

УДК 625.731.2

СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ І СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОСАДКОВИХ ЛЕСОВИХ ҐРУНТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ В'ЯЖУЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Кандидати техн. наук О. Ю. Дорошенко, В. М. Молчанов,
магістрант М. А. Любарський

MODERN METHODS OF INVESTIGATION AND STABILIZATION OF SETTLING CLAY SOILS USING BINDING MATERIALS

PhD (Tech.) A. Doroshenko, PhD (Tech.) V. Molchanov,
Master's student M. Lyubarsky

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.215.2026.358946>



Анотація. У статті розглянуто проблему деформаційної нестабільності слабких і просадкових ґрунтів, зокрема лесових відкладів, що поширені на території України і становлять суттєвий ризик для транспортного і цивільного будівництва. Проаналізовано інженерно-геологічні особливості ґрунтів зі зниженою міцністю, механізми виникнення просадних деформацій унаслідок зволоження і їхній вплив на надійність основ і фундаментів споруд. Наведено основні показники оцінювання просадності ґрунтів, зокрема відносну просадність, критичний просадний тиск і граничну вологість. Розглянуто і систематизовано сучасні методи покращення властивостей ґрунтових основ, включаючи конструктивні,

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

© Дорошенко О. Ю., Молчанов В. М., Любарський М. А., 2026.

фізико-механічні та фізико-хімічні підходи. Особливу увагу приділено ін'єкційним технологіям закріплення, таким як струменеве цементування, бурозмішувальні ґрунтоцементні методи, хімічна та електрохімічна стабілізація, а також інноваційні біо- і термічні методи. Обґрунтовано доцільність комплексного підходу щодо стабілізації просадкових ґрунтів з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей, умов зволоження та проєктних вимог щодо довговічності і несучої здатності основ.

Ключові слова: лесові ґрунти, просадні ґрунти, деформаційна нестабільність, основи і фундаменти, ін'єкційне закріплення, струменеве цементування, ґрунтоцемент, стабілізація ґрунтів, дорожнє будівництво, геотехнічні методи.

Abstract. Over the past decade, road and civil construction activities in Ukraine have intensified significantly, with a considerable number of projects being implemented in areas characterized by unfavorable engineering and geological conditions. Construction is increasingly carried out on weak and collapsible soils, including loess deposits, organic-mineral soils, and technogenically altered formations that exhibit reduced strength and instability under changes in moisture regime, salt composition, and seasonal effects. Loess soils, which occupy a dominant position among Quaternary deposits in Ukraine, are distinguished by high porosity and a pronounced loss of structural strength when wetted, leading to sudden collapsible deformations and uneven settlement of foundations.

The paper analyzes the engineering characteristics of collapsible loess soils, the mechanisms of deformation development under loading and wetting, and the main indicators used to assess collapsibility, including relative collapsibility, critical collapsible pressure, and threshold moisture content. A systematic review of modern methods for improving the properties of weak soil foundations is presented, covering structural, physical-mechanical, and physico-chemical approaches.

Special attention is paid to injection-based soil stabilization technologies, such as jet grouting, deep soil mixing, chemical grouting, electrochemical stabilization, and innovative bio-cementation methods. These techniques allow the formation of artificial structural bonds between soil particles, leading to increased bearing capacity, reduced compressibility, and improved water resistance without large-scale soil excavation. The analysis demonstrates that injection stabilization methods are among the most effective and versatile solutions for mitigating collapsibility and ensuring the long-term reliability and durability of foundations in road and civil engineering projects.

Keywords: loess soils, collapsible soils, soil stabilization, injection grouting, jet grouting, deep soil mixing, soil-cement, foundation engineering, road construction, geotechnical methods.

Вступ. Протягом останнього десятиліття в Україні спостерігають активізацію транспортно-будівельних робіт, причому більшість із них реалізують на територіях із несприятливими геологічними характеристиками. Дедалі частіше будівельні проєкти охоплюють зони, складені ґрунтами зі зниженою міцністю і нестабільною поведінкою – органічно-мінеральними, техногенно зміненими або чутливими до зовнішніх факторів (перезволоження, зміни сольового складу, сезонні деформації тощо).

Окремі типи таких ґрунтів, наприклад торф'янисті відклади і мулуваті породи, уже

в природному стані демонструють обмежену здатність витримувати навантаження та значну схильність до ущільнення. Інші різновиди можуть різко втрачати міцність унаслідок певних впливів, як-от зволоження, вилуговування солей або зміна хімічної рівноваги в масиві. Ігнорування або неповне врахування цих процесів здатне спричинити помітні деформації основи, нерівномірні просідання земляного полотна залізниць або автодоріг, а інколи – критичне порушення стійкості ґрунтової споруди.

Нинішній рівень розвитку інженерної науки і технологічного забезпечення дає

зможу застосовувати різні підходи для посилення або стабілізації основ у складних умовах. У багатьох випадках саме такі методи стають безальтернативними, оскільки лише вони здатні забезпечити необхідну експлуатаційну надійність і довговічність споруди.

На території України лесові ґрунтові відклади охоплюють значні площі, у межах яких розташовані зони активного житлового, громадського та промислового будівництва. Потужність лесових товщ є вкрай мінливою: їхній початок може знаходитися майже біля поверхні, а загальна глибина поширення сягати десятків або навіть кількох сотень метрів.

Щодо масштабного розповсюдження таких порід, то питання зниження або усунення їхньої деформаційної нестабільності в основах інженерних об'єктів набуває високої практичної значущості. Основним фактором ризику є різка зміна структурної міцності лесу в разі контакту з водою: зволоження провокує просідання масиву та суттєве падіння опору навантаженням, що часто стає причиною порушення цілісності або аварійного стану споруд через втрату несучої спроможності основи.

