



KAPITEL 6 / CHAPTER 6 ⁶

ENHANCING THE BEARING CAPACITY OF SOFT CLAY SUBGRADES OF ROADS BY USING LIME AND XANTHAN GUM

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-33-00-007

Вступ.

Постановка проблеми. Для відновлення і розвитку інфраструктури України, ліквідації наслідків руйнувань, пов'язаних із бойовими діями, і у 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 знаходяться в 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 за допомогою застосування геосинтетичних матеріалів [2], а також додаванням вапна або біополімерів [3]. У всьому світі триває пошук найбільш ефективних і екологічних матеріалів для закріплення слабких ґрунтів, які в природному стані не можливо використовувати у якості основи під земляне полотно автомобільних доріг або інших об'єктів транспортної інфраструктури. Бо, заміна таких ґрунтів призводить до 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 військові дії в Україні завдали прямої серйозної шкоди автомобільним дорогам. З початку повномасштабного вторгнення в Україні було зруйновано близько 25 тисяч кілометрів доріг. Наразі стан утримання дорожньої мережі став надзвичайно важким. Велика кількість автодоріг районного та міського значення в країні вже відслужили свій нормативний термін, а під час

⁶*Authors: Balashova Yuliia Borysivna*



війни ще додалося навантаження від проходження військових колон. Тому, головним завданням є забезпечення безперервного і безперешкодного руху транспорту, а також безперервної доставки гуманітарної та військової допомоги в міста та села. Отже, зараз для України потрібне: 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 знаходиться під впливом динамічного і хвильового навантаження. Враховуючи те, що 70% площі України займають глинисті ґрунти, дослідження підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів є актуальним на сьогоднішній день.

6.1. Загальний огляд.

Аналіз публікацій. У більшості з раніше виконаних зарубіжних і вітчизняних досліджень для зміцнення глинистих ґрунтів у якості в'язучого використовували вапно або цемент. 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, і тому вважається не екологічним.

Під час будівництва будівель і споруд на слабких природних ґрунтах, таких як торф, мул, глинисті ґрунти в м'якопластичному або текучо-пластичному стані, доводиться проводити комплекс заходів для поліпшення їхніх природних властивостей. В процесі поліпшення природних властивостей ґрунтів відбувається зміна їх природних властивостей шляхом введення в'язучих матеріалів з метою підвищення міцності ґрунтів, зменшення стисливості та водопроникності. Процес стабілізації ґрунтів залежить від багатьох факторів, головними з яких є: вид ґрунту, вид в'язучого та активізаторів, технологія змішування.



Проведені дослідження щодо якості стабілізації ґрунта з водонасиченою каолінітовою і монтморилонітовою глиною показали покращення коефіцієнта несучої здатності за Каліфорнійською шкалою при додаванні вапна. Також було зафіксовано збільшення міцності та модуля Юнга у зразках ґрунту, коли вони були оброблені вапном [4].

Дослідження в штаті Оклахома показали, що більшість природних ґрунтів спричиняють сезонні пошкодження доріг та споруд. Додавання вапна або летючої золи допомагає зупинити усадку і набухання [5].

Іншим перспективним напрямком покращення властивостей слабких водонасичених ґрунтів на сьогоднішній день є застосування біополімерів.

Багато біополімерів використовуються у якості стабілізаторів ґрунту для покращення механічної поведінки слабких ґрунтів. Найбільш розповсюджені це – ксантанова камедь [6], бета-глюкан та агарова камедь [7].

Порівняльні дослідження щодо використання цементу і ксантанової камеді були проведені у Кореї [8]. Автори виявили, що суміш ґрунту з 1% ксантанової камеді має вищу міцність на стиск, ніж ґрунт оброблений цементом 10%. В результаті досліджень було з'ясовано, що зміцнюючий ефект ксантанової камеді залежить від чотирьох факторів: типу ґрунту, рівня гідратації (вмісту води), вмісту ксантанової камеді та методу змішування.

Найбільша кількість зарубіжних досліджень проведена з ксантановою і гуаровою камедями, завдяки їх стабільній поведінці в суворих умовах та розумним цінам. У Японії та Єгипті були проведені експериментальні дослідження трьох основних властивостей ґрунтової суміші з біополімерами, а саме: характеристик ущільнення, потенціалу руйнування та параметрів зсуву. Результати експериментів показали, що як ксантанова, так 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 в 2-3 рази більшою, ніж для сухої суміші [9].

