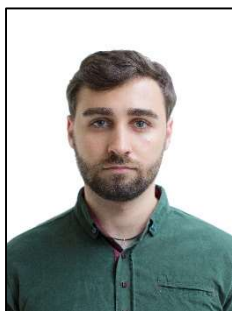


ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ
ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ НА ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТОВИХ ШАРІВEXPERIMENTAL RESEARCH ON THE PATTERNS OF FLY ASH INFLUENCE ON THE
PROPERTIES OF SOIL LAYERS

Бондаренко Людмила Петрівна, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: luda_bond@ukr.net, тел. +380442803942,

<https://orcid.org/0000-0002-8239-065X>



Скоропадський Віктор Вікторович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: viktorap333@gmail.com, тел. +380960736425.

<https://orcid.org/0000-0002-4404-7447>

Анотація. У статті розглянуто можливість використання золи-винесення теплових електростанцій (ТЕС) для стабілізації ґрунтів в дорожньому будівництві. Актуальність дослідження обумовлена дефіцитом придатних природних ґрунтів та необхідністю використання промислових відходів для сталого розвитку. Проаналізовано та узагальнено сучасні наукові дослідження щодо впливу золи-винесення у поєднанні з різними активаторами на фізико-механічні властивості ґрунтів. Показано, що введення золи сприяє формуванню цементацийних зв'язків у структурі ґрунту, зменшенню пластичності та підвищенню показників міцності. Ефективність стабілізації ґрунту залежить від вмісту золи, її властивостей та умов тверднення. На основі аналізу наукових джерел обґрунтовано програму та методику проведення експериментальних досліджень, визначено перелік контрольованих властивостей, а також варіації вмісту золи та цементу у сумішах. Шляхом лабораторних експериментів виявлено закономірності зміни властивостей укріплених ґрунтів залежно від вмісту золи. Окрему увагу приділено дослідженню комплексного в'язучого «зола-винесення – цемент». Доведено, що раціональне поєднання цих компонентів дозволяє суттєво підвищити морозостійкість та тріщиностійкість ґрунтових основ. У роботі деталізовано методику проведення досліджень, а також представлено та проаналізовано результати експериментальних випробувань. Використання золи – перспективний напрям покращення інженерних властивостей ґрунтових споруд, що сприяє зменшенню використання цінних природних ресурсів за рахунок їх заміни техногенними відходами. Отримані результати свідчать про ефективність стабілізації ґрунтів золою та доцільність подальших досліджень з метою підвищення ефективності дорожнього будівництва та реалізації принципів сталого розвитку.

Ключові слова: зола-винесення, стабілізація ґрунтів, будівництво, дорожнє будівництво, фізико-механічні властивості ґрунтів, укріплення ґрунтів, несна здатність, ущільнюваність ґрунту, земляне полотно, дорожній одяг, транспортна інфраструктура, вторинні матеріали, сталий розвиток, утилізація відходів.

Вступ. Стрімка індустріалізація, швидкий розвиток інфраструктури та розширення будівництва призвели до дефіциту природних матеріалів, зокрема і для будівельної галузі. Ґрунт є найпоширенішим та найдешевшим будівельним матеріалом, який використовується в різних напрямках будівництва, починаючи від дорожньої сфери і закінчуючи цивільним будівництвом. Попри загальну доступність ґрунту, у певних регіонах спостерігається його гостра нестача, спричинена незадовільними фізико-механічними характеристиками місцевих ґрунтів. Транспортування ж ґрунту на великі відстані недоцільне та економічно не вигідне. Це обумовлює низку проблем під час будівництва дорожніх насипів земляного полотна, що потребують значних обсягів відповідного за властивостями ґрунту.

У разі використання непридатного ґрунту в насипі виникають негативні наслідки: нестабільність конструкції, недостатня несна здатність, низька стійкість, пучинистість тощо. Ці фактори впливають на прискорене руйнування конструкції і як наслідок – експлуатаційний термін споруди зменшується в кілька разів. Тому покращення властивостей ґрунту шляхом додавання добавок є предметом значного дослідницького інтересу в галузі геотехнічної інженерії. Найпоширенішим матеріалом для укріплення ґрунтів є цемент та вапно. Але поряд з ними існує перспективний матеріал, який може також покращувати властивості ґрунтів, це зола-винесення ТЕС [1]. Зола-винесення в ґрунті виконує роль укріплення (стабілізації) та модифікації залежно від її хімічного складу і відповідних властивостей. Даний побічний продукт ТЕС наразі в Україні використовується в незначному обсязі, близько 8% від обсягу утворення, за іншими даними – до 20% [2], а решта накопичується у відвалах, що створює значні екологічні ризики.

Враховуючи дешевизну золи-винесення та негативний вплив на довкілля, необхідні додаткові дослідження взаємодії цього матеріалу з ґрунтами. Це дозволить науково обґрунтувати ефективність застосування золи-винесення для покращення ґрунтових характеристик та збільшити обсяги її використання у дорожньому будівництві. Дослідження властивостей ґрунту, стабілізованого золою, є актуальним також для впровадження принципів сталого розвитку та розробки ефективних інженерних рішень щодо зміцнення дорожніх насипів і шарів дорожнього одягу.

Доцільність використання побічних продуктів енергетичної галузі, зокрема зол-винесення, підтверджена багатьма дослідженнями та обсягами використання в інших країнах. До прикладу, обсяги використання золи в різних країнах: Китай 67% від загального обсягу утворення, Індія – 63%, США – 54%, ЄС – 90%, Японія – 96%, Австралія – 50%, Канада – 80%. Великі обсяги використання даного матеріалу пов'язані з високим рівнем досліджень та успішними прикладами застосування [3].

Аналіз літературних джерел [4 – 11] показує, що стабілізація ґрунтів є важливим методом покращення фізико-механічних властивостей земляного полотна та конструкцій дорожнього одягу. Одним із найпоширеніших підходів є введення хімічних добавок (цементу, вапна, геополімерів, армувальних волокон тощо), які ініціюють реакції зміцнення. Отримані результати свідчать, що використання золи-винесення разом із вторинними добавками є ефективним та економічно доцільним способом стабілізації слабких ґрунтів. Такий підхід забезпечує підвищення міцності й довговічності дорожніх конструкцій, сприяє утилізації промислових відходів, зменшенню потреби у портландцементі та скорочує викиди CO₂ пов'язані з його виробництвом.

У даному дослідженні розглядається використання золи-винесення як добавки до ґрунту в поєднанні з цементом-стабілізатором. Комплексна стабілізація забезпечує довговічність конструктивних шарів та економічну ефективність експлуатації дороги.

Метою дослідження є встановлення науково обґрунтованих закономірностей впливу золи-винесення Дарницької ТЕС (як окремої добавки, так і в складі комплексного в'язучого з цементом) на процеси структуроутворення та зміну фізико-механічних властивостей ґрунтів, для підвищення міцності та довговічності конструктивних шарів дорожнього одягу.

Завдання дослідження:

1. Дослідити вплив дозування золи-винесення на параметри стандартного ущільнення (максимальну щільність скелета та оптимальну вологість) супіску пилуватого.

2. Оцінити зміну деформаційних характеристик (модуля пружності та модуля деформації) ґрунтових сумішей залежно від вмісту золи та рівня вертикального навантаження за допомогою штампових випробувань.