Поняття «лес» увійшло до наукового обігу завдяки досліднику К. Леонарду на початку XIX століття, після чого розпочався тривалий етап наукових обговорень, присвячених механізмам його формування, характеру внутрішньої будови та особливостям поведінки за дії зовнішніх впливів. На ранніх стадіях вивчення до лесових порід зараховували широкий спектр світлих пилюватих утворень із крупними порами у структурі. Сучасна ж інженерна класифікація визначає лес як однорідну, нестратифіковану, переважно суху високопористу породу з домінуванням пилової фракції (понад половину частинок розміром приблизно 0,005–0,05 мм), пористістю, що зазвичай перевищує 42 %, і характерною здатністю до структурного ущільнення із замочуванням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Лесові масиви виявлені майже на всіх

материках, проте найбільші їхні ареали зосереджені в межах Євразії та Північної Америки. В Європі їхня межа поширення доходить приблизно до 60° північної широти, в Азії простягається значно вище, тоді як південний рубіж наближається до 28°. В Україні лесові покривні товщі є домінуючим типом четвертинних відкладів і займають близько 80 % площі країни, що робить проблему їхньої інженерної надійності однією з основних для будівельної і транспортної інфраструктури.

Значна частина просадних ґрунтів, зокрема супіски, піщані та лесоподібні породи, є чутливими до зовнішніх і внутрішніх змін у масиві. Коли рівень діючих напружень перевищує межу структурної міцності, або відбувається руйнування природної будови чи трансформація вологісного режиму, інженерні властивості таких ґрунтів можуть стрімко втрачати стабільність. Це проявляється в суттєвому зниженні їхніх міцнісних і деформаційних параметрів [1, 4, 5].

Оцінювання просадної поведінки ґрунтової основи базовано на кількох важливих характеристиках. Однією з них є *відносна просадність* – показник, що відображає рівень додаткового ущільнення ґрунту під визначеним навантаженням після його контакту з водою. Інший важливий параметр – *критичний просадний тиск*, який визначає найменше значення навантаження, за якого ґрунт починає проявляти просадні деформації в умовах повного водонасичення. Також виділяють *граничну просадну вологість* – мінімальний вміст води в ґрунті, що запускає механізм структурного просідання.

Для лесових ґрунтів визначальним індикатором, який найточніше описує їхню схильність до просадних деформацій, є саме величина відносної просадності, оскільки вона комплексно відображає реакцію ґрунтової структури на навантаження в умовах зволоження. Рис. 1 і 2 побудовані за даними робіт [3, 12].

Деформації лесових ґрунтів під час замочування проявляються у процесі ущільнення ґрунтового масиву та зумовлені такими факторами:

- зростанням зовнішнього навантаження, що призводить до розвитку звичайної осадки;
- підвищенням вологості внаслідок замочування, що спричиняє просадку;

- тривалим зволоженням, що викликає післяпросадкові деформації, інтенсивність яких залежить від наявності в ґрунті повільно розчинних солей.

Розраховують основи на лесових просадкових ґрунтах за деформаційним підходом, у межах якого повну величину переміщень визначають як суму осадки від дії зовнішніх навантажень і просадки, що виникає під час замочування.

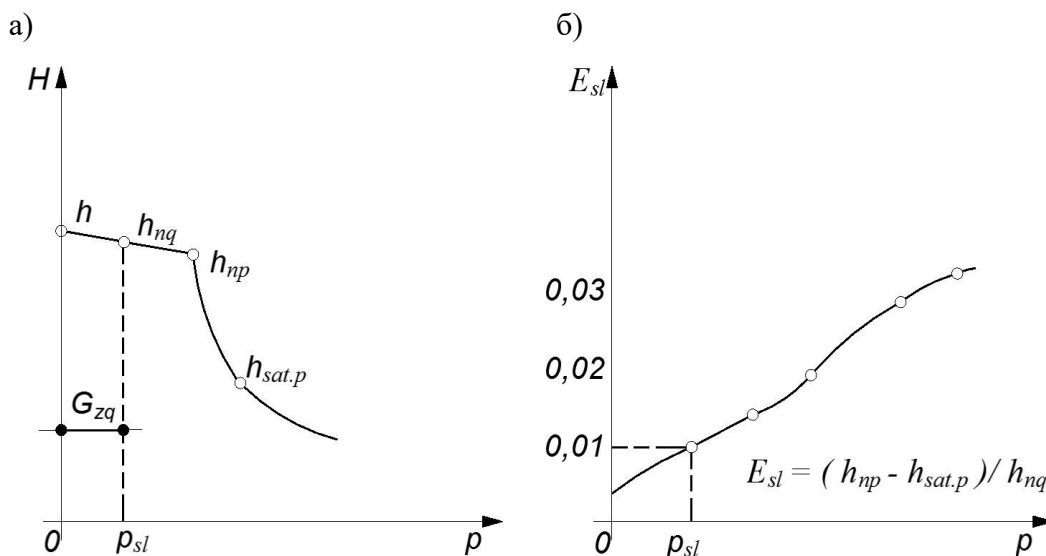


Рис. 1. Криві, що відображають поведінку лесового ґрунтового масиву під час зволоження: а – залежність зміни об’ємного стану ґрунту під навантаженням (компресійна діаграма); б – динаміка трансформації показника відносної просадності

