

УДК 625.7/.8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.7.965

## ПІДВИЩЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ СЛАБКИХ ВОДОНАСИЧЕНИХ ГЛИНИСТИХ ОСНОВ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ

БАЛАШОВА Ю. Б.<sup>1\*</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ДЕМ'ЯНЕНКО В. В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

УСИЧЕНКО О. Ю.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ТИКВЕНКО П. А.<sup>4</sup>, маг.,

БАЛАШОВ А. О.<sup>5</sup>, студ.

<sup>1\*</sup> Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 786-54-46, e-mail: [balashova.yuliiia@pdaba.edu.ua](mailto:balashova.yuliiia@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-2286-9263

<sup>2</sup> Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 728-38-94, e-mail: [demianenko.viktor@pdaba.edu.ua](mailto:demianenko.viktor@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-0427-4263

<sup>3</sup> Кафедра транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, Київ, Україна, тел. +38 (050) 311-41-82, e-mail: [fbk@ukr.net](mailto:fbk@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-7482-8420

<sup>4</sup> Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 566-53-63, e-mail: [pavel.mt72@gmail.com](mailto:pavel.mt72@gmail.com), ORCID ID: 0009-0003-7481-2191

<sup>5</sup> Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 678-37-54, e-mail: [andbalashov@hotmail.com](mailto:andbalashov@hotmail.com), ORCID ID: 0009-0007-5833-0888

**Анотація. Постановка проблеми.** Для відновлення і розвитку інфраструктури України, ліквідації наслідків руйнувань, пов'язаних із бойовими діями, і в повоєнній відбудові країни, у першу чергу, необхідне відновлення мережі автомобільних доріг і аеродромів України, а також цивільних і промислових об'єктів. Для безперервної роботи інфраструктурних об'єктів, які перебувають у складних інженерно-геологічних умовах, необхідне підвищення несучої здатності основ, на яких планується відбудова, реконструкція, будівництво або капітальний ремонт цих об'єктів. Підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів виконується такими традиційними методами як застосування геосинтетичних матеріалів або вапна, а також новими альтернативними методами – додаванням біополімерів. **Мета статті** – аналіз зарубіжного досвіду застосування ефективних і екологічних матеріалів для закріплення і підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів та обґрунтування доцільності їх використання в умовах України на основі виконаних лабораторних досліджень ґрунтів із додаванням вапна і біополімеру – ксантанової камеді. **Висновок.** Виконано аналіз зарубіжних методик щодо застосування вапна і біополімерів для закріплення і підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів. Проаналізовано дослідження щодо підбору концентрації вапна і біополімерів у ґрунтовій суміші. Виконано лабораторні експериментальні дослідження зі слабкими водонасиченими глинистими ґрунтами з різним показником текучості ґрунту і вмістом вапна 2–4 % та ксантанової камеді 2–4 %. Результати досліджень показали значне зменшення деформацій слабких ґрунтів у разі закріплення їх біополімером.

**Ключові слова:** слабкі водонасичені глинисті ґрунти; основа земляного полотна; автомобільні дороги; біополімери; ксантанова камедь; вапно; несуча здатність; деформації; показник текучості ґрунту

## INCREASING THE BEARING CAPACITY OF SOFT WATER-SATURATED CLAY SUBGRADES ROADS

BALASHOVA Yu.B.<sup>1\*</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

DEMIANENKO V.V.<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

USYCHENKO O.Yu.<sup>3</sup>, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

TYKVENKO P.A.<sup>4</sup>, Master,

BALASHOV A.O.<sup>5</sup>, *Stud.*

<sup>1\*</sup> Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 786-54-46, e-mail: [balashova.yuliia@pdaba.edu.ua](mailto:balashova.yuliia@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-2286-9263

<sup>2</sup> Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 728-38-94, e-mail: [demianenko.viktor@pdaba.edu.ua](mailto:demianenko.viktor@pdaba.edu.ua), ORCID ID: 0000-0003-0427-4263

<sup>3</sup> Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, 1, M. Omelianovycha-Pavlenka Str., Kyiv, 01010, Ukraine, tel. +38 (050) 311-41-82, e-mail: [fbk@ukr.net](mailto:fbk@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-7482-8420

<sup>4</sup> Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 566-53-63, e-mail: [pavel.mf72@gmail.com](mailto:pavel.mf72@gmail.com), ORCID ID: 0009-0003-7481-2191

<sup>5</sup> Department of Highways, Geodesy and Land Management, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 678-37-54, e-mail: [andbalashov@hotmail.com](mailto:andbalashov@hotmail.com), ORCID ID: 0009-0007-5833-0888

**Abstract. Problem statement.** The restoration and development of Ukraine's infrastructure, the elimination of the consequences of the destruction caused by hostilities, and the post-war reconstruction of the country require, first and foremost, the restoration of the road and aerodrome networks in Ukraine, as well as civil and industrial facilities. For the smooth operation of infrastructure facilities located in difficult engineering and geological conditions, it is necessary to increase the bearing capacity of the foundations on which the restoration, reconstruction, construction or overhaul of these facilities is planned. Increasing the bearing capacity of soft, water-saturated clay soils is performed by traditional methods such as the use of geosynthetic materials or lime, as well as new alternative methods such as the addition of biopolymers. **The purpose of the article** is to analyze foreign experience in the use of effective and environmentally safe materials for consolidating and increasing the bearing capacity of soft water-saturated clay soils and justification of the feasibility of their use in Ukraine based on laboratory studies of soils with the addition of lime and a biopolymer, xanthan gum. **Conclusion.** An analysis of foreign methods for the use of lime and biopolymers to consolidate and increase the bearing capacity of soft water-saturated clay soils was performed. Studies on the selection of the concentration of lime and biopolymers in the soil mixture were analyzed. Laboratory experimental studies were conducted on soft water-saturated clay soils with varying soil liquidity index and lime content of 2–4 % and xanthan gum content of 2–4 %. The research results showed a significant reduction in deformations of soft soils when they are fixed with biopolymer.

