

## ВИКОРИСТАННЯ ЗОЛИ ВИНЕСЕННЯ У СКЛАДІ ГРУНТОЦЕМЕНТУ

Вінницький національний технічний університет

**Анотація.** В даній роботі виконаний пошук оптимального складу ґрунтоцементу, що містить різний відсоток золи винесення: від незначних добавок до заміни половини маси ґрунту на золу. Пошук оптимального складу виконаний на підставі експериментальних досліджень з визначення фізико-механічних характеристик.

Використання ґрунтоцементу з додаванням золи винесення пропонується для армування основ вертикальними армуючими елементами. З метою розробки практичних рекомендацій щодо оптимального складу ґрунтоцементу було виконане математичне моделювання роботи армованої ґрунтоцементними палями основи з варіюванням фізико-механічних характеристик паль, що залежать від вмісту золи винесення, та деформативних характеристик ґрунту.

Для чисельного моделювання був використаний програмний комплекс Plaxis. При сталому кроці армуючих елементів досліджувались властивості ґрунтоцементного масиву в залежності від деформативності паль та ґрунту основи.

**Ключові слова:** ґрунтоцемент; зола-винесення, міцність, армована основа, розрахунковий опір, модуль деформації.

**Abstract.** In this work, we searched for the optimal composition of soil cement containing different percentage of ash removal: from minor additives to the replacement of half the soil mass for ash. The search for the optimal composition was performed on the basis of experimental studies to determine the physical and mechanical characteristics. The use of soil cement with the addition of fly ash is proposed for the reinforcement of the bases by vertical reinforcing elements. In order to develop practical recommendations on the optimal composition of soil cement, a mathematical simulation of the work of reinforced soil cement fields was performed with the variation of the physical and mechanical characteristics of piles, depending on the ash content of the ash.

Plaxis software was used for numerical simulation. With a steady step of reinforcing elements, the properties of the soil-cement mass were studied, depending on the deformability of the piles

**Keywords:** soil cement; fly ash, strength, reinforced base, design resistance, module of deformation.

### Вступ

Використання ґрунтоцементу, як матеріалу для виготовлення фундаментів та підсилення основ, є ефективним напрямком зниження вартості будівництва адже використовуються ґрунти, що залягають безпосередньо в основі будівельних об'єктів. Змішування місцевих ґрунтів із цементом, вапном, гіпсом, шлаками і з уведенням різних добавок дозволяє отримати матеріал – ґрунтоцемент, який останнім часом широко використовується для підготовки основ під фундаменти, зведення фундаментів, а також для спорудження різних геотехнічних споруд.

Ґрунтоцементні конструкції все більше набирають популярності у фундаментобудуванні, а саме: улаштування набивних паль бурозмішувальним методом, струменевою цементациєю, струменево-змішувальною цементациєю; улаштування підпірних стін котлованів; улаштування ґрунтоцементних анкерів; улаштування фундаментів мілкого закладання; улаштування протифільтраційних завіс; зміцнення зсувонебезпечних схилів; підсилення основи існуючих фундаментів похилими, горизонтальними та вертикальними ґрунтоцементними елементами (ГЦЕ); улаштування роздільних екранів для захисту фундаментів споруд від впливу нового будівництва; закріплення масиву ґрунту від розрідження за сейсмічних навантажень; улаштування дорожнього полотна; улаштування залізничних насипів; поліпшення будівельних властивостей торф'яних, лесових ґрунтів, насипних, слабких ґрунтів ( $E < 5$  МПа); закріплення ґрунтів; захист підземних виробок у процесі виконання різних інженерно-технічних завдань; армування основи фундаментів.

У ґрунтоцементних основ та фундаментів, незважаючи на велику кількість переваг, є і недоліки, такі як велика пористість та порівняно невелика міцність за матеріалом [1—3]. Питання теоретичного оцінювання несучої здатності ґрунтоцементних основ і фундаментів є досить актуальним, оскільки існує необхідність визначення меж їх використання через невелику (порівняно з бетоном) міцність ґрунтоцементу.

Для покращення властивостей ґрунтоцементу різними авторами запропоновані добавки у вигляді вапна, глини, різних пластифікаторів [4], пісків і хвостів (відходів збагачення корисних копалин) [3]. Крім того існують технології підвищення міцності ґрунтоцементу, серед яких метод вібрування ґрунтоцементу [5].

В даній роботі в якості мінеральної добавки до ґрунтоцементу пропонується зола виносення, яка утворюється в результаті спалювання твердого палива на ГРЕС. Ця добавка успішно використовується для бетонів. Бетонні суміші з золами володіють більшою зв'язністю, меншим водовідділенням і розшаруванням. Бетон має при цьому більшу міцність, щільність, водонепроникність, стійкість до деяких видів корозії, меншу теплопровідність [6].

Для підтвердження доцільності використання золи виносення в якості добавки до ґрунтоцементу проведено експериментальні дослідження властивостей ґрунтоцементу з додаванням золи виносення та математичні дослідження оптимального складу ґрунтоцементних паль як елементів армування основи.

Ґрунтоцемент пропонується для влаштування штучних основ шляхом армування слабких ґрунтів вертикальними жорсткими елементами з ґрунтоцементу. Ефект такого армування основ полягає у тому, що у певному об'ємі слабого ґрунту частина його замінюється жорстким матеріалом із достатньо великим модулем деформації. Модуль деформації утвореної штучної основи значно збільшується у порівнянні з модулем деформації природного ґрунту. Оскільки методики визначення параметрів армованої основи на теперішній час дуже ненадійні, то дослідження параметрів основи, армованої ґрунтоцементними палями з використанням золи виносення є актуальною задачею.

#### **Експериментальні дослідження властивостей ґрунтоцементу з додаванням золи виносення**

Вихідними матеріалами для виготовлення ґрунтоцементу прийнято цемент, зола виносення Ладизинської ТЕС, глинистий ґрунт, вода.

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. Портландцемент марки М400 являє собою композицію компонентів мінерального походження, що знаходяться в агрегатному стані. У складі суміші переважають оксиди кальцію, магнію, оксиди алюмінію, заліза, кремнію. Частка мінеральних складових досягає 98%.

