всі витрати компонентів ( $X_1, X_2, X_3$ ) дорівнюють нулю.
- **Лінійні ефекти ( $X_1, X_2, X_3$ ):** Всі мають позитивні коефіцієнти (12.5, 2.27, 2.65), що вказує на те, що збільшення витрати будь-якого з компонентів окремо призводить до збільшення модуля деформації. Найбільший лінійний вплив має цемент ( $X_1$ ).
- **Квадратичні ефекти ( $X_1^2, X_2^2, X_3^2$ ):**
  - Цемент та фібра мають позитивні коефіцієнти (5.01 та 0.88), що свідчить про зростаючий (прискорюваний) позитивний ефект зі збільшенням дозування.
  - Нанг-добавка має негативний коефіцієнт (-0.14), що вказує на наявність оптимальної дози, після якої ефективність добавки знижується.
- **Взаємодії ( $X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3$ ):**
  - Взаємодії цементу з нанг-добавкою (0.37) та нанг-добавки з фіброю (0.07) є позитивними (синергетичними).
  - Взаємодія цементу з фіброю (-1.4) є негативною, що свідчить про можливе пригнічення сумарного ефекту при їх одночасному збільшенні порівняно з незалежними впливами.

За рівнянням (3) побудовані графіки на рис. 5.21, 5.22, 5.23.



5.21 Залежність модуля деформації ґрунтоцементу від витрати цементу, добавки, фібри при випробуванні зразків на розтяг при згині (фактори на верхньому рівні)

Аналіз графіку:

Фактор X1-витрата цементу.

Показує найбільшу зміну модуля деформації серед усіх факторів. При низькому рівні (-1) модуль деформації становить близько 25 МПа. При високому рівні (+1) модуль деформації різко зростає до приблизно 47,5 МПа. Залежність є нелінійною (криволінійною), що свідчить про те, що ефективність фактора зростає з його збільшенням (вигнута вгору).

Фактор X2-витрати добавки.

Показує помірний лінійний вплив. При низькому рівні -1 модуль деформації становить близько 43 МПа. При високому рівні +1 модуль деформації зростає до приблизно 47,5 МПа. Крива майже пряма, що свідчить про постійний темп зростання ефекту в усьому діапазоні.

Фактор X3- витрата фібри.

Показує найменшу зміну модуля деформації. При низькому рівні -1 модуль деформації становить близько 45 МПа. При високому рівні +1 модуль деформації досягає приблизно 47,5 МПа. Залежність є майже горизонтальною, що вказує на те, що цей фактор має найменший вплив на модуль деформації в даному діапазоні порівняно з X1 та X2.

Висновок.

Витрата цементу має найсильніший вплив на модуль деформації ґрунтоцементу, причому його ефективність значно зростає на верхньому рівні. Фактори X2 та X3 мають менший вплив у цьому конкретному режимі.



Рис. 5.22. Залежність модуля деформації ґрунтоцементу від витрат цементу, добавки фібри при випробуванні зразків на розтяг при згині (фактори на основному рівні)



Рис. 5.23. Залежність модуля деформації ґрунтоцементу від витрат цементу, добавки, фібри при випробуванні зразків на розтяг при згині (фактори на нижньому рівні)

Аналіз графіка 5.23 свідчить, що **основним чинником формування модуля деформації є витрати цементу**, тоді як **фібра та добавка виконують коригувальну та стабілізуювальну функції**. Оптимізація складу матеріалу з точки зору жорсткості повинна базуватися на **раціональному підборі цементу з одночасним використанням фібри та добавки для забезпечення тріщиностійкості й довговічності**.

## РОЗДІЛ 6

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ.

#### 6.1 Правила охорони праці під час будівництва, ремонту та утримання автомобільних доріг

1. Ці Правила поширюються на всіх суб'єктів господарювання незалежно від форми власності (далі - підприємства), які виконують роботи з будівництва, ремонту та утримання автомобільних доріг загального користування.

