

## ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ГРУНТОЦЕМЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗОЛИ ВИНЕСЕННЯ

Вінницький національний технічний університет

**Анотація.** Виконано 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. Експериментально визначалась міцність зразків ґрунтоцементу при заміні від 5 до 50% ваги ґрунту на золу винесення. Встановлено, що добавка золи винесення у кількості 5-12% призводить до збільшення міцності зразків у порівнянні із зразками без добавок, що містять в якості в'язучого тільки цемент.

З метою розробки практичних рекомендацій щодо оптимального складу ґрунтоцементу було виконане математичне моделювання роботи армованої ґрунтоцементними палями основи. Для чисельного моделювання був використаний програмний комплекс Plaxis. При сталому кроці армуючих елементів досліджувались властивості ґрунтоцементного масиву в залежності від деформативності елементів армування і деформативності підсилюваного ґрунту.

**Ключові слова:** ґрунтоцемент, зола винесення, міцність, модуль деформації, армований масив, математичне моделювання, напружено-деформований стан.

**Abstract.** The search for the optimal composition of soil cement containing different percentages of removal ash: from minor additives to the replacement of half the mass of soil with ash. The search for the optimal composition was performed on the basis of experimental studies to determine the physical and mechanical characteristics. The strength of soil cement samples was experimentally determined when replacing from 5 to 50% of the soil weight with ash removal. It was found that the addition of removal ash in the amount of 5-12% increases the strength of the samples compared to samples without additives, which contain only cement as a binder.

In order to develop practical recommendations for the optimal composition of soil cement, mathematical modeling of the work reinforced with soil cement piles base was performed. The Plaxis software package was used for numerical simulation. At a constant step of reinforcing elements, the properties of the soil-cement massif depending on the deformability of the reinforcing elements and the deformability of the reinforced soil were investigated.

**Keywords:** soil cement; fly ash, module of deformation, reinforced base, mathematical modeling, stress-strain state.

### 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.

Найбільшого поширення дістало армування слабких основ ґрунтоцементними палями. 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 може регулюватися за рахунок геометричних параметрів елементів армування, а також їх міцності та деформативних характеристик.

Незалежно від технології влаштування ґрунтоцементних елементів їх вартість залежить від вмісту в'язучого. Науковцями кафедри БМГА ВНТУ було запропоновано введення у склад водоцементного розчину, який змішується з ґрунтом, золи винесення, що є відходом спалювання твердого палива на ГРЕС [1 - 3]. Попередні дослідження показали, що додавання золи призводить до збільшення міцності ґрунтоцементу, що дозволяє для досягнення певної міцності використовувати менше цементу. Оскільки при використанні мінеральної добавки у вигляді золи винесення економія

в'язучого призводить до зниження вартості ґрунтоцементу без ускладнень технологічного характеру, то подальші дослідження з оптимізації складу ґрунтоцементу є актуальними.

### Виклад основного матеріалу дослідження

У даній роботі поставлені задачі:

- дослідним шляхом визначити вплив вмісту золи винесення у складі водоцементної суміші на міцність ґрунтоцементу;
- опанувати оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) системи "армована основа – фундамент" за допомогою програмного комплексу Plaxis 3D, який базується на використанні чисельного методу скінчених елементів;
- побудувати розрахункові схеми роботи палі у ґрунті, роботи штампю на армованій основі;
- виконати чисельне моделювання роботи стовпчастого фундаменту на основі, армованій ґрунтоцементними палями, з побудовою графіків осідання-навантаження при різних деформативних характеристиках палей, пов'язаних з вмістом золи винесення;
- виконати чисельне моделювання роботи стовпчастого фундаменту на основі, армованій ґрунтоцементними палями, для різних видів ґрунту;
- провести розрахункові дослідження впливу вмісту золи винесення у складі ґрунтоцементу на властивості армованої основи.

Попередні дослідження властивостей ґрунтоцементу з додаванням золи винесення були виконані магістром Гончарук М. С. у 2018-2019 р.р. [1, 2]. Досліджувались властивості ґрунтоцементу з низьким вмістом золи винесення (від 20 до 80% від вмісту цементу, відповідно від 4 до 14% від ваги ґрунту). Ці результати були використані при подальшому аналізі.

На другому етапі досліджень була поставлена задача дослідити варіант з додаванням у склад суміші значної кількості золи. 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 золу винесення згідно з програмою, що наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Програма експериментального дослідження

№ 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

Об'єднані результати випробувань наведені на риунку 1.

