

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТОВОЇ ОСНОВИ, АРМОВАНОЇ ҐРУНТОЦЕМЕНТНИМИ ПАЛЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗОЛИ ВИНЕСЕННЯ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. В даній роботі наведено результати чисельних досліджень параметрів основи, армованої ґрунтоцементними палями з використанням золи винесення. Для математичного моделювання роботи армованої ґрунтоцементними палями основи фундаменту мілкого закладання обрано програмний продукт Plaxis 3D, який базується на використанні чисельного методу скінчених елементів. При дослідженні передбачене варіювання модуля деформації армуючих елементів з ґрунтоцементу з додаванням золи винесення в діапазоні від 100 до 2000 МПа.

Внаслідок армування основи вертикальними ґрунтоцементними елементами модуль деформації основи збільшився на 60-70% для палей, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж вдвічі для палей, улаштованих за струменевою цементацією (Jet Grouting). Відповідно розрахунковий опір збільшився вдвічі для палей, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж втричі для палей, улаштованих за струменевою цементацією (Jet Grouting).

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

Abstract. This paper presents the results of numerical studies of the parameters of the base, reinforced with soil cement piles using ash. For the mathematical modeling of the work of reinforced-cement piles of the basis of the foundation of shallow laying the software product Plaxis 3D was chosen, which is based on the use of the numerical finite element method. In the study, the variation of the module of deformation of reinforcing elements from soil cement with addition of fly ash in the range from 100 to 2000 MPa is envisaged.

Due to the reinforcement of the foundation by vertical soil cement elements, the deformation module of the foundation increased by 60-70% for piles arranged by blending technology, and more than twice for piles arranged by jet cementing (Jet Grouting). Accordingly, the design resistance was doubled for piles arranged by blending technology and more than three times for piles cemented with jet cementing (Jet Grouting).

Keywords: soil cement; fly ash, reinforced base, designed resistance, module of deformation.

Вступ

Попередніми експериментальними дослідженнями властивостей ґрунтоцементу з додаванням золи винесення [1 - 3] показано, що застосування золи винесення 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 винесення в діапазоні від 5 до 12% від ваги ґрунту. Додавання золи винесення у такій кількості призводить до збільшення міцності ґрунтоцементу у порівнянні з сумішшю без золи.

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 винесення є актуальною задачею.

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 виносення.

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.

Виклад основного матеріалу дослідження

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

Коефіцієнт Пуасона за різними джерелами [4, 5] 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 виготовленні 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 [7] пропонується вважати інваріантною, тобто незалежною від літологічного складу ґрунту, із якого виготовлено ґрунтоцемент за бурозмішувальною технологією.

За рекомендаціями [5] 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, 5]:

- для великоуламкових ґрунтів та крупних і середніх пісків $E = 330-480$ МПа;
- для пісків дрібних та пилуватих $E = 300-450$ 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 [5] рекомендується попередньо визначити 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 пилуватих та дрібних, 300-500 для пісків середньої крупності і крупних, 500-800 для пісків гравелистих.

За даними випробовувань зразків ґрунтоцементу, ущільнених тиском у 2-16 МПа, Токіна А. М. [8], при міцності ґрунтоцементу від 2,0 до 6,0 МПа модуль деформації складає 1500 – 3500 МПа.

Попередніми експериментальними дослідженнями властивостей ґрунтоцементу з додаванням золи виносення [1 - 3] за умови ущільнення зразків при міцності ґрунтоцементу від 0,6 до 4,7 МПа модуль деформації складає 360 – 2800 МПа.

За результатами досліджень [1 - 3] залежність між модулем деформації ґрунтоцементу з додаванням золи виносення і міцністю близька до результатів, одержаних Токіним О. М. (рис. 1).