2. На кожному підприємстві повинні бути розроблені інструкції з охорони праці відповідно до вимог Положення про розробку інструкцій з охорони праці, затвердженого наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29.01.98 N 9 (з20226-98), зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 07.04.98 за N 226/2666 (НПАОП Б.00-4.15-98).

3. Навчання і перевірка знань з питань охорони праці працівників підприємств проводяться відповідно до вимог Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці, затвердженого наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 26.01.2005 N 15 (з0231-05), зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 15.02.2005 за N 231/10511 (НПАОП Б.00-4.12-05), а з питань пожежної безпеки - відповідно до Переліку посад, при призначенні на які особи зобов'язані проходити навчання і перевірку знань з питань пожежної безпеки, та порядок їх організації, затвердженого наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи від 29.09.2003 N 368 (з1147-03), зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 11.11.2003 за N 1147/8468 (НАДЗ Б.06.001-2003), та Типового положення про інструктажі, спеціальне навчання та перевірку знань з питань пожежної безпеки на підприємствах, в установах та організаціях України, затвердженого наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від

наслідків Чорнобильської катастрофи від 29.09.2003 N 368 ( z1148-03 ) зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 11.12.2003 за N 1148/8459 (НАПБ Б.02.005-2003).

Забороняється допускати до роботи працівників, які не пройшли навчання та перевірку знань з питань охорони праці та пожежної безпеки.

4. Попередній (під час прийняття на роботу) і періодичний (протягом трудової діяльності) медичні огляди працівників повинні проводитися в установлені терміни відповідно до Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій, затвердженого наказом Міністерства охорони здоров'я України від 21.05.2007 N 246 ( z0846-07 ), зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 23.07.2007 за N 846/14113.

5. Неповнолітні працівники (молодші 18 років) допускаються до робіт, не заборонених для них Переліком важких робіт і робіт із шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх, затвердженим наказом Міністерства охорони здоров'я України від 21.03.94 N 46 ( z0176-94 ), зареєстрованим в Міністерстві юстиції України 28.07.94 за N 176/385.

6. Не дозволяється жінкам виконувати роботи, які зазначені в Переліку важких робіт та робіт із шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці жінок, затвердженому наказом Міністерства охорони здоров'я України від 29.12.93 N 256 ( z0351-94 ), зареєстрованому в Міністерстві юстиції України 30.03.94 за N 51/150, а також підіймати та переміщувати вантажі відповідно до Графічних норм підймання і переміщення важких речей жінками, затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 10.12.93 N 241 ( z0194-93 ), зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 22.12.93 за N 194. 7. Працівники повинні забезпечуватися спецодягом, спецвзуттям і іншими засобами індивідуального захисту відповідно до Норм безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту працівникам дорожнього господарства, затверджених наказом

Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду від 24.12.2008 N 292 ( з0073-09 ), зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 24.01.2009 за N 73/15089 (далі - НПАОП 35.21-3.03-08). 8. Розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві здійснюються відповідно до Порядку розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 25.08.2004 N 1112 ( 1112-2004-п ).

### **6.2 Вимоги безпеки до підготовчих робіт**

1. Вимоги безпеки в зоні проведення робіт і у місцях проведення дорожніх робіт порядок установаження огорожувальних засобів повинен відповідати вимогам ДСТУ 4100-2002. "Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування" (далі - ДСТУ 4100-2002).

2. Не дозволяється завозити устаткування, матеріали та складувати їх без попереднього встановлення огорожень, які повинні відповідати вимогам ДСТУ 12.2.351.2009.

3. Під час технологічних перерв і закінчення робочої зміни дорожньо-будівельна техніка повинна залишатися в огороженій зоні.

### **6.3. Вимоги безпеки до улаштування будівельного майданчика та робочих місць**

1. Усі роботи з улаштування будівельного майданчика повинні проводитися відповідно до проектної документації, затвердженої у встановленому порядку.