3. Встановити характер зміни параметрів опору зсуву (кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення) стабілізованих ґрунтів за різних значень вертикальних напружень.

4. Експериментально визначити оптимальні співвідношення в комплексних системах «ґрунт – зола-винесення – цемент» за критеріями границі міцності на стиск та розтяг при згині після 28 діб тверднення.

5. Дослідити морозостійкість отриманих композитів та встановити вплив вмісту золи на збереження міцнісних характеристик матеріалу після циклічного заморожування-відтавання.

Методи дослідження: експериментальний, порівняльно-аналітичний, метод моделювання натурних умов.

Виклад основного матеріалу дослідження і отриманих результатів. Для досягнення поставленої мети в лабораторії дорожньо-будівельних матеріалів та хімії НТУ було проведено серію лабораторних випробувань, першим етапом яких стало визначення характеристик вихідної сировини та обґрунтування вибору об'єктів дослідження.

Характеристика вихідної сировини та обґрунтування вибору об'єктів дослідження

Для проведення лабораторних досліджень в якості ґрунту був обраний супісок пилуватий (табл.1), який є одним із найпоширеніших типів ґрунтів в Україні (охоплює близько третини території). Вибір даного типу ґрунту обумовлений його складними геотехнічними властивостями: низькою міцністю, високою капілярністю та чутливістю до зволоження. У дорожньому будівництві використання таких ґрунтів без стабілізації може призводити до просідання земляного полотна та швидкої втрати несної здатності внаслідок перезволоження.

Таблиця 1 – Властивості ґрунту для визначення виду ґрунту**Table 1** – Soil properties for determining soil type

Вид матеріалу	Вміст фракцій мм в %							W _L	W _p	
	>2	1-2	0,5-1	0,5-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,02-0,005			
Супісок	0	0,07	1,43	16,20	40,50	36,35	3,03	2,42		
	Піщана фракція 58,20%					Пилувата 39,38%		Глиниста 2,42%	20,55	14,8

Дослідженнями пікнометричним методом згідно з ДСТУ 4745:2007 встановлено щільність частинок – 2,707 г/см³, насипна щільність – 1,221 г/см³ відповідно до ДСТУ ISO 17892-2:2021, за розрахунками пористість становить – 49%.

Для стабілізації ґрунту використовували комплексну в'язучу систему, що складалася із золи-винесення та портландцементу.

В якості золи-винесення під час лабораторних досліджень була використана зола Дарницької ТЕС, отримана від спалювання кам'яного вугілля. Згідно з роботою [12] понад 90% частинок зол-винесення дрібні і мають питому поверхню 4380 см²/г. Для встановлення гранулометричного складу досліджуваної золи-винесення було виконано лабораторне випробування згідно ДСТУ 8772:2018, ДСТУ Б В.2.1-19:2009, результати якого представлені в таблиці 2.

Аналіз гранулометрії (табл.2) свідчить, що 94,15% золи становлять фракції розміром 10–71 мкм, які

визначають її високу питому поверхню. Дрібнодисперсна структура сприяє ущільненню ґрунтів, низька щільність дозволяє зменшувати масу конструкцій. Завдяки даним властивостям матеріал можна успішно використовувати для стабілізації ґрунтів, як мінеральну добавку до цементу або самостійно. Сферична форма частинок, характерна для золи-винесення Дарницької пилувугільної ТЕС, покращує реологічні властивості сумішей та сприяє щільнішому пакуванню зерен у структурі ґрунту.

Згідно з ДСТУ 8772:2018 проведено випробування та встановлено: щільність частинок – 2,365 г/см², насипна щільність – 1,221 г/см², пористість – 48% за результатами розрахунків.

Таблиця 2 – Гранулометрія золи-винесення Дарницької ТЕС
Table 2 – Granulometry of fly ash of Darnytsia TPP

Матеріал	Вміст фракцій мм в %							
	Зола- винесення	(Набір сит I)						
>2		1-2	0,5-1	0,5-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,02-0,005	<0,005
0		0	0	0,15	26,04	71,24	1,14	1,43
(Набір сит II)								
			2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,14	0,14-0,071	<0,071
		0	0	0	0,30	2,83	96,87	

За хімічним складом зола-винесення є алюмосилікатним матеріалом із домінуванням оксидів кремнію (SiO₂ – 52,3%), алюмінію (Al₂O₃ – 31,5%) та заліза (Fe₂O₃– 9,2%), що згідно з даними Соколова О. В. [12] визначає її високу пуцоланову активність. Мінералогічний склад представлений склоподібною аморфною фазою, мулітом (Al₆Si₂O₁₃), кварцом, магнетитом та кальцієвими силікатами. Склоподібна структура, що формується внаслідок швидкого охолодження залізо-алюмосилікатного розплаву, забезпечує здатність золи вступати в реакцію з Ca(OH)₂ з утворенням цементуючих гідросилікатів кальцію [13]. Передбачається, що це сприятиме суттєвому підвищенню міцності, щільності та водостійкості зміцнених ґрунтів, що підлягає експериментальній перевірці в даній роботі.

Ефективність реалізації пуцоланових властивостей золи та швидкість формування кристалізаційної структури ґрунтосуміші значною мірою залежать від наявності активатора тверднення, у ролі якого в даному дослідженні виступав портландцемент.

Для забезпечення гідравлічного тверднення системи використовували портландцемент марки ПЦ 400, основні мінералогічні складові якого – аліт (C₃S), беліт (C₂S), трикальцієвий алюмінат (C₃A) та чотирикальцієвий алюмоферит (C₄AF), які забезпечують процеси гідратації та формування міцної цементної структури. Використання цементу даної марки дозволяє досягти нормативної міцності при стиску (не менше 40 МПа на 28 добу) та забезпечити стабільні показники морозостійкості зміцненого ґрунту.

Програма та методологія експериментальних досліджень

Головною метою експериментальної частини дослідження була порівняльна оцінка ефективності стабілізації супіску пилуватого золою-винесення як самостійним в'язучим, так і в складі комплексної системи з додаванням портландцементу. Програма досліджень була розділена на два етапи:

1. Дослідження ґрунту, стабілізованого лише золою-винесення. На цьому етапі визначали оптимальні параметри ущільнення (максимальну щільність та оптимальну вологість) згідно з ДСТУ Б В.2.1-12:2009, а також показники несної здатності та граничного опору зсуву. Випробування на ущільнення допомагають дослідити поведінку ґрунту під час ущільнення, тоді як випробування несної здатності та опору зсуву використовуються для визначення міцності ґрунту як земляного полотна.

2. Дослідження ґрунту, укріпленого комплексною сумішшю (зола + цемент). Для оцінки роботи зміцнених шарів у конструкціях дорожнього одягу проводили визначення:

- границі міцності при стиску, що визначає несну здатність конструкції;

– міцності на розтяг при розколі для оцінки тріщиностійкості матеріалу під впливом транспортних навантажень;

– морозостійкості для прогнозування довговічності та експлуатаційної стабільності структури в умовах циклічного заморожування-відтавання.

Такий комплексний підхід до тестування дозволив встановити закономірності формування структури стабілізованого ґрунту (супіску) та визначити раціональні сфери застосування отриманих композитів у дорожньому будівництві.

