

ЕФЕКТ ВІД ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛИ ВИНЕСЕННЯ ДЛЯ УЛАШТУВАННЯ ГРУНТОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. В даній роботі описано результати проведених експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу різного складу, який було виготовлено в лабораторних умовах за бурозмішувальною технологією за допомогою лабораторних приладів та математичних досліджень для чисельного моделювання напружено-деформованого стану системи «фундамент – армована основа» з використанням методу скінченних елементів.

Ключові слова: армуючий елемент; основа; ґрунтоцемент; мінеральна добавка; зола винесення; напружено-деформований стан.

Abstract. This paper describes the results of experimental studies to determine the physico-mechanical characteristics of soil cement of various composition, which was made in laboratory conditions by blending technology with the help of laboratory instruments and mathematical studies for numerical modeling of stress-strain state of the foundation-using finite element method.

Keywords: reinforcing element; basis; soil cement; mineral additive; ash removal; stress-strain state.

Вступ

Досить часто при будівництві будівель і споруд доводиться робити посилення ґрунту, так як ідеального немає, а основа для будь-якої споруди має відповідати всім вимогам міцності, стійкості і надійності.

Для зниження вартості фундаментів можливе використання ґрунтів, які залягають в основі об'єктів будівництва як матеріал для влаштування фундаментів. Істотно зміцнити ґрунт можливо за рахунок просочення його цементним розчином. Внаслідок цього отримують матеріал досить значної міцності - ґрунтоцемент.

ґрунтоцементні палі мають ряд переваг, які в окремих випадках можуть мати визначальне значення і виявитися найбільш оптимальним виходом.

До теперішнього часу при використанні ґрунтоцементних паль як армуючих елементів пропонувалось в якості вяжучого застосовувати лише цемент. Є окремі пропозиції щодо добавок у вигляді різних пластифікаторів, які пропонував аспірант Полтавського університету О. П. Новицький [1].

Однією з добавок до бетонних сумішей є зола винесення. Для бетонних сумішей добавка золи винесення показала позитивний результат. Тому в даній роботі розглядалась пропозиція заміни частини вяжучого у вигляді цементу на золу винесення. Такі дослідження були запропоновані вперше.

При цьому передбачено експериментальні дослідження властивостей ґрунтоцементу з додаванням золи винесення та математичні дослідження оптимального складу ґрунтоцементних паль на прикладі стрічкових фундаментів.

Мета дослідження – визначення впливу добавок золи винесення на властивості ґрунтоцементу та визначення оптимального складу суміші ґрунтоцементу з мінеральною добавкою з забезпеченням потрібних фізико-механічних характеристик.

Задачі дослідження:

- дослідити вплив мінеральної добавки, а саме золи винесення, на фізико-механічні властивості ґрунтоцементної суміші в лабораторних умовах;
- розробка моделі фундаменту в ґрунтовому середовищі, армованому ґрунтоцементними палями, за допомогою програмного комплексу «Плаксис»;
- аналіз впливу фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу на роботу системи армована

основа - фундамент;

- розробка рекомендацій для розрахунку основи, армованої ґрунтоцементними палями з додаванням золи виносення.

Характеристика використуваних матеріалів

Вихідними матеріалами для виготовлення ґрунтоцементу прийнято цемент, глинисті ґрунти, воду.

В якості в'язучого для виготовлення експериментальних зразків і їх дослідження використовувався цемент марки 400. Цемент виготовлений згідно з вимогами ДСТУ Б В. 2.7-46-96.

Для виготовлення досліджуваних зразків ґрунтоцементу був використаний ґрунт – суглинок лесований, жовто-коричневий, твердий, високопористий, карбонатний, просадочний.

Для ґрунту було визначено основні властивості, а саме:

- щільність ґрунту $\rho = 1,775 \text{ г/см}^3$;
- вологість ґрунту $W = 0,18$;
- вологість на межі розкочування $W_p = 0,175$;
- вологість на межі текучості $W_L = 0,24$.

Для приготування ґрунтоцементних зразків використовувалась вода гідрокарбонатно-кальцієва, слабомінералізована, слаболужна, показник рН = 8, яка не містить шкідливих домішок, що перешкоджає нормальному твердінню цементу.

В якості мінеральної добавки застосовуємо золу виносу Ладижинської ТЕС Вінницької області. Хімічний та мінералогічний склади відповідають основним вимогам, що висуваються до золи для бетонів.

