

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАКРІПЛЕННЯ ГРУНТОВИХ
МАСИВІВ З ЛЕСОВОГО ГРУНТУ**

STUDY OF THE EFFICIENCY OF STABILIZING LOESS SOIL MASSIFS

**Грецький Д.В. к.т.н., доц., Пряник С.П. к.т.н., доц., Березань М.О. к.т.н.,
доц., Юрченко С.В. ст. викладач (Черкаський державний технологічний
університет, м. Черкаси)**

**Gretskyi Denys, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
<https://orcid.org/0000-0002-3086-0939>, Pryanik Serhii, Candidate of Technical
Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4430-4287>, Berezan
Mikola, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
<https://orcid.org/0009-0005-8203-2798>, Yurchenko Serhii, Senior teacher,
<https://orcid.org/0000-0003-1740-8080>, (Cherkasy State Technological University)**

**У статті розглянуто питання підвищення ефективності закріплення
лесових ґрунтів, що характеризуються просадковістю. Наведено аналіз
існуючих технологій цементації та силікатизації, виявлено їхні недоліки.
Запропоновано вдосконалену технологію формування просторової
основи будівель на просадкових ґрунтах.**

**The article presents the results of research aimed at improving the efficiency
of stabilizing loess soil masses that are prone to subsidence and exhibit an
unstable structural framework. The study analyzes existing technologies of
soil stabilization through cementation and silicatization, emphasizing their
main shortcomings such as high labor intensity, irregular penetration of
grouting mixtures into the soil body, and a significant decrease in strength
and durability of silicatized soils under prolonged wetting. Laboratory
experiments were conducted on loessial silt loam samples to determine
deformation stabilization behavior under loading before and after treatment
and to assess the time-dependent increase in the deformation modulus of
stabilized soils. The tests demonstrated that injection cementation increases
the deformation modulus of loess soils up to 80–90 MPa and effectively
reduces relative collapsibility to negligible values. Based on the experimental
results, an improved technological concept for forming a spatial foundation
from stabilized collapsible soils was proposed. It includes the formation of a
surface layer of stabilized soil, a system of columnar masses at the locations of
building supports, and transverse and diagonal connecting bands that ensure
structural integrity and uniform load distribution. The application of electro-
osmotic and lime-cement treatment processes was found to accelerate the**

consolidation of the foundation base and enhance its load-bearing capacity. The developed technology significantly shortens the construction period, reduces material consumption, and provides reliable long-term operation of foundations on loess soils in complex engineering and geological conditions. The obtained research results can be recommended for practical use in the design and construction of buildings and structures in areas with widespread collapsible loess formations.

Ключові слова: лесові ґрунти, ін'єкційна цементация, силікатизация, закріплення основ, просадковість, просторовий геомасив.

Loess soil, collapsibility, injection cementation, silicatization, soil stabilization, deformation modulus, spatial foundation, engineering geology.

Вступ. Обширна зона нашої країни зайнята лесовими відкладами, які широко представлені у південних областях. З середини 50-х років минулого століття багато лесових масивів у межах агломерацій зазнали підтоплення. Гідрогеологічні умови експлуатації лесових порід нині стали самостійним об'єктом оцінки та прогнозування під час розв'язання геоекологічних завдань.

Супровідні просадкові деформації будівель і споруд виявили фундаментальну властивість лесових ґрунтів — просадковість, тобто нестійкість структури.

Проблема необхідності врахування просадковості лесових ґрунтів, що займають близько 65-70 % усієї площі України, є актуальною як під час зведення нових будівель і споруд, так і під час експлуатації існуючого житлового та соціально-побутового фонду [1].

Існуючі методи відновлення несучої здатності лесових масивів не завжди дають бажані результати: зміни, що відбуваються у ґрунті в процесі його механічного або ін'єкційного ущільнення (різними мінеральними композиціями — цементациєю, силікатизацією тощо), мають складний характер і залежать від багатьох факторів — таких, як хімічний і мінералогічний склад самого ґрунту, його фізичний та механічний стан, рівень і хімічний склад ґрунтових вод, ступінь підтоплюваності тощо.