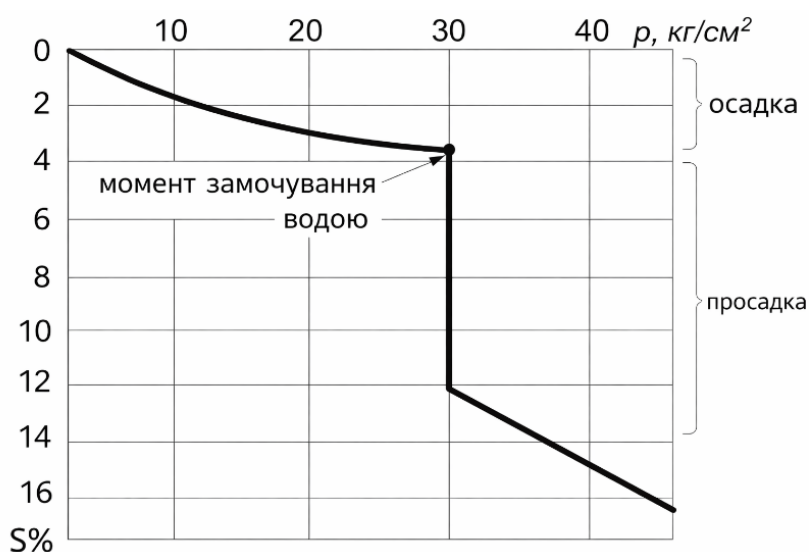


Рис. 2. Зміна просадних властивостей лесового суглинку

Визначення мети та завдання дослідження. *Метою дослідження* є аналіз і систематизація сучасних методів дослідження та покращення фізико-механічних властивостей слабких і просадкових ґрунтів, зокрема лесових відкладів, через застосування різних видів в'язучих матеріалів та ін'єкційних технологій закріплення, із метою підвищення надійності, несучої здатності та довговічності основ і фундаментів інженерних споруд у транспортному і цивільному будівництві.

Для досягнення поставленої мети в роботі передбачено вирішення таких завдань:

- проаналізувати інженерно-геологічні особливості слабких і просадкових ґрунтів і механізми розвитку деформацій із їх зволоженням;
- узагальнити основні показники оцінювання просадних властивостей ґрунтів, зокрема відносну просадність, критичний просадний тиск і граничну вологість;
- систематизувати сучасні методи покращення властивостей ґрунтових основ (конструктивні, фізико-механічні та фізико-хімічні) щодо їхньої ефективності та сфери застосування;
- проаналізувати вплив різних типів в'язучих матеріалів на зміну фізико-механічних характеристик ґрунтів для ін'єкційного та бурозмішувального закріплення;
- оцінити переваги, обмеження і технологічні особливості ін'єкційних методів стабілізації ґрунтів у лесових просадкових відкладах;
- обґрунтувати доцільність комплексного підходу щодо стабілізації ґрунтових основ з урахуванням їхніх властивостей, умов зволоження та проектних вимог щодо експлуатаційної надійності споруд.

Основна частина дослідження.

Головною умовою безпечного будівництва на просадкових ґрунтах є забезпечення надійності основ і фундаментів інженерних

споруд за допомогою цілеспрямованої модифікації будівельних властивостей слабких ґрунтів. Сучасні методи покращення характеристик лесових просадкових ґрунтів доцільно систематизувати у три базові групи (рис. 3):

1. *Конструктивні методи* — передбачають формування сприятливих умов взаємодії ґрунтів із фундаментами через керування напружено-деформованим станом і регулювання умов їх деформування.

2. *Фізико-механічні методи (уцільнення)* — реалізують різними технологічними способами, спрямовані на зменшення пористості, забезпечення щільнішої упаковки мінеральних агрегатів і підвищення несучої здатності ґрунтового масиву.

3. *Фізико-хімічні методи (закріплення)* — ґрунтовані на створенні штучних структурних зв'язків між мінеральними частинками, що забезпечує формування нової, міцнішої та менш деформівної ґрунтової структури.

Конструктивні заходи приймають за розрахунком конструкцій на нерівномірні просідання в основах, вони спрямовані на пристосування будівель і споруд до можливих нерівномірних осідань ґрунтів.

Водозахисні заходи проводять для зменшення максимальних осідань до мінімально можливих величин через зниження можливості замочування ґрунтів і промокання всієї їхньої товщі.

Вибираючи раціональний комплекс заходів для боротьби з просіданням лесових ґрунтів, необхідно враховувати такі фактори: умови залягання ґрунтів, фізико-механічні властивості ґрунтів, імовірність замочування основ фундаментів, конструктивні особливості будівель і споруд, місцеві умови будівництва тощо.

Для будівництва споруд на лесових просадкових ґрунтах з метою забезпечення їхньої міцності та стійкості виконують такі заходи:

- водозахисні, тобто захист ґрунтів основи від різкого підвищення їхньої вологості або замочування;

- конструктивні, тобто конструктивне посилення просторової жорсткості будівель і споруд, наприклад повне або часткове прорізання ґрунтів палями або опорами;

- заходи з усунення осідальних властивостей лесових ґрунтів через ущільнення або закріплення їх ін'єкційними сумішами.

Струмене цементування (jet-grouting) детально описали українські дослідники Ворфоломеєв та Алексій [1]. Вони запропонували розглядати метод як ресурсоефективний, що дає змогу формувати ґрунтоцементні колони руйнуванням структури ґрунту високошвидкісним струменем цементного розчину. Автори акцентують, що технологія забезпечує локальне зміцнення без виймання ґрунту, а також дає змогу регулювати діаметр і міцність колон залежно від інженерних умов.

Ґрунтобетонні технології для підземних споруд запропонували Гайко, Ган і Матвійчук [2, 7, 28, 29]. Вони розглядають ґрунтобетон як конструктивний елемент, що поєднує властивості ґрунту і бетону і може виконувати несучу й огорожувальну функції. Їхня пропозиція полягає у використанні бурозмішувальної технології для формування монолітних підземних оболонок, які підвищують сейсмічну та деформаційну стійкість основи.

Базові знання про властивості ґрунтів, необхідні для розуміння механізмів закріплення, дає навчальний посібник Гнатенка та співавторів [3]. Автори систематизували фізичні, геологічні та механічні властивості ґрунтів, підкреслюючи, що вибір методу стабілізації має бути базований на структурі, пористості, вологості та несучій здатності масиву.

Ін'єкційні технології, зокрема силікатизацію, смолизацію та цементацию під тиском, дослідив Біляєв [4]. Він запропонував комбінований підхід щодо підбору компонентів розчину для ін'єкції, який може підвищувати щільність і зменшувати водопроникність ґрунту, що є

важливим для фундаментів на слабких ґрунтових основах.