Підготовка зразків та склади сумішей. Для забезпечення чистоти експерименту перед проведенням випробувань всі вихідні матеріали були висушені до абсолютно сухого стану, після чого були виготовлені досліджувані зразки.

На першому етапі досліджень, з метою вивчення впливу золи-винесення на фізико-механічні властивості ґрунту, було прийнято наступні склади композицій: Г100 – 100% ґрунту (контрольний зразок); Г90310 – 90% ґрунту та 10% золи; Г80320 – 80% ґрунту та 20% золи; Г70330 – 70% ґрунту та 30% золи.

Порядок виконання та результати лабораторних випробувань зразків «ґрунт-зола» та «ґрунт-зола-цемент»

Визначення максимальної щільності та оптимальної вологості досліджуваних зразків ґрунту проведено відповідно до ДСТУ Б В.2.1-12:2009 шляхом послідовного зволоження сумішей з кроком 1%. Це дозволило охопити діапазон стану ґрунту від недостатньо зволоженого до перезволоженого. Ущільнення зразків здійснювали на приладі для стандартного ущільнення шляхом трамбування ґрунту ударами вантажу з висоти 30см кількістю ударів – 40. Потім визначалася щільність зразка і відбиралися 2 проби для визначення вологості та перерахунку сухої щільності матеріалу. Також додатково визначалися показники границі текучості та розкочування (табл.3, рис. 1, 2).

Таблиця 3 – Результати випробування з визначення максимальної щільності

Table 3 – Results of the test for determining maximum density

Вид суміші	Вміст золи	Щільність ґрунту, г/см ³	Щільність скелета ґрунту, г/см ³	Оптимальна вологість ґрунту W, %	Пористість, %	Границя текучості, W _L , %	Границя розкочування, W _P , %
Г100	0	2,276	2,059	10,58	23,94	20,55	14,8
Г90310	10	2,284	2,065	10,62	22,74	21,31	15,35
Г80320	20	2,271	2,061	10,21	21,88	21,62	16,59
Г70330	30	2,194	1,994	10,07	23,45	22,44	17,27

Аналіз результатів (рис.1, 2) показує, що додавання до 20% золи підвищує щільність скелета ґрунту. Подальше збільшення вмісту добавки призводить до зниження щільності і для 30% золи вона стає нижчою за показник чистого ґрунту. Це обумовлено тим, що висока дисперсність та сферичність зерен золи сприяють кращому ущільненню суміші за рахунок зниження внутрішнього тертя («ефект підшипника») та формування щільної структури шляхом заповнення пор. Це підтверджують також показники пористості, які знижуються після додавання золи в кількості до 20%, а далі відбувається зростання пористості. Воно може свідчити про надлишок вмісту золи, за якого пористість виникає вже в самій структурі дрібнодисперсного заповнювача. Спад щільності суміші із вмістом 30% золи пов'язаний з низькою щільністю частинок золи, які впливають на загальний показник. Така ж тенденція спостерігається в роботі [14]. Введення понад 10% золи призводить до зниження оптимальної вологості суміші. Даний ефект пояснюється реологічними властивостями мікросфер золи, які полегшують взаємне переміщення зерен ґрунту під час ущільнення. Отримані результати узгоджуються з відомими даними [10] та підтверджують, що введення золи сприяє підвищенню границь текучості (W_L) і розкочування (W_P). Це розширює робочий діапазон вологості суміші, дозволяючи зберігати її оптимальну консистенцію навіть за підвищеного вмісту води.

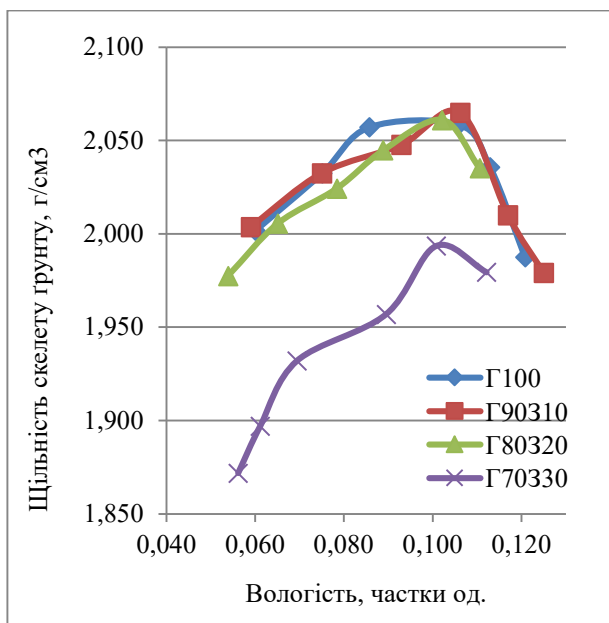


Рисунок 1 – Графік зміни щільності сумішей
Figure 1 – Graph of changes in the density of mixtures

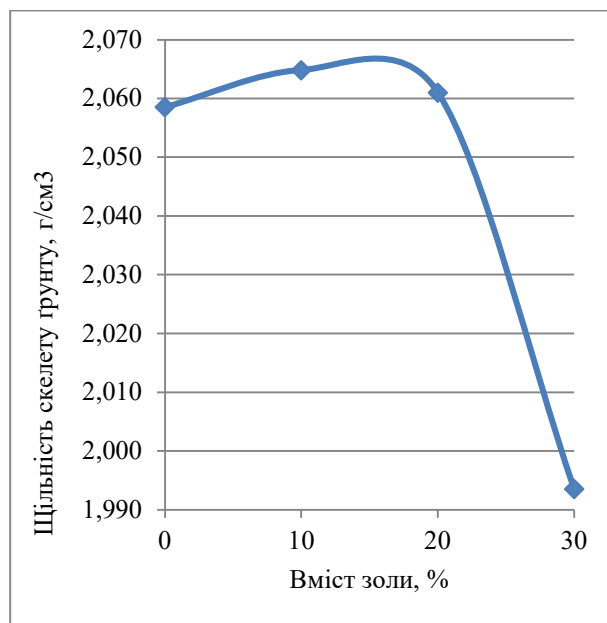


Рисунок 2 – Графік залежності щільності від вмісту золи
Figure 2 – Graph of dependence of density on ash content

Визначення модуля деформації та пружності проводилося шляхом штампових випробувань в ємності встановленого об'єму. Всі випробування проводилися за максимальної щільності та оптимальної вологості. Навантаження на штамп здійснювалося в ступінчастому режимі. На кожному ступені навантаження знімалися відліки переміщення з індикатору годинникового типу після стабілізації просідань. Було виконано 3 етапи навантажень по 4 ступені навантаження і розвантаження в кінці етапу. В результаті проведених досліджень було встановлено значення деформацій залежно від навантаг та показники модуля пружності і модуля деформації (табл.4, 5, рис.3-5).