Перспективним напрямом у розв'язанні цієї проблеми можна вважати розроблення таких технологій і способів ін'єктування мінеральних композицій, які б не руйнували наявні структурні зв'язки лесових ґрунтів, а при взаємодії з хімічними елементами масиву та навколишнього середовища утворювали нові, міцні та стійкі до агресивних впливів сполуки.

Аналіз останніх досліджень. Питаннями дослідження закріплення лесових масивів шляхом цементації та силікатизації займалися багато дослідників: Воляник М. В., Приходченко О. Є., Бекетов А. К., Качан Ю. І., Zhang C.; Kong R., Bakhshandeh F. і Noorzad R., Li G., Wang L., Seiphoori A.

Постановка мети і задач досліджень. Визначити напрями удосконалення влаштування закріплених геомасивів з лесового ґрунту шляхом обґрунтування матеріалу та технології закріплення.

Методика досліджень. Шляхом виготовлення дослідних зразків з закріпленого лесового ґрунту визначити: характер стабілізації деформації зразків ґрунту під навантаженням при замочуванні до та після закріплення та залежність наростання в часі модуля деформації закріпленого лесового ґрунту. Визначити перспективні напрями удосконалення технології влаштування закріплених геомасивів складених лесовими ґрунтами.

Результати досліджень. За своїми хіміко-мінеральним складами лесові ґрунти є придатними для закріплення цементом. Огляд літератури [2, 3, 4] та власні дослідження [5, 8] дозволяють зробити висновок, що найбільш придатними для закріплення методом цементації є лесові супіски та легкі суглинки, які володіють найбільшими просадковими властивостями. Важкі суглинки та лесові глини містять значну кількість глинистої фракції, у якій переважає монтморилоніт. Це призводить до підвищеної витрати цементу, зниження міцності та водостійкості закріплених ґрунтів, роблячи цементацію малоефективною. Крім того, агрегативна та злитна структура таких ґрунтів і незначний вміст макропор суттєво ускладнюють проникнення цементної суспензії в товщу ґрунту.

Для експериментального закріплення були використані легкі пилюваті лесові суглинки, що мають наступні фізико-механічні властивості: вологість 12-18 %, щільність 1,6-1,8 г/см³, пористість 42-48 %; активна компресійна пористість 8,2%; кількість пластичності 9-12%; модуль деформації компресійний при природній вологості 5,15-6,47 МПа, модуль деформації при водонасиченні 2,65-4,15 МПа; відносна просадковість 0,02-0,05.

З цих ґрунтів відбиралися моноліти непорушеної структури для закріплення в лабораторних умовах (загалом понад 20 монолітів). На лабораторній установці для ін'єкційної цементації моноліти зазнавали нагнітання цементної суспензії під постійним тиском. У процесі експерименту підбиралися оптимальні поєднання тиску нагнітання та густини цементної суспензії. Закріплені зразки ґрунту піддавалися випробуванням на стисливість, роздавлювання, водостійкість.

Під час силікатизації на початковому етапі відбувається підвищення вологості навколишнього ґрунту, що може спричинити додаткові просадкові деформації. Тому була проведена серія експериментів для визначення осадкових і просадкових деформацій у період нагнітання цементної суспензії та в перші години після цього.

У зразки ґрунту, що перебували під вертикальним навантаженням 0,2 МПа, цементний розчин нагнітався знизу вгору. Досліди показали, що під час нагнітання просадкові деформації не спостерігаються, оскільки тиск нагнітання компенсує вертикальне навантаження. Навіть має місце невелике розушільнення ґрунту. Після припинення нагнітання просадкових

деформацій також не зафіксовано, оскільки більшість пор ґрунту вже заповнені цементним розчином. Відбувається повільне осідання ґрунту, яке затухає в міру твердіння розчину (рис. 1). Час стабілізації осідання становить 6–8 годин, максимальна величина відносної деформації не перевищує 1,5 %.