**Keywords:** *soft water-saturated clay soils; subgrade; highways; biopolymers; xanthan gum; lime; bearing capacity; deformation; liquidity index*

**Постановка проблеми.** Для відновлення і розвитку інфраструктури України, ліквідації наслідків руйнувань, пов'язаних із бойовими діями, і в повоєнній відбудові країни, у першу чергу, необхідне відновлення мережі автомобільних доріг і аеродромів України [1], а також цивільних і промислових об'єктів.

Для безперебійної роботи інфраструктурних об'єктів, які перебувають у складних інженерно-геологічних умовах, необхідне підвищення несучої здатності основ, на яких планується відбудова, реконструкція, будівництво або капітальний ремонт цих об'єктів.

Підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів можна виконувати шляхом застосування геосинтетичних матеріалів [2], а також додавання вапна [3] або біополімерів [4].

У всьому світі триває пошук найбільш ефективних і екологічних матеріалів для закріплення слабких ґрунтів, які в природному стані неможливо використовувати як основу під земляне полотно автомобільних доріг або інших об'єктів транспортної інфраструктури, бо заміна таких ґрунтів спричинює підвищення вартості будівництва, реконструкції та капітального ремонту. Використання в основах конструкцій дорожнього одягу автомобільних доріг і аеродромних покриттів укріплених ґрунтів замість високоміцних дає змогу значно знизити вартість відбудови, реконструкції, будівництва та капітального ремонту доріг і аеродромів.

Війна та воєнні дії в Україні завдали прямої серйозної шкоди автомобільним дорогам. З початку повномасштабного

вторгнення в Україні зруйновано близько 25 тисяч кілометрів доріг. Наразі стан дорожньої мережі надзвичайно важкий. Велика кількість автодоріг районного та міського значення в країні вже відслужили свій нормативний термін, а під час війни ще додалося навантаження від проходження військових колон. Тому головним завданням стало забезпечення безперервного і безперешкодного руху транспорту, а також безперервної доставки гуманітарної та військової допомоги в міста та села.

Отже, зараз для України потрібні: відновлення, реконструкція, капітальний ремонт та посилення дорожнього одягу, а також покриттів аеродромів; підвищення несучої здатності основ та укосів земляного полотна автомобільних доріг та залізниць, зокрема, у складних інженерно-геологічних умовах; підвищення стійкості укосів земляного полотна, яке перебуває під впливом динамічного і хвильового навантаження.

Враховуючи те, що 70 % площі України займають глинисті ґрунти, дослідження підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів наразі дуже актуальне.

**Аналіз публікацій.** У більшості з раніше виконаних зарубіжних і вітчизняних досліджень для зміцнення глинистих ґрунтів як в'язуче використовували вапно або цемент [3]. Вапно добре взаємодіє з мінералами глинистих ґрунтів, утворюючи міцніші, порівняно з природними, структурні зв'язки. Для хімічного закріплення ґрунту активно використовувався цемент, однак він має кілька несприятливих для довкілля властивостей, тому вважається не екологічним.

Під час зведення будівель і споруд на слабких природних ґрунтах, таких як торф, мул, глинисті ґрунти в м'якопластичному або текучопластичному стані, доводиться проводити комплекс заходів для поліпшення їх природних властивостей. У процесі поліпшення природних властивостей ґрунтів відбувається зміна їх природних

властивостей завдяки введенню в'язучих матеріалів з метою підвищення міцності ґрунтів, зменшення стисливості та водопроникності. Процес стабілізації ґрунтів залежить від багатьох факторів, головні з яких: вид ґрунту, вид в'язучого та активізаторів, технологія змішування.

Проведені дослідження щодо якості стабілізації ґрунту з водонасиченою каолінітовою і монтморилонітовою глиною показали поліпшення коефіцієнта несучої здатності за Каліфорнійською шкалою у разі додавання вапна. Також зафіксовано збільшення міцності та модуля Юнга у зразках ґрунту, якщо вони були оброблені вапном [4].

Випробування на компресійному приладі глинистих зразків із додаванням вапна показали відносно низькі величини пружних деформацій (3–4 %) в області напружень до межі текучості і великі величини пластичних деформацій (12–18 %) в області напружень після межі текучості ґрунту [5].

Різні матеріали, такі як вапно, цемент, зола та їх комбінації можуть бути додані до ґрунту для зміни його фізичних і механічних властивостей.

Дослідження в штаті Оклахома (США) показали, що більшість природних ґрунтів спричиняють сезонні пошкодження доріг та споруд. Додавання вапна або летючої золи допомагає зупинити усадку і набухання [6].

Результати випробувань на одометрі показали, що характеристики стисливості обробленої вапном неорганічної глини дещо поліпшуються за більш тривалих періодів твердіння, ніж для органічних глин, оброблених вапном [7].

Проведені випробування на консолідацію показали, що збільшення концентрації вапна зменшує тиск консолідації. За вмісту вапна 1 % тиск становив  $0,3 \text{ кг/м}^2$ , а за 7 % –  $0,2 \text{ кг/м}^2$  [8].