Таблиця 4 – Залежність деформацій від навантаг та типу суміші
Table 4 – Dependence of deformations on load and type of mixture

Навантага на штамп, Н	Повне вертикальне переміщення за індикатором, мм			
	Г100	Г90310	Г80320	Г70330
0	0	0	0	0
50	0,17	0,27	0,32	0,29
100	0,51	0,55	0,66	0,6
150	0,83	0,83	0,99	0,91
200	1,12	1,1	1,33	1,2
300	1,78	1,7	2,04	1,87
400	2,29	2,17	2,65	2,74
500	2,83	2,64	3,34	3,67
600	3,46	3,1	4,06	4,63
700	4,31	3,89	4,92	6,04
800	5,02	4,3	5,3177	7,02
900	5,45	4,83	5,82	8,3
1000	6,4	5,45	6,77	9,58

Таблиця 5 – Показники модуля пружності і модуля деформації
Table 5 – Indicators of the modulus of elasticity and modulus of deformation

Параметри	Вид суміші			
	Г100	Г90310	Г80320	Г70330
Максимальний тиск I етапу МПа	0,637			
Модуль пружності I етапу, МПа	50,56	60,67	82,73	82,73
Модуль деформації I етапу, МПа	31,44	32,02	26,48	29,35
Максимальний тиск II етапу МПа	1,911			
Модуль пружності II етапу, МПа	80,29	82,73	105,00	105,00
Модуль деформації II етапу, МПа	30,53	34,08	26,02	22,82
Максимальний тиск II етапу МПа	3,185			
Модуль пружності III етапу, МПа	126,39	130,00	137,88	162,50
Модуль деформації III етапу, МПа	27,51	32,31	26,01	18,38

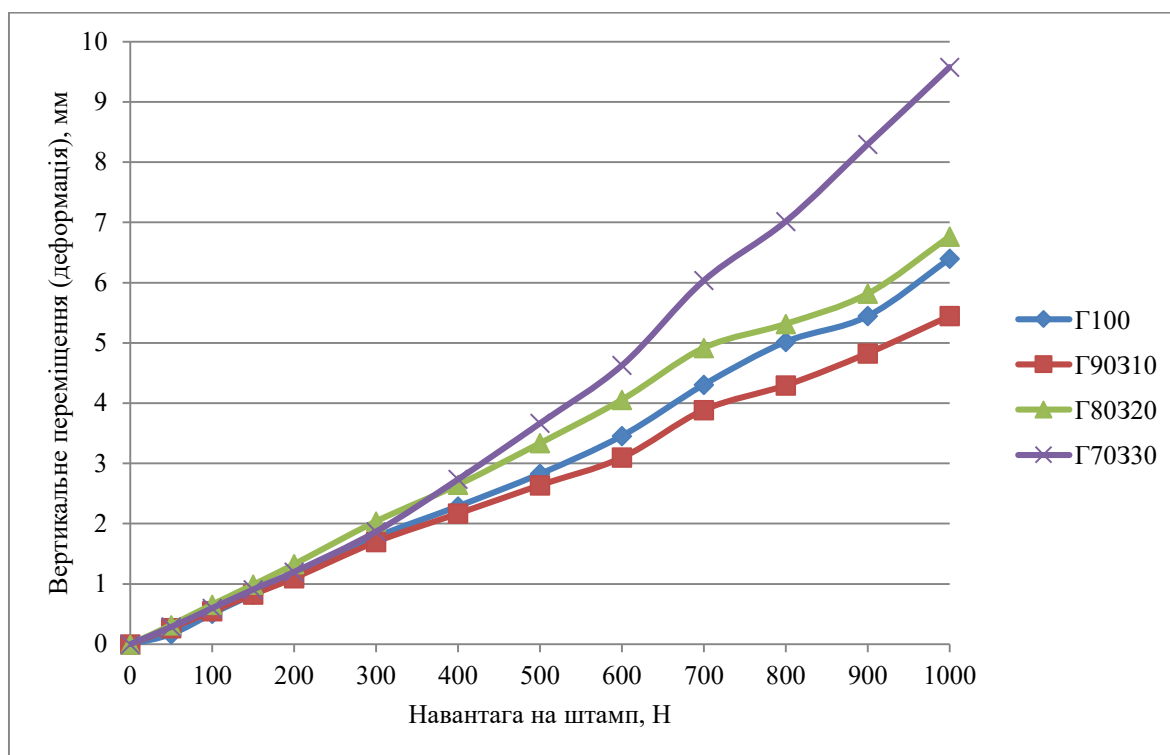


Рисунок 3 – Графік залежності зміни деформації від навантаги та типу суміші
Figure 3 – Graph of the dependence of the change in deformation on the load and type of mixture

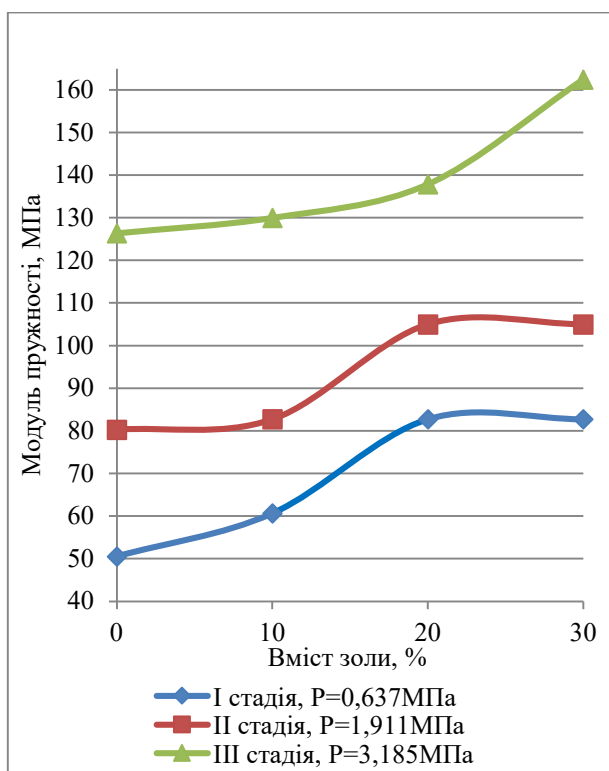


Рисунок 4 – Графік зміни модуля пружності
Figure 4 – Graph of change in elasticity

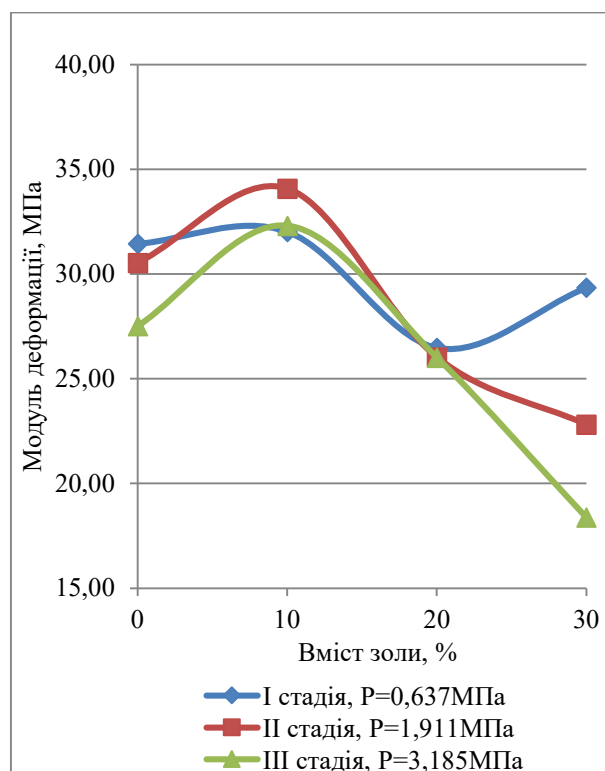


Рисунок 5 – Графік зміни модуля деформації
Figure 5 – Graph of change in deformation modulus