2. На будівельному майданчику повинні бути обладнані санітарно-побутові та інші приміщення відповідно до вимог ДЕН В.2.2-27:2010 "Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення"

3. Будівельний майданчик, що розташовується в межах населеного пункту, повинен бути огорожений.

4. Проїзди, проходи, кранові колії, вантажно-розвантажувальні майданчики та робочі місця необхідно регулярно очищати від будівельного

сміття, а взимку очищати від снігу та льоду та покривати протиожеледними матеріалами.

5. Будівельний майданчик, ділянки виконання робіт, робочі місця, проїзди та підходи до них у темний час доби повинні бути освітлені відповідно до вимог ДБН В.2.5-28-2006. "Природне та штучне освітлення". Прожектори не повинні засліплювати очі працівників. Висота підвішування світильників загального освітлення, у тому числі прожекторів, повинна бути не нижче 2,5 м.

6. На під'їзних тимчасових дорогах до будівельного майданчика, у місцях розміщення пересувних асфальтобетонних і цементобетонних заводів повинні бути встановлені знаки безпеки дорознього руху відповідно до вимог ДСТУ 4100-2002.

7. Для автомобілів і інших транспортних засобів на будівельному майданчику повинна бути встановлена допустима швидкість руху. У зонах обмеженої швидкості руху, місцях стоянки транспортних засобів і розворотів повинні бути встановлені дорожні знаки відповідно до вимог ДСТУ 4100-2002.

#### **6.4 Вимоги безпеки під час зберігання матеріалів, виробів і конструкцій**

1. Завозити матеріали для їх складування та зберігання дозволяється після влаштування майданчиків, передбачених проектом виконання робіт (далі - ПВР).

2. Зберігатися матеріали, вироби та конструкції на будівельному майданчику повинні в штабелях або на спеціальних стелажах. Для матеріалів і виробів, що вимагають закритого зберігання, повинні встановлюватися навіси та склади. Для матеріалів сипучих: силоси, бункери, ларі тощо.

3. Усі довгомірні матеріали та конструкції повинні зберігатися в штабелях на спеціально обладнаних горизонтальних майданчиках.

4. Матеріали, які виносяться для ремонту дороги, повинні складуватися на майданчиках або на узбіччі. У разі складування матеріалів на узбіччі

дороги місце складування повинно бути огорожене знаками дорожнього руху. Не дозволяється складувати матеріали на укосах насипу та виїмок.

5. Для відводу поверхневих вод на майданчиках для зберігання матеріалів повинен бути ухил 1-2 град. убік границь майданчиків, а якщо вони розташовані на кососорах, то влаштовують нагірну канаву для відводу води. Узимку майданчики перед складуванням матеріалів очищають від снігу та льоду.

6. Під час складування матеріалів, конструкцій і виробів вживають заходів проти самовільного їх переміщення (осилення, розкочування, розв'язування та перевертання). Не дозволяється тривалювати (опирати) матеріали та вироби на паркані та інші конструкції.

7. Штабелі з піску, гравію, щебеню та інших сыпких матеріалів повинні мати укоси, що відповідають куту природного укосу для даного матеріалу, або огорожуватися підпірними стінками.

8. Між суміжними штабелями (стелажами) на складах потрібно влаштувати проїзди для руху транспортних засобів і вантажопідіймальних механізмів, а також проходи для працівників шириною не менше 1 м.

9. Відстань від місць складування матеріалів і устаткування до бровок котлованів, траншей повинна визначатися розрахунком стійкості їх укосів. У всіх випадках ця відстань не може бути менше ніж 1 м.

10. Балони із стиснутими газами та ємності з фарбами, олифами, маслами та легкозаймистими рідинами, а також гара з-під них повинні зберігатися роздільно відповідно до вимог Правил пожежної безпеки в Україні, затверджених наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій від 19.10.2004 N 126 ( з1410-04 ), зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 24.11.2004 за N 1410/10039 (далі - НАПБ А.01.001-2004).