Для виготовлення досліджуваних зразків ґрунтоцементу був використаний ґрунт – суглинок лесоподібний, жовто-коричневий, твердий, високопористий, карбонатний, просадочний з такими характеристиками: щільність ґрунту  $\rho = 1,78 \text{ г/см}^3$ ; вологість ґрунту  $W = 0,18$ ; вологість на межі розкочування  $W_p = 0,17$ ; вологість на межі текучості  $W_L = 0,24$ .

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

Зола виносення - полімінеральний тонкодисперсний порошок, побічний продукт спалювання твердого палива на ТЕС. Фізико-механічні властивості золи винос такі [7]:

- гідравлічна активність 0,4 МПа;
- насипна густина  $1150 \text{ кг/м}^3$ ;
- істинна густина  $1,95 \text{ г/см}^3$ ;
- питома поверхня  $2000 \dots 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ .

Результати мікроскопічних досліджень свідчать, що мікроструктура низько кальцієвої золи виносення (70-80 %) є скловидною алюмосилікатною фазою у вигляді частинок кулеподібної форми розміром до 100 мкм. Хімічний склад золи виносення подано у таблиці 1. Хімічний та мінералогічний склади відповідають основним вимогам, що висуваються до золи для бетонів.

Таблиця 1 - Хімічний склад золи виносення Ладжинської ТЕС

Оксиди	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Масова частка оксидів, %	55,3	1,4	22,34	5,42	2,52	0,12	2,46	5,96	0,75	2,46	0,38	0,33

Дослідження властивостей ґрунтоцементу з додаванням золи виносення виконувались у два етапи.

**На першому етапі** досліджувались властивості ґрунтоцементу з низьким вмістом золи виносення (від 20 до 80% від вмісту цементу, відповідно від 4 до 14% від ваги ґрунту) [8, 9].

Частина цементу замінювалась на золу виносення згідно з програмою, що наведена у таблиці 2.

Таблиця 2 – Програма дослідження з малим вмістом золи виносення

№ п/п	Цемент, % від ваги в'язучого	Цемент, г % від ваги ґрунту	Зола, % від ваги в'язучого	Зола, г % від ваги ґрунту	Ґрунт, гр	Вода, гр
1	100	400/20%	0	0	2000	330
2	80	320/15%	20	80/3,4%	2000	330
3	60	240/11%	40	160/7%	2000	330
4	40	160/7%	60	240/11%	2000	330
5	20	80/3,4%	80	320/15%	2000	330
6	100	400/20%	0	0	2000	330
7	80	320/15%	0	0	2000	330
8	60	240/11%	0	0	2000	330
9	40	160/7%	0	0	2000	330
10	20	80/3,45	0	0	2000	330

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 виносення – отримана суміш перемішувалась до однорідної маси протягом 5 хвилин. Після перемішування ґрунтоцементну суміш було викладено у форми. Цементно-ґрунтова суміш мала м'якопластичну консистенцію і укладалась у форми з ущільненням. Питома вага суміші після укладки 19 кН/м<sup>3</sup>.

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 (рис. 1).

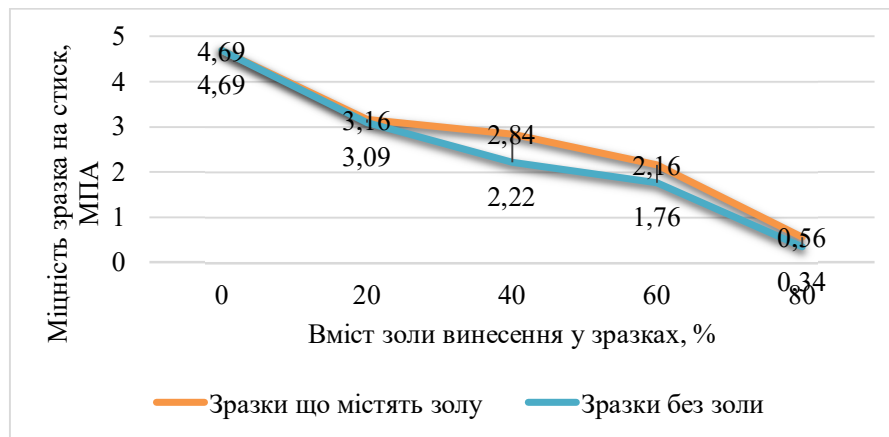


Рис. 1 – Загальний графік міцності ґрунтоцементу на стиск з вмістом золи виносу та без неї

Із загального графіку міцності ґрунтоцементу на стиск з вмістом золи виносення та без неї видно, що при вмісті золи виносення до 60 % від ваги 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 виносення 20 %; третій заміс із вмістом цементу 60 % та золи виносення 40 %; четвертий заміс із вмістом цементу 40 % та золи виносення 60 %; п'ятий заміс із вмістом цементу 20 % та золи виносення 80 % від ваги в'язучого.

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 3).

Таблиця 3 – 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

Дослідження [8, 9] показали, що застосування золи в якості мінеральної добавки при виготовленні ґрунтоцементу дає позитивний ефект. За допомогою додавання оптимальної кількості золи може бути підвищена міцність ґрунтоцементних конструкцій.

Оскільки зола виносення приймає участь у структуроутворенні ґрунтоцементу, то було зроблене припущення, що додавання у склад суміші значної кількості золи, замінюючи нею не цемент, а ґрунт у складі суміші, може мати позитивний ефект.

Отже, **на другому етапі досліджень** була поставлена задача дослідити варіант з додаванням у склад суміші значної кількості золи [10].

Відсоток в'язучого у складі ґрунтоцементу за даними попередніх дослідників коливається в межах від 10 до 30 %. При дослідженнях виконано дві серії зразків, відсоток цементу в яких прийнято сталим і таким, що складає відповідно 20 та 10%.

При дослідженнях частина ґрунту замінювалась на золю виносення згідно з програмою, що наведена у таблиці 4. У таблиці 5 наведені результати випробувань.

