УДК 625.7/.8 **DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-160-169**
UDC 625.7/.8

ЗАКОНОМІРНОСТІ ТА ТЕНДЕНЦІЇ ВПЛИВУ ЗОЛИ ВИНОСУ НА ҐРУНТИ

PATTERNS AND TRENDS OF THE EFFECT OF FLY ASH ON SOILS

Савенко В'ячеслав Якович, *Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри транспортного будівництва та управління майном Національно транспортного університету, e-mail: svi1310@ukr.net ,*

https://orcid.org/0000-0001-8174-7728.

Скоропадський Віктор Вікторович, *аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном Національно транспортного університету, e-mail: viktorap333@gmail.com,*

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

Анотація: У статті розглянуто можливість повторного використання золи виносу теплоелектростанцій у дорожньому будівництві з метою забезпечення енергозбереження та ресурсоефективності. Проаналізовано вплив золи на основні інженерно-геотехнічні показники ґрунтів, такі як межа текучості, межа пластичності, щільність, оптимальна вологість, гідравлічна провідність, опір проникненню, міцність на зсув та показник CBR. Встановлено, що зола виносу здатна покращувати властивості слабких глинистих ґрунтів завдяки своїм пуцолановим і гідравлічним властивостям. Додавання золи сприяє зменшенню пластичності, набухання та водонасичення, підвищує ущільнення й несучу здатність до певного оптимального вмісту, після якого спостерігається зниження показників. Оптимальна кількість золи залежить від її хімічного складу, гранулометрії та типу ґрунту. Застосування золи виносу є доцільним з екологічної та економічної точок зору, оскільки дозволяє зменшити кількість промислових відходів, скоротити використання природних матеріалів і забезпечити стійкість транспортних споруд.

Ключові слова: зола виносу, стабілізація ґрунтів, дорожнє будівництво, пуцоланові властивості, індекс пластичності, оптимальна вологість, фізико-механічні властивості, енергоефективність, утилізація відходів.

Вступ. Економічний розвиток будь якої країни нерозривно пов'язаний з галузями промисловості, енергетики та мережі транспортних зв'язків. В Україні основну кількість електроенергії виробляють атомні електростанції АЕС, а на другому місці за обсягами виробництва йдуть теплові електростанції – ТЕС і ТЕЦ. Теплові електростанції виробляють третину всієї електроенергії і чинять значний вплив на екологічну ситуацію. На них припадає понад 30 % викидів шкідливих речовин від загального обсягу викидів промислових підприємств. Цей вплив відбувається через викиди шкідливих газів, а також накопичення продуктів спалювання – зол виносу. Утилізація золи виносу при повторному використанні є важливим аспектом економічних та екологічних інтересів. Щорічне виробництво золи виносу в Україні становить близько 6,5 млн тон, а також існує багато відвалів цього відходу промисловості, які займають великі площі та чинять негативний вплив на екологію. Золошлаковий відвал – спеціальне призначене місце для накопичення вторинних продуктів спалювання ТЕС(ТЕЦ) – золошлакових матеріалів. Золошлакові відвали містять токсичні елементи, забруднюють ґрунт та підземні води, потребують відчуження великих територій. В Україні обсяги невикористаних золошлакових відвалів приблизно оцінюються в кількості 360млн тон і вони займають великі площі [1]. Ці великі обсяги матеріалу утворюються внаслідок уловлювання дрібних частинок золи електрофільтрами, які утворюються в процесі спалювання твердого палива. Основними виробниками є теплові електростанції, які спалюють кам'яне та буре вугілля. Враховуючи ці чинники є велика потреба в утилізації зол і найкращою галуззю для цього є будівництво, зокрема транспортне. Кожного року відбувається здорожчання будівництва та сировини, а також дефіцит природніх матеріалів. Тому використання золи виносу в будівництві є взаємовигідним, адже воно досягає економічного та екологічного ефекту, що є концепцією сталого розвитку. В світі є багато прикладів успішного використання даної сировини, її використовують при виробництві цементу, бетону, цегли, шлакоблоків, як добавка до ґрунтів, кам'яних сумішей та асфальтобетону і це не повний перелік шляхів використання. При використанні золи як додаток до цементу економиться енергія, яка потрібна на його виготовлення та зменшуються викиди CO_2 які виникають при виготовленні. Лідерами утилізації золи при повторному використанні в світі є США, Китай, Індія, Фінляндія, Франція, Велика Британія та ін. В Україні золу використовують тільки до 20% від утворення [2].

Від виду твердого палива, а саме типу вугілля залежить якість побічного продукту – золи виносу, а як наслідок спосіб використання. Найбільш кількісно ефективним способом повторного застосування золи є поєднання з ґрунтами, де можна вводити її до 30% від маси суміші. Використання золи-винесення для стабілізації та укріплення ґрунту зменшить попит на звалища для цього попелу та обмежить використання цінних заповнювачів. Зола виносу є прогресивним матеріалом для укріплення ґрунтів через свою низьку об'ємну вагу, хорошу стисливість, пуцоланові властивості та економічний ефект [3,4].