Іншим перспективним напрямком поліпшення властивостей слабких водонасичених ґрунтів на сьогоднішній день стало застосування біополімерів.

Багато біополімерів використовуються як стабілізатори ґрунту для поліпшення механічної поведінки слабких ґрунтів. Найбільш розповсюджені це – ксантанова камедь [9], бета-глюкан та агарова камедь [10].

Порівняльні дослідження щодо використання цементу і ксантанової камеді проведені у Кореї [11]. Автори виявили, що суміш ґрунту з 1 % ксантанової камеді має вищу міцність на стиск, ніж ґрунт, оброблений цементом 10 %. У результаті досліджень з'ясовано, що зміцнювальний ефект ксантанової камеді залежить від чотирьох факторів: типу ґрунту, рівня гідратації (вмісту вологи), вмісту ксантанової камеді та методу змішування.

Найбільше зарубіжних досліджень проведено із ксантановою і гуаровою камедями, завдяки їх стабільній поведінці в суворих умовах та розумним цінам. У Японії та Єгипті виконано експериментальні дослідження трьох основних властивостей ґрунтової суміші з біополімерами, а саме: характеристик ущільнення, потенціалу руйнування та параметрів зсуву. Результати експериментів показали, що і ксантанова, і гуарова камедь можуть бути використані як поліпшувачі ґрунту. Потенціал руйнування зменшився з 9 до 1 % після змішування ґрунту з 2 % біополімеру у вологому стані. Ефективність дії біополімеру для вологої суміші була приблизно у 2–3 рази більшою, ніж для сухої суміші [12].

Натурні експериментальні дослідження проведено у Шрі-Ланці. З'ясовувалась можливість використання біополімеру ксантанової камеді як матеріалу для стабілізації ґрунту під час будівництва узбіччя дороги. Порівняно зміцнювальний ефект ксантанової камеді зі звичайним цементом, сумішшю золи-виносу та шлаку.

З'ясовано, що ґрунт, оброблений ксантановою камеддю, мав значно кращі показники, ніж інші в'язучі. Також визначено, що ґрунт, оброблений ксантановою камеддю, мав вищу пластичність, ніж, оброблений цементними в'язучими [13]. У ході досліджень отримано

оптимальну концентрацію ксантанової камеді – 2 %, яка відповідає критеріям для стабілізованої основи дорожнього одягу на узбіччі, а також проектним умовам майже всіх розвинених країн [13].

У США проведено порівняльні дослідження щодо ефективності застосування біополімерів і їх концентрації у суміші. Дослідження проводились із п'ятьма видами біополімерів: ксантанова камедь, бета-глюкан, гуарова камедь, хітозан та альгінат. З'ясовано, що найкращі результати показали ксантанова камедь, бета-глюкан та гуарова камедь. Додавання біополімерів нелінійно збільшує модуль Юнга (модуль пружності, E) ґрунту. Оптимальна концентрація біополімеру змінюється залежно від його типу. Також з'ясовано, що оптимальна концентрація ксантанової камеді становить 2 %, а гуарової камеді – 1 % [14].

**Мета статті** – аналіз зарубіжного досвіду застосування ефективних і екологічних матеріалів для закріплення і підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів та обґрунтування доцільності їх використання в умовах України на основі виконаних лабораторних досліджень ґрунтів із додаванням вапна і біополімеру – ксантанової камеді.

**Результати.** Проведено дослідження щодо визначення оптимальної концентрації вапна для зміцнення ґрунтів у лабораторних умовах. Для цього підбрано склад ґрунтово-вапняного співвідношення. В основі всіх існуючих методик підбору складу ґрунтово-вапняної суміші лежить орієнтовне значення кількості вапна, яке коригується шляхом визначення якісних характеристик ґрунтово-вапняної суміші.

У США і Франції методики підбору складу ґрунтових сумішей різні. Основні розбіжності в методиках підборів складів головним чином стосуються методик лабораторних випробувань і визначення якісних характеристик, пов'язаних з оптимізацією ґрунтової суміші. Найбільший

досвід застосування ґрунтів, зміцнених вапном, мають США і Франція.

Результати досліджень вмісту вапна у ґрунтово-вапняній суміші від маси

глинистого ґрунту у різних країнах світу наведені в таблиці.

Таблиця

Аналіз вмісту вапна у ґрунтово-вапняній суміші

Конструктивний елемент автомобільної дороги	Вміст вапна у ґрунтово-вапняній суміші, % від маси глинистого ґрунту		
	США	Франція	Швеція
основа земляного полотна	5–8	4–5	8–10
тіло земляного полотна (автодорожнього насипу)	3–6	3–4	–
основа дорожнього одягу	2–4	2–4	–

Методика підбору складу ґрунтово-вапняної суміші США включає визначення мінімальної кількості вапна за допомогою тесту Eades і Grim [15]. Суть цього методу полягає в підборі мінімальної кількості вапна, за якої рН ґрунтово-вапняної суміші буде відповідати значенню 12,40.

На відміну від французької методики, цей метод дає змогу визначити необхідну кількість вапна з виготовленням мінімальної кількості зразків, що істотно спрощує процедуру підбору складу.

Якість ґрунтово-вапняної суміші оцінюється показниками:

- міцність на стиск зразків після 7 днів твердіння на повітрі за температури 40 °С і 24-годинного капілярного замочування;
- набухання  $G_v$ .