Відсоток в'язучого у складі ґрунтоцементу за даними попередніх дослідників коливається в межах від 10 до 30 %. При дослідженнях цей відсоток прийнято сталим і таким що складає 20 %.

В роботі частина цементу замінювалась на золу виносення згідно з програмою, що наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Програма дослідження з витримуванням зразків у воді

№ п/п	Цемент, %	Цемент, гр	Зола, %	Зола, гр	Ґрунт, гр	Вода, гр
1	100	400	0	0	2000	330
2	80	320	20	80	2000	330
3	60	240	40	160	2000	330
4	40	160	60	240	2000	330
5	20	80	80	320	2000	330
6	100	400	0	0	2000	330
7	80	320	0	0	2000	330
8	60	240	0	0	2000	330
9	40	160	0	0	2000	330
10	20	80	0	0	2000	330

Виклад основного матеріалу дослідження

Випробування проводились згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 як для бетонів з урахуванням ДСТУ Б В.2.1-4-96.

Метою експериментальних досліджень було визначення модуля деформації E та міцності ґрунтоцементу на стиск R при різному вмісті золи виносення.

Методика виготовлення ґрунтоцементної суміші полягала в наступному. Цемент та вода у необхідній кількості перемішувались вручну до отримання однорідного стану, так званого цементного молока. Кількість цементу бралось 20 % від ваги сухого ґрунту. Водцементне відношення (В/Ц) прийняте 0,6 – 1,0. Потім в отриманий розчин додавався ґрунт з певною вологістю та зола виносу – отримана суміш перемішувалась до однорідної маси протягом 5 хвилин. Після перемішування ґрунтоцементну суміш було викладено у форми.

Всього було виконано десять замісів ґрунтоцементної суміші. Кількість ґрунту та води у кожному

замісі були сталими та становили 2000 грам та 330 грам відповідно. Зразки були витримані у приміщенні лабораторії та у воді протягом 28 діб.

Після випробування першого замісу із вмістом цементу 100 % було визначено те, що міцність кубиків, які були витримані у воді протягом 28 діб, значно більша за ті, які були витримані у приміщенні лабораторії. Тому надалі було прийнято рішення про витримування усіх подальших зразків у воді, оскільки в ґрунті ґрунтоцемент завжди знаходиться у вологому середовищі. Дане рішення дало можливість зменшити кількість зразків однієї серії.

У результаті було одержано загальний графік із середніми значеннями міцності зразків (рисунок 1).

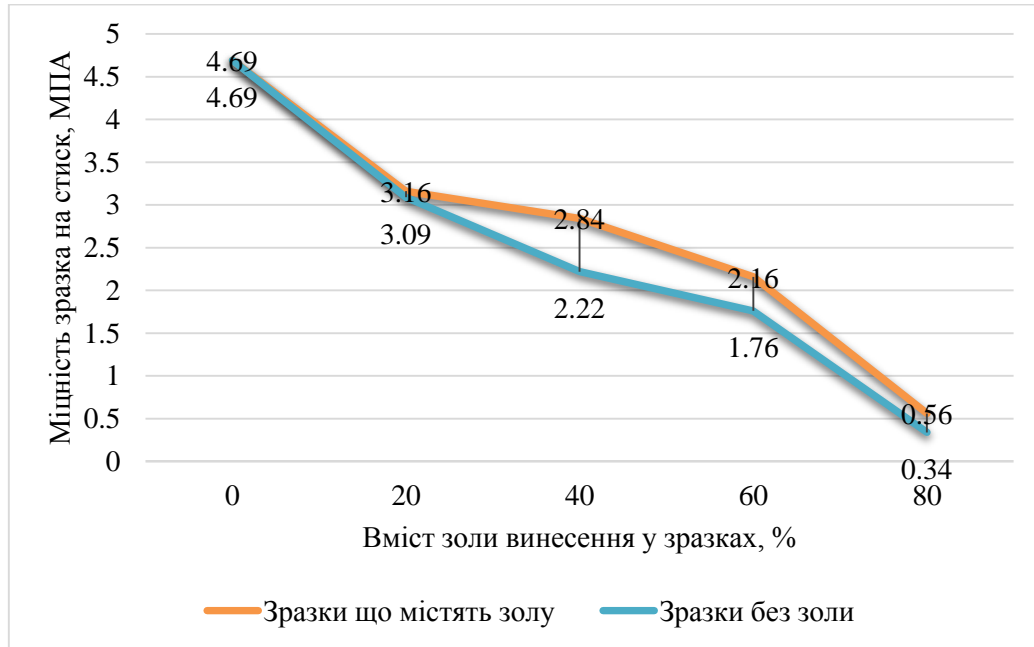


Рисунок 1 – Загальний графік міцності ґрунтоцементу на стиск з вмістом золи виносу та без неї