Натурні експериментальні дослідження були проведені у Шрі-Ланці.



З'ясовувалась можливість використання біополімеру ксантанової камеді як матеріалу для стабілізації ґрунту для будівництва узбіччя дороги. Було порівняно зміцнювальний ефект ксантанової камеді зі звичайним цементом, сумішшю золи-виносу та шлаку. Було з'ясовано, що ґрунт, оброблений ксантановою камеддю, мав значно кращі показники, ніж інші в'язучі. Також було визначено, що ґрунт, оброблений ксантановою камеддю мав вищу пластичність, ніж ґрунт, оброблений цементними в'язучими [10]. В ході досліджень була отримана оптимальна концентрація ксантанової камеді - 2%, яка відповідає критеріям для стабілізованої основи дорожнього одягу на узбіччі, а також проектним умовам майже всіх розвинених країн [10].

В США були проведені порівняльні дослідження щодо ефективності застосування біополімерів і їх концентрації у суміші. Дослідження проводились з 5 видами біополімерів: ксантанова камедь, бета-глюкан, гуарова камедь, хітозан та альгінат. В ході досліджень було 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. В ході експериментальних досліджень з'ясовано, що оптимальна концентрація ксантанової камеді становить – 2%, а гуарової камеді – 1% [11].

Мета досліджень – 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 з додаванням вапна і біополімеру – ксантанової камеді.

6.2. Методи досліджень.

Проведені дослідження щодо визначення оптимальної концентрації вапна для зміцнення ґрунтів у лабораторних умовах. Для цього проводився підбір



складу 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.

В США і Франції методики підбору складу ґрунтових сумішей відрізняються. 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, укріплених вапном, мають США і Франція.

Результати досліджень вмісту вапна у ґрунтово-вапняній суміші від маси глинистого ґрунту у різних країнах світу представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - 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	-

Проаналізуємо методику США. Методика підбору складу ґрунтово-вапняної суміші США включає в себе визначення мінімальної кількості вапна за допомогою тесту Eades і Grim [12]. Суть цього методу заключається 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 при температурі 40°C і 24-годинного капілярного замочування;



- Набрякання G_v .

Проаналізуємо методику Франції. Згідно цієї методики мінімальна кількість вапна визначається виходячи з цієї кількості, за якої число пластичності ґрунтово-вапняної суміші істотно не зміниться. Якість ґрунтово-вапняної суміші для влаштування шарів основ визначається параметрами [13]:

- Індексом IBI , який являє собою набір міцності зразків ґрунту, укріпленого вапном, у 90-хв. віці, %.

- CBR_{SP} - набір міцності CBR , зразків, ущільнених відповідно до методу Proctor і насичених водою протягом 4 діб;

Відношення: $CBR_{SP} / IBI \geq 1,0$.

- Набухання G_v , яке визначається після 168 годин витримки у воді при $40^\circ C$.

- Морозостійкість UCS , яка визначається як міцність на стиск після необхідної кількості циклів заморожування-відтавання, МПа.

- Водостійкість I , яка визначається як міцність на стиск як

$$I = \frac{UCS_{(28+32i)}}{UCS_{(60)}} \geq 0.8 \quad (1)$$

де $UCS_{(28+32i)}$ - міцність на стиск циліндричних зразків, які після нормального твердіння у віці 28 діб, були насичені водою протягом 32 діб (при $20 \pm 2^\circ C$);

$UCS_{(60)}$ - 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 pH і є найбільш перспективною, оскільки зменшує трудомісткість робіт при підборі складу.

Додавання меленого вапна до складу перезволожених глинистих ґрунтів призводить до взаємодії з тонкодисперсною частиною ґрунту і зменшує його дисперсність, липкість, набрякання і усадку, межі пластичності, а також підвищує розмокання тощо. Зниження вологості перезволожених ґрунтів при



вмісті вапна відбувається внаслідок впливу таких факторів:

а) частина вологи при додаванні в ґрунт вапна вступає в хімічну взаємодію з його активними компонентами і переходить у твердий стан; кількість цієї вологи визначається за формулою:

$$W_{\text{хім}} = K_1 D, \quad (2)$$

де D – доза вапна в ґрунті, % від ваги його твердої фази;

K_1 – коефіцієнт, що характеризує активність вапна по відношенню до води, для CaO , $K_1 = 0,32$.