Аналіз результатів експериментальних досліджень (табл.4, 5, рис.3-5) свідчить про те, що найменші деформації спостерігаються в суміші Г90310. Вони менші, ніж деформації за аналогічних навантажень в контрольному зразку ґрунту Г100. Введення 20% золи зумовлює певний приріст деформацій, що суттєво не відхиляється від показників контрольного складу. Разом з тим, у зразка Г70330 спостерігаються значні деформації, особливо під час значних навантажень. На початковому етапі навантаження деформації подібні до показників контрольного зразку, але зі збільшенням навантаження деформації значно зростають. Це пов'язано з рухомістю зерен і недостатніми внутрішніми силами, які не можуть протидіяти зовнішнім впливам, тому штамп заглиблювався на максимальні значення в суміші з вмістом золи 30%. Разом з тим пружні деформації зменшувалися зі збільшенням вмісту золи. На графіку (рис.3) видно, що чим більша прикладена навантага, тим більше значення відносної деформації. На I та II етапі навантаження відбувається зростання модуля пружності зі збільшенням вмісту золи до 20% (рис.4). В цей момент досягається максимум і він не змінюється до вмісту золи 30%. Але на III стадії навантаження спостерігається пряма залежність модуля пружності від вмісту золи. Модуль деформації зростає під час введення золи в кількості 10% на трьох стадіях навантаження, після чого спадає до досягнення 20% вмісту золи. На I стадії навантаження в суміші Г70330 відбувається зростання модуля деформації, що може свідчити про доущільнення суміші за малих навантаг. Подальше збільшення навантаги приводить до зменшення модуля деформації суміші Г70330 (рис.5). Причина така ж, як і під час деформації даної суміші. Про збільшення несної здатності ґрунтів укріплених золами також згадується в роботі [15].

Визначення граничного опору зсуву визначалося згідно з ДСТУ Б В.2.1-4-96 шляхом відтворення натурального характеру руйнування зсуву в лабораторних умовах методом одноплосинного зрізу на приладі плоского зрізу конструкції І.М. Літвінова. Зріз відбувався під кутом, що зменшує вплив тертя між частинами приладу і позитивно впливає на точність вимірювань. Зразки ущільнювалися до максимальної щільності за оптимальної вологості в спеціальних ємностях і встановлювалися в робоче

положення приладу. Для визначення опору зсуву виконувалося 3 випробування для різних значень вертикальних напружень – 0,2, 0,3, 0,4 МПа. Після фіксації зразків і прикладання вертикального напруження здійснювали горизонтальне навантаження за допомогою вантажів масою 0,1 та 0,05кг, що відповідають силі 25 та 12,5 Н відповідно. Збільшення горизонтальних навантаж відбувалося до моменту зриву однієї частини відносно іншої, або до моменту горизонтального переміщення більше, ніж на 5мм. Саме ця навантага і є граничним опором зсуву. За отриманими результатами опору зсуву визначалися коефіцієнти внутрішнього тертя та питоме зчеплення зразків. Результати випробувань наведені в табл.6 та на рис.6.

Таблиця 6 – Показники опору зсуву, кута внутрішнього тертя, питомого зчеплення
Table 6 – Shear resistance, angle of internal friction, specific adhesion

Вид суміші	Вміст золи	№ випробування	Вертикальне напруження, МПа	Зсувна навантага, Н	Граничний опір зсуву, МПа	Кут внутрішнього тертя, град.	Питоме зчеплення С, МПа
Г100	0	1	0,2	450	0,18	16,70	0,12
		2	0,3	525	0,21		
		3	0,4	600	0,24		
Г90310	10	1	0,2	400	0,16	21,80	0,08
		2	0,3	500	0,2		
		3	0,4	600	0,24		
Г80320	20	1	0,2	375	0,15	25,41	0,055
		2	0,3	487,5	0,195		
		3	0,4	612,5	0,245		
Г70330	30	1	0,2	350	0,14	28,81	0,03
		2	0,3	487,5	0,195		
		3	0,4	625	0,25		

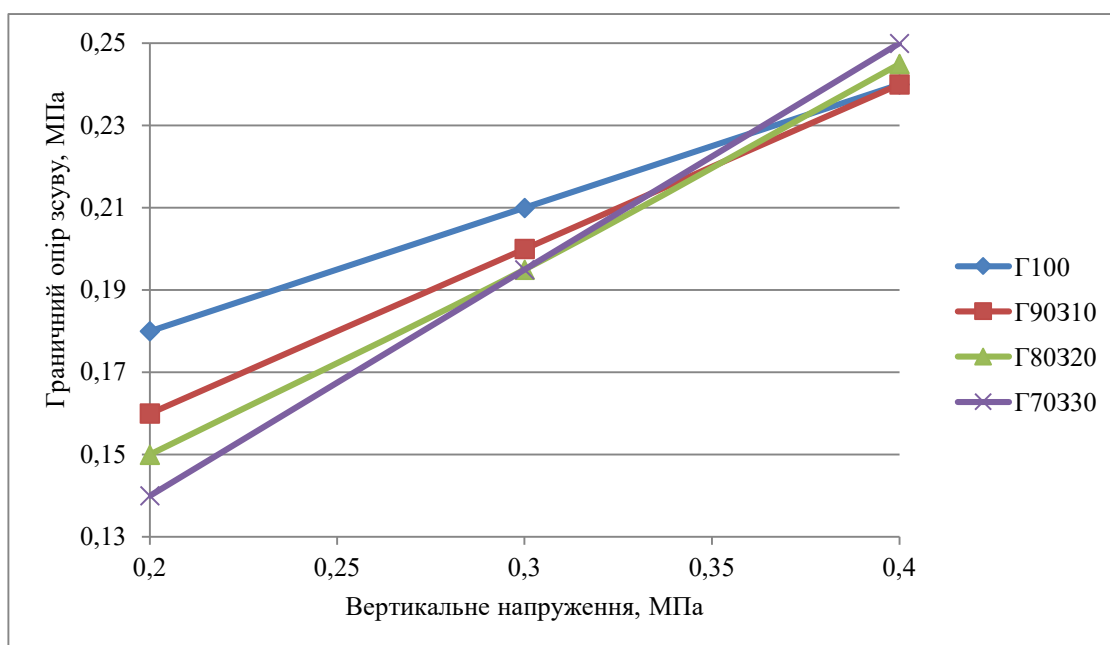


Рисунок 6 – Графік залежності опору зсуву від вмісту золи
Figure 6 – Graph of shear strength versus ash content

На підставі аналізу результатів експериментальних досліджень (табл.6, рис.6) можна зробити висновок про те, що вплив вмісту золи прямо пропорційний до кута внутрішнього тертя і обернено-пропорційний до питомого зчеплення. Для малих вертикальних напружень опір зсуву сумішей із золою гірший, ніж у вихідного ґрунту. Проте в реальних умовах, в масивних конструкціях, де діє великий вертикальний тиск, суміші із золою мають кращий опір зсуву, ніж звичайний ґрунт. Водночас, що більший вміст золи (до 30% за результатами дослідження), тим більший граничний опір зсуву. За дослідженням [16] також встановлено, що зола підвищує показник кута внутрішнього тертя ґрунтів.