Таблиця 4 – Програма дослідження з великим вмістом золи винесення

№ серії	Цемент, % від ваги ґрунту	Цемент, г	Зола, % від ваги ґрунту	Зола, г	Ґрунт, г	Вода, г
1	20	400	50	1000	1000	330
	20	400	40	800	1200	330
	20	400	30	600	1400	330
2	10	200	50	1000	1000	330
	10	200	40	800	1200	330
	10	200	30	600	1400	330

Таблиця 5 – Значення міцності ґрунтоцементу із великим вмістом золи винесення

№ серії	Вміст цементу, %	Вміст золи винесення, %	Середня міцність на стиск за результатами випробування трьох кубиків, МПа
1	20	50	4,47
	20	40	2,95
	20	30	2,38
2	10	50	1,71
	10	40	1,29
	10	30	1,36

При обробці результатів випробувань були враховані дані, одержані на першому етапі з малим вмістом золи винесення (рис. 1). Таке об'єднання результатів можливе, оскільки при дослідженнях був використаний той самий ґрунт та така ж методика замісів. Об'єднані результати випробувань наведені на рис. 2.

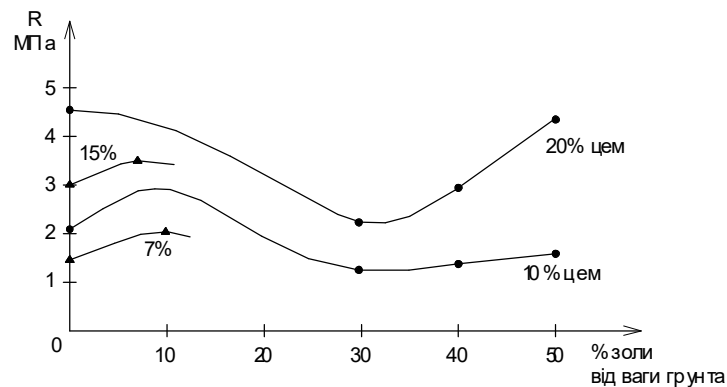


Рис. 2 – Графік залежності міцності ґрунтоцементу на стиск від вмісту золи винесення

З графіку рис. 2 видно, що збільшення вмісту золи винесення в діапазоні від 5 до 12% від ваги ґрунту призводить до збільшення міцності ґрунтоцементу у порівнянні з сумішшю без золи. При більшому вмісті золи міцність зразків ґрунтоцементу зменшується.

При вмісті золи винесення більше 40% від ваги ґрунту міцність зразків знову починає зростати, але міцність зразків з золою не перевищує міцність зразків без золи.

Отже при вмісті золи винесення від 5 до 12% спостерігається максимальне значення міцності ґрунтоцементу, величина якої залежить вже від вмісту цементу. При вмісті цементу від 7 до 20% від ваги ґрунту міцність ґрунтоцементу коливається в межах 2,0 – 4,5 МПа.

Досвід використання ґрунтоцементу говорить про те, що така міцність достатня для цілей армування ґрунту, а в певних умовах і для влаштування ґрунтоцементних паль.

### Математичні дослідження оптимального складу ґрунтоцементних паль як елементів армування основи

Перспективним напрямком досліджень напружено-деформованого стану (НДС) системи «фундамент – армований елемент - основа» є використання методів математичного моделювання на

основі чисельних методів аналізу. Найпоширенішим на сьогодні є метод скінчених елементів (МСЕ), який покладений в основу сучасних програмних комплексів для розрахунку будівельних конструкцій, будівель і споруд. Для математичного моделювання роботи армованої ґрунтоцементними палями основи фундаменту мілкого закладання обрано програмний продукт Plaxis 3D Foundation в умовах вирішення просторової задачі.

Метою чисельних досліджень є аналіз параметрів основи, армованої ґрунтоцементними палями з використанням золи винесення.

Параметрами основи, що підлягають аналізу, є приведений модуль деформації та перша критична сила (за Пузиревським М. П.), що дозволяє визначити допустиме навантаження на армовану основу.

Для моделювання ґрунтоцементних паль необхідно задати такі їх характеристики: питома вага, модуль деформації та коефіцієнт Пуасона.

Коефіцієнт Пуасона за різними джерелами [1, 2] для ґрунтоцементу знаходиться в межах 0,2 – 0,25.

Властивості ґрунтоцементу залежать від технології його виготовлення. Головним фактором при цьому є наявність обтиснення ґрунтоцементної суміші. При виготовленні паль за стандартною бурозмішувальною технологією використовується текуча суміш, яка не підлягає ущільненню. Ущільнення суміші в тілі паль може здійснюватись за допомогою вібрації. Міцність ґрунтоцементу, виготовленого за бурозмішувальною технологією знаходиться у діапазоні 1,0 -6,0 МПа в залежності від виду ґрунту, вмісту цементу, водоцементного відношення.

При виготовлення паль за струменевою цементацією (Jet Grouting), струменево-змішувальною цементацією технологічний процес передбачає ущільнення ґрунто-цементної суміші. В результаті міцність ґрунтоцементу може досягати 8,0 -20,0 МПа.

Величина модуля деформації при застосуванні бурозмішувальної технології без ущільнення [6] може бути визначена за емпіричною формулою

$$E = 131,69 + 67,737 R, \quad (1)$$

де  $R$  – міцність ґрунтоцементу в МПа.

Залежність (1) за результатами досліджень [11] пропонується вважати інваріантною, тобто незалежною від літологічного складу ґрунту, із якого виготовлено ґрунтоцемент за бурозмішувальною технологією.

За рекомендаціями [2] при застосуванні бурозмішувальної технології на залежність між модулем деформації та міцністю ґрунтоцементу літологічний склад ґрунту має незначний вплив. Зокрема, при міцності на стиск  $R = 2,0 - 4,0$  МПа модуль деформації ґрунтоцементу [табл. Е.2, 2]:

- для великоуламкових ґрунтів та крупних і середніх пісків  $E = 330-480$  МПа;
- для пісків дрібних та пилюватих  $E = 300-450$  МПа;
- для супісків важких та суглинків легких  $E = 230-350$  МПа;
- для суглинків важких та глин  $E = 200-330$  МПа.

В будь-якому випадку при застосуванні бурозмішувальної технології без ущільнення модуль деформації ґрунтоцементу знаходиться в діапазоні 100 – 500 МПа.

Для ущільнених ґрунтоцементних сумішей у [2] рекомендується попередньо визначати модуль деформації за формулою

$$E = k_s R, \quad (2)$$

де коефіцієнт  $k_s$  приймається рівним 70-100 для глин і суглинків, 150-200 для супісків, 200-300 для пісків пилюватих та дрібних, 300-500 для пісків середньої крупності і крупних, 500-800 для пісків гравелистих.