11. Балони із зрідженим газом повинні зберігатися у вертикальному положенні в спеціальних приміщеннях або у металевих шафах із природною вентиляцією. Не дозволяється зберігати в одному приміщенні кисневі балони та балони із зрідженим газом.

12. Вентилі газових балонів повинні бути закриті запобіжними ковпаками. Не дозволяється приймати, зберігати та видавати балони без ковпаків.

13. Отруйні речовини повинні зберігатися в окремих приміщеннях (сховищах), які добре вентилюються. На сховищах повинні бути попереджувальні знаки.

14. Якщо в одному приміщенні зберігаються різні отруйні речовини, бирки на них повинні бути пофарбовані в кольори відповідно до вимог ДСТУ 4500-3:2003.

15. Легкозаймісті рідини (гас, бензин тощо), а також змащувальні матеріали повинні зберігатися з дотриманням правил пожежної безпеки в приміщеннях із неспалюваними конструкціями або заглибленими в землю. Відстань від складів із такими матеріалами до споруд, що знаходяться поблизу, повинна бути не менше ніж 50 м. Не дозволяється зберігати та переносити летючі або легкозаймісті рідини у відкритій тарі.

16. Ємності для зберігання горючих рідин (резервуари, цистерни тощо) повинні закриватися герметичними кришками та запечатуватися на замок. Наповнювати ємності та роздавати горючі матеріали потрібно тільки за допомогою трубопроводів і насосів. Не дозволяється роздавати їх відрами, черпаками, сифонами та за допомогою шлангів, відсмоктуючи рідини. Наливати легкозаймісті рідини потрібно тільки в тару, що герметично закривається.

## РОЗДІЛ 7

### Висновки та рекомендації за результатами досліджень

1. У роботі виконано комплексне дослідження впливу нанодобавки **Nanoalps®System Soll** на фізико-механічні та експлуатаційні властивості ґрунтоцементного дорожнього покриття. Встановлено, що введення нанодобавки суттєво змінює процес структуроутворення ґрунтоцементної композиції.
2. Експериментально підтверджено, що застосування Nanoalps®System Soll сприяє ущільненню мікроструктури ґрунтоцементу, зменшенню кількості капілярних пор і формуванню більш однорідної цементно-ґрунтової матриці.

Цемент є ключовим фактором, що визначає міцність при стиску. Поверхня різко зростає саме у напрямку збільшення його витрати.

Добавка має другорядний вплив, її зміна незначно змінює величину міцності, особливо у центральній області плану.

Область максимальних значень міцності ( $> 9$  МПа) спостерігається при:

- витраті цементу 14–16 %,
- добавці 0,6–1,0 %,
- фіксованій витраті фібри 0,3 %.

3. Встановлено позитивний вплив нанодобавки на **міцність при стиску та розтязі при згині** ґрунтоцементних зразків у порівнянні з контрольними складами без добавки, що свідчить про підвищення несучої здатності дорожнього покриття.

Міцність на розтяг при згині. Змінюється від 0,13 МПа до понад 1,7 МПа.

Найвища міцність  $> 1,7$  МПа досягається де витрата фібри перевищує приблизно 0,26%, незалежно від витрати добавки в межах 0,5%–1,5%.

4. На основі методів математичного планування експерименту встановлено оптимальні межі дозування нанодобавки, за яких досягається найбільш ефективне поєднання міцності та довговічності ґрунтоцементного покриття без перевитрати в'язучих матеріалів.

Витрата цементу має найсильніший вплив на модуль деформації ґрунтоцементу і досягла значення 47,5 МПа, при цьому його ефективність значно

зростає на верхньому рівні. Добавка і витрата фібри мають менший вплив на модуль деформації.

5. Отримані результати підтверджують доцільність використання нанодобавки Nanoalps®System Soll як ефективного модифікатора ґрунтоцементних матеріалів для дорожнього будівництва, особливо при влаштуванні основ та покриттів автомобільних доріг місцевого значення.