б) додавання в 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 фактору 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 $12-20^\circ\text{C}$;

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



де t_r - максимальна температура гасіння вапна; t_e - температура вапна еталона під час гасіння; t_b - температура води перезволоженого ґрунту.

Все більше наукових експериментів на теперішній час присвячено дослідженню застосування біополімерів, як найбільш екологічних, для поліпшення властивостей ґрунтів. Найбільша кількість досліджень проведена з ксантановою камедю [14, 15].

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 в широкому діапазоні температур і рН [7]. Крім того, її аніонні та гідрофільні характеристики поверхні полегшують взаємодію з катіонами та іншими полісахаридами, що індукують сильніше гелеутворення. Ксантанова камедь має широке застосування 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 порожнинах 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 камедю і глинистим ґрунтом утворює міцні біополімерно-ґрунтові матриці, які діють як цементні в'язучі речовини між частинками ґрунту таким чином, що зміцнення є максимальним.



Ефект зміцнення ґрунту з вмістом ксантанової камеді нелінійно зростає і вирівнюється при невеликому збільшенні концентрації ксантанової камеді. Але, слід уникати високого вмісту ксантанової камеді через вартість матеріалу та технологічність (наприклад, високої в'язкості, що призводить до поганого змішування). Найбільш економічною та ефективною концентрацією ксантанової камеді для обробки ґрунту, виявляється концентрація приблизно 1-4%.

Враховуючи відсутність негативних наслідків з точки зору 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 що немає чіткої методики їх застосування. Дослідження в цьому напрямку продовжуються.

6.3. Результати лабораторних досліджень.

Нами були проведені дослідження щодо застосування ксантанової камеді і вапна для підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів м'якопластичної консистенції. Експериментальні дослідження проводились у компресійному приладі з глинистими ґрунтами з різним показником текучості ґрунта $I_L = 0,51-0,71$. Вміст вапна і ксантанової камеді приймався 2-4%. Результати експериментальних досліджень представлені на графіках 1-5.

Дослідження деформацій слабого водонасиченого глинистого ґрунту з показником текучості $I_L = 0,51$ показали, що при додаванні 2 % вапна, деформації зменшуються на 34 %, а при вмісті 4 % вапна - на 54 %. При додаванні ксантанової камеді 2% деформації глини зменшуються на 70%, а при вмісті 4% ксантанової камеді - на 78 %.