Із загального графіку міцності ґрунтоцементу на стиск з вмістом золи виносу та без неї видно те, що при вмісті золи виносення до 60 % від об'єму в'язучого міцність ґрунтоцементу не знижується, а навіть покращується. При цьому, замінюючи частину в'язучого на мінеральну добавку маємо і економічний ефект. Адже як всім відомо, зола значно дешевша за цемент.

Для визначення модуля деформації було виконано п'ять замісів ґрунтоцементної суміші. Перший заміс виконувався із вмістом цементу 100 % та золи виносу 0 %; другий заміс із вмістом цементу 80 % та золи виносу 20 %; третій заміс із вмістом цементу 60 % та золи виносу 40 %; четвертий заміс із вмістом цементу 40 % та золи виносу 60 %; п'ятий заміс із вмістом цементу 20 % та золи виносу 80 %.

Модуль деформації ґрунтоцементу визначався на зразках-призмах відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-217:2009.

У результаті випробувань було отримано значення модуля деформації ґрунтоцементу та ґрунтоцементу з мінеральною добавкою.

Таблиця 2 – Значення модуля деформації ґрунтоцементу та ґрунтоцементу з мінеральною добавкою

№	Вміст цементу, %	Вміст золи виносу, %	Модуль деформації E, МПа
1	100	0	2757,91
2	80	20	2506,33
3	60	40	2305,75
4	40	60	2154,03
5	20	80	363,31

Для математичного моделювання роботи стрічкового фундаменту та стрічкового фундаменту на основі, армованій ґрунтоцементними елементами, було обрано програмний продукт Plaxis 3D, який базується на використанні чисельного методу скінченних елементів.

При моделюванні були прийняті наступні передумови і параметри:

- модель ґрунту основи – пружно-пластична модуль Кулона-Мора
- модель стрічкового фундаменту, що підсилюється, з співвідношенням сторін $L/B \geq 10$
- армуючі елементи – циліндричні палі діаметром 300 мм та довжиною 6 м (довжина палі підібрана з умов прорізання просадкової товщі)
- спосіб влаштування армуючих елементів – з вийманням ґрунту
- розташування армуючих елементів в один, два та три ряди
- відстань між армуючими елементами не менше ніж $3d$
- між армованим масивом та підшвою фундаменту передбачено прошарок піщаного ґрунту товщиною 200 мм
- розміри розрахункової області в плані $40 \times 20 \times 15$ м
- за максимальне навантаження, що сприймається фундаментом, прийняте навантаження на стіну будинку 243,29 кН/п.м (при модельних дослідженнях прийнято за 1)

Модельні експерименти були розділені на такі підгрупи:

I – визначення потрібного кроку та кількості рядів армуючих елементів за умови зменшення розмірів підшви до 0,6 та 0,8 м (тиск по підшві становив 435,48 кПа/м та 334,11 кПа/м відповідно).

На даному етапі ґрунтоцементні палі приймалися без вмісту золи з модулем деформації 2757,91 МПа.

II – для обраного на попередньому етапі оптимального варіанту розміщення елементів підсилення і ширини підшви провести аналіз напружено-деформованого стану системи «фундамент-армована основа» в залежності від вмісту золи винесення у складі ґрунтоцементу.

Для аналізу був обраний стрічковий фундамент під середню стіну 4-поверхової будівлі з експлуатаційним навантаженням 243,29 кН/п.м.

Оскільки основою фундаменту мілкого закладання є просадковий ґрунт ПЕ №2, базовим варіантом влаштування фундаменту була стрічка шириною 2,4 м, підібрана з умови допущення просідання. Під фундамент було передбачено піщану підготовку товщиною 100 мм.