Згідно з методикою Франції мінімальна кількість вапна визначається виходячи з тієї кількості, за якої число пластичності ґрунтово-вапняної суміші істотно не зміниться. Якість ґрунтово-вапняної суміші для влаштування шарів основ визначається параметрами [16]:

– індекс  $IBI$ , який являє собою набір міцності зразків ґрунту, зміцненого вапном, у віці 90 хв (%);

–  $CBRSP$  – набір міцності  $CBR$ , зразків, ущільнених відповідно з методом Proctor і насичених водою протягом 4 діб;

- відношення  $CBRSP / IBI \geq 1,0$ ;

– набухання  $G_v$ , яке визначається після 168 годин витримки у воді за 40 °С;

– морозостійкість  $UCS$ , яка визначається як міцність на стиск після необхідної кількості циклів заморожування – відтавання, МПа.

Водостійкість  $I$ , яка визначається як міцність на стиск:

$$I = \frac{UCS_{(28+32i)}}{UCS_{(60)}} \geq 0,8, \quad (1)$$

де  $UCS (28 + 32i)$  – міцність на стиск циліндричних зразків, які після нормального твердіння у віці 28 діб були насичені водою протягом 32 діб (за  $20 \pm 2$  °С);  $UCS (60)$  – міцність на стиск циліндричних зразків нормального твердіння у віці 60 діб.

Таким чином, методика, прийнята в США, дозволяє встановити мінімальну кількість вапна на основі визначення рН і вважається найбільш перспективною, оскільки зменшує трудомісткість робіт під час підбору суміші.

Додавання меленого вапна у склад перезволожених глинистих ґрунтів викликає взаємодію з тонкодисперсною частиною ґрунту і зменшує його дисперсність, липкість, набухання й усадку, межі пластичності, а також посилює розмокання тощо. Зниження вологості перезволожених ґрунтів з умістом вапна відбувається внаслідок впливу таких факторів:

а) частина вологи у разі додавання в ґрунт вапна вступає в хімічну взаємодію з його активними компонентами і переходить

у твердий стан; кількість цієї вологи визначається за формулою:

$$W_{\text{хим}} = K_1 D, \quad (2)$$

де  $D$  – доза вапна в ґрунті, % від ваги його твердої фази;  $K_1$  – коефіцієнт, що характеризує активність вапна відносно води, для СаО,  $K_1 = 0,32$ ;

б) додавання у ґрунт вапна у вигляді сухого порошку збільшує вагу його сухої маси за рахунок додавання сухого матеріалу і за рахунок ваги хімічно зв'язаної окисом кальцію води; вологість ґрунтово-вапняної суміші з урахуванням цього фактора визначають за формулою:

$$W_{\text{суміш}} = \frac{W_{\text{гр}}}{1 + 0,01D(1+K)}, \quad (3)$$

де  $W_{\text{гр}}$  – природна вологість ґрунту, %;

в) у процесі гасіння вапна тепло, що виділяється, підвищує температуру ґрунту, тому випаровуваність вологи з оброблюваного шару збільшується.

Таким чином, величина зменшення вологості перезволоженого ґрунту за рахунок випаровування після додавання вапна залежить від коефіцієнта випаровування і дозування вапна, % від ваги сухого ґрунту  $D$  і може бути визначена за формулою:

$$W_{\text{вип}} = \alpha K_2 D, \quad (4)$$

де  $\alpha = 0,17 \dots 0,23$  – коефіцієнт випаровування за температури повітря 12–20 °С;

$$K_2 = (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}) / (t_{\text{е}} - t_{\text{в}}), \quad (5)$$

де  $t_{\text{г}}$  – максимальна температура гасіння вапна;  $t_{\text{е}}$  – температура вапна еталона під час гасіння;  $t_{\text{в}}$  – температура води перезволоженого ґрунту.

Все більше наукових експериментів наразі присвячено дослідженню застосування біополімерів як найбільш екологічних, для поліпшення властивостей ґрунтів. Найбільше досліджень проведено з ксантановою камедю [17; 18].

Ксантанова камедь – це полісахарид, який зазвичай використовується як харчова добавка і модифікатор реології. Він

виробляється шляхом ферментації глюкози або сахарози бактерією *Xanthomonas campestris*. У статичних умовах невелика кількість ксантанової камеді (у більшості продуктів – 0,5 %) викликає значне збільшення в'язкості рідини. Також, на відміну від інших камедей, ксантанова камедь демонструє високу стабільність у широкому діапазоні температур і рН [9].

Крім того, її аніонні та гідрофільні характеристики поверхні полегшують взаємодію з катіонами та іншими полісахаридами, що індукують сильніше гелеутворення. Ксантанова камедь широко застосовується в різних промислових галузях, включаючи харчову, фармацевтичну, нафтову та інші.

Ксантанова камедь має значний зміцнювальний ефект на ґрунти. Це зміцнення досягається за рахунок збільшення міжчастинкових зв'язків у ґрунті і, таким чином, збільшенням когезійних сил у ґрунті. У випадку оброблених ксантаном грубозернистих ґрунтів збільшення міцності в основному відбувається за рахунок ксантанової матриці, яка утворюється на поверхні і в пустотах ґрунтів; це зміцнення дуже залежить від міцності самої ксантанової камеді. Ця ксантанова матриця збільшує жорсткість і робить ґрунт більш крихким, оскільки ґрунт твердіє.