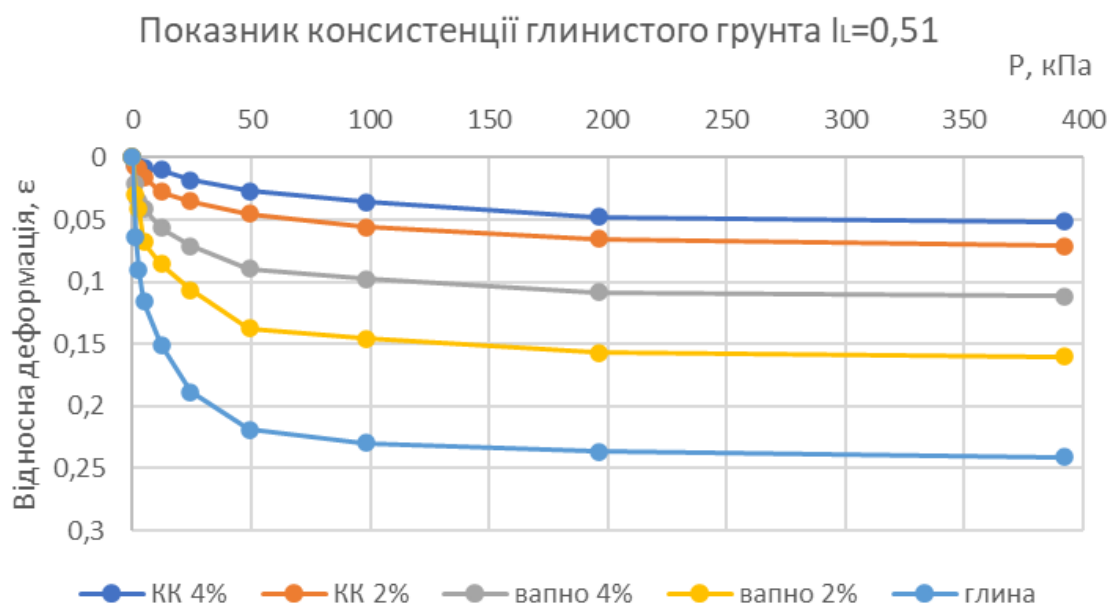


Рисунок 1 - Результати досліджень глинистого ґрунта з показником $I_L = 0,51$ з додаванням ксантанової камеді 2% і 4% і вапна 2% і 4%

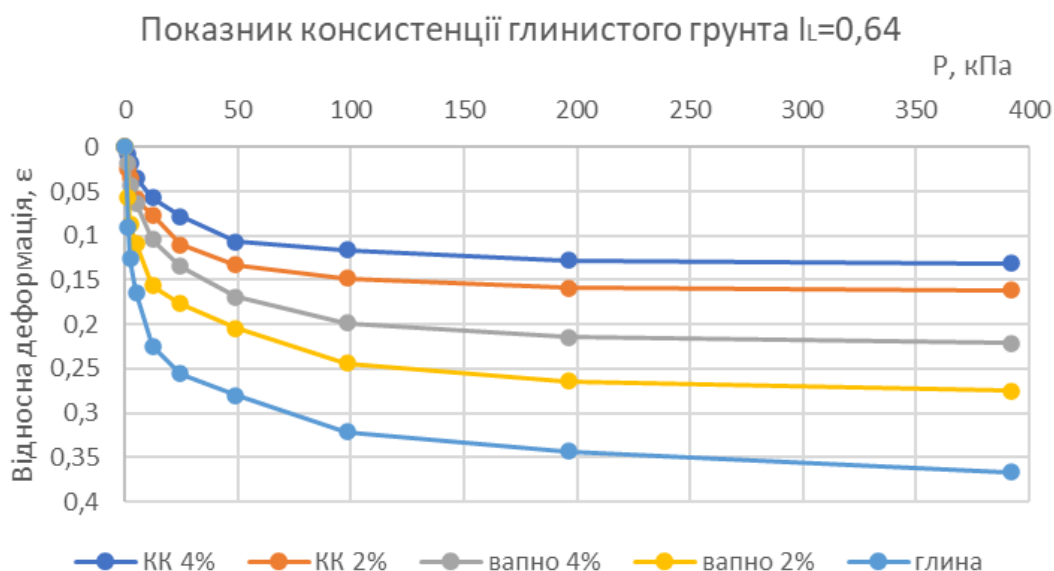


Рисунок 2 - Результати досліджень глинистого ґрунта з показником $I_L = 0,64$ з додаванням ксантанової камеді 2% і 4% і вапна 2% і 4%

При дослідженнях слабого водонасиченого глинистого ґрунта з показником текучості $I_L = 0,64$ було виявлено, що при додаванні 2 % вапна деформації зменшуються на 25 %, а 4 % вапна - на 40 %. При додаванні ксантанової камеді 2% деформації зменшуються на 56%, а при 4% ксантанової камеді - на 64 %.