В якості альтернативного варіанту пропонується використати фундамент мілкого закладання на армованій основі. Армуючим елементом є ґрунтоцементна паля довжиною 6 м та діаметром 0,3 м. Довжина палі обрана з умови повного прорізання просадкової товщі оскільки відомо [2], що армування просадкового ґрунту ґрунтоцементними палями призводить до відсутності прояву просадковості під час замочування.

На першому етапі експерименту були виконані наступні моделювання:

1. Базовий варіант фундаменту шириною 2,4 м, який без армування масиву забезпечує надійну роботу, який був підібраний з умови допущення просідання в технічному розділі МКР. Основою для фундаменту слугує суглинок м'якопластичний, гумусований, жовто-бурий, просадочний з наступними фізико-механічними характеристиками: $\gamma = 18,7 \text{ кН/м}^3$; $\varphi = 14^\circ$; $c = 14 \text{ кПа}$; $E = 7 \text{ МПа}$.

2. Фундамент шириною 0,6 м з армуванням масиву ґрунтоцементними елементами довжиною 6 м та діаметром 300 мм. Основою для фундаменту слугує армований масив, для якого армуючим елементом є ґрунтоцементна паля. Ґрунтоцементні елементи були розташовані в один ряд з кроком 1 м.

3. Фундамент шириною 0,6 м з армуванням масиву ґрунтоцементними елементами довжиною 6 м та діаметром 300 мм. Основою для фундаменту слугує армований масив, для якого армуючим елементом є ґрунтоцементна паля. Ґрунтоцементні елементи були розташовані в два ряди з кроком 1 м.

4. Фундамент шириною 0,8 м з армуванням масиву ґрунтоцементними елементами довжиною 6 м та діаметром 300 мм. Основою для фундаменту слугує армований масив, для якого армуючим

елементом є ґрунтоцементна палля. Ґрунтоцементні елементи були розташовані в один ряд з кроком 1 м.

5. Фундамент шириною 0,8 м з армуванням масиву ґрунтоцементними елементами довжиною 6 м та діаметром 300 мм. Основою для фундаменту слугує армований масив, для якого армуючим елементом є ґрунтоцементна палля. Ґрунтоцементні елементи були розташовані в два ряди з кроком 1 м.

6. Фундамент шириною 0,8 м з армуванням масиву ґрунтоцементними елементами довжиною 6 м та діаметром 300 мм. Основою для фундаменту слугує армований масив, для якого армуючим елементом є ґрунтоцементна палля. Ґрунтоцементні елементи були розташовані в три ряди з кроком 1 м.

Результатом проведення першого етапу експерименту став графік осідання-навантаження для вищевказаних розрахункових моделей.