З іншого боку, більша частина міцності дрібнозернистих ґрунтів, оброблених *Xanthan*, походить від водневого або електростатичного зв'язку між мономерами ксантану та дрібнодисперсними частинками ґрунту. Пряма взаємодія між ксантановою камеддю і глинистим ґрунтом утворює міцні біополімерно-ґрунтові матриці, які діють як цементні в'язучі речовини між частинками ґрунту таким чином, що зміцнення стає максимальним.

Ефект зміцнення ґрунту з умістом ксантанової камеді нелінійно зростає і вирівнюється за невеликого збільшення концентрації ксантанової камеді. Але слід уникати високого вмісту цього матеріалу через вартість та технологічність

(наприклад, високу в'язкість, що погіршує змішування).

Найбільш економічною та ефективною концентрацією ксантанової камеді для обробки ґрунту виявляється концентрація приблизно 1–4 %.

Враховуючи відсутність негативних наслідків із погляду довговічності, а також наявність екологічно чистих властивостей, ксантанова камедь може бути рекомендована як життєздатний матеріал для поліпшення ґрунту, а також у сфері впровадження технології біоґрунту.

Світова популярність застосування біополімерів для поліпшення характеристик ґрунту постійно зростає, але поки ще немає чіткої методики їх застосування. Дослідження в цьому напрямку продовжуються.

Ми провели дослідження щодо застосування ксантанової камеді і вапна для підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів м'якопластичної консистенції. Експерименти виконували у компресійному приладі з глинистими ґрунтами з різним показником текучості ґрунту  $IL = 0,51–0,71$ . Вміст вапна і ксантанової камеді приймався 2–4 %. Результати експериментів показано на рисунках 1–5.

Дослідження деформацій слабого водонасиченого глинистого ґрунту з показником текучості  $IL = 0,51$  показали, що у разі додавання 2 % вапна деформації зменшуються на 34 %, а за вмісту 4 % вапна – на 54 %. За додавання ксантанової камеді 2 % деформації глини зменшуються на 70 %, а за вмісту 4 % – на 78 %.

У дослідженнях слабого водонасиченого глинистого ґрунту з показником текучості  $IL = 0,64$  виявлено, що за додавання 2 % вапна деформації зменшуються на 25 %, а 4 % вапна – на 40 %. У разі додавання ксантанової камеді 2 % деформації зменшуються на 56 %, а за 4 % – на 64 %.

За збільшення показника текучості слабого водонасиченого глинистого ґрунту до  $IL = 0,71$  в ході досліджень виявлено, що

у разі додавання 2 % вапна деформації зменшуються на 20 %, а за його вмісту 4 % – на 33 %. За додавання ксантанової камеді 2 % деформації зменшуються на 47 %, а за її вмісту 4 % – на 55 %.

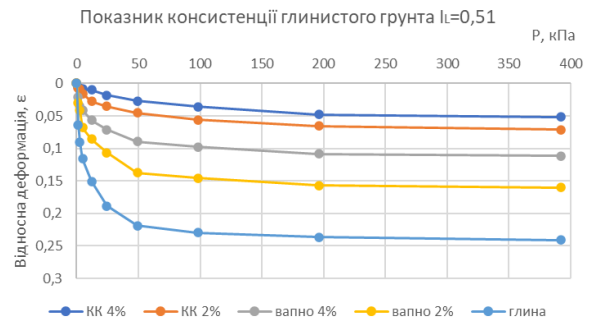


Рис. 1. Результати досліджень глинистого ґрунту з показником текучості  $IL = 0,51$  з додаванням ксантанової камеді 2 і 4 % та вапна 2 і 4 %

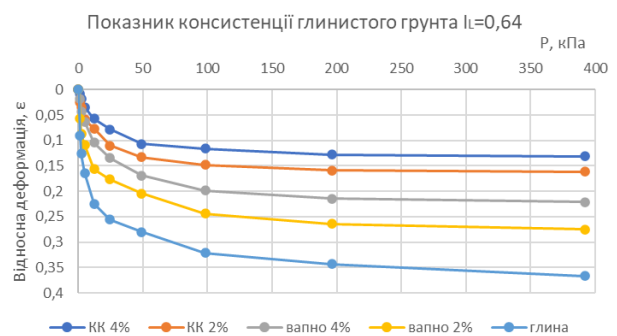


Рис. 2. Результати досліджень глинистого ґрунту з показником текучості  $IL = 0,64$  з додаванням ксантанової камеді 2 і 4 % та вапна 2 і 4 %

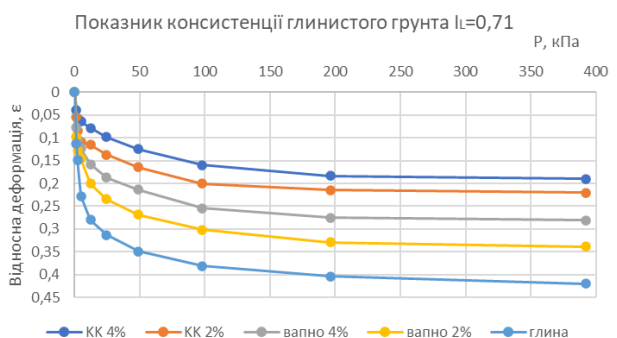


Рис. 3. Результати досліджень глинистого ґрунту з показником консистенції  $IL = 0,71$  з додаванням ксантанової камеді 2 і 4 % та вапна 2 і 4 %

Як показують дослідження, збільшення концентрації вапна з 2 до 4 % зумовлює зменшення деформацій приблизно в 1,6 раза. Що стосується підвищення концентрації ксантанової камеді з 2 до 4 %, деформації зменшуються в 1,1–1,3 раза. Таким чином, з'ясовано, що збільшення

концентрації ксантанової камеді не суттєво впливає на величину відносної деформації ґрунту.