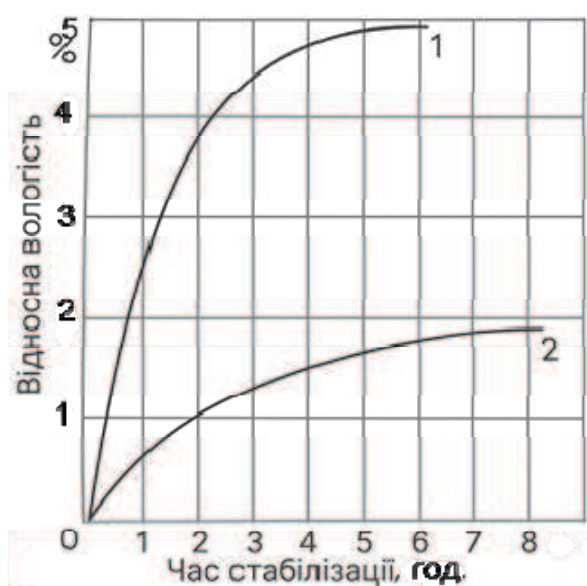


Рис. 1. Характер стабілізації деформацій зразка ґрунту під навантаженням при замочуванні (1), після нагнітання суспензії (2)

Ці результати формують припущення, що даний метод можна рекомендувати для закріплення основ аварійних будівель. При цьому важливою умовою є нагнітання розчину знизу вгору. Таку подачу можна забезпечити шляхом використання ін'єкторів з однобічною перфорацією та похилим їх розташуванням. Можливі також варіанти закріплення з використанням вертикальних труб із висувними горизонтальними ін'єкторами, перфорованими у верхній частині.

Модуль деформації закріплених ґрунтів E через 98 днів досягає 80–90 МПа, при цьому густина зростає на 0,06–0,10 г/см³. У перші 2–3 години після закріплення E підвищується незначно, потім спостерігається інтенсивне зростання модуля в міру твердіння цементу. Через 8–10 годин швидкість зростання знову сповільнюється.

Випробування лесового ґрунту із закріплених масивів на стискання показали, що через 28 діб міцність ґрунтів становить 3–6 МПа, причому 70–75 % міцності ґрунти набирають у перші 3–4 доби. При використанні суспензії з В/Ц = 3 міцність закріплених ґрунтів досягала 7–8 МПа. Під час силікатизації ж міцність цих ґрунтів (за великої витрати силікату натрію) становила 1–4 МПа, причому найкраще закріплювалися більш глинисті ґрунти. Таким чином, ефективність закріплення ін'єкційною цементациєю принаймні не поступається силікатизації та добре її доповнює.

Як відомо, силікатизовані ґрунти за тривалого обводнення змінюють свої властивості: їхня міцність знижується на 35–50 % через перехід солей

кремнієвої кислоти у розчин. Випробування цементованих ґрунтів на водостійкість показали, що витримування зразків у воді протягом місяця призводить до зниження міцності лише на 7 %. Це відбувається внаслідок розм'якшення структурних зв'язків ґрунту, але не цементу.

Також існує проблеми вибору технології влаштування геомасивів з закріпленого ґрунту. Відомими є способи та технології [5, 6, 7].

Загальним недоліком цих технологій є значна трудомісткість виконання робіт, зумовлена необхідністю укріплення великого об'єму ґрунту. Крім того, під час ін'єктування необхідно нагнітати закріплювальний розчин у попередньо визначеній кількості з урахуванням коефіцієнта насичення ґрунту. Через неоднорідність основи можливе перевитрачання розчину, який не вступатиме в реакцію з активними компонентами ґрунту. Це призводить до неекономного використання матеріалів, збільшення тривалості виконання робіт і, що найважливіше, може викликати додаткові просадки шарів ґрунтового масиву, які перебувають у напруженому стані під дією ваги розташованих вище шарів ґрунту.

Метою удосконалення технології є зменшення витрат енергоресурсів та скорочення тривалості формування надійної основи будівель і споруд.