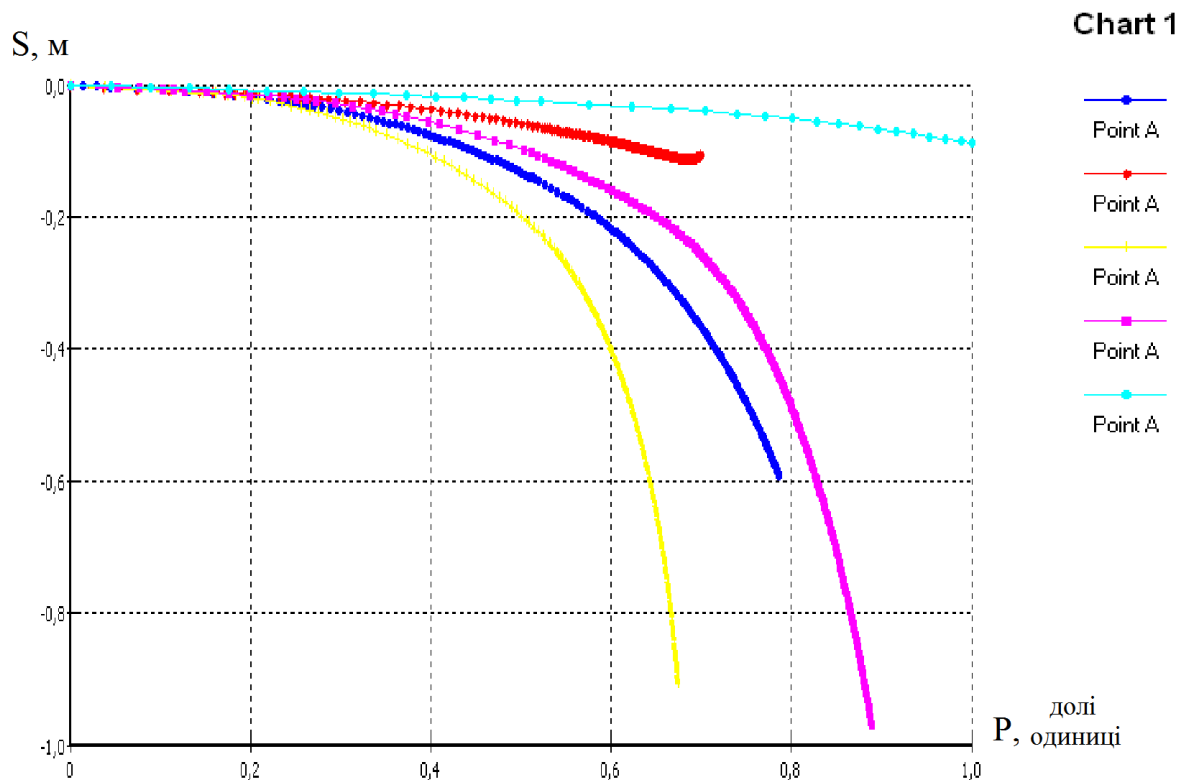


Рисунок 2 – Синій – графік осідання при однорядному розміщенні палей та ширині підшви 0,6 м; червоний – графік осідання при дворядному розміщенні палей та ширині підшви 0,6 м; жовтий – графік осідання при однорядному розміщенні палей та ширині підшви 0,8 м; рожевий – графік осідання при дворядному розміщенні палей та ширині підшви 0,8 м; зелений – графік осідання при трирядному розміщенні палей та ширині підшви 0,8 м

З графіку видно, що найбільш надійну роботу при заданому навантаженні забезпечує фундамент шириною 0,8 м при армуванні ґрунтоцементними елементами, розміщеними у три ряди, тому саме він був прийнятий в якості оптимального варіанту для подальшого дослідження.

На другому етапі експерименту для обраного оптимального варіанту було розглянуто п'ять варіантів ґрунтоцементних елементів з різним відсотком вмісту золи виносення та відповідно з різним модулем деформації.

В результаті було отримано графік осідання-навантаження.

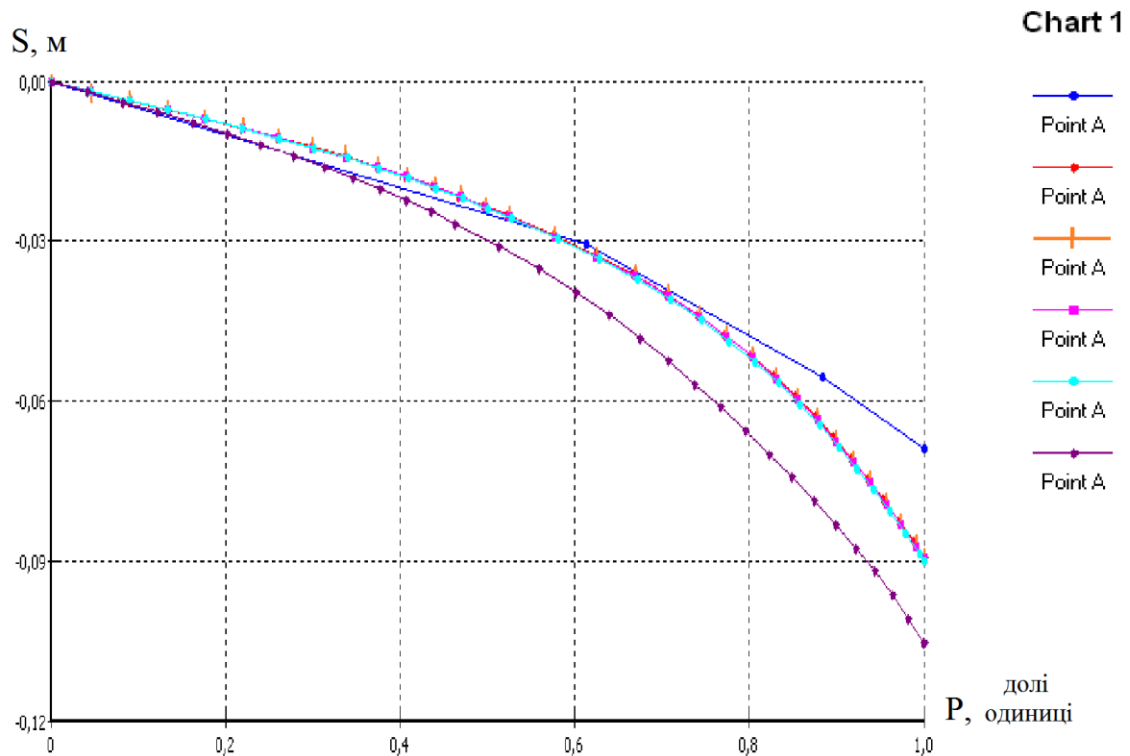
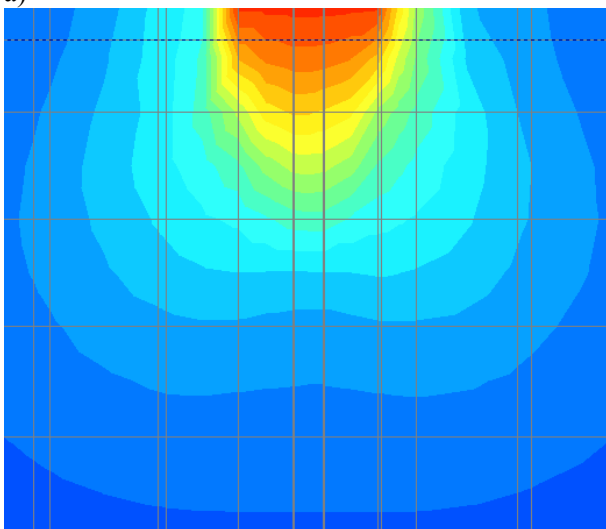