За даними випробувань зразків ґрунтоцементу, ущільнених тиском у 2-16 МПа, Токіна А. М. [12], при міцності ґрунтоцементу від 2,0 до 6,0 МПа модуль деформації складає 1500 – 3500 МПа.

Експериментальними дослідженнями властивостей ґрунтоцементу з додаванням золи винесення (табл. 3) за умови ущільнення зразків при міцності ґрунтоцементу від 0,6 до 4,7 МПа модуль деформації складає 360 – 2800 МПа.

За результатами досліджень [8, 9] залежність між модулем деформації ґрунтоцементу з додаванням золи винесення і міцністю близька до результатів, одержаних Токіним О. М. (рис. 3).

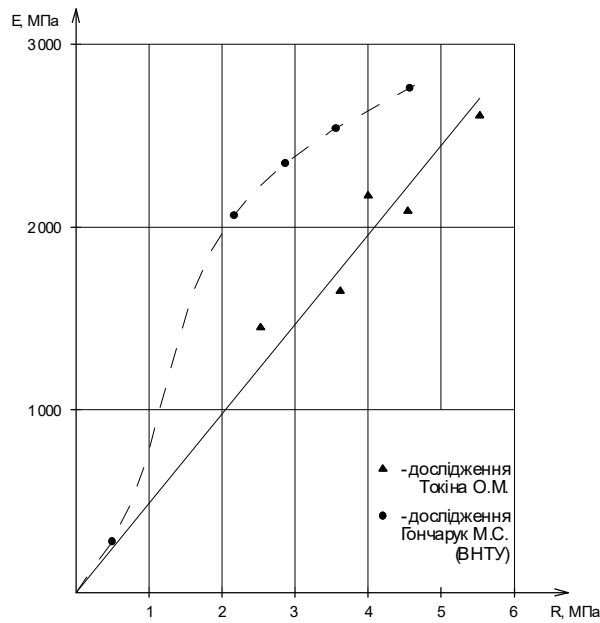


Рис. 3 – Залежність між модулем деформації ґрунтоцементу без додавання золи виносення (за Токіним О. М.) і з додаванням золи виносення за дослідженнями, проведеними у ВНТУ

Як бачимо за графіком рис. 3, додавання золи виносення покращує деформаційні властивості ґрунтоцементу. Отже, при додаванні золи виносення деформаційні властивості ґрунтоцементу можна приймати принаймні не гіршими, ніж для ґрунтоцементу на основі лише цементу.

Для аналізу параметрів основи, армованої ґрунтоцементними палями з використанням золи виносення, виконано моделювання роботи штампу розмірами 1200x1200 мм на основі, армованій ґрунтоцементними палями довжиною 5,7 м. Розрахункову схему при дослідженнях прийнято відповідно до наведеної на рис. 4, запропонованою у [1]. При відстані між елементами 600 мм штамп розміром у плані 1200x1200 мм завантажує площу, яка армована 12 елементами діаметром 200 мм з кроком 600 мм. Згідно з [1, 13] крок елементів армування 3d є оптимальним з точки зору досягнення якості армованого масиву при прийнятних витратах матеріалів.

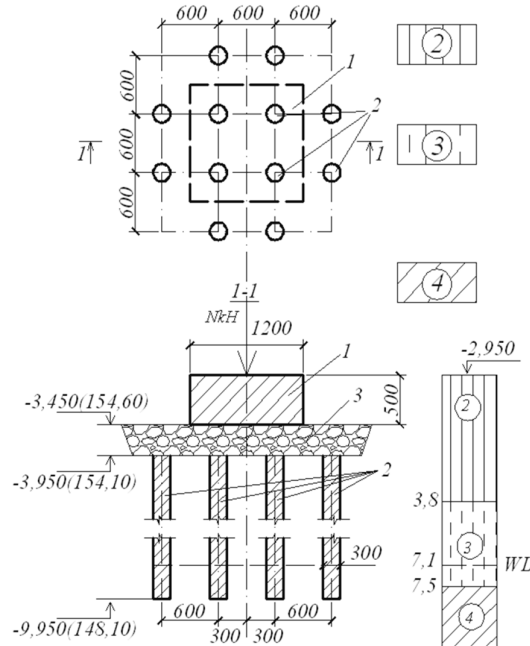


Рис. 4 – Схема випробувань основи, яка армована вертикальними ґрунтоцементними елементами, залізобетонним квадратним штампом [1]

При дослідженні передбачене варіювання модуля деформації армуючих елементів з ґрунтоцементу з додаванням золи виносення в діапазоні від 100 до 2000 МПа, оскільки зола виносення рекомендується в якості добавки для будь-якої технології влаштування ґрунтоцементних паль (як без ущільнення так і з ущільненням).

Другим параметром, вплив якого досліджується, є модуль деформації природного ґрунту, в якому влаштовуються елементи армування.

Програма визначення приведеного модуля деформації та допустимого навантаження на армовану основу та впливу на них вертикального армування ґрунту (табл. 7) передбачала наступні етапи:

- створення розрахункової моделі стовпчастого фундаменту (рис. 5) і паль (рис. 6);