Порівнянням якості стабілізуючої добавки до глинистого ґрунту з показником консистенції  $IL = 0,51$  з'ясовано що ефективність додавання ксантанової камеді 2 % порівняно з вапном 2 % майже вдвічі вища. За  $IL = 0,64$  деформації зменшуються в 1,7 раза, а при  $IL = 0,71$  – в 1,5 раза.

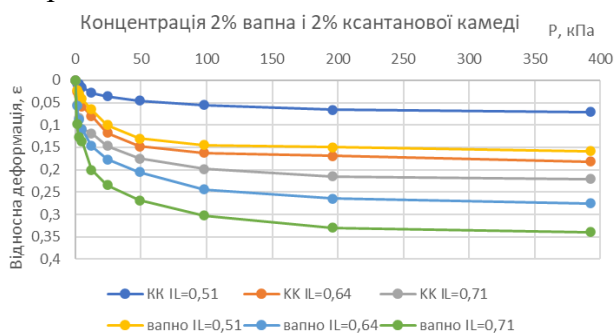


Рис. 4. Результати досліджень глинистого ґрунту з показниками текучості 0,51; 0,64; 0,71 з додаванням вапна 2% і ксантанової камеді 2%

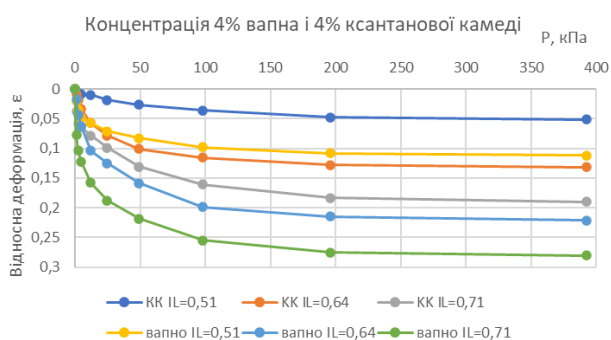


Рис. 5. Результати досліджень глинистого ґрунту з показниками текучості 0,51; 0,64; 0,71 з додаванням вапна 4% і ксантанової камеді 4%

Аналіз концентрації ксантанової камеді 4 % порівняно з вапном 4 % для глинистих ґрунтів із показником текучості  $IL = 0,51$  показав, що деформації зменшуються майже

вдвічі; для  $IL = 0,64$  – в 1,8 раза; для  $IL = 0,71$  – в 1,6 раза.

## Висновки

1. Виконано аналіз зарубіжних методик щодо застосування вапна і біополімерів для зміцнення і підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів. Проаналізовано дослідження щодо підбору концентрації вапна і біополімерів у ґрунтовій суміші.

2. З'ясовано, що стабілізація деформацій слабких водонасичених глинистих ґрунтів відбувається дуже повільно і може займати кілька десятків років. Додавання вапна і біополімерів дозволяє значно стабілізувати осідання цих ґрунтів у більш короткий термін.

3. Виконані лабораторні експериментальні дослідження зі слабкими водонасиченими глинистими ґрунтами з різним показником текучості ґрунту  $IL$  і вмістом вапна 2–4 % та ксантанової камеді 2–4 % показали значне зменшення деформацій. Найбільший ефект застосування біополімеру отримано для ґрунту з показником консистенції  $IL = 0,51$ . Але це пов'язано з однаковим часом твердіння ґрунтової суміші різної консистенції. Якщо для  $IL = 0,71$  збільшити час твердіння суміші, то ефект застосування біополімеру буде значно вищим.

**Перспективи.** Ефективність застосування біополімерів для поліпшення властивостей ґрунтів, особливо глинистих, не викликає сумніву. Але ще потрібні дослідження щодо підбору оптимальної концентрації біополімеру та часу твердіння суміші. Враховуючи те, що більшу частину України займають глинисті ґрунти, їх посилення біополімерами є перспективним напрямком досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Проект Плану відновлення України : матер. роб. гр. «Відновлення та розбудова інфраструктури». Національна рада з відновлення України від наслідків війни. 2022. 178 с. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>
2. Yuliia Balashova, Viktor Demianenko, Nataliia Tkach, Hennadii Karasev. Ensuring the sustainability of the roadbeds in the zones of the underground mine works. Scopus, ISSN: 25550403. DOI: 10.1051/e3sconf/201912301041. Vol. 123. EDP Sciences, 2019. Pp. 01041. 13 p. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211522441&eid=2-s2.0-85074287353>