### **Рекомендації**

1. Рекомендується застосовувати нанодобавку **Nanoalps®System Soll** у технології влаштування ґрунтоцементних дорожніх покриттів з метою підвищення їх міцності, водостійкості та довговічності, зокрема в регіонах з несприятливими кліматичними умовами.
2. Оптимальне дозування нанодобавки доцільно призначати з урахуванням гранулометричного складу ґрунту, вмісту цементу та умов експлуатації дорожнього одягу, спираючись на результати лабораторних випробувань.
3. Доцільно впроваджувати результати дослідження у практику дорожнього будівництва при реконструкції та капітальному ремонті автомобільних доріг, а також при будівництві тимчасових і технологічних доріг.
4. Рекомендується продовжити наукові дослідження в напрямі вивчення довгостривалої тріщиностійкості, зносостійкості та поведінки ґрунтоцементу з нанодобавкою в умовах реальної експлуатації.

### Список використаних джерел

1. Зоценко М. Л., Наливайко О. Г., Ларцева І. І., Панько С. М. Дослідження водонепроникності ґрунтоцементу // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2010. Вип. 32. С. 43–48.
2. Ларцева І. І., Петручак М. В. До визначення фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава : ПолтНТУ, 2010. Вип. 2 (27). С. 127–134.
3. Петручак О. В. Забезпечення ефективної роботи підземних конструкцій, які виконані з ґрунтоцементу // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава : ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34). С. 178–183.
4. Мислицька А. О., Сазиський М. В., Шехоріна С. Є. Ґрунтобетонні перекриття малоповерхових будівель: огляд сучасних технологій і розробка нового конструктивного рішення // *Науковий вісник будівництва*. 2020. Т. 100, № 2. С. 126–132. URL: [http://nov.gov.ua/UJRN/Nv1\\_2020\\_100\\_2\\_22](http://nov.gov.ua/UJRN/Nv1_2020_100_2_22) (дата звернення: 2025-03-19).
5. Маєська І. В., Очеретний В. П., Гончарук М. С. Різноманітність впливу дозавок розробки-виносу на властивості ґрунтоцементу // *Інноваційні технології в будівництві : матеріали міжнар. наук.-техн. конф.* Вінниця : ВНТУ, 2018. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/view/6020> (дата звернення: 2025-03-19).
6. Ковальський В. П., Сідлак О. С. Використання золи виносу ГЕС у будівельних матеріалах // *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2014. № 1. С. 35–40.
7. ДСТУ Б В.2.1-2-96 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація. Чинний від 1996-11-01. Київ : Держсгосживстандарт України, 1996. 51 с.

8. Зміцнення і стабілізація ґрунтів. URL:  
<https://jak.koshachek.com/articles/zmicnennja-i-stabilizacija-gruntiv-stabilizacija.html> (дата звернення: 2025-03-19).
9. Борзяк О. С. Регулювання контактних взаємодій для підвищення стійкості в умовах експлуатації матеріалів на основі мінеральних в'язучих : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05. Харків, 2021. 413 с.
10. Даніленко Е. І. *Залізнична колія : підручник* : у 2 т. Київ : Інпрес, 2010.
11. ДБН В.1.1-43:2017 Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017.
12. ДБН В.2.1-10:2018 Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018.
13. ДБН В.2.1-10:2009 Зміни № 2. Фундаменти заглибокі і глибокого закладання. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010.
14. Доценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко З. М. *Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом*. Харків : Друкарня «Мадрид», 2016.
15. Крисан Б. С., Крисан В. В. Армування насипу підходів земляного полотна до шляхопроводу ґрунтоцементними паллями // *Армування основ при будівництві та реконструкції будівель*. 2007. Вип. 66. С. 204–211.
16. Петренко В. Д., Крисан В. І., Крисан В. В., Чегелєв І. С. Досвід спорудження пальово-плитного фундаменту в складних інженерно-геологічних умовах // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2021. Вип. 19. С. 78–84.
17. Петренко В. Д., Гютькін О. Л., Крисан В. І., Крисан В. В. Відновлення міцнісних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. Вип. 16. С. 65–74.
18. Петренко В. Д., Крисан В. І., Крисан В. В., Коновал В. М. Науково-технічне обґрунтування підсилення ґрунтових основ армованими ґрунтоцементними