Рисунок 3 – Синій – графік осідання базового варіанту при ширині підшви 2,4 м; червоний – графік осідання при трирядному розміщенні паль та вмістом золи винесення 0 %; оранжевий – графік осідання при трирядному розміщенні паль та вмістом золи винесення 20 %; рожевий – графік осідання при трирядному розміщенні паль та вмістом золи винесення 40 %; зелений – графік осідання при трирядному розміщенні паль та вмістом золи винесення 60 %; фіолетовий – графік осідання при трирядному розміщенні паль та вмістом золи винесення 80 %

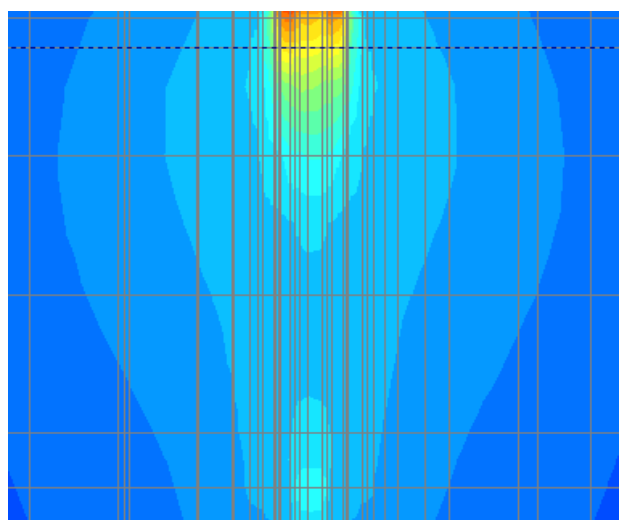
Аналіз одержаних результатів показує, що збільшення вмісту золи винесення не суттєво погіршує роботу армованої основи, так як видно, що при додаванні золи винесення від 20 % до 60 % графіки проходять майже один біля одного. Виключення складає тільки варіант армування при вмісті золи винесення 80 %, при якому деформації фундаменту стають неприпустимими.

Також для базового та оптимального варіанту фундаменту на рисунку 4 наведено мозаїки деформацій ґрунту.