3. Солодкий С. Й., Топилко Н. І., Турба Ю. В., Гримак О. Я., Новицький Ю. Л. Оптимізація складу цементогрунту з метою підвищення його фізико-механічних показників. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. 2018. С. 199–205. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/may/12259/31165.pdf>
4. Bell F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. *ELSEVIER : Engineering Geology*. Vol. 42. 1996. Pp. 223–237. URL: [https://www.academia.edu/2006280/Lime\\_stabilization\\_of\\_clay\\_minerals\\_and\\_soils](https://www.academia.edu/2006280/Lime_stabilization_of_clay_minerals_and_soils)
5. Sudhakar M. R., Shivananda P. Compressibility behaviour of lime-stabilized clay. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2005. Vol. 23 (3). Pp. 309–319. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-004-1608-2> URL: [https://www.researchgate.net/publication/227226920\\_Compressibility\\_behaviour\\_of\\_lime-stabilized\\_clay](https://www.researchgate.net/publication/227226920_Compressibility_behaviour_of_lime-stabilized_clay)
6. Russell L. Buhler, Amy B. Cerato. Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and class c fly ash. *GeoDenver : New Peaks in Geotechnics. GSP 162 : Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization*. Denver. CO. Feb. 18–21, 2007. CD Proceedings. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.561.6106&rep=rep1&type=pdf>
7. Yunus N. Z. M, Wanatowski D. Shear strength and compressibility behaviour of lime-treated organic clay. *KSCCE Journal of Civil Engineering*. 2016. Vol. 20 (5). Pp. 1721–1727. ISSN 1226-7988. URL: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0438-5>; URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-015-0438-5>
8. Manoharan A. K., Kulanthaivel P. Strength Behaviour of Clay Soil Stabilized With Lime. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 961 (1). Pp. 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/961/1/012003. URL: [https://www.researchgate.net/publication/346802448\\_Strength\\_Behaviour\\_of\\_Clay\\_Soil\\_Stabilized\\_With\\_Lime](https://www.researchgate.net/publication/346802448_Strength_Behaviour_of_Clay_Soil_Stabilized_With_Lime)
9. Vivek Kumar. Xanthan gum: introduction, structure, applications and production. January 3, 2021. URL: <https://microbiologynotes.org/xanthan-gum-introduction-structure-applications-and-production/>
10. Chandravanshi G., Jain S. K. Application of xanthan gum biopolymer for treatment of expansive soil : a review. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. E-ISSN: 2395-0056. Vol. 08, iss. 07. July 2021. URL: [www.irjet.net](http://www.irjet.net) p-ISSN: 2395-0072; URL: <https://www.irjet.net/archives/V8/i7/IRJET-V8I7472.pdf>
11. Chang I., Im J., Prasadhi A. K., Cho G-C. Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. *ELSEVIER: Construction and Building Materials*. Vol. 74. 2015. Pp. 65–72. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026>; URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814011702>
12. Ayeldeen M., Negm A., El-Sawwaf M., Kitazume M. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Vol. 9. 2017. Pp. 329–339. Elsevier: URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.007>; URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775516302736?via%3Dihub>
13. Lee S., Chung M., Park H. M., Song K., Chang I. Xanthan Gum Biopolymer as Soil-Stabilization Binder for Road Construction Using Local Soil in Sri Lanka. August 2019. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 31 (11). Pp. 06019012-1. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002909. URL: [https://www.researchgate.net/publication/335393440\\_Xanthan\\_Gum\\_Biopolymer\\_as\\_Soil-Stabilization\\_Binder\\_for\\_Road\\_Construction\\_Using\\_Local\\_Soil\\_in\\_Sri\\_Lanka](https://www.researchgate.net/publication/335393440_Xanthan_Gum_Biopolymer_as_Soil-Stabilization_Binder_for_Road_Construction_Using_Local_Soil_in_Sri_Lanka)
14. Soldo A., Miletić M., Auad M. L. Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. *Scientific Reports*. Vol. 10. Article number: 267. 2020. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57135-x>; URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-57135-x#citeas>
15. ASTM D6276-19. 2019. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. URL: <https://www.astm.org/d6276-19.html>
16. NF EN 459-1. 2015. Norme Envigueur Chaux de construction. Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité. URL: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-4591/chaux-de-construction-partie-1-definitions-specifications-et-criteres-de-co/fa183246/45742>
17. S. P. Singh and R. Das. 2019. Geoenvironmental properties of expansive soil treated with Xanthan Gum biopolymer. *Geomechanics and Geoengineering*. Vol. 15. Pp. 107–122. URL: <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1632495>
18. Chang I., Lee M., Tran A. T. P., Lee S., Kwon Y-M., Im J., Cho G-C. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices. *ELSEVIER : Transportation Geotechnics*. Vol. 24. 2020. Pp. 100385. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100385>; URL: [https://www.researchgate.net/publication/342073899\\_Review\\_on\\_biopolymer-based\\_soil\\_treatment\\_BPST\\_technology\\_in\\_geotechnical\\_engineering\\_practices](https://www.researchgate.net/publication/342073899_Review_on_biopolymer-based_soil_treatment_BPST_technology_in_geotechnical_engineering_practices)

## REFERENCES

1. *Proekt Planu vidnovlennia Ukrainy* [Draft Recovery Plan for Ukraine.] *Materialy robochoi hrupy "Vidnovlennia ta rozbudova infrastruktury"* [Materials of the working group "Restoration and Development of Infrastructure"]. National Council for the Restoration of Ukraine from the Consequences of War, 2022, 178 p. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf> (in Ukrainian)