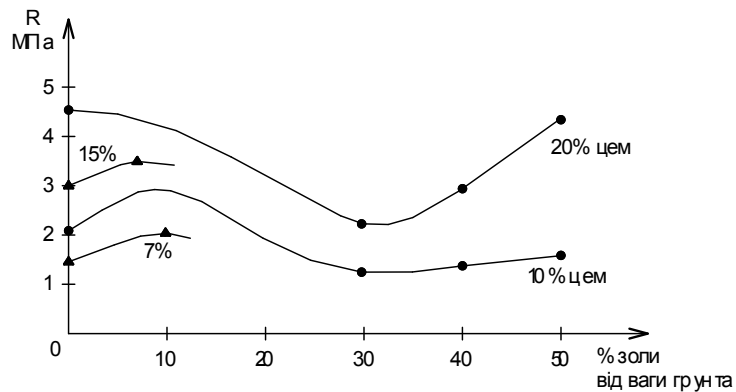


Рис. 1 – Графік залежності міцності ґрунтоцементу на стиск від вмісту золи виносення

З графіку рис. 1 видно, що збільшення вмісту золи виносення 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 виносення 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 виносення 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.

**Використання ґрунтоцементу з додаванням золи виносення** 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 виносення.

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

**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.

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 вугу ґрунту, вмісту цементу, водоцементного відношення.

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

**В означеному діапазоні міцності ґрунтоцементу модуль його деформації варіює в межах 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), то такий діапазон варіювання модуля деформації був прийнятий при математичному моделюванні.

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

Для аналізу параметрів основи, армованої ґрунтоцементними палями з використанням золи виносення, виконане 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. 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.

У таблиці 2 наведена програма математичного моделювання. Розглядалось три варіанти ґрунтових умов з модулями деформації природних ґрунтів 18, 12 та 6 МПа. Для кожного варіанту ґрунтових умов розглядалось використання ґрунтоцементу для армуючих елементів з модулем деформації 100, 300, 500, 1500 та 2000 МПа [4]. Для порівняння розглядалися також варіанти неармованої основи та варіант армування бетонними паллями.

На рис. 3 показані графіки залежності осідання від навантаження для стовпчастого фундаменту та фундаменту, розташованого в масиві ґрунту з модулем деформації 18 МПа, армованому ґрунтоцементними паллями Ø 0,2 м з кроком 3d при різних значеннях модуля деформації елементів армування.

Аналогічні графіки побудовані і для інших варіантів природного ґрунту.

За результатами моделювання одержані параметри армованої основи (таблиця 3).

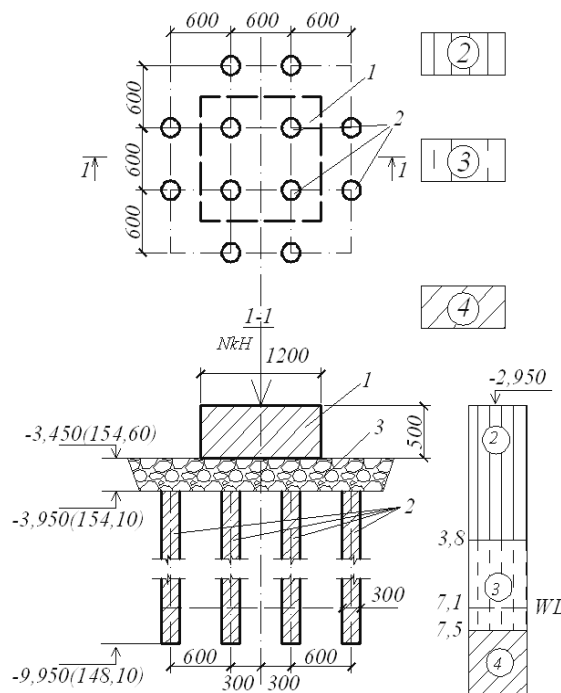


Рис. 2 – Схема випробувань основи, яка армована вертикальними ґрунтоцементними елементами, залізобетонним квадратним штампом

Таблиця 2 - Програма моделювання сумісної роботи фундаменту та ґрунтоцементних паль

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 $E_{пдп\epsilon} = 18$ 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/
		300	18	0,25	