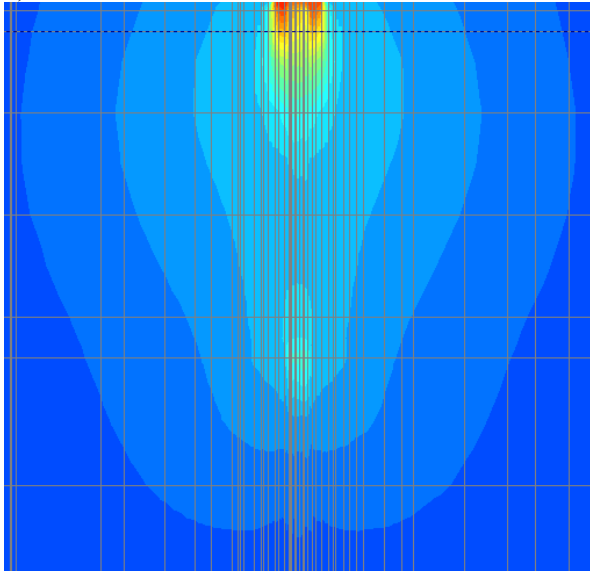
а)



б)



в)



г)

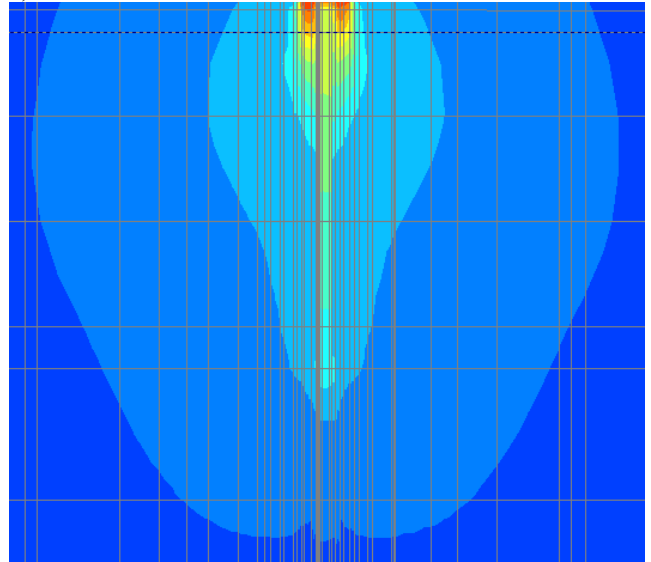


Рисунок 4 – Мозаїки деформацій системи «фундамент – армована основа»: а) варіанту при ширині підшви 2,4 м; та варіантам при трирядному розміщенні паль при – б) вмісті золи виносення 0 %; в) вмісті золи виносення 60 %; г) вмісті золи виносення 80 %

Висновок

Провівши експериментальні дослідження для визначення фізико-механічних характеристик ґрунтоцементу різного складу, який було виготовлено в лабораторних умовах за бурозмішувальною технологією за допомогою лабораторних приладів, та математичні дослідження для чисельного моделювання напружено-деформованого стану системи «фундамент – армована основа» з використанням методу скінченних елементів, можна зробити наступні висновки.

1. міцність ґрунтоцементу, в якому у складі в'язучого присутня зола виносення, знаходиться в межах 3,16-0,56 МПа при 20 % та 80% вмісту золи відповідно;
2. міцність ґрунтоцементу, в якому у складі в'язучого відсутня зола виносу, але було зменшено відсоток в'язучого від маси ґрунту знаходиться в межах 3,09-0,34 МПа при 16% та 4% відповідно;
3. міцність ґрунтоцементу без додавання мінеральної добавки становить 4,69 МПа;
4. міцність ґрунтоцементних кубиків, які були витримані у воді протягом 28 діб, значно більша за ті, які були витримані у приміщенні лабораторії;
5. при вмісті золи виносення від 20% до 60 % від ваги в'язучого міцність ґрунтоцементу знижується несуттєво;
6. при вмісті золи виносення більше 70 % від ваги в'язучого міцність ґрунтоцементу значно погіршується;
7. при введенні золи виносення до ґрунтоцементних призм більше 70 % від ваги в'язучого модуль деформації суттєво погіршується;
8. збільшення вмісту золи виносення не суттєво погіршує роботу армованої основи, так як видно, що при додаванні золи виносення від 20 % до 60 % напружено-деформований стан системи «фундамент – армована основа» майже не змінюється;
9. виключення з попереднього пункту складає варіант армування при вмісті золи виносення 80 % при якому деформації фундаменту стають неприпустимими;
10. використання у складі ґрунтоцементу золи виносення у кількості до 60 відсотків від ваги в'язучого дозволяє одержувати надійне рішення фундаменту із значним зменшенням ширини підшви, що підтверджують розрахунки, проведені у програмному комплексі «Plaxis»;
11. оптимальним варіантом при армуванні стрічкового фундаменту ґрунтоцементними елементами є трирядне розташування армуючих елементів;
12. також можна зазначити і економічний ефект від використання золи виносення, адже зола є дешевим компонентом у порівнянні з цементом, тому заміна частини цементу на золу у складі