2. Yuliia Balashova, Viktor Demianenko, Nataliia Tkach and Hennadii Karasev. Ensuring the sustainability of the roadbeds in the zones of the underground mine works. Scopus, ISSN: 25550403. DOI: [10.1051/e3sconf/201912301041](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301041). Vol. 123. EDP Sciences, 2019, pp. 01041, 13 p. URL: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211522441&eid=2-s2.0-85074287353>
3. Solodkyi S.I., Topylko N.I., Turba Yu.V., Hrymak O.Ia. and Novytskyi Yu.L. *Optymizatsiia skladu tsementohruntu z metoiu pidvyschennia yoho fizyko-mekhanichnykh pokaznykiv* [Optimization of cement soil composition to improve its physical and mechanical properties]. Visnyk NU "Lvivska politekhnika" [Bulletin of Lviv Polytechnic National University]. 2018, pp. 199–205. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/may/12259/31165.pdf> (in Ukrainian)
4. Bell F.G. Lime stabilization of clay minerals and soils. ELSEVIER : Engineering Geology. Vol. 42, 1996, pp. 223–237. URL: [https://www.academia.edu/2006280/Lime\\_stabilization\\_of\\_clay\\_minerals\\_and\\_soils](https://www.academia.edu/2006280/Lime_stabilization_of_clay_minerals_and_soils)
5. Sudhakar M.R. and Shivananda P. Compressibility behaviour of lime-stabilized clay. Geotechnical and Geological Engineering. 2005, vol. 23 (3), pp. 309–319. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-004-1608-2>; URL: [https://www.researchgate.net/publication/227226920\\_Compressibility\\_behaviour\\_of\\_lime-stabilized\\_clay](https://www.researchgate.net/publication/227226920_Compressibility_behaviour_of_lime-stabilized_clay)
6. Russell L. Buhler and Amy B. Cerato. Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and class c fly ash. GeoDenver : New Peaks in Geotechnics. GSP 162 : Problematic Soils and Rocks and In Situ Characterization. Denver, CO, Feb. 18–21, 2007. CD Proceedings. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.561.6106&rep=rep1&type=pdf>
7. Yunus N.Z.M. and Wanatowski D. Shear strength and compressibility behaviour of lime-treated organic clay. KSCE Journal of Civil Engineering. 2016, vol. 20 (5), pp. 1721–1727. ISSN 1226-7988. URL: <https://doi.org/10.1007/s12205-015-0438-5>; URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12205-015-0438-5>
8. Manoharan A.K. and Kulanthaivel P. Strength Behaviour of Clay Soil Stabilized With Lime. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. Vol. 961 (1), pp. 012003, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/961/1/012003. URL: [https://www.researchgate.net/publication/346802448\\_Strength\\_Behaviour\\_of\\_Clay\\_Soil\\_Stabilized\\_With\\_Lime](https://www.researchgate.net/publication/346802448_Strength_Behaviour_of_Clay_Soil_Stabilized_With_Lime)
9. Vivek Kumar. Xanthan gum: introduction, structure, applications and production. January 3, 2021. URL: <https://microbiologynotes.org/xanthan-gum-introduction-structure-applications-and-production/>
10. Chandravanshi G. and Jain S.K. Application of xanthan gum biopolymer for treatment of expansive soil : a review. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). e-ISSN: 2395-0056, vol. 08, iss. 07, July 2021. URL: [www.irjet.net](http://www.irjet.net) p-ISSN: 2395-0072; URL: <https://www.irjet.net/archives/V8/i7/IRJET-V8I7472.pdf>
11. Chang I., Im J., Prasidhi A.K. and Cho G-C. Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. ELSEVIER: Construction and Building Materials. Vol. 74, 2015, pp. 65–72. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026>; URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814011702>
12. Ayeldeen M., Negm A., El-Sawwaf M. and Kitazume M. Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Vol. 9, 2017, pp. 329–339. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.11.007>; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775516302736?via%3Dihub>
13. Lee S., Chung M., Park H.M., Song K. and Chang I. Xanthan Gum Biopolymer as Soil-Stabilization Binder for Road Construction Using Local Soil in Sri Lanka. August 2019. Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 31 (11), pp. 06019012-1. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002909; URL: [https://www.researchgate.net/publication/335393440\\_Xanthan\\_Gum\\_Biopolymer\\_as\\_Soil-Stabilization\\_Binder\\_for\\_Road\\_Construction\\_Using\\_Local\\_Soil\\_in\\_Sri\\_Lanka](https://www.researchgate.net/publication/335393440_Xanthan_Gum_Biopolymer_as_Soil-Stabilization_Binder_for_Road_Construction_Using_Local_Soil_in_Sri_Lanka)
14. Soldo A., Miletic M. and Auad M. L. Biopolymers as a sustainable solution for the enhancement of soil mechanical properties. Scientific Reports. Vol. 10, art. no. 267, 2020. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57135-x>; URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-57135-x#citeas>
15. ASTM D6276-19. 2019. Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization. URL: <https://www.astm.org/d6276-19.html>
16. NF EN 459-1. 2015. Norme Envigueur Chaux de construction – Partie 1 : définitions, spécifications et critères de conformité. URL: <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-4591/chaux-de-construction-partie-1-definitions-specifications-et-criteres-de-co/fa183246/45742>
17. S.P. Singh and R. Das. 2019. Geoengineering properties of expansive soil treated with Xanthan Gum biopolymer. Geomechanics and Geoengineering. Vol. 15, pp. 107–122. URL: <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1632495>
18. Chang I., Lee M., Tran A.T.P., Lee S., Kwon Y-M., Im J. and Cho G-C. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology ingeotechnical engineering practices. ELSEVIER : Transportation Geotechnics 24. 2020, pp. 100385. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100385>; URL: [https://www.researchgate.net/publication/342073899\\_Review\\_on\\_biopolymer-based\\_soil\\_treatment\\_BPST\\_technology\\_in\\_geotechnical\\_engineering\\_practices](https://www.researchgate.net/publication/342073899_Review_on_biopolymer-based_soil_treatment_BPST_technology_in_geotechnical_engineering_practices)

Надійшла до редакції: 20.06.2023.