Підгрупи	Довжина та поперечний розмір паль	Модуль деформації ґрунтоцементу, МПа	Питома вага ґрунтоцементу, кН/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт Пуасона	Ґрунтові умови
		500	18	0,25	м <sup>3</sup> , $c = 16$ кПа, $\varphi = 16^\circ$ ,
		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	

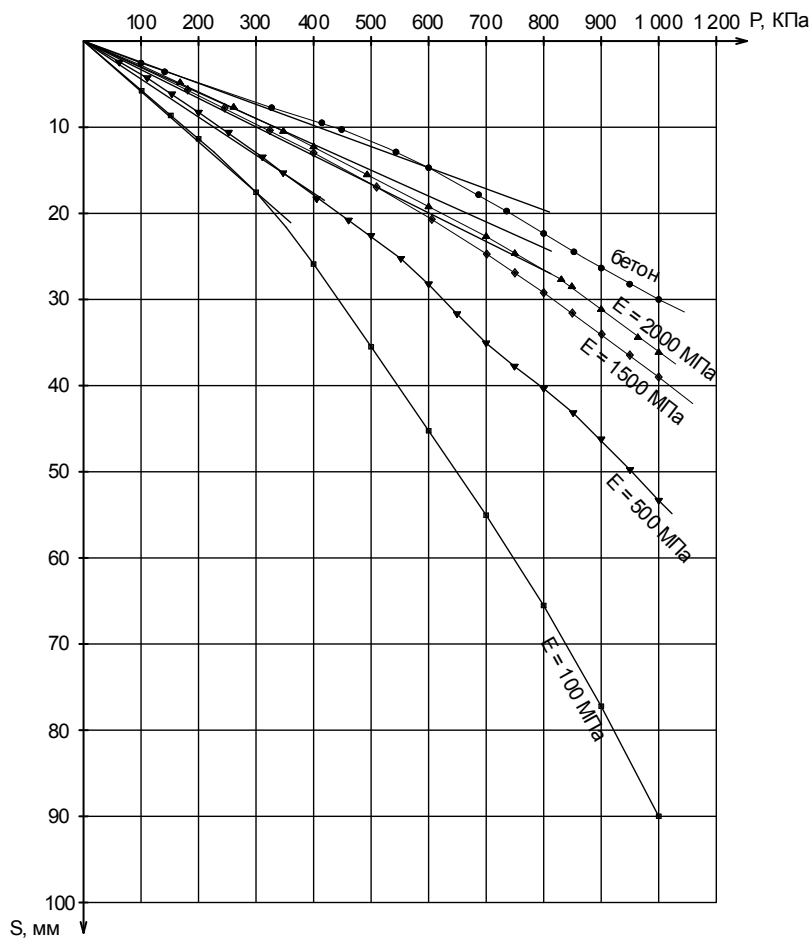


Рис. 3 - Графіки залежності осідання від навантаження для стовпчастого фундаменту та фундаменту, розташованого в масиві, армованому ґрунтоцементними палями Ø 0,2 м з кроком 3d для неоднорідної основи з приведеним модулем деформації  $E = 18$  МПа

Таблиця 3 - Параметри армованої основи за даними моделювання

Підгрупи	Параметри основи	Модуль деформації елементів армування, МПа
----------	------------------	--

		Відсутні	100	300	500	1500	2000	24000 (бетон)
I	E, МПа	18,0	23,0	27,0	30,0	38,9	41,8	51,5
	$\sigma_1$ , кПа	170	200	230	250	270	280	290
II	E, МПа	12,0	29,0	33,0	36,0	44,0	47,0	47,0
	$\sigma_1$ , кПа	170	200	230	250	280	290	300
III	E, МПа	6,0	17,5	21,5	22,9	27,6	28,3	31,7
	$\sigma_1$ , кПа	100	150	230	250	280	290	300

Внаслідок армування основи вертикальними ґрунтоцементними елементами модуль деформації основи з приведеним модулем деформації 18 МПа збільшився на 60-70% для паль, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж вдвічі для паль, улаштованих за струменевою цементациєю (Jet Grouting).

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

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

Для визначення економічної ефективності від використання вертикального армування ґрунтоцементними елементами з додаванням золи виносення у порівнянні з типовим рішенням фундаменту мілкого закладання на природній основі були виконані порівняльні розрахунки для технічного об'єкту проектування (спальний корпус санаторію в м. Хмільник). На підставі розрахунків за результатами науково-дослідних напрацювань для стрічкового фундаменту на армованій основі ширину фундаменту було зменшено з 3,3 м до 1,7 м (рис. 4). Виконане конструювання і розрахунок міцності тіла плити фундаменту.