Американські інженери Bushman, Freeman і Норре [5] у своїх працях рекомендували механізовану стабілізацію для неасфальтованих автодоріг, що часто є тимчасовими будівельними майданчиками. Їхні пропозиції включають застосування вапна та цементу для поверхневої стабілізації, а також контроль дренажу для запобігання розмиву основи.

Головко [6] дослідив теоретичні основи ін'єкційного закріплення розчинами під високим тиском. Він запропонував модель проникнення розчинів у пори ґрунту і довів, що для лесів найефективнішими є багатокомпонентні суспензії, які утворюють кристалізаційні та гелеві зв'язки між частинками, що суттєво зменшує деформації.

Громова [7] розглянула модифікацію ґрунтоцементу, запропонувавши додавання полімерів і суперпластифікаторів для підвищення однорідності, тріщиностійкості та міцності основи. Вона обґрунтувала, що модифікований ґрунтоцемент забезпечує кращі характеристики, ніж традиційні цементні суспензії, особливо в зоні змінної вологості.

Методи стабілізації ґрунтів, узагальнені в українських джерелах, наведені у роботі [8]. Запропоновано порівняльний аналіз методів, включаючи європейські норми EN і американські ASTM для цементации та стабілізації, які застосовують як базу для адаптації технологій в Україні.

Зоценко та Алпатов [9] запропонували електрохімічне закріплення, що базоване на введенні стабілізуювальних іонів у ґрунт за дії електричного поля. Автори довели, що цей метод може підвищувати несучу здатність ґрунтів, особливо в умовах реконструкції, де доступ до масиву обмежений.

Іванов і Терещенко [10] розглянули хімічні методи ін'єкцій, наголошуючи на доцільності використання рідкого скла, полімерних і смоляних розчинів для заповнення пор і створення додаткових

зв'язків. Їхня пропозиція спрямована на зменшення просідань і покращення роботи основи під навантаженням.

У нормативному посібнику НДІОСП [11] запропоновано практичні рекомендації для ін'єкційного закріплення ґрунтів у промисловому і цивільному будівництві, зокрема для фундаментів і схилів, зосереджуючись на контролі технологічних параметрів тиску, часу ін'єкції та складу суспензій.

Мітчелл і Сога [12] описали фундаментальні закономірності поведінки ґрунтів для стабілізації, включно з цементацією, армуванням і зміною структури порового простору. Вони запропонували теоретичну базу для прогнозування результатів закріплення.

Біологічні та інноваційні методи, зокрема мікробіологічну цементацію, наведені в роботах [13, 14]. Українські аналітичні огляди, створені на основі праць DeJong і Whiffin, описують використання бактерій для формування кальцитових зв'язків між частинками ґрунту. Метод подано як екологічний і перспективний для піщаних ґрунтів і зон, де обмежене застосування традиційної цементації.

Аналіз наукових праць свідчить, що проблему закріплення ґрунтів у будівництві автори розглядають комплексно – від фундаментальної теорії до прикладних інженерних рішень. Дослідники зазначають, що струменеве цементування та бурозмішувальні ґрунтоцементні технології є одними з найбільш універсальних і керованих методів, здатних забезпечити прогнозоване зміцнення масиву без потреби вилучення ґрунту [1, 2, 7].

Для просадкових лесових відкладів доведено високу ефективність ін'єкційних суспензій на основі цементу, силікатів і полімерів, які не лише ущільнюють ґрунт, але й формують нові структурні зв'язки між його частинками, зменшуючи деформаційні прояви [4, 6, 10].

У транспортному будівництві, умовах реконструкції та обмеженого доступу до

основи окремо виділяють електрохімічне закріплення, яке допомагає впливати на ґрунт локально, підвищуючи його несучу здатність без масштабних земляних робіт [9].

Перспективним і екологічно орієнтованим напрямом визначено мікробіологічну цементацію, що базована на природному процесі утворення кальцитових зв'язків за участю ґрунтових бактерій, особливо ефективному в піщаних і водонасичених ґрунтах [13].

Важливу роль для вибору технології відіграють вихідні фізико-механічні властивості ґрунту, механізми взаємодії частинок, характер порового простору та водний режим, що детально обґрунтовано у фундаментальних і навчальних джерелах [3, 13].

Окрім наукових концепцій, нормативно-технічні видання містять чіткі практичні регламенти щодо тиску, часу ін'єкції та складу робочих розчинів, що формує основу для якісного виконання геотехнічних робіт у цивільному та промисловому будівництві [11].

Як показує досвід українських і зарубіжних учених, найбільш ефективним методом запобігання нерівномірним осіданням і подальшим деформаціям будівель і споруд є ін'єкційне закріплення ґрунтів основи фундаментів, що гарантує підвищення несучої здатності ґрунтів, водостійкості, довговічності і міцності.

Як ін'єкційне закріплення ґрунтів розуміють такі методи їх зміцнення, за яких між частинками ґрунту штучним шляхом (нагнітанням ін'єкційних розчинів) створено додаткові зв'язки, у результаті чого зростає міцність ґрунту і зменшується його стисливість.

На відміну від методів ущільнення, ін'єкційне закріплення ґрунтів не має істотного впливу на їхню структуру. З ін'єкційним закріпленням введені склади утворюють у масиві ґрунту міцні структурні зв'язки. У результаті цього забезпечено збільшення міцності ґрунтів, зниження

їхньої стисливості, зменшення водопроникності і чутливості до зміни зовнішнього середовища, особливо вологості [7, 9, 12].

Існують різні методи закріплення просадкових ґрунтів залежно від технології закріплення, хімічних процесів, що відбуваються в ґрунті з нагнітанням розчинів, і характеру зміни властивостей ґрунтів.

Хімічні способи закріплення ґрунтів (однорозчинна, дворозчинна і газова силікатизація, смолизація і амонізація) полягають у перетворенні властивостей ґрунтів хімічними розчинами в їхньому природному заляганні. Хімічні способи закріплення ґрунту базовані на взаємодії між хімічними реагентами, введеними в ґрунт, або реакції між хімічним розчином і активною частиною ґрунту, утворюючи при цьому ґрунтобетонний масив із підвищеною міцністю, довговічністю і водонепроникністю.