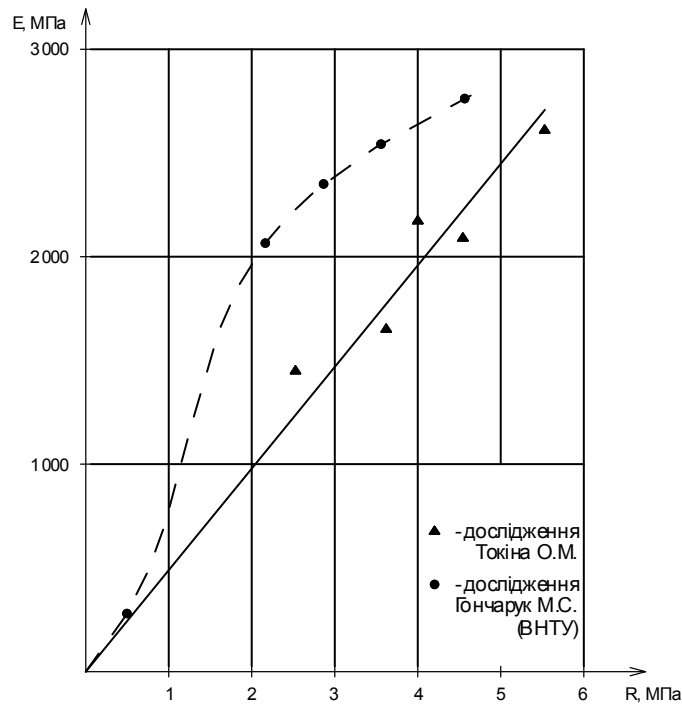


Рис. 1 – Залежність між модулем деформації ґрунтоцементу без додавання золи виносення (за Токіним О. М.) і з додаванням золи виносення за дослідженнями, проведеними у ВНТУ

Як бачимо за графіком рис. 1, 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 пальями з використанням золи виносення, виконано моделювання роботи штампу розмірами 1200x1200 мм на основі, армованій ґрунтоцементними пальями довжиною 5,7 м. Розрахункову схему при дослідженнях прийнято відповідно до наведеної на рис. 2. 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 [4] крок елементів армування 3d є оптимальним з точки зору досягнення якості армованого масиву при прийнятних витратах матеріалів.

Моделювання сумісної роботи фундаменту та ґрунтоцементних паль $\varnothing 0,2$ м з кроком 3d довжиною 5,7 м виконувалось на неоднорідному ґрунті з характеристиками згідно з таблицею 1.

Таблиця 1 - Фізико-механічні характеристики ґрунтів

Найменування ґрунту	γ , кН/м ³	γ_s , кН/м ³	W	W ₁	W _p	I _p	I ₁	e	S _r	C, кПа	ϕ , град.	ν	E, МПа	R ₀ , 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.

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).

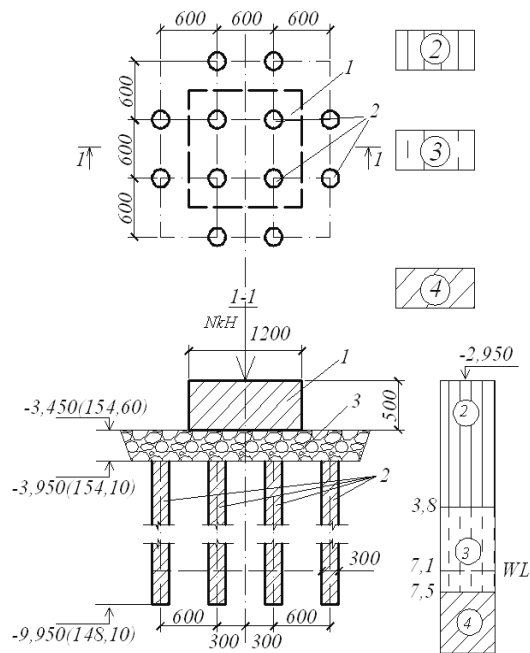


Рис. 2 – Схема випробувань основи, яка армована вертикальними ґрунтоцементними елементами, залізобетонним квадратним штампом

Програма визначення приведенного модуля деформації та допустимого навантаження на армовану основу та впливу на них вертикального армування ґрунту (табл. 2) передбачала наступні етапи:

- створення розрахункової моделі стовпчастого фундаменту (рис. 3) і паль (рис. 4);