в'язучого призводить до зменшення вартості фундаментів. При влаштуванні ґрунтоцементних елементів із вмістом золи виносення 20 % від ваги в'язучого можна досягти близько 10,5 % економії від загальної вартості влаштування фундаменту; при влаштуванні ґрунтоцементних елементів із вмістом золи виносення 40 % від ваги в'язучого можна досягти близько 20,8 % економії від загальної вартості влаштування фундаменту; при влаштуванні ґрунтоцементних елементів із вмістом золи виносення 60 % від ваги в'язучого можна досягти близько 31,2 % економії від загальної вартості влаштування фундаменту.

Беручи до уваги вищесказане, можна стверджувати про ефективність та раціональність використання мінеральних добавок, а саме золи виносення, при влаштуванні фундаментів із ґрунтоцементних паль.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Новицький О. П. Вплив пластифікуючих добавок на міцність ґрунтоцементу / Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34) – с. 171 – 177.
2. Нуждин Л.В. Исследование динамического напряженно-деформированного состояния жестких вертикальных армоэлементов / Л.В. Нуждин, Е.П. Скворцов // Вестник ТГАСУ. – Томск: ТГАСУ, 2003. - № 1. – С. 225-230
3. Маєвська І. В., Пляцок М. С. Планування експерименту з визначення впливу добавок золи виносення на властивості ґрунтоцементу. XLVII регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області: тези науково-технічної конференції, м. Вінниця 2018 р. [Електронний ресурс]: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2018/paper/view/3922/3249>
4. Маєвська І. В., Очеретний В. П., Гончарук М. С. Визначення впливу добавок золи-виносення на властивості ґрунтоцементу. *Інноваційні технології в будівництві*: тези науково-технічної конференції, м. Вінниця 14.11.2018 р. [Електронний ресурс]: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/viewFile/6020/5013>
5. Маєвська І. В., Гончарук М. С. Вплив міцності армуючих елементів на допустиме навантаження на армовану основу. XLVIII регіональна науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів ВНТУ з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області: тези науково-технічної конференції, м. Вінниця 2019 р. [Електронний ресурс]: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2019/paper/view/6914/5719>
6. Маєвська І. В., Гончарук М. С. Математичне моделювання роботи армованої основи ґрунтоцементними елементами з використанням золи виносення. Енергоефективність в галузях економіки України: тези науково-технічної конференції, м. Вінниця 2019 р. [Електронний ресурс]: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/viewFile/8299/6955>
7. Зоценко М.Л. Досвід і перспектива підсилення основ вертикальними ґрунтоцементними елементами у міському будівництві / М.Л. Зоценко, Ж.М. Бовкун, В.І. Малярко // Бетон і железобетон в Украине. – 2006. - № 6. – С. 24-28
8. Армирование лессовых грунтов оснований зданий и сооружений / И.В. Степура, В.С. Шокарев, А.С. Трегуб, А.В. Павлов, В.П. Павленко // Международная конференция по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. – Пермь: ПГТУ, 2004. – С. 213-221
9. Проектирование и устройство оснований и сооружений из армированного грунта. Строительные нормы Республики Беларусь. Приложение П10-01 к СНБ 5.01.01-99
10. Крисан, В. І. Дослідження напружено-деформованого стану ґрунтового масиву, армованого ґрунтоцементними елементами, що виготовлені по струминно-змішувальній методиці: автореф. дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук: 05.23.02 / В. І. Крисан. – Полтава: ПолтНТУ, 2010. – 24 с.

Гончарук Марина Сергіївна — студентка групи Б-18м, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: b16ms.plyatsok@gmail.com

Науковий керівник: **Маєвська Ірина Вікторівна** — доцент кафедри "Будівництва, міського господарства та архітектури". Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com

Honcharook Marina - student of the group B-18m, faculty of heat and power engineering and gas supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: b16ms.plyatsok@gmail.com

Supervisor: **Maievskaya Irina Victorivna** - associate professor of the Department of "Building, Urban and Architecture". Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: irina.mayevskaja@gmail.com