Визначення границі міцності на стиск, згин, морозостійкості ґрунту із золою проводили з додаванням цементу. Для цього кожен раніше сформований склад розділявся на 3 підсклади з вмістом цементу 3, 5, 7% відповідно. Загалом отримано 12 різновидів сумішей з різними комбінаціями вмісту золи (0, 10, 20, 30%) та цементу (3, 5, 7%). Поєднання золи з цементом сприяє синтезу тобермориту з утворенням піни, яка поступово заповнює порожнечі. Це забезпечує формування монолітної, стійкої та надійної мікроструктури зміцненого ґрунту [17, 18]. До даних сумішей додавалася вода в кількості, що задовольняє умову оптимальної вологості. З сумішей формувалися зразки-циліндри висотою та діаметром 50,5 мм відповідно до ДСТУ Б В.2.7-309:2016 в спеціальних металевих формах на пресі під тиском ($15,0 \pm 0,2$) МПа протягом 3хв. Зразки витримувалися протягом 28 діб в ексікаторах за температури 20°C для набору ними міцності. Далі виконувалися випробування з визначення границі міцності при стиску, міцності на розтяг при розколі, морозостійкості згідно з ДСТУ Б В.2.7-309:2016. Перед випробуванням всі зразки насичувалися водою.

Водонасичені зразки випробовували на стиск зі швидкістю руху плити ($3,0 \pm 0,1$) мм/хв. За границю міцності приймали максимальне напруження, зафіксоване в момент механічного руйнування.

Міцність на розтяг при розколі визначали методом розколювання водонасичених зразків за твірною (аналогічно до схеми випробувань на стиск). Ці дані слугували базою для обчислення границі міцності матеріалу на розтяг при згині.

Морозостійкість матеріалу оцінювали за втратою міцності на стиск водонасичених зразків після 10 циклів заморожування-відтавання. Кожен цикл передбачав витримання зразків протягом 3,5 год за температури (-18 ± 2) °C із наступним розморожуванням за (18 ± 2) °C протягом аналогічного часу. Результати випробувань наведено в табл.7 та на рис.7-9.

Таблиця 7 – Результати випробувань міцності на стиск, морозостійкості та міцності на згин
Table 7 – Results of compressive strength, frost resistance and bending strength tests

Склад зразків	Границя міцності на стиск, МПа	Коефіцієнт морозостійкості	Міцність на згин, МПа
Г100Ц3	0,713	0	0,229
Г100Ц5	1,111	0,32	0,398
Г100Ц7	2,722	0,37	0,533
Г90310Ц3	1,092	0,12	0,290
Г90310Ц5	2,181	0,39	0,477
Г90310Ц7	3,488	0,45	0,779
Г80320Ц3	1,705	0,24	0,328
Г80320Ц5	2,066	0,45	0,490
Г80320Ц7	2,816	0,56	0,675
Г70330Ц3	1,431	0,33	0,227
Г70330Ц5	1,535	0,55	0,354
Г70330Ц7	2,491	0,76	0,478

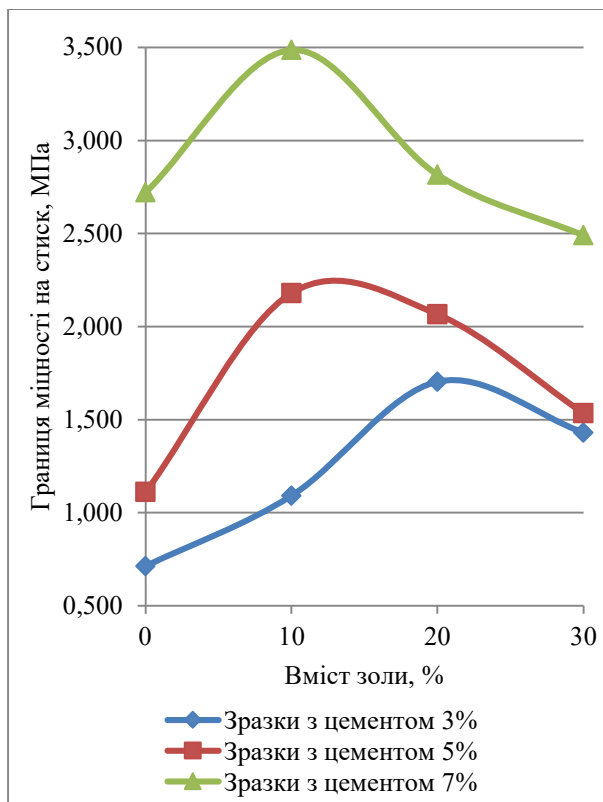


Рисунок 7 – Графік границі міцності на стиск
Figure 7 – Compressive strength limit graph

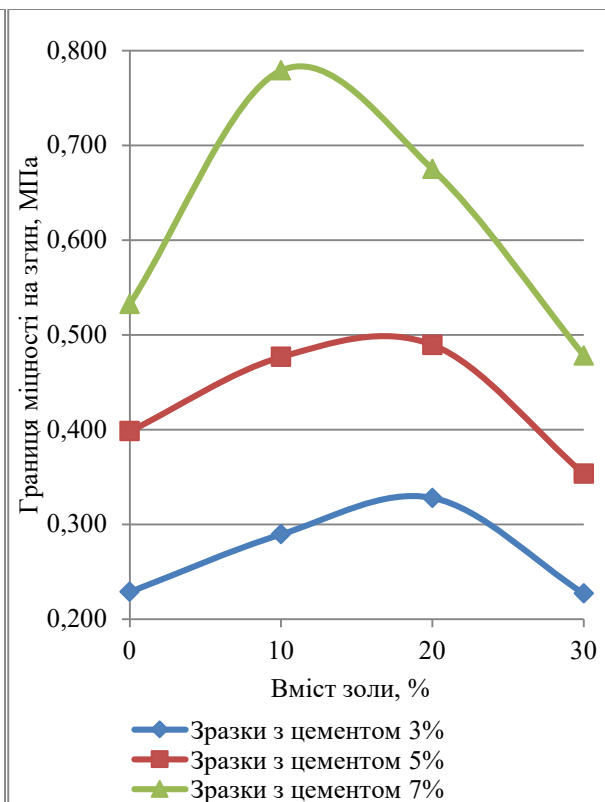


Рисунок 8 – Графік границі міцності на згин
Figure 8 – Bending strength limit graph