На нашу думку, напрямком удосконалення є створення системи елементів, що утворюють основу будівель та споруд на просадкових ґрунтах, що включає поверхневий шар з укріпленого ґрунту, стовпчасті масиви з укріпленого ґрунту в місцях колон будівлі і об'єднані між собою перемичками також з укріпленого ґрунту глибиною, рівною глибині стовпчастих масивів, всередині комірок утвореного просторового каркасу, розміщені додаткові стовпи з укріпленого ґрунту, причому для зменшення тривалості по отриманню основи, об'єднання стовпчастих масивів n -го та $n+2$ -го ряду (першого та третього ряду, що розглядається) відбувається за рахунок смуг укріпленого ґрунту у вигляді діагональних зв'язків та паралельних зв'язків у напрямку ряду, що розглядається, об'єднання стовпчастих масивів наступного $n+1$ -го ряду—за рахунок поперечних смуг-перемичок (перпендикулярних до напрямку ряду, що розглядається), такими, що утворюються внаслідок різниці потенціалів ряду n та $n+2$. Причому додаткові стовпи ущільненого ґрунту влаштовані тільки у ряду $n+1$, [8].

Запропонована основа влаштовується у такій послідовності, основа складається з просадкового ґрунту 1, поверхневого шару з укріпленого ґрунту 2, стовпчастих масивів 3, що укріплені, додаткових стовпів 4. Стовпчасті масиви 3 з'єднані між собою перемичками закріпленого ґрунту 5. Укріплення масиву ґрунту за рахунок пропускання струму між анодом 6 та катодом 7, додатковій подачі через трубопровід 8 води під тиском і за допомогою забору зайвої вологи через іглофільтр 9 (рис. 2).

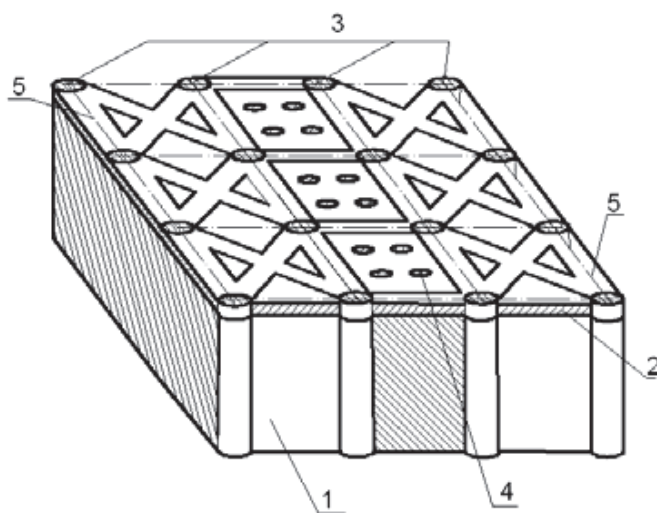


Рис. 2. Просторова основа з закріпленого просадкового ґрунту

Влаштування основи виконується в такій послідовності. Спочатку проводять розбивку умовної сітки розмірами комірки 3х3 м. Потім у просадковому ґрунті 1 влаштовується свердловини 6, в місцях перетину вісей сітки, на усю глибину просадкової товщі 1 за рахунок занурення металевої інвентарної труби закритою знизу наконечником, що саморозкривається (на фігурах не показано). Труба поступово заповнюється молотим негашеним вапном з активністю більше ніж 75% з поступовим ущільненням суміші у свердловині трамбівкою вагою 300-400 кг та поступовим витягуванням труби. У свердловини 3 (основних стовпчастих масивів) занурюють електроди-аноди 6 та катоди 7, у вигляді металевих перфорованих труб-стрижнів, причому катодний електрод 7 сполучається з насосним іглофільтром 9 для забору з свердловини 3 зайвої вологості, а анодний з додатковим трубопроводом 8 для подачі води у вапняну свердловину. Для забезпечення оптимального насичення просадкового ґрунту 1 в'язучим, в свердловину анодного електроду 6 доцільно здійснювати додаткову подачу води під тиском не більше ніж 5 кгс/см^2 . Через електроди 6, 7 подають постійний електричний струм з напругою до 150-210 В, що прямопропорційно відстані 3-4,3 м. Таким чином в результаті електроосмосу та в результаті гасіння вапна з водою відбувається рух гідроксиду кальцію у рідкому виді від анодного електроду 6 до катодного 7. В результаті цього руху відбувається фільтрування вапняного молока, укріплення просадкового ґрунту 1 в'язучим, зайва волога при цьому збирається у катодній свердловині, звідки проводиться її забір іглофільтром 9 на поверхню ґрунту. В результаті гасіння вапна з водою, що подається, об'єм свердловини 3 збільшується на 80-100% з значним виділенням тепла (при 1 кг вапна—277 Ккал). Також проходить в результаті гасіння вапна водою закріплення ґрунту навколо свердловини 3.