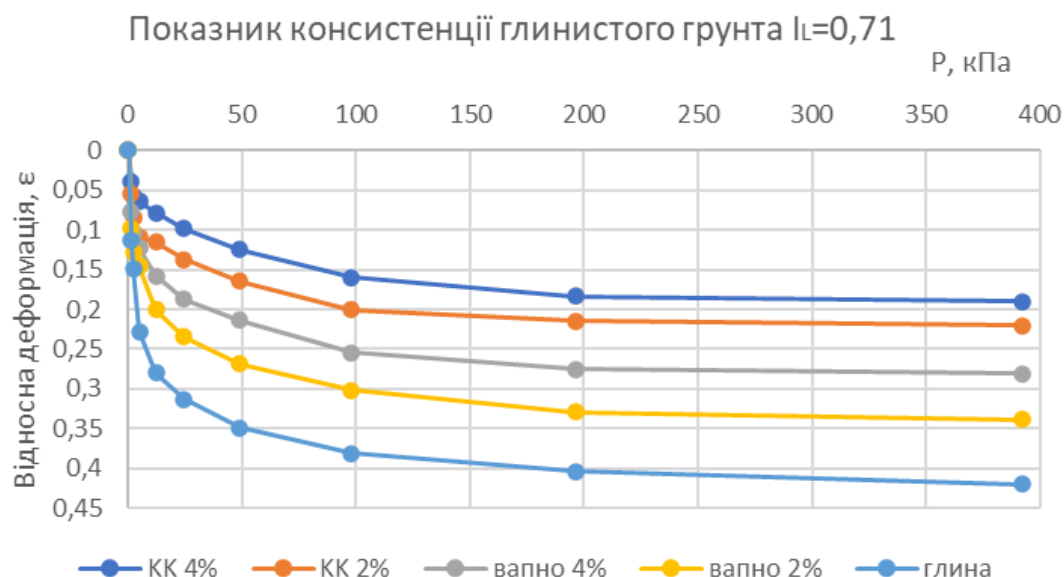


Рисунок 3 - Результати досліджень глинистого ґрунта з показником $I_L = 0,71$ з додаванням ксантанової камеді 2% і 4% і вапна 2% і 4%

При збільшенні показника текучості слабкого водонасиченого глинистого ґрунта до $I_L = 0,71$ в ході досліджень було виявлено, що при додаванні 2 % вапна деформації зменшуються на 20 %, а при вмісті 4 % вапна - на 33%. При додаванні ксантанової камеді 2% деформації зменшуються на 47%, а при вмісті 4% ксантанової камеді - на 55 %.

Як показують дослідження звеличення концентрації вапна з 2% до 4% призводить до зменшення деформацій приблизно в 1,6 раз. Що стосується звеличення концентрації ксантанової камеді з 2% до 4% то деформації зменшуються в 1,1-1,3 рази.

Таким чином, з'ясовано, що збільшення концентрації ксантанової камеді не суттєво впливає на величину відносної деформації ґрунта.

Якщо виконати порівняння по якості стабілізуючої добавки до глинистого ґрунта з показником консистенції $I_L = 0,51$, то ефективність додавання ксантанової камеді 2% у порівнянні з вапном 2 % майже в 2 рази вище. При $I_L = 0,64$ деформації зменшуються в 1,7 раз, а при $I_L = 0,71$ деформації зменшуються в 1,5 рази.