Однорозчинну силікатизацію застосовують для закріплення дрібнозернистих, пилюватих пісків і легких супісків із $k_f = 0,5 \dots 5$ м/доба, де достатньо невеликої міцності ґрунтобетону – до 0,5 МПа, або влаштування водонепроникної зависи в пісках. Існує кілька рецептур однорозчинного способу силікатизації: силікатно-кремнієвофтористо-воднева, силікатно-фосфорнокисла, силікатно-алюмосірчаноокисла, амонітно-силікатна і силікатно-органічна [15].

Смолизацію застосовують для закріплення дрібнозернистих, пилюватих пісків і легких супісків із $k_f = 0,5 \dots 5$ м/доба з проектною міцністю ґрунту до 5 МПа. Зі смолизацією в ґрунт вводять високомолекулярні органічні сполуки (карбомідні, фенолформальдегідні та інші синтетичні смоли) разом із затверджувачами (кислотами, кислими солями тощо), де через деякий час починається процес полімеризації смоли [16–18].

Електрохімічні способи закріплення спрямовані на зміцнення суглинних,

мулистих і глинистих ґрунтів із k_f менше 0,2 м/доба. Однак слід зазначити, що міцність, якої досягають за таких способів закріплення, має невисокі показники – до 0,6 МПа [9, 19–23].

Електрохімічні способи закріплення включають три напрями:

- електроосмотичне зневоднення (осушення) – покращує властивості ґрунту на період розробки котловану. Такий спосіб дає змогу розкрити котловани у водонасичених ґрунтах через одночасне застосування постійного електричного струму та голкофільтрового водозниження. Із проходженням постійного електричного струму в ґрунті починаються фізико-хімічні процеси, які сприяють електроосмосу (руху води в порах ґрунту);

- електрохімічне закріплення. За тривалого впливу на ґрунт постійного електричного струму починаються фізико-хімічні процеси, які сприяють помітному ущільненню ґрунту біля анода і розрідженню його біля катода, який потім теж починає ущільнюватися;

- електросилікатизація. Цей спосіб складається з двох методів закріплення – силікатизації та електричної обробки. Здійснюють за допомогою ін'єкторів, через які під тиском нагнітають силікатні розчини, а потім пропускають постійний електричний струм. Одночасний вплив силікатного розчину і електричного струму на ґрунт прискорює проходження розчину, сприяє зневодненню і агрегації ґрунту, а також утворенню в ґрунті гелю кремнієвої кислоти.

Термічний спосіб характерний для закріплення лесових просадкових ґрунтів із будь-яким k_f і забезпечує міцність закріплення до 0,2 МПа. Цей спосіб заснований на нагнітанні через заздалегідь пробурені свердловини нагрітого в печах повітря або розпечених продуктів згорання. Під дією високих температур (від 350 до 8000 °С) окремі мінерали, що складають скелет ґрунту, оплавляються, утворюючи міцні зв'язки між частинками ґрунту,

надаючи йому нових фізико-хімічних властивостей: ґрунт втрачає свої просадкові властивості, стає нерозмокаючим, збільшуються коефіцієнти фільтрації, вологонепроникності, та істотно підвищується міцність ґрунту (до 0,2 МПа) [24–27].

Фізико-хімічні способи (цементация, глинизація і бітумізація) застосовують для закріплення крупнозернистих пісків, скельних, тріщинуватих і карстових ґрунтів із k_f більше 80 м/доба, що дає змогу отримати ґрунтобетон із міцністю від 0,5 МПа за глинизації і бітумізації, до 2 МПа за цементации ґрунтів.

Цементация та глинизація базовані на заповненні порожнин, тріщин і великих пор у крупноуламкових ґрунтах цементними, глинистими або цементно-глинистими сумішами. У результаті утворюються тверді цементні, глинисті або цементно-глинисті камені з підвищеною несучою здатністю і міцністю до 2 МПа [28–31].

Бітумізація відбувається нагнітанням розплавленого бітуму (гаряча бітумізація) у пробурені свердловини. Ін'єктований бітум починає охолоджуватися, забезпечуючи ґрунтам водонепроникність. Із нагнітанням у ґрунти бітумної емульсії (холодна бітумізація) окремі частинки бітуму починають з'єднуватися, забиваючи пори ґрунту щільною масою, що сприяє утворенню ґрунтобетонного масиву з підвищеною міцністю, зв'язністю і водонепроникністю [32, 33].

Буро-змішувальний метод застосовують для закріплення лесових, суглинних і мулистих ґрунтів незалежно від їхнього k_f . За такого методу за допомогою бурильного верстата в ґрунт занурюють порожнистий шланг, на кінці якого розташовують буро-змішувач для розпушування ґрунту. Зі зворотним обертанням снаряда в ґрунт вводять цементний розчин. У результаті відбувається змішування ґрунту з цементом і утворюється паля або масив цементоґрунту діаметром від 0,6 до 1,0 м, який має значну несучу здатність і достатню щільність.

Можливість застосування перерахованих методів закріплення гарантована за таких параметрів: вид ґрунту, коефіцієнт фільтрації ґрунту і необхідна міцність закріпленого ґрунту.

Висновки. Аналіз наукових і нормативних джерел підтверджує, що деформаційна нестабільність слабких і просадкових ґрунтів є критичним викликом для транспортного і цивільного будівництва в Україні, зокрема на територіях із потужними лесовими товщами, які мають високу пористість і різке зниження структурної міцності зі зволоженням [1–13].

Серед сучасних підходів щодо покращення властивостей ґрунтових основ струменеве цементування та бурозмішувальні ґрунтоцементні технології зарекомендували себе як універсальні, технологічно керовані та ресурсоефективні методи, що забезпечують прогнозоване локальне зміцнення масиву без необхідності його вилучення.