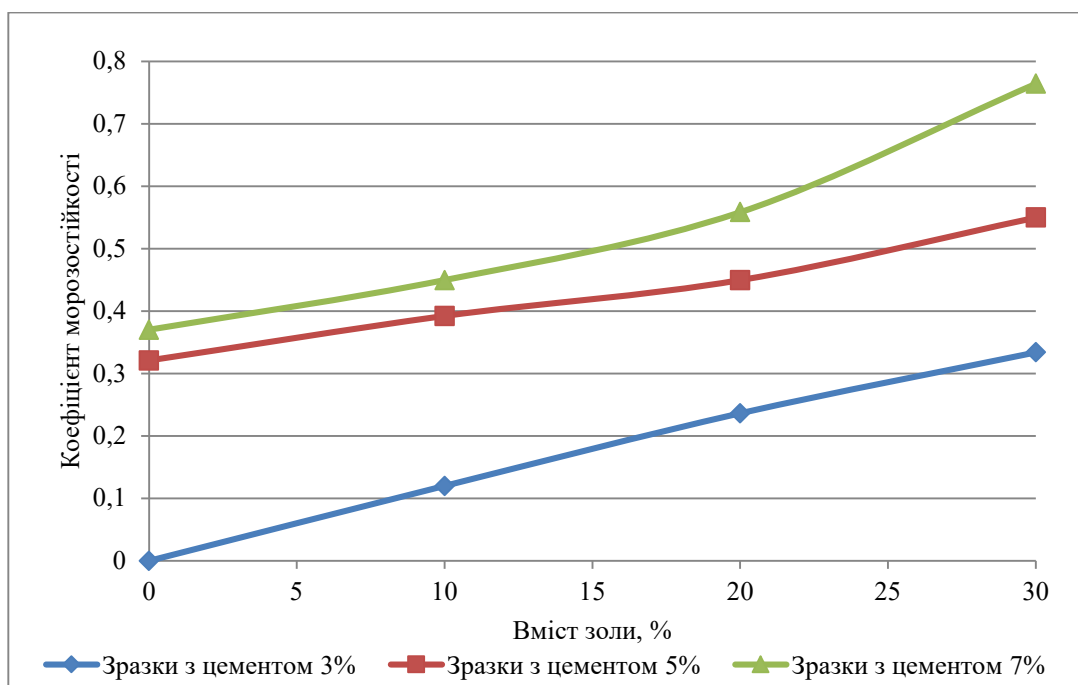


Рисунок 9 – Графік морозостійкості сумішей різного складу
Figure 9 – Frost resistance graph of mixtures of different compositions

Аналіз результатів експериментальних досліджень (табл.7, рис.7-9) показує, що вплив золи на міцність на стиск не однаковий за різних рівнів вмісту цементу. За вмісту цементу 3% у ґрунтовій суміші додавання золи збільшує її міцність і досягає максимуму за вмісту золи 20%, після чого йде на спад. Але навіть у раз вмісту золи 30% показник міцності кращий, ніж у зразків без золи. За вмісту цементу 5% відбувається зростання міцності після введення золи до 10% вмісту. Саме тоді досягаються найкращі результати. Подальше збільшення вмісту золи призводить до певного зниження міцності, проте її показники залишаються вищими порівняно зі зразками без додавання золи. Для складу ґрунтової суміші із 7% вмісту цементу найбільш раціональним є введення 10% золи, що забезпечує найвищі міцнісні характеристики, після чого зі збільшенням вмісту золи йде різкий спад міцності. В зразках Г80320Ц7 показник міцності дещо вищий, ніж в контрольного зразку без золи Г100Ц7, а в зразків Г70330Ц7 міцність нижча, ніж в контрольних зразків. Схожі результати описані в роботі [19].

Міцність на згин зразків з вмістом цементу 3 і 5% зростає після введення золи у кількості до 20%, після чого йде на спад. Для 30 % вмісту золи показники міцності на згин є нижчими, або рівноцінними контрольному складу без золи. В зразках з 7% цементу спостерігається різке зростання міцності на згин після додавання 10% золи, за якого досягається максимум показника. Після перевищення вмісту 10% відбувається зменшення міцності на згин, причому для вмісту 20% золи показник кращий, ніж в контрольних зразків без золи, а для вмісту 30% показник гірший за результати контрольного зразку.

Морозостійкість зразків під час додавання золи зростає для всього діапазону вмісту золи від 0 до 30%. Найбільший приріст спостерігається у зразків укріплених 3% цементу. Також спостерігається інтенсифікація морозостійкості зразків з вмістом цементу 7% після додавання золи від 20 до 30%. В роботі [20] також описується, що зола підвищує морозостійкість, але в поєднанні зі ЩПС.

Висновки та рекомендації

Аналіз наукових досліджень показує, що використання золи-винесення теплових електростанцій є перспективним напрямом підвищення ефективності стабілізації ґрунтів у дорожньому будівництві. Встановлено, що введення золи до складу ґрунтових сумішей змінює їхні фізико-механічні характеристики, зокрема зменшує пластичність, покращує ущільнюваність та сприяє формуванню міцних структурних зв'язків між частинками.

Показано, що застосування золи-винесення у поєднанні з цементом-активатором дозволяє суттєво підвищити показники міцності, несної здатності та стійкості ґрунтових основ до деформацій. Водночас ефективність стабілізації залежить від мінералогічного складу золи, її вмісту у суміші, типу ґрунту та тривалості тверднення.

Проведені випробування підтвердили результати зарубіжних наукових праць. Встановлено вплив золи-винесення на основні фізико-механічні показники сумішей та інженерні властивості ґрунтових шарів. Отримано залежності зміни параметрів від вмісту золи-винесення та рівня вмісту цементу. Результати свідчать про доцільність використання золи-винесення Дарницької ТЕС в поєднанні з ґрунтами, що видно на прикладі покращення властивостей супіску після стабілізації золою. Крім того, використання золи-винесення у ґрунтових конструкціях дозволить не лише покращити інженерні властивості основ, але й сприятиме зменшенню обсягів накопичення промислових відходів та раціональному використанню природних ресурсів.

Таким чином, застосування золи-винесення для стабілізації ґрунтів є технічно доцільним та екологічно обґрунтованим напрямом розвитку будівельної галузі, що потребує подальших експериментальних досліджень та впровадження у практику дорожнього будівництва.

Перелік посилань

1. Ignatova O., Sebelev I., Dyatchina A. Use of Heat Power Plants' Ash in Road Construction. *XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 953. 8 p.
2. Дерев'яно В. М., Моспан В. І., Колохов В. В., Дзюбан О. В., Мальцев С. В. Основні напрямки досліджень із використання золи ТЕС у виробництві будівельних матеріалів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 1 (007). С. 38–44.

3. Eskioglou P., Oikonomou N. Protection of environment by the use fly ash in road construction. *Global NEST Journal*. 2008. Vol. 10, No. 1. P. 108–113.
4. Arora S., Aydilek A. H. Class F fly ash amended soils as highway base materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005. Vol. 17, No. 6. P. 640–649.
5. Trzebiatowski B. D., Edil T. B., Benson C. H. Case study of subgrade stabilization using fly ash: State Highway 32, Port Washington, Wisconsin. *Recycled Materials in Geotechnics*. 2004. P. 123–136.
6. Mahvash S., López-Querol S., Bahadori-Jahromi A. Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. *Heliyon*. 2017. 27 p.
7. Amadi A., Osu A. Effect of curing time on strength development in black cotton soil–quarry fines composite stabilized with cement kiln dust. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2018. Vol. 30, No. 4. P. 305–312.
8. Mishra B., Gupta M. K. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 95–107.
9. Phummiphon I. et al. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*. 2016. Vol. 17, No. 4. P. 877–891.
10. Karami H. et al. Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades. *Transportation Geotechnics*. 2021. Vol. 29. 20 p.
11. Sarkar R., Devi D., Kumar T. S. Experimental studies on fiber reinforced soil stabilized with lime and fly ash. *International Journal of Integrated Engineering*. 2024. Vol. 16, No. 5. 13 p.
12. Соколов О. В. Удосконалення технології вироблення асфальтобетонних сумішей із золою-винесення для влаштування шарів дорожнього одягу : дис. ... д-ра філософії : 192 Будівництво та цивільна інженерія. Київ : Національний транспортний університет, 2024.
13. Kumar T. A., Thyagaraj T., Robinson R. G. Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*. 2022. P. 160–171.
14. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R. K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18, No. 4. P. 263–267.
15. Alawi A. et al. Enhancement of the existing soil strength using the waste materials as a stabilization resource for sustainable development. *Materials Today: Proceedings*. 2023. 6 p.
16. Simatupang M. et al. The mechanical properties of fly-ash-stabilized sands. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. P. 132.
17. Khan F., Das B., Dewanga N. Determination of geotechnical properties and stability of expansive soil using fly ash. *Walailak Journal of Science and Technology*. 2021. 18 p.
18. Noaman M. F., Khan M. A., Kausar A., Hassan A. A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 6. Article 100151. 14 p.
19. Bitar M. A., Ghida I. A., Jaber L. Using fly ash-plastic mesh bags wastes mixture as a recoverable resource for soil stabilization. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 18, No. 3. 16 p.
20. Deng C., Jiang Y., Tian T., Yi Y. Laboratory mechanical properties and frost resistance of vibration-compacted cement–fly ash slurry and cement–fly ash-treated macadam mixtures. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 397. 12 p.