- палями // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2022. Вип. 21. С. 70–79.
19. Бесараб О. М., Гуріна Л. І., Смолянець В. В. Оцінка впливу добавки в ґрунт RVI-81 на підвищення довговічності дорожнього одягу // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2008. Вип. 75. С. 73–81.
20. Бесараб О. М., Гуріна Л. І., Опрошенко Г. О. Дослідження добавки infra Crete для підвищення фізико-механічних властивостей ґрунту // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2008. Вип. 75. С. 250–266.
21. Веденісов А. В. Захисні роз'єднувальні екрани з ґрунтоцементу в умовах стислої міської забудови // *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. праць. Рівне, 2012. Вип. 24.
22. Бонченко М. Л., Наливайко О. І., Ларцева І. І., Гайко О. М. Дослідження водонепроникності ґрунтоцементу // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2010. Вип. 32. С. 43–48.
23. Ларцева І. І., Петруняк М. В. До визначення фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава : ПолтНТУ, 2010. Вип. 2 (27). С. 127–134.
24. ДСТУ Б В.2.7-309:2016 ґРУНТИ, УКРІПЛЕНІ ЗВ'ЯЗУЧИМ. Методи випробувань.
25. Петраш О. В. Забезпечення ефективної роботи підземних конструкцій, які виготовлені з ґрунтоцементу // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава : ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34). С. 178–183.
26. Мислиця А. О., Савицький М. Р., Шехоркіна С. Є. ґрунтобетонні перекриття малоповерхових будівель: огляд сучасних технологій і розробка нового конструктивного рішення // *Науковий вісник будівництва*. 2020. Т. 100, № 2. С. 126–132. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb\\_2020\\_100\\_2\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2020_100_2_22) (дата звернення: 2025-03-19).

27. Маєвська І. В., Очеретний В. П., Гончарук М. С. Визначення впливу добавок золи-виносу на властивості ґрунтоцементу // *Інноваційні технології в будівництві* : матеріали міжнар. наук. техн. конф. Вінниця : ВНТУ, 2018. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/view/6020> (дата звернення: 2025-03-19).
28. Ковальський В. П., Сідлак О. С. Вигорістання золи виносу ТЕС у будівельних матеріалах // *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2014. № 1. С. 35–40.
29. ДСТУ Б В.2.1-2-96 Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Класифікація. Чинний від 1996-11-01. Київ : Держсхоживстандарт України, 1996. 51 с.
30. Зміцнення і стабілізація ґрунтів. URL: <https://jak.koshachev.com/articles/zmicnennia-i-stabilizacija-gruntiv-stabilizacija.html> (дата звернення: 2025-03-19).
31. ДБН В.1.1-45:2017 Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017.
32. Крисан В. І., Крисан В. В. Армування насипу підходів земляного полотна до шляхопроводу ґрунтоцементними палями // *Армування основ при будівництві та реконструкції будівель*. 2007. Вип. 56. С. 204–211.
33. Петренко В. Д., Тютюкін О. Л., Крисан В. І., Крисан В. В. Відновлення міцнісних та деформативних характеристик земляного полотна та його основи армуванням ґрунтоцементними елементами // *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. Вип. 16. С. 65–74.
34. Бесараб О. М., Гуріна Л. І., Смолянєць В. В. Оцінка впливу добавки в ґрунт RBI-81 на підвищення довговічності дорожнього одягу // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2008. Вип. 75. С. 73–81.
35. Бесараб О. М., Гуріна Л. І., Спрощенко І. О. Дослідження добавки Infra Crete для підвищення фізико-механічних властивостей ґрунту // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. Київ, 2008. Вип. 75. С. 260–266.