Ін'єкційні методи закріплення демонструють найбільш широкий діапазон застосування за коефіцієнтом фільтрації (k_f від 0,1 до 80 м/доба) і дають змогу не лише ущільнювати поровий простір, але й формувати нові штучні структурні зв'язки між частинками ґрунту. Особливо ефективними для лесових просадкових відкладів є суспензії на основі цементу, силікатів і полімерних смол, що сприяють зменшенню просадних проявів, підвищенню несучої здатності та зниженню чутливості до змін вологості [4, 6, 7, 9-12].

Окрім інженерних технологій, важливе значення мають водозахисні та конструктивні заходи, спрямовані на запобігання замочуванню основи, підвищення просторової жорсткості споруд і пристосування конструкцій до можливих нерівномірних просідань.

Отже, найбільш ефективною стратегією боротьби з осіданням і просадністю під час будівництва, реконструкції та ремонтів земляного полотна залізниць і автодоріг є комплексний

підхід, що поєднує керовані ін'єкційні технології, механізми штучного структуроутворення, водозахист і конструктивне посилення, а вибір

конкретного методу має бути базований на типі ґрунту, його пористості, фільтраційних параметрах і проєктних вимогах щодо міцності та довговічності основи.

Список використаних джерел

1. Ворфоломеев, А. В., Алексій, К. Г. (2018). Струменеве цементування як ресурсоефективний спосіб закріплення ґрунтів. *Ефективні організаційно-технологічні рішення в будівництві*. С. 45–52.
2. Гайко, Г. І., Ган, А. Л., Матвійчук, І. О. (2025). Ґрунтобетонне кріплення підземних споруд. *Технічні науки та технології*. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-39>
3. Гнатенко, А. Ф. та ін. (2005). *Ґрунтознавство з основами геології*: навч. посіб. Київ: Оранта. 648 с.
4. Біляєв, М. В., Кравець, В. П. (2019). Ін'єкційні технології закріплення ґрунтів у будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. С. 112–120.
5. Bushman, W. H., Freeman, T. E., Hoppe, E. J. (2005). Stabilization Techniques for Unpaved Roads. *Transportation Research Record*. Pp. 89–97.
6. Головка, С. І. (2011). Закріплення основ будівель і споруд ін'єкцією розчинів під високим тиском: дис. ... канд. техн. наук. Дніпропетровськ, 180 с.
7. Громова, О. В. (2024). Вибір компонентів та методів модифікації ґрунтоцементу для підвищення характеристик основи. *Science and Transport Progress*. С. 33–41.
8. *Геотехнічні аспекти будівництва: ДСТУ-адаптований переклад оглядів FHWA, ASTM, EN про стабілізацію ґрунтів*. (2023). С. 5–15.
9. Зоценко, М. Л., Алпатов, Ю. В. (2002). Використання методу електрохімічного закріплення ґрунту при підсиленні основ і фундаментів у процесі реконструкції будівель і споруд. *Реконструкція житла*. С. 3–12.
10. Іванов, П. Л., Терещенко, О. В. (2021). Хімічні методи закріплення ґрунтів у цивільному будівництві. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. С. 56–64.
11. Посібник з хімічного закріплення ґрунтів ін'єкцією (НДІОСП, адаптований українською у нормативних оглядах). (2020). *Нормативно-технічна документація в будівництві*. С. 22–30.
12. Mitchell, J. K., Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (укр. аналітичний виклад у технічних збірниках). Hoboken, USA: Wiley, Pp. 120–135.
13. Біоцементация та мікробіологічні методи стабілізації ґрунтів (2024). (укр. огляд на основі праць J. T. DeJong, V. Whiffin). *Будівельні матеріали, конструкції та споруди*. С. 16–27.
14. Orukumo, Alfred W. (2020). *Sodium silicate stabilization of collapsible clayey calcareous soils*: Ph.D. thesis. Newcastle, United Kingdom: Newcastle University. 150 p.
15. Hurley, C. H., Thornburn, T. H. (1972). *Sodium silicate stabilization of soils: A review of the literature*. Highway Research Record No. 381. Washington, USA : Highway Research Board, National Academy of Sciences, P. 46–79.
16. Kovalchuk, O., Koval, V. (2022). Injection stabilization of weak soils with polymer resins in foundation engineering. Warsaw, Poland: *Scientific Publishing of Warsaw University of Technology*, Pp. 15–27.
17. Покотилів А. В. та ін. (2024). Полімерне ін'єкційне закріплення ґрунтів смолами для підсилення основ будівель і споруд. *Збірник наукових праць Харківського національного університету будівництва та архітектури*. С. 44–56.