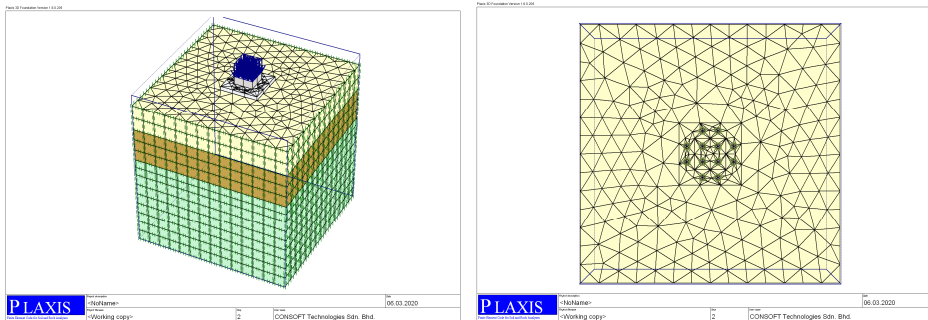


Рис. 5 - Модель стовпчастого фундаменту

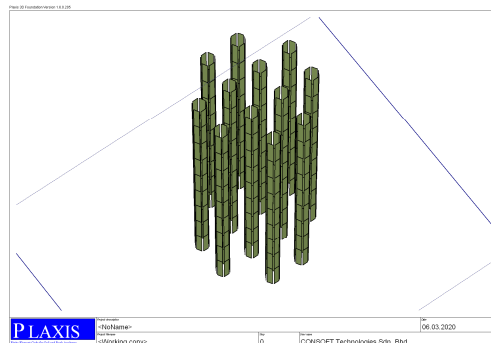


Рис. 6 - Модель армуючих елементів – паль

- дослідження залежності осідання - навантаження стовпчастого фундаменту з вертикальним армуванням ґрунту від модуля деформації армуючих елементів (ґрунтоцементних паль);
- дослідження залежності осідання - навантаження стовпчастого фундаменту з вертикальним армуванням ґрунту від модуля деформації ґрунту природної основи.

При моделюванні були прийняті наступні передумови і параметри:

- модель ґрунту основи – пружно-пластична модель Кулона-Мора;
- модель фундаменту – стовпчастий фундамент з розмірами підшви 1,2x1,2 м;
- крок армуючих елементів – ґрунтоцементних паль довжиною 3d;
- палі діаметром 200 мм, бурові, з коефіцієнтом умов роботи по бічній поверхні 0,6;
- розміри розрахункової області в плані 10x10x10 м;
- за навантаження, що сприймається фундаментом, приймається значення зовнішнього навантаження без урахування ваги фундаменту 1000 кН/м<sup>2</sup>.

Модельні експерименти розділено на такі підгрупи:

I - моделювання сумісної роботи фундаменту та ґрунтоцементних паль Ø0,2 м з кроком 3d довжиною 5,7 м на неоднорідному ґрунті з характеристиками згідно з таблицею 6 та рис. 7. Матеріал



фундаменту – бетон класом міцності С15/20. Щебенева підготовка  $\gamma=18,0$  кН/м<sup>3</sup>,  $\nu=0,3$  кПа,  $E = 60$  МПа висотою 25 см. Програму моделювання наведено в табл. 7.

Таблиця 6 - Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Найменування ґрунту	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$\gamma_s$ , кН/м <sup>3</sup>	W	W <sub>l</sub>	W <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>l</sub>	e	S <sub>r</sub>	C, кПа	$\varphi$ , град.	$\nu$	E, МПа	R <sub>o</sub> , кПа	Потужність шару, м
Рослинний шар	16,5	-	0,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4-0,5
Пісок дрібний	17,9	26,5	0,17	-	-	-	-	0,73	0,62	0,4	29	0,31	20	200	2,5-2,8
Суглинок	17,3	26,8	0,13	0,17	0,09	0,08	0,5	0,75	0,46	15	19	0,37	7,7	203	2,0-2,4
Глина голубувато сіра	17,0	27,1	0,2	0,39	0,18	0,21	0,1	0,91	0,6	43,4	16,8	0,4	16,2	269	5,0

Рівень ґрунтових вод – 0,8 м.

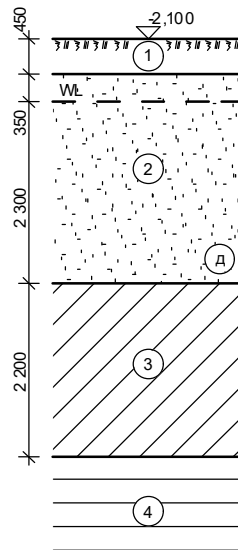


Рисунок 7 – Геологічний розріз майданчику з неоднорідним ґрунтом для I підгрупи досліджень

II - моделювання сумісної роботи фундаменту та ґрунтоцементних паль  $\varnothing 0,2$  м з кроком 3d довжиною 5,7 м на однорідному ґрунті з наступними характеристиками: суглинок  $\gamma=16,8$  кН/м<sup>3</sup>,  $c = 16$  кПа,  $\varphi=16^\circ$ ,  $E = 12$  МПа. Матеріал фундаменту – бетон класом міцності С15/20. Щебенева підготовка  $\gamma=18,0$  кН/м<sup>3</sup>,  $\nu=0,3$  кПа,  $E = 60$  МПа висотою 25 см. Програму моделювання наведено в табл. 7.

III - моделювання сумісної роботи фундаменту та ґрунтоцементних паль  $\varnothing 0,2$  м довжиною 5,7 м розміщеними під основою фундаменту на однорідному ґрунті з наступними характеристиками: суглинок  $\gamma=16,8$  кН/м<sup>3</sup>,  $c = 14$  кПа,  $\varphi=14^\circ$ ,  $E = 6$  МПа. Матеріал фундаменту – бетон класом міцності С15/20. Щебенева підготовка  $\gamma=18,0$  кН/м<sup>3</sup>,  $\nu=0,3$  кПа,  $E = 60$  МПа висотою 25 см. Програму моделювання наведено в табл. 7.

При моделюванні роботи фундаменту на армованій основі були враховані наступні фази роботи:

- робота ґрунтової товщі без фундаменту (початкова фаза);
- влаштування паль;
- влаштування стовпчастого фундаменту;
- робота стовпчастого фундаменту під дією вертикального навантаження.

Таблиця 7 - Програма моделювання сумісної роботи фундаменту та основи, армованої ґрунтоцементними палями

Підгрупи	Довжина та поперечний розмір паль	Модуль деформації ґрунтоцементу, МПа	Питома вага ґрунтоцементу, кН/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт Пуасона	Ґрунтові умови
I	L=5,7 м, d=0,2 м; крок паль 3 d	100	18	0,25	Неоднорідні за рис. 7. та табл. 6, $E_{прис} = 18$ МПа
		300	18	0,25	
		500	18	0,25	
		1500	19	0,2	
		2000	19	0,2	
		27000 (бетон)	24	0,2	
II	L=5,7 м, d=0,2 м; крок паль 3 d	100	18	0,25	суглинок $\gamma = 16,8$ кН/м <sup>3</sup> , $c = 16$ кПа, $\varphi = 16^\circ$ , $E = 12$ МПа
		300	18	0,25	
		500	18	0,25	
		1500	19	0,2	
		2000	19	0,2	
		27000 (бетон)	24	0,2	
III	L=5,7 м, d=0,2 м; крок паль 3 d	100	18	0,25	суглинок $\gamma = 16,8$ кН/м <sup>3</sup> , $c = 14$ кПа, $\varphi = 14^\circ$ , $E = 6$ МПа
		300	18	0,25	
		500	18	0,25	
		1500	19	0,2	
		2000	19	0,2	
		27000 (бетон)	24	0,2	

На рис. 8 наведено схему деформування стовпчастого фундаменту в армованому масиві ґрунтоцементними палями  $\varnothing 0,2$  м з кроком 3d на неоднорідній основі з приведеним модулем деформації  $E = 18$  МПа.