Experimental Research on the Patterns of Fly Ash Influence on the Properties of Soil Layers

Bondarenko Liudmyla P., PhD (Candidate of Technical Science), Associate Professor, National Transport University, Professor of Department of Transport Construction and Property Management, luda_bond@ukr.net, tel.+380442803942, <https://orcid.org/0000-0002-8239-065X>

Skoropadskyi Viktor V.,— PhD student of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University. E-mail: viktorap333@gmail.com, tel. +380960736425, <https://orcid.org/0000-0002-4404-7447>

Abstract. The article considers the possibility of using fly ash from thermal power plants (TPPs) for soil stabilization in road construction. The relevance of the study is driven by the deficit of suitable natural soils and the necessity of using industrial waste for sustainable development. Modern scientific research on the influence of fly ash in combination with various activators on the physico-mechanical properties of soils is analyzed and summarized. It is shown that the introduction of fly ash promotes the formation of cementation bonds in the soil structure, leading to a decrease in plasticity and an increase in strength indicators. The efficiency of soil stabilization depends on the ash content, its properties, and curing conditions. Based on the analysis of scientific sources, the program and methodology of experimental research are substantiated, the list of controlled properties is determined, and the variations of ash and cement content in the mixtures are specified. Through laboratory experiments, the patterns of changes in the properties of stabilized soils depending on the ash content were revealed. Particular attention is paid to the study of the complex binder "fly ash – cement". It is proved that the rational combination of these components significantly increases the frost resistance and crack resistance of soil bases. The paper details the research methodology and presents and analyzes the results of experimental testing. The use of ash is a promising direction for improving the engineering properties of soil structures, contributing to the reduction of valuable natural resource use by replacing them with industrial waste. The results obtained testify to the efficiency of soil stabilization with fly ash and the feasibility of further research aimed at improving the efficiency of road construction and implementing the principles of sustainable development.

Keywords: fly ash, soil stabilization, construction, road construction, physico-mechanical properties of soils, soil strengthening, bearing capacity, soil compactability, subgrade, road pavement, transport infrastructure, secondary materials, sustainable development, waste recycling.

References

1. Ignatova O., Sebelev I., Dyatchina A. Use of Heat Power Plants' Ash in Road Construction. *XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 953. 8 p.
2. Derevianko, V. M., Mospan, V. I., Kolokhov, V. V., Dziuban, O. V. and Maltsev, S. V. (2022) Main directions of research on the use of TPP fly ash in the production of building materials, *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury*, (1), pp. 38–44. [In Ukrainian].
3. Eskioglou P., Oikonomou N. Protection of environment by the use fly ash in road construction. *Global NEST Journal*. 2008. Vol. 10, No. 1. P. 108–113.
4. Arora S., Aydilek A. H. Class F fly ash amended soils as highway base materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2005. Vol. 17, No. 6. P. 640–649.
5. Trzebiatowski B. D., Edil T. B., Benson C. H. Case study of subgrade stabilization using fly ash: State Highway 32, Port Washington, Wisconsin. *Recycled Materials in Geotechnics*. 2004. P. 123–136.
6. Mahvash S., López-Querol S., Bahadori-Jahromi A. Effect of class F fly ash on fine sand compaction through soil stabilization. *Heliyon*. 2017. 27 p.
7. Amadi A., Osu A. Effect of curing time on strength development in black cotton soil–quarry fines composite stabilized with cement kiln dust. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2018. Vol. 30, No. 4. P. 305–312.
8. Mishra B., Gupta M. K. Use of randomly oriented polyethylene terephthalate (PET) fiber in combination with fly ash in subgrade of flexible pavement. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 190. P. 95–107.
9. Phummiphan I. et al. Stabilisation of marginal lateritic soil using high calcium fly ash-based geopolymer. *Road Materials and Pavement Design*. 2016. Vol. 17, No. 4. P. 877–891.
10. Karami H. et al. Use of secondary additives in fly ash based soil stabilization for soft subgrades. *Transportation Geotechnics*. 2021. Vol. 29. 20 p.
11. Sarkar R., Devi D., Kumar T. S. Experimental studies on fiber reinforced soil stabilized with lime and fly ash. *International Journal of Integrated Engineering*. 2024. Vol. 16, No. 5. 13 p.

12. Sokolov, O. V. (2024) *Improvement of the technology for producing asphalt concrete mixtures with fly ash for the construction of pavement layers*. PhD Thesis (Specialty 192 Building and Civil Engineering). Kyiv: National Transport University. [In Ukrainian].
13. Kumar T. A., Thyagaraj T., Robinson R. G. Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*. 2022. P. 160–171.
14. Prabakar J., Dendorkar N., Morchhale R. K. Influence of fly ash on strength behavior of typical soils. *Construction and Building Materials*. 2004. Vol. 18, No. 4. P. 263–267.
15. Alawi A. et al. Enhancement of the existing soil strength using the waste materials as a stabilization resource for sustainable development. *Materials Today: Proceedings*. 2023. 6 p.
16. Simatupang M. et al. The mechanical properties of fly-ash-stabilized sands. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. P. 132.
17. Khan F., Das B., Dewanga N. Determination of geotechnical properties and stability of expansive soil using fly ash. *Walailak Journal of Science and Technology*. 2021. 18 p.
18. Noaman M. F., Khan M. A., Kausar A., Hassan A. A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. *Cleaner Materials*. 2022. Vol. 6. Article 100151. 14 p.
19. Bitar M. A., Ghida I. A., Jaber L. Using fly ash-plastic mesh bags wastes mixture as a recoverable resource for soil stabilization. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 18, No. 3. 16 p.
20. Deng C., Jiang Y., Tian T., Yi Y. Laboratory mechanical properties and frost resistance of vibration-compacted cement–fly ash slurry and cement–fly ash-treated macadam mixtures. *Construction and Building Materials*. 2023. Vol. 397. 12 p.

Дата надходження до редакції 13.01.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 03.02.2026.