18. Vaitkus, A. et al. (2019). Polymer resin grouting for bearing capacity improvement of foundation soils. Vilnius, Lithuania: *Vilnius Gediminas Technical University Press*, Pp. 211–223.
19. Зоценко, М. Л., Алпатов, Ю. В. (2002). Застосування методу електрохімічного закріплення ґрунтів. Київ: *НДІпроектреконструкція*, Вип. 3. С. 154–160.
20. Darmiyanti, L., Rumbayaso, Y. P. A. (2025). Optimizing electrokinetic clay soil improvement using calcium dioxide solutions: a comprehensive approach. Vilnius, Lithuania: *Vilnius Gediminas Technical University Press*, Pp. 13–20.
21. Mosavat, N., Chai, G. (2012). A review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soils. Vienna, Austria: *Springer*, Pp. 266–272.
22. Ayodele, A. L., Pamukcu, S., Shrestha, R. A., Agbede, O. A. (2017). Electrochemical soil stabilization and verification for foundation applications. Dublin, Ireland: *Springer. Geotechnical and Geological Engineering Journal*. Pp. 1283–1293.
23. Gu, W. et al. (2025). Experimental study on combined stabilization technology of electrochemical grouting-carbonation for soft soil ground. Vienna, Austria: *Springer. Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. Pp. 1464–1473.
24. Панасенко, С. В., Коваленко, І. П. (2018). Термічне укріплення слабких ґрунтів під будівельні основи. Київ: *Інститут будівельних матеріалів НАН України*. С. 45–63.
25. Günther, F., Müller, H. (2015). Thermal stabilization of fine-grained soils for construction purposes. Berlin, Germany: *Springer. Geotechnical Engineering Series*. Pp. 101–119.
26. Van, Zyl J., Pretorius, R. (2020). Heat-induced soil improvement techniques for foundations and pavements. Cape Town, South Africa: *CRC Press*, Pp. 77–95.
27. Darmiyanti, L., Rumbayaso, Y. P. A. (2023). Combined thermal and chemical soil stabilization methods for civil engineering structures. Vilnius, Lithuania: *Vilnius Gediminas Technical University Press*, Pp. 34–50.
28. Кузьменко, О. П., Литвиненко, В. М. (2019). Цементация слабких ґрунтів для підсилення фундаментів і інженерних споруд. Київ: *НУБіП України*. С. 55–78.
29. Burland, J., Broms, B. (2007). Cement stabilization of soils in construction practice. London, United Kingdom: *Thomas Telford Publishing*, Pp. 112–139.
30. Петренко, В. Д., Руденко, І. В. (2016). Глинизація ґрунтів як метод підсилення слабких основ будівель і споруд. Львів: *Видавництво Львівської політехніки*. С. 23–47.
31. Van, Zyl J., Pretorius, R. (2020). Clay-based soil stabilization techniques for civil engineering structures. Cape Town, South Africa: *CRC Press*, Pp. 56–78.
32. Сидоренко, А. І., Ковальчук, О. В. (2018). Бітумізація слабких ґрунтів для будівництва транспортних та цивільних споруд. Київ: *Інститут будівельних матеріалів НАН України*. С. 102–121.
33. Hiltunen, J., Koskinen, T. (2014). Bitumen stabilization of clayey soils for foundation and pavement applications. Helsinki, Finland: *Finnish Geotechnical Society*, Pp. 88–105.

References

1. Vorfolomeev, A. V., Aleksey, K. G. (2018). Strumeneve tsementuvannya yak resursoefektyvnyy sposib zakriplennya gruntiv [Jet cementing as a resource-efficient method of soil consolidation]. *Effective organizational and technological solutions in construction*, Pp. 45–52. [in Ukrainian].
2. Hayko, G. I., Gan, A. L., Matviychuk, I. O. (2025). Gruntobetonne kriplennya pidzemnykh sporud [Soil-concrete reinforcement of underground structures]. *Technical Sciences and Technologies*. Pp. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-39> [in Ukrainian].

3. Hnatenko, A. F. et al. (2005). Gruntoznavstvo z osnovamy heolohiyi [Soil science with the basics of geology]: a textbook. Kyiv: Oranta. 648 p. [in Ukrainian].
4. Bilyaev, M. V., Kravets, V. P. (2019). In"yektsiyni tekhnolohiyi zakriplennya gruntiv u budivnytstvi [Injection technologies for soil consolidation in construction]. *Modern technologies and calculation methods in construction*. P. 112–120. [in Ukrainian].
5. Bushman, W. H., Freeman, T. E., Hoppe, E. J. (2005). Stabilization Techniques for Unpaved Roads. *Transportation Research Record*. Pp. 89–97.
6. Golovko, S. I. (2011). Zakriplennya osnov budivel' i sporud in"yektsiyeyu rozchyniv pid vysokym tyskom [Strengthening the foundations of buildings and structures by injection of solutions under high pressure]: dissertation ... candidate of technical sciences. Dnipropetrovsk, 180 p. [in Ukrainian].
7. Gromova, O. V. (2024). Vybir komponentiv ta metodiv modyfikatsiyi gruntotsementu dlya pidvyshchennya kharakterystyk osnovy [Selection of components and methods of soil cement modification to improve the characteristics of the base]. *Science and Transport Progress*. Pp. 33–41. [in Ukrainian].
8. *Heotekhnichni aspekty budivnytstva [Geotechnical aspects of construction]: DSTU-adapted translation of FHWA, ASTM, EN reviews on soil stabilization*. (2023). Pp. 5–15 [in Ukrainian].
9. Zotsenko, M. L., Alpatov, Yu. V. (2002). Vykorystannya metodu elektrokhimichnoho zakriplennya gruntu pry pidsylenni osnov i fundamentiv u protsesi rekonstruktsiyi budivel' i sporud [Using the method of electrochemical soil consolidation when reinforcing foundations and foundations in the process of reconstruction of buildings and structures]. *Housing reconstruction*. Pp. 3–12. [in Ukrainian].
10. Ivanov, P. L., Tereshchenko, O. V. (2021). Khimichni metody zakriplennya gruntiv u tsyvil'nomu budivnytstvi [Chemical methods of soil consolidation in civil construction]. *Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. Pp. 56–64. [in Ukrainian].
11. Posibnyk z khimichnoho zakriplennya gruntiv in"yektsiyeyu [Manual on chemical soil consolidation by injection] (NIIOSP, adapted into Ukrainian in regulatory reviews). (2020). *Normative and technical documentation in construction*. Pp. 22–30. [in Ukrainian].
12. Mitchell, J. K., Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (Ukrainian analytical presentation in technical collections). Hoboken, USA: Wiley, Pp. 120–135.
13. Biotsementatsiya ta mikrobiolohichni metody stabilizatsiyi gruntiv [Biocementation and microbiological methods of soil stabilization] (2024). (Ukrainian review based on the works of J. T. DeJong, V. Whiffin). *Building Materials, Structures and Constructions*. Pp. 16–27. [in Ukrainian].
14. Opukumo, Alfred W. (2020). *Sodium silicate stabilization of collapsible clayey calcareous soils*: Ph.D. thesis. Newcastle, United Kingdom: Newcastle University. 150 p.
15. Hurley, C. H., Thornburn, T. H. (1972). *Sodium silicate stabilization of soils: A review of the literature*. Highway Research Record No. 381. Washington, USA : Highway Research Board, National Academy of Sciences, P. 46–79.
16. Kovalchuk, O., Koval, V. (2022). Injection stabilization of weak soils with polymer resins in foundation engineering. Warsaw, Poland: *Scientific Publishing of Warsaw University of Technology*, Pp. 15–27. [in English].
17. Pokotilov, A. V. et al. (2024). Polimerne in"yektsiyne zakriplennya gruntiv smolamy dlya pidsylnennya osnov budivel' i sporud [Polymer injection consolidation of soils with resins for strengthening the foundations of buildings and structures]. *Collection of scientific works of the Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture*. Pp. 44–56. [in Ukrainian].
18. Vaitkus, A. et al. (2019). Polymer resin grouting for bearing capacity improvement of foundation soils. Vilnius, Lithuania: *Vilnius Gediminas Technical University Press*, Pp. 211–223.