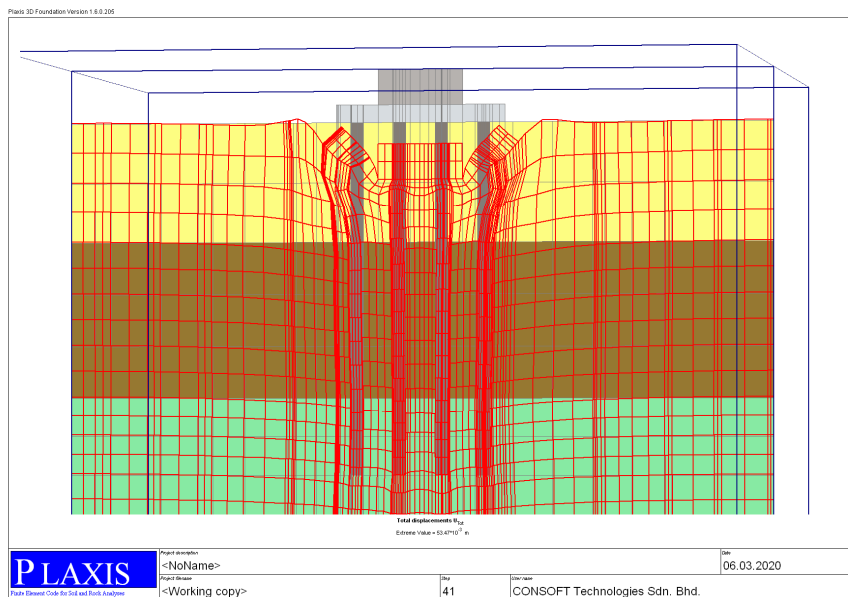


Рис. 8 - Схема деформування армованої основи при модулі деформації ґрунтоцементних елементів  $E = 500$  МПа

На рис. 9-11 наведені графіки залежності осідання від навантаження для стовпчастого фундаменту та фундаменту, розташованого в масиві, армованому ґрунтоцементними палями  $\varnothing 0,2$  м з кроком 3d при різних значеннях модуля деформації елементів армування та різних значеннях модуля деформації природної основи. Для порівняння наведені також графіки для неармованої основи та основи, армованої бетонними палями.

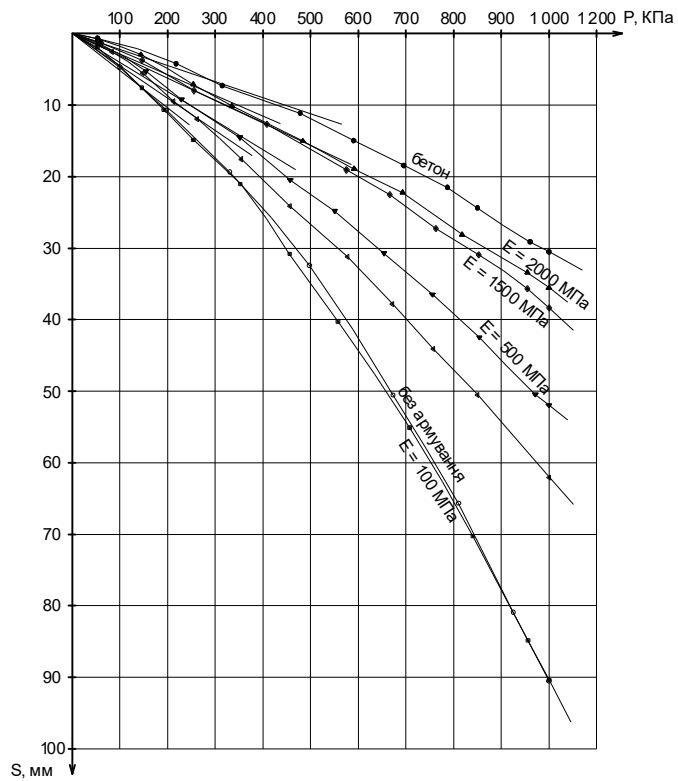


Рисунок 9 - Графіки залежності осідання від навантаження для стовпчастого фундаменту та фундаменту, розташованого в масиві, армованому ґрунтоцементними палями  $\varnothing 0,2 \text{ м}$  з кроком  $3d$  для неоднорідної основи з приведеним модулем деформації  $E = 18 \text{ МПа}$

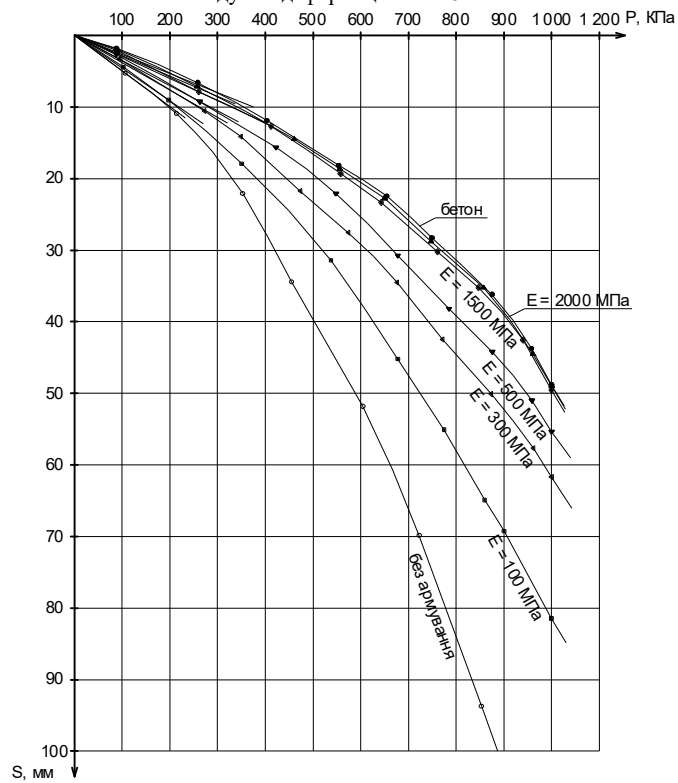


Рисунок 10 - Графіки залежності осідання від навантаження для стовпчастого фундаменту та фундаменту, розташованого в масиві, армованому ґрунтоцементними палями  $\varnothing 0,2 \text{ м}$  з кроком  $3d$  для однорідної основи з модулем деформації  $E = 12 \text{ МПа}$