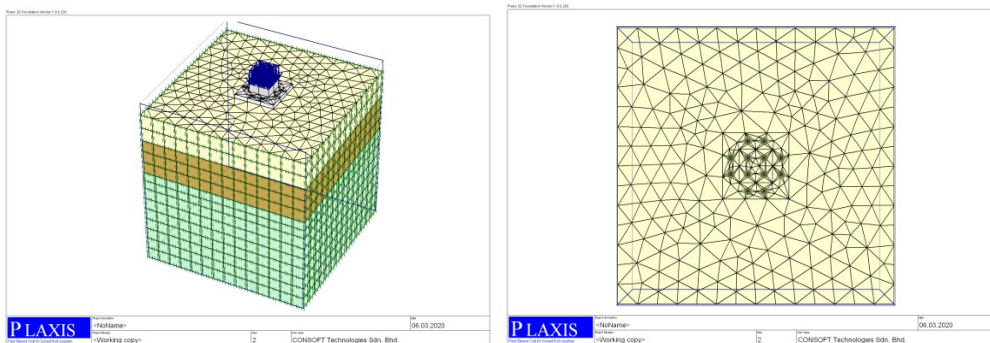


Рис. 3 - Модель стовпчастого фундаменту

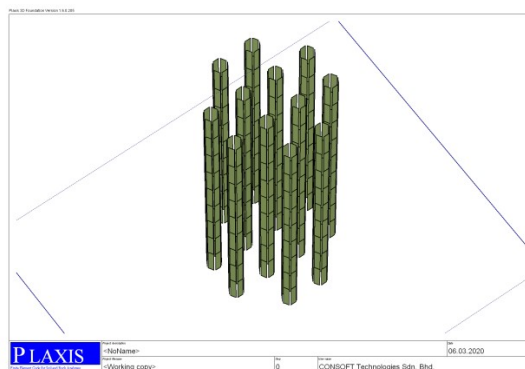


Рис. 4 - Модель армуючих елементів – паль

- 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 підшови 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/м².

Таблиця 2 – Програма дослідження

Підгрупи	Довжина та поперечний розмір паль	Модуль деформації ґрунтоцементу, МПа	Питома вага ґрунтоцементу, кН/м ³	Коефіцієнт Пуасона
I	L=5,7 м, d=0,2 м; крок паль 3 d	100	18	0,25
		300	18	0,25
		500	18	0,25
		1500	19	0,2
		2000	19	0,2
		27000 (бетон)	24	0,2

Матеріал фундаменту – бетон класом міцності C15/20. Щебенева підготовка $\gamma = 18,0$ кН/м³, $\nu = 0,3$ кПа, $E = 60$ МПа висотою 25 см.

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.

На рис. 5 наведено схему деформування стовпчастого фундаменту в армованому масиві ґрунтоцементними палями Ø 0,2 м з кроком 3d на неоднорідній основі з приведеним модулем деформації $E = 18$ МПа.

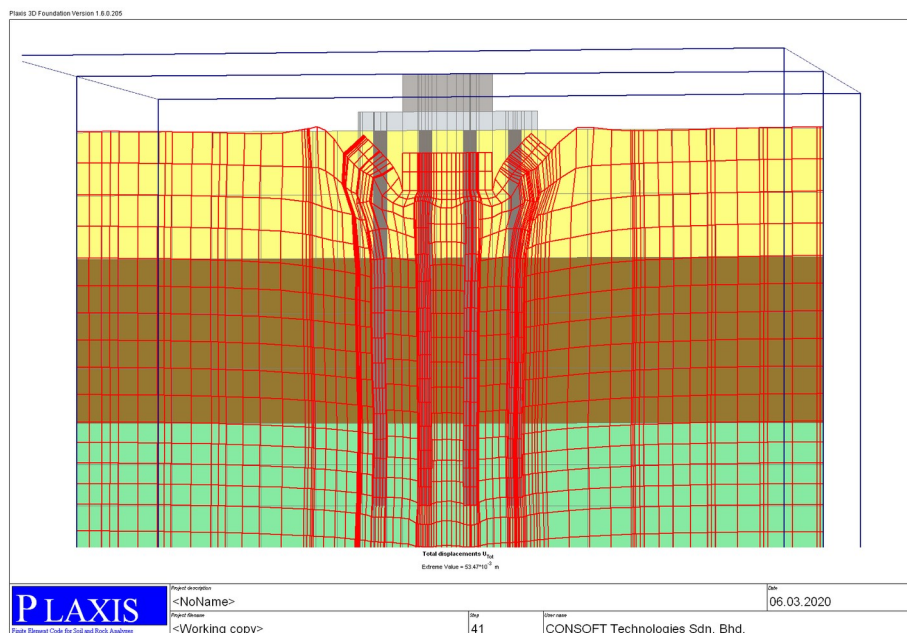


Рис. 5 - Схема деформування армованої основи при модулі деформації ґрунтоцементних елементів $E = 500$ МПа

На рис. 6 - графіки залежності осідання від навантаження для фундаменту, розташованого в масиві, армованому ґрунтоцементними палями Ø 0,2 м з кроком 3d при різних значеннях модуля деформації елементів армування. Для порівняння наведені також графіки для основи, армованої бетонними палями.