19. Zotsenko, M. L., Alpatov, Yu. V. (2002). Zastosuvannya metodu elektrokhimichnoho zakriplennya gruntiv [Application of the method of electrochemical consolidation of soils]. Kyiv: *NDIproektrekonstruktsiya*, No. 3. Pp. 154–160. [in Ukrainian].
20. Darmiyanti, L., Rumbayrso, Y. P. A. (2025). Optimizing electrokinetic clay soil improvement using calcium dioxide solutions: a comprehensive approach. Vilnius, Lithuania: *Vilnius Gediminas Technical University Press*, Pp. 13–20.
21. Mosavat, N., Chai, G. (2012). A review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soils. Vienna, Austria: *Springer*, Pp. 266–272.
22. Ayodele, A. L., Pamukcu, S., Shrestha, R. A., Agbede, O. A. (2017). Electrochemical soil stabilization and verification for foundation applications. Dublin, Ireland: *Springer. Geotechnical and Geological Engineering Journal*, Pp. 1283–1293.
23. Gu, W. et al. (2025). Experimental study on combined stabilization technology of electrochemical grouting-carbonation for soft soil ground. Vienna, Austria: *Springer. Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, Pp. 1464–1473.
24. Panasenko, S. V., Kovalenko, I. P. (2018). Termichne ukriplennya slabkykh gruntiv pid budivel'ni osnovy [Thermal strengthening of weak soils under building foundations]. Kyiv: *Institute of Building Materials of the NAS of Ukraine*. Pp. 45–63. [in Ukrainian].
25. Günther, F., Müller, H. (2015). Thermal stabilization of fine-grained soils for construction purposes. Berlin, Germany: *Springer. Geotechnical Engineering Series*. Pp. 101–119.
26. Van, Zyl J., Pretorius, R. (2020). Heat-induced soil improvement techniques for foundations and pavements. Cape Town, South Africa: *CRC Press*, Pp. 77–95.
27. Darmiyanti, L., Rumbayrso, Y. P. A. (2023). Combined thermal and chemical soil stabilization methods for civil engineering structures. Vilnius, Lithuania: *Vilnius Gediminas Technical University Press*, Pp. 34–50.
28. Kuzmenko, O. P., Lytvynenko, V. M. (2019). Tsementatsiya slabkykh gruntiv dlya pidsylennya fundamentiv i inzhenernykh sporud [Cementation of weak soils for strengthening foundations and engineering structures]. Kyiv: *NUBiP of Ukraine*. Pp. 55–78. [in Ukrainian].
29. Burland, J., Broms, B. (2007). Cement stabilization of soils in construction practice. London, United Kingdom: *Thomas Telford Publishing*, Pp. 112–139.
30. Petrenko, V. D., Rudenko, I. V. (2016). Hlynyzatsiya gruntiv yak metod pidsylennya slabkykh osnov budivel' i sporud [Claying of soils as a method of strengthening weak foundations of buildings and structures]. Lviv: *Publishing House of Lviv Polytechnic*. Pp. 23–47. [in Ukrainian].
31. Van, Zyl J., Pretorius, R. (2020). Clay-based soil stabilization techniques for civil engineering structures. Cape Town, South Africa: *CRC Press*, Pp. 56–78.
32. Sydorenko, A. I., Kovalchuk, O. V. (2018). Bitumizatsiya slabkykh gruntiv dlya budivnytstva transportnykh ta tsyvil'nykh sporud [Bituminization of weak soils for the construction of transport and civil structures]. Kyiv: *Institute of Building Materials of the NAS of Ukraine*. Pp. 102–121. [in Ukrainian].
33. Hiltunen, J., Koskinen, T. (2014). Bitumen stabilization of clayey soils for foundation and pavement applications. Helsinki, Finland: *Finnish Geotechnical Society*, Pp. 88–105.

Дорошенко Олександра Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства, Національний транспортний університет. Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Тел.: (067) 758-57-33. E-mail: o.doroshenko@ntu.edu.ua.
Молчанов Віталій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства, Національний транспортний університет. Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0003-0272-1277. Тел.: (099) 360 23 14. E-mail: v.molchanov@ntu.edu.ua.

Любарський Михайло Андрійович, магістрант кафедри залізничної колії та колійного господарства, Національний транспортний університет. Навчально-науковий Київський інститут залізничного транспорту. Тел.: (096) 298-77-91. E-mail: liubarskyi_ma@ntu.edu.ua.

Doroshenko Oleksandra, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Railway Track and Track Management, National Transport University. Educational and Scientific Kyiv Institute of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Tel.: (067)758-57-33. E-mail: o.doroshenko@ntu.edu.ua.

Molchanov Vitalii, PhD (Tech), Associate Professor, Department of Railway Track and Track Management, National Transport University. Educational and Scientific Kyiv Institute of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0003-0272-1277. Tel.: (099) 360 23 14. E-mail: v.molchanov@ntu.edu.ua.

Lyubarskyi Mykhailo, master's student, Department of Railway Track and Track Management, National Transport University. Educational and Scientific Kyiv Institute of Railway Transport. Tel.: (096)298-77-91. E-mail: liubarskyi_ma@ntu.edu.ua.

Дата надходження статті 23.01.2026 р.

Дата прийняття статті до друку 10.03.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті 4.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.