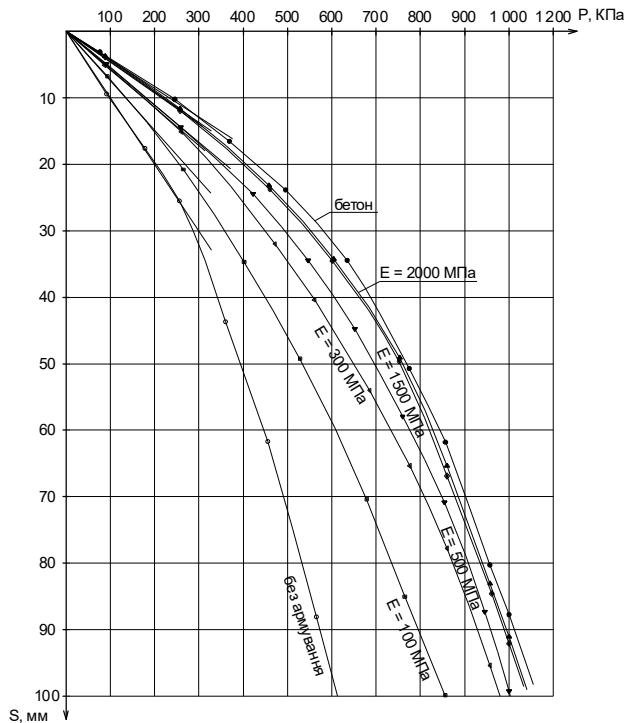


Рисунок 11 - Графіки залежності осідання від навантаження для стовпчастого фундаменту та фундаменту, розташованого в масиві, армованому ґрунтоцементними палями  $\varnothing 0,2$  м з кроком 3d для однорідної основи з модулем деформації  $E = 6$  МПа

Розрахунковий опір ґрунту  $R$  визначався як перше критичне напруження  $\sigma_1$  (абсолютно безпечно з точки зору міцності основи), яке визначено за точкою відхилення графіка від прямої.

Результати розрахунків наведені у таблиці 8.

Таблиця 8 - Параметри армованої основи за даними моделювання [14]

Підгрупи	Параметри основи	Модуль деформації елементів армування, МПа						
		Відсутні	100	300	500	1500	2000	24000 (бетон)
I	$E$ , МПа	18,0	18,0	19,4	23,0	30,0	32,0	41,0
	$\sigma_1$ , кПа	170	200	230	250	270	280	290
II	$E$ , МПа	12,0	20,0	23,6	26,0	31,0	33,0	33,9
	$\sigma_1$ , кПа	170	200	230	250	280	290	300
III	$E$ , МПа	6,0	12,5	15,3	16,4	19,7	20,0	22,6
	$\sigma_1$ , кПа	140	170	230	250	280	290	300

На рис. 12 наведено графік залежності модуля деформації армованого ґрунту від модуля деформації ґрунтоцементу, а на рис. 13 - графік залежності розрахункового опору армованого ґрунту від модуля деформації ґрунтоцементу.

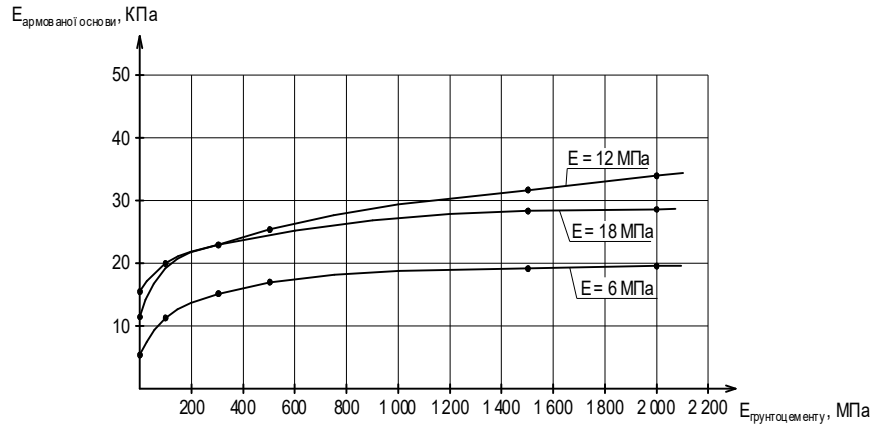


Рисунок 12 - Залежність модуля деформації армованого ґрунту від модуля деформації ґрунтоцементу

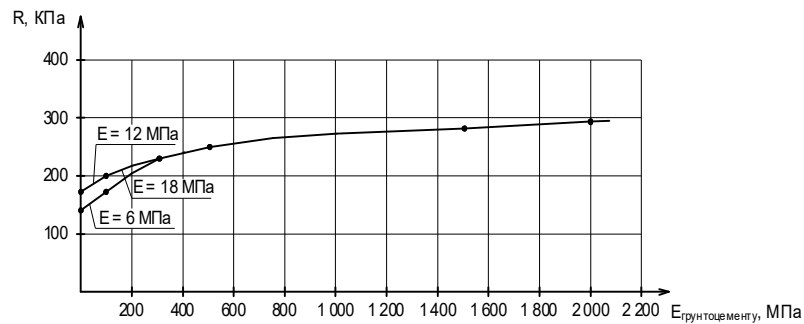


Рисунок 13 - Залежність розрахункового опору армованого ґрунту від модуля деформації ґрунтоцементу

Внаслідок армування основи вертикальними ґрунтоцементними елементами модуль деформації основи з приведеним модулем деформації 18 МПа збільшився на 30% для паль, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж вдвічі для паль, улаштованих за струменевою цементацією (Jet Grouting).