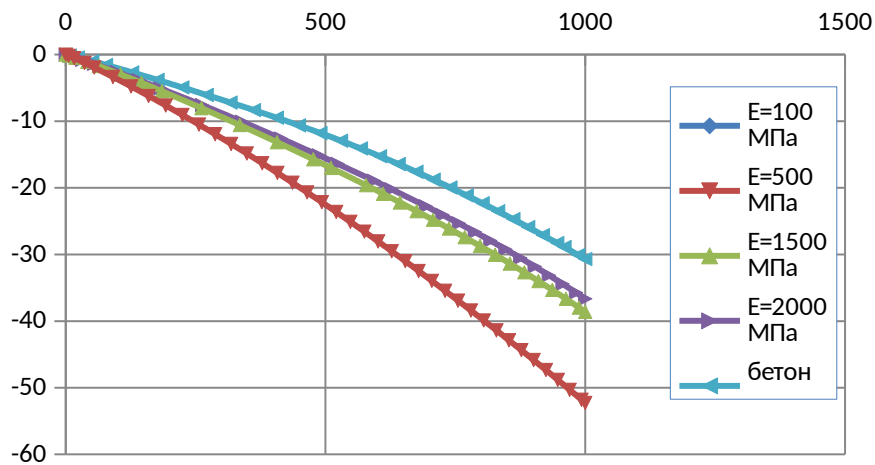


Рис. 6 - Графіки залежності осідання від навантаження для фундаменту, розташованого в масиві, армованому ґрунтоцементними палями Ø 0,2 м з кроком 3d

Розрахунковий опір ґрунту R визначався як перше критичне напруження σ_1 (абсолютно безпечно з точки зору міцності основи), яке визначено за точкою відхилення графіка від прямої.

Модуль деформації ґрунту E , МПа, обчислювався для лінійного відрізка графіка за ДСТУ Б В.2.1.-7-2000 (ГОСТ 20276-99). У ДСТУ Б В.2.1.-7-2000 передбачена максимальна величина штампа $A = 5000 \text{ см}^2$. Нами з причини, що була вказана вище, використаний штамп площею $A = 14400 \text{ см}^2$. Тому при підрахунках модуля деформації необхідно було врахувати масштабний ефект при випробовуваннях. Чим більший штамп, тим менше значення модуля деформації E . Тому, щоб привести модуль деформації до стандартного штампа, слід використати масштабний коефіцієнт, який при $p = 0,2-0,3 \text{ МПа}$ складає $m=1,4$ [4].

Результати розрахунків наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 - Параметри армованої основи за даними моделювання

Параметри основи	Модуль деформації ґрунтоцементних палей, МПа					
	Відсутні	100	500	1500	2000	24000 (бетон)
E , МПа	18,0	21,0	30,0	38,9	41,8	51,5
σ_1 , кПа	160	300	370	510	550	600

Внаслідок армування основи вертикальними ґрунтоцементними елементами модуль деформації основи збільшився на 60-70% для палей, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж вдвічі для палей, улаштованих за струменевою цементациєю (Jet Grouting).

Відповідно розрахунковий опір збільшився вдвічі для палей, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж втричі для палей, улаштованих за струменевою цементациєю (Jet Grouting).

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 збільшився на 60-70% для паль, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж вдвічі для паль, улаштованих за струменевою цементацією (Jet Grouting).

Відповідно розрахунковий опір збільшився вдвічі для паль, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж втричі для паль, улаштованих за струменевою цементацією (Jet Grouting).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маєвська І. В., Гончарук М. С. Ефект від використання золи виносення для улаштування ґрунтоцементних паль. МОЛОДЬ В НАУЦІ: ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОБЛЕМИ, ПЕРСПЕКТИВИ-2019: тези науково-практичної інтернет конференції, м. Вінниця 2020 р.

2. Маєвська І. В., Очеретний В. П., Гончарук М.С. Визначення впливу добавок золи-виносення на властивості ґрунтоцементу / 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>.

3. Гріщенко Р. П., Маєвська І. В. Аналіз міцності ґрунтоцементу при частковій заміні ґрунту на золу виносення. / Енергоефективність в галузях економіки України. Міжнародна н/т конф. ВНТУ, Вінниця, 2019. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/egeu/egeu2019/paper/viewFile/8263/6946>.

4. 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.

5. СП 291.1325800.2017. Конструкции ґрунтоцементные армированные. Правила проектирования. - Минстрой России. 2017, 34 с. [Чинний від 2017-11-16].

6. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Зоценко В. М. Бурові ґрунтоцементні палі, які виготовляються за бурозмішувальним методом: монографія. Харків: «Друкарня Мадрид», 2016. 94 с.

7. Петруняк М.В. Вплив на характеристики ґрунтоцементу 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.

8. Токин, А. Н. Способ изготовления цементогрунтовых свай / А. Н. Токин, Я.Я. Мотузов, А. И. Ветштейн. – М. : Стройиздат, 1981. – С. 29 – 33.

Гріщенко Руслан Павлович — студент групи Б-18мі, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: rusyagrishchen@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

Grischenko Ruslan- student of the group B-18mi, faculty of heat and power engineering and gas supply, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: rusyagrishchen@gmail.com

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