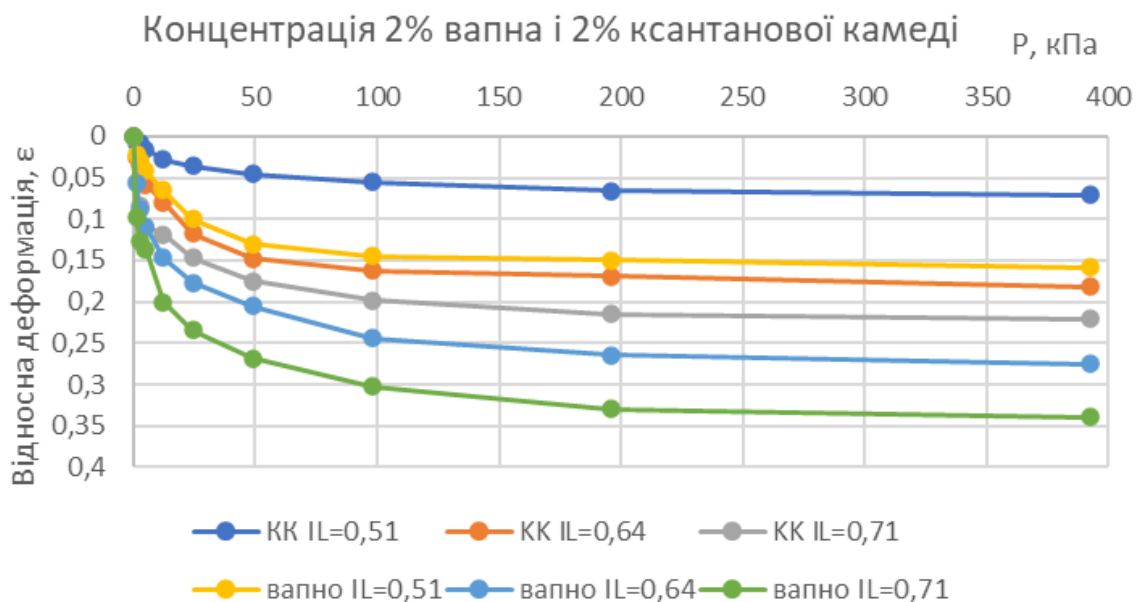


Рисунок 4 - Результати досліджень глинистого ґрунта з показниками текучості 0,51; 0,64; 0,71 з додаванням вапна 2% і ксантанової камеді 2%

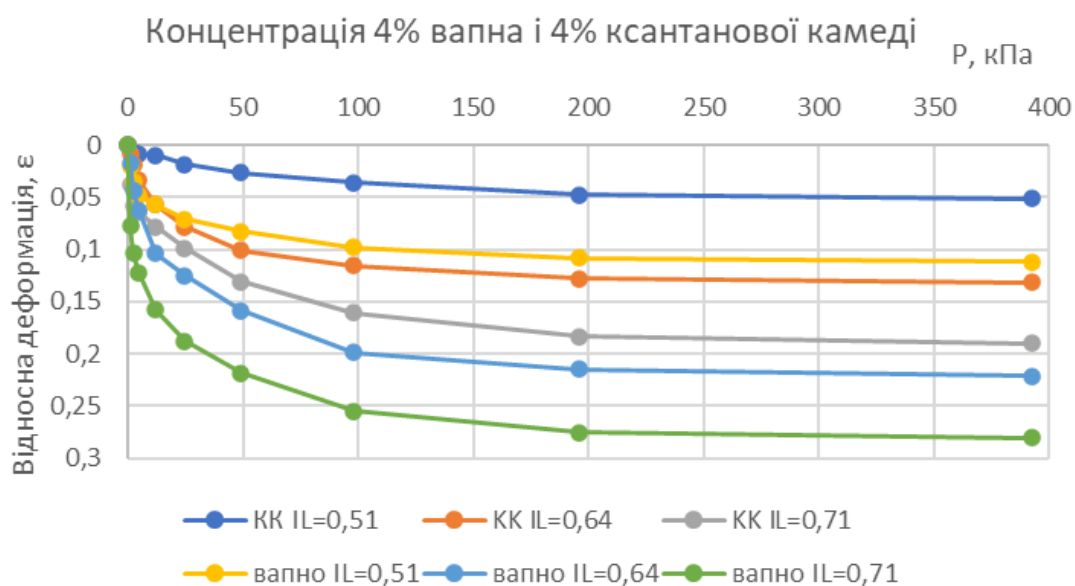


Рисунок 5 - Результати досліджень глинистого ґрунта з показниками текучості 0,51; 0,64; 0,71 з додаванням вапна 4% і ксантанової камеді 4%

Аналіз концентрації ксантанової камеді 4% у порівнянні з вапном 4 % для глинистих ґрунтів з показником текучості $I_L = 0,51$ показав, що деформації зменшуються майже в 2 рази; для $I_L = 0,64$ – в 1,8 раз; для $I_L = 0,71$ – в 1,6 раз.



Висновки.

1. Виконаний аналіз зарубіжних методик щодо застосування вапна і біополімерів для закріплення і підвищення несучої здатності слабких водонасичених глинистих ґрунтів. Проаналізовані 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 ґрунта I_L і вмістом вапна 2-4% та ксантанової камеді 2-4%, показали значне зменшення деформацій. Найбільший ефект застосування біополімеру отриманий для ґрунта з показником консистенції $I_L=0,51$. Але, це пов'язано з однаковим часом твердіння ґрунтової суміші різної консистенції. Якщо для $I_L=0,71$ збільшити час твердіння суміші, то ефект застосування біополімеру буде значно вище.

Перспективи. Ефективність застосування біополімерів для покращення 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.