Додаткові стовпи 4 ущільненого ґрунту (рис. 3а) влаштовують у ряді n+1 (середній із трьох, що розглядаються) за рахунок занурення металевої інвентарної труби закритою знизу наконечником, що саморозкривається. Та

поступовому подаванню піщаної суміші та її ущільнення за рахунок витягування труби (на рисунках не показано).

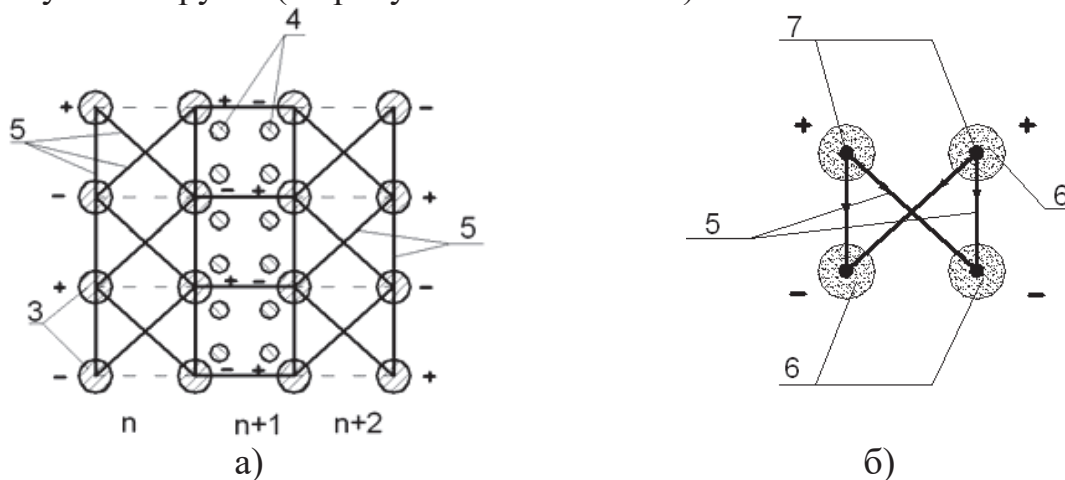


Рис. 3. Напрямок робіт по влаштуванню просторової основи з закріпленого ґрунту

Після влаштування вапняних стовпів 3 основи та зв'язків між ними 5 за рахунок просочення ґрунту вапняним в'язучим та додаткових стовпів 4, приступають до робіт, пов'язаних з укріпленням поверхневого шару ґрунту 2. Влаштування поверхневого шару 2 ведуть за рахунок поверхневого бетонування цементно-ґрунто-вапняним розчином в пропорції (1:0,5:0,02). Вапно слід додавати окремо у вигляді рідкого вапняного молока. Домішка вапна дає розчину більшу міцність на стиск і зменшує його розмокаючу дію. Для порівняння міцність на стиск у віці 7 діб - 42 кг/см², у порівнянні з звичайним ґрунто-цементним розчином - 30 кг/см² і 12-30 кг/см² у зразка ґрунту, що закріплений силікатизацією, [8].

Напрямок робіт по влаштуванню основи будівель та споруд ведеться рядами, по три ряди за одну захватку. Проводять влаштування стовпчастих масивів (вапняних паль) ряду n, та n+2 (рис. 3а), потім розміщують електроди (рис. 3б) попарно з одним знаком навпроти електродів з протилежним знаком у кожній комірці ряду, задля створення різниці потенціалів у напрямку ряду, що розглядається. Після цього відбувається одночасна подача струму на ці електроди і створення таким чином сітки укріплених зв'язків між протилежними полюсами електродів в ряді n, n+2 та утворення поперечних укріплених зв'язків у ряді n+1, [8].