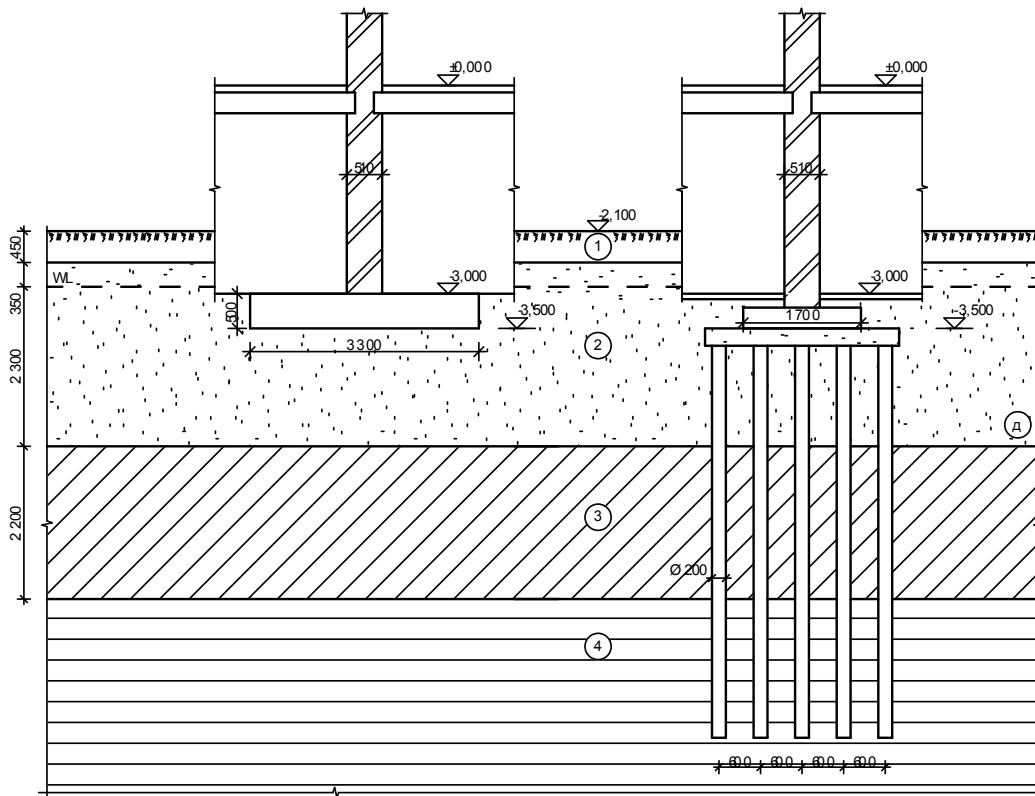


Рис. 4 – Розміщення у ґрунті фундаментів під середню поперечну стіну у двох розглянутих варіантах

Отримані дані свідчать про те, що влаштування фундаменту мілкого закладання у традиційному варіанті на природній основі є економічним варіантом, оскільки цей варіант має найменший показник приведених витрат – 38.564 тис. грн., а тому економічний ефект –334,26 тис. грн. у порівнянні з дорожчим варіантом будівництва – 372.825 тис. грн.

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

4. Для слабкої основи з модулем деформації 6 МПа модуль деформації армованої основи став більше у 3 рази для паль, улаштованих за бурозмішувальною технологією, і більше, ніж у 4 рази для паль, улаштованих за струменевою цементацією (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 цементацією (Jet Grouting) практично незалежно від початкових параметрів ґрунтової основи

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Маєвська І. В., Гончарук М. С. Ефект від використання золи винесення 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-винесення 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 винесення. / 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. Гріщенко Р. П., Маєвська І. В. Аналіз параметрів ґрунтової основи, армованої ґрунтоцементними палями з використанням золи винесення. Тези XLIX конференції професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниці та області, м. Вінниця, ВНТУ, 2020 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/9082>.

**Гріщенко Руслан Павлович** — студент групи Б-18мі, факультет будівництва теплоенергетики та газопостачання, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: [rusyagrischen@gmail.com](mailto:rusyagrischen@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](mailto: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: [rusyagrischen@gmail.com](mailto:rusyagrischen@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](mailto:irina.mayevskaja@gmail.com)