Для ґрунтової основи з модулем деформації 12 МПа відповідне збільшення складає 210% та 280%, для ґрунтової основи з модулем деформації 6 МПа відповідне збільшення складає 270% та 370%.

Відповідно розрахунковий опір збільшився у 1,5 рази для паль, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і у 1,6 рази для паль, улаштованих за струменевою цементацією (Jet Grouting) практично незалежно від початкових параметрів ґрунтової основи.

### Висновки

1. Застосування золи виносення у складі суміші при виготовленні ґрунтоцементу дає позитивний ефект. За допомогою додавання оптимальної кількості золи може бути досягнена потрібна міцність ґрунтоцементних конструкцій. Встановлено, що оптимальною кількістю золи у складі ґрунтоцементної суміші є вміст золи виносення в діапазоні від 5 до 12% від ваги ґрунту. Додавання золи виносення у такій кількості призводить до збільшення міцності ґрунтоцементу у порівнянні з сумішшю без золи.

2. Для оцінювання напружено-деформованого стану основи, армованої ґрунтоцементними елементами, використана пружнопластична модель ґрунту, реалізована у програмному комплексі Plaxis 3D. Порівняння залежностей „осідання – навантаження”, отриманих за даними розрахунків і експериментальним шляхом, показало високий збіг результатів. Це свідчить про правомірність вибору та застосування пружнопластичної моделі ґрунту й підтверджує достовірність встановлених закономірностей зміни деформативних характеристик армованих основ.

3. Внаслідок армування основи вертикальними ґрунтоцементними елементами модуль деформації основи з приведеним модулем деформації 18 МПа збільшився на 30% для паль,

улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж вдвічі для паль, улаштованих за струменевою цементациєю (Jet Grouting).

4. Для слабкої основи з модулем деформації 6 МПа модуль деформації армованої основи став майже у 3 рази більше для паль, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і майже у 4 рази для паль, улаштованих за струменевою цементациєю (Jet Grouting).

5. Відповідно розрахунковий опір збільшився у 1,5 рази для паль, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і у 1,6 раза для паль, улаштованих за струменевою цементациєю (Jet Grouting) практично незалежно від початкових параметрів ґрунтової основи.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Петраш, Р. В. Спільна робота ґрунту та елементів армування, які виготовлені за бурозмішувальною технологією: дис. на здобуття наук. ст. канд. техн. наук: 05.23.02 / ПолтНТУ, Полтава, 2009. – 216 с.
2. СП 291.1325800.2017. Конструкции грунтоцементные армированные. Правила проектирования. - Минстрой России. 2017, 34 с. [Чинний від 2017-11-16].
3. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. Бурові грунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: монографія. Харків: «Друкарня Мадрид», 2016. 94 с.
4. Новицький О. П. Вплив пластифікуючих добавок на міцність грунтоцементу / Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава: ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34) – с. 171 – 177.
5. Нестеренко Т. М. Вплив вібрування на механічні характеристики грунтоцементу / Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). – Вип. 75. Кн. 2. – К.: ДП НДІБК, 2011. С. 656 – 660.
6. Дворкін Л. Й. Будматеріали з відходів [Електронний ресурс] / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін // Фенікс. – 2007. – Режим доступу до ресурсу: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-110-stroitelnye-materialy/index.htm>.
7. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л., Корнейчук Ю. А. Эффективные цементно-золяные бетоны. — Ровно, 1998. — 196 с.
8. Маєвська І. В., Гончарук М. С. Ефект від використання золи винесення для улаштування грунтоцементних паль. МОЛОДЬ В НАУЦІ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ-2019: тези науково-практичної інтернет конференції, м. Вінниця 2020 р.
9. Маєвська І. В., Очеретний В. П., Гончарук М.С. Визначення впливу добавок золи-винесення на властивості грунтоцементу / Іноваційні технології в будівництві. Міжнародна н/т конф. ВНТУ, Вінниця, 2018. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2018/paper/view/6020>.
10. Гріщенко Р. П., Маєвська І. В. Аналіз міцності грунтоцементу при частковій заміні ґрунту на золу винесення. / Енергоефективність в галузях економіки України. Міжнародна н/т конф. ВНТУ, Вінниця, 2019. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egcu/egcu2019/paper/viewFile/8263/6946>.
11. Петруняк М.В. Вплив на характеристики грунтоцементу літологічних особливостей ґрунту / М.В. Петруняк, М.Л. Зоценко // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. Вип. 71. – Кн. 2. – К.: НДІБК, 2008. – С. 27 – 35.
12. Токин, А. Н. Способ изготовления цементогрунтовых свай / А. Н. Токин, Я.Я. Мотузлов, А. И. Ветштейн. – М. : Стройиздат, 1981. – С. 29 – 33.
13. Блащук Н.В. Визначення модуля деформації основи, армованої вертикальними елементами / Н.В. Блащук, І.В. Маєвська // Основи та фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник / - Київ: КНУБА, 2015. – Вип. 37. – С. 228-237.
14. Гріщенко Р. П., Маєвська І. В. Аналіз параметрів ґрунтової основи, армованої грунтоцементними палями з використанням золи винесення/ *Матеріали конференції «XLIX Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2020)»*, Вінниця, 2020. [Електронний ресурс]. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/9082>

**Ірина Вікторівна Маєвська** — канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця. [irina.mayevskaja@gmail.com](mailto:irina.mayevskaja@gmail.com).

**Irina V. Majewska** - candidate. Sc., assistant professor of department of construction, architecture and municipal economy, Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa.

**Наталія Вікторівна Блащук**— канд. техн. наук, доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

**Natalia V. Blashchuk** - candidate. Sc., assistant professor of department of construction, architecture and municipal economy, Vinnytsia National Technical University. Vinnitsa.

**Гончарук Марина Сергіївна** — магістр будівництва, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [b16ms.plyatsok@gmail.com](mailto:b16ms.plyatsok@gmail.com).

**Honcharook Marina** – master's building degree, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: [b16ms.plyatsok@gmail.com](mailto:b16ms.plyatsok@gmail.com)