Висновки та рекомендації. Описані результати лабораторного закріплення лесових ґрунтів ін'єкційними способами дають змогу по-новому розглянути проблему довговічності зміцнених масивів лесових ґрунтів при проєктуванні фундаментів мілкового закладення. По-перше, повна стабілізація основ та відповідних надземних конструкцій аварійних будівель можлива лише за умови зниження рівня ґрунтових вод і вологості навколишніх ґрунтів. По-друге, масиви, закріплені методом силікатизації, в умовах тривалого зволоження або змінної вологості протягом 3–8 років втрачають несучу здатність на 50–70 %. По-третє, нагнітання піщано-цементних

сумішей не забезпечує формування суцільного масиву закріплення, і з часом можливий виштовх ґрунтової маси за умов підтоплення чи підвищеної вологості.

Було описано рекомендовану технологічну послідовність утворення основи з закріпленого просадкового ґрунту наведені рекомендації щодо значень технологічних параметрів виконання робіт.

1. Яковлев А.В. Особенности проектирования, строительства, эксплуатации будивель і споруд на лесовому ґрунті та зсувонебезпечній території України / А.В. Яковлев, Ю.Л. Винников. – К.: НМК ВО, 1992. – 252с.

Iakovliev A.V. Osoblyvosti proektuvannia, budivnytstva, ekspluatatsii budivel i sporud na lesovomu hrunti ta zsuvenebezpechnii terytorii Ukrainy / A.V. Yakovliev, Yu.L. Vynnykov. – K.: NMK VO, 1992. – 252s.

2. Hoang, P.Dinh, Nguyen, D.Cong and Chu, T.Viet 2020. Study on the loess soil improved by soil-cement columns for wind turbine foundation (in Vietnamese). Journal of Mining and Earth Sciences. 61, 6 (Dec, 2020), 109-115. DOI: <https://doi.org/10.46326/JMES.HTCS2020.15>.

3. Milev N. Ground improvement and foundation design of industrial facilities on loess soil / N. Milev // Facta Universitatis – Series: Architecture and Civil Engineering. - 2024. - Vol. 22, No 3. - P. 277-291. - DOI: 10.2298/FUACE231111004M.

4. Zhao Z.-K., Wang T.-H., Jin X. Study on permeation grouting rules for loess and method for predicting migration radius // KSCE Journal of Civil Engineering. - 2021. - Vol. 25, No 8. - P. 2876-2883. - DOI: 10.1007/s12205-021-1597-1.

5. Грецький Д.В., Коновал С.В., Пономаренко О.І. Аналіз існуючих технологій кріплення глибоких котлованів // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2016. – Вип. 32. – С. 341–345. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i32.79>.

Hretskyi D.V., Konoval S.V., Ponomarenko O.I. Analiz isnuichykh tekhnolohii kriplennia hlybokykh kotlovaniv // Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zbirnyk naukovykh prats. – Rivne: NUVHP, 2016. – Vyp. 32. – S. 341–345. <https://doi.org/10.31713/budres.v0i32.79>.

6. Hamdy, D. B., Fahim, H., & El-Dahshan, A. (2024). Origin and characteristics of collapsible soils – State of the art and remedy options. Innovative Infrastructure Solutions. DOI: 10.1007/s41062-024-01673-5

7. Zamanian, M., Karimi, S., & Rahmani, A. (2025). Comparative efficacy of grouting and mixing methods for stabilizing collapsible soils with nano-clay and cement. Construction and Building Materials. DOI: 10.1016/j.cscm.2025.e05159.

8. Пат. 110648 Україна, МПК (2016) E02D27/34. Основа будівель та споруд на просадочних ґрунтах / Грецький Д.В., Коновал С.В.; заявник та патентовласник Черкаський державний технологічний університет - № u201601606 ; заявл. 22.02.2016; опубл. 15.10.2016, Бюл. № 20/2016. – 3 с.

Pat. 110648 Ukraina, MPK (2016) E02D27/34. Osnova budivel ta sporud na prosadochnykh gruntakh / Hretskyi D.V., Konoval S.V.; zaiavnyk ta patentovlasnyk Cherkaskyi derzhavnyi tekhnolohichniy universytet - № u201601606 ; zaiavl. 22.02.2016; opubl. 15.10.2016, Biul. № 20/2016. – 3 s.