Мета роботи. Дослідити способи використання золи в поєднанні з ґрунтами. Опис хімічного складу золи та її мінералогія, встановлення степеню впливу цих показників на укріплення. Встановлення основних характеристик та переваг золи виносу для використання в будівництві. Рекомендації щодо вибору ґрунту та його характеристик для досягнення кращого результату в поєднанні із золою. Виявлення тенденцій та закономірностей впливу золи на властивості ґрунту при укріпленні, на основі аналізу зарубіжних досліджень. Встановлення взаємозв'язків та впливів між різними інженерно-геологічними показниками.

Виклад основного матеріалу. Покращувати якість основи з ґрунту можна стабілізацією, яка буває як механічна так і хімічна. Хімічна стабілізація полягає в введенні речовин з добавками, які вступають в реакцію з ґрунтом та його укріплюють утворюючи стійку основу. Найпоширенішим матеріалом для укріплення є цемент в кількості 8-15%. При будівництві доріг використання ґрунтових мас дуже велике що призводить до значного застосування цементу та збільшення економічних затрат. Для зменшення витрат можна використовувати промислові відходи, зокрема золи теплоелектростанцій [5].

Властивості золи залежать від мінералогічного складу вугілля і вони можуть сильно варіюватися в різних ТЕС. Основні мінерали вугілля є карбонати, сульфіди, глинистий матеріал. До глинистого матеріалу відносять тонкодисперсні алюмосилікатні мінерали з пластинчастою структурою, які ведуть себе як глини, це можуть бути каолініти, ілліти, смектити. На прояв гідравлічних властивостей впливає вміст карбонатів, а саме CaO і за цією ознакою золи поділяються на висококальцієві з вмістом CaO > 20% (активні), які проявляють не тільки гідравлічні властивості, а й пуцоланові, низькококальцієві з вмістом CaO < 10% (слабоактивні) - в більшості проявляють пуцоланові властивості. Комбінована гідравлічна та пуцоланова активність проявляється через високий вміст саме вільного CaO, який при контакті з водою гідратується до $Ca(OH)_2$, що вступає у вторинну реакцію з SiO_2/ Al_2O_3 утворюючи при цьому гідросилікати кальцію (C–S–H/ C–A–H). Гелі які утворюються в процесі хімічних реакцій забезпечують цементуючий ефект підвищуючи міцність і водостійкість стабілізованого матеріалу. Ще одна важлива характеристика це модуль основності МО – інтегральна характеристика хімічного складу. МО > 0,9 – основні золи, 0,6-0,9 – кислі, МО < 0,6 – надкислі. По мірі зменшення МО вміст оксиду кальцію зменшується, а вміст склоподібної фази навпаки збільшується. Золи в своєму складі містять компоненти SiO_2 (діоксид кремнію або кремнезем, до 65%), Al_2O_3(діоксид алюмінію або глинозем, до 25%), CaO, MgO, K_2O, Na_2O, завдяки саме цим мінералам золу й використовують в будівництві. У кристалічній фазі можлива наявність двокальцієвого силікату, муліту, геленіту, псевдоволастоніту й інших мінералів.

В дорожньому будівництві золу в ґрунті використовують для спорудження земляного полотна, модифікації мінералогічного складу ґрунтів, стабілізація ґрунтів (зміцнення слабких ґрунтів - піски, торфовища), як добавка до в’яжучих з метою їх економії та зміцнення ґрунтів. Золу сухого вловлення можна застосовувати як самостійне в’яжуче (якщо вона активна), а також як добавку до неорганічних і органічних в'яжучих речовин [6]. Якщо зола використовується як добавка до в’яжучих то вона виступає в ролі активної мінеральної алюмінєво-кремнієвої добавки в кількості 5-25% від ваги клінкеру. Переваги використання продуктів спалювання вугілля у дорожньому будівництві:

- Економічність
- Низька щільність знижує витрати на транспортування
- Доступність у всіх регіонах
- Висока міцність та морозостійкість
- Екологічність через усунення золовідвалів

Фізичні властивості золи виносу – низька щільність, висока механічна міцність, хімічна інертність, термостійкість, низька теплопровідність. Завдяки цим властивостям навіть неактивна зола якісно використовується в ґрунтах. Вона використовується для поліпшення гранулометрії і як наслідок поліпшення ущільнення та структури. Також її можна використовувати як частковий замінник природного ґрунту, наприклад піску для поліпшення властивостей стисливості. Активні золи що проявляють пуцоланові та гідравлічні властивості можуть використовуватися як самостійне в’яжуче при укріпленні ґрунтів, особливо глинистих з числом пластичності до 21. Внаслідок застосування зол для укріплення ґрунту частинки цементуються і формується штучне каменеподібне середовище, яке підвищує несучу здатність та водостійкість. Основні мінерали ґрунту мають максимальну адсорбційну здатність у перші 4 - 8 днів, тому найбільший ріст міцності досягається в цей період.

При укріпленні ґрунтів потрібно надавати перевагу карбонатним ґрунтам які набувають після укріплення більшу міцність порівняно з некарбонатними. Для прискорення процесів твердіння, підвищення міцності і морозостійкості укріплених сумішей рекомендується вводити в них наступні водорозчинні активатори: технічний хлористий кальцій; технічний хлористий натрій; технічний натрій сірчанокислий; хлорне залізо. Як активатор, для ґрунтових сумішей з використанням золошлакових матеріалів ТЕС укріплених вапном, може застосовуватись портландцемент або гіпс.

Щоб досягнути найбільшого ефекту від укріплення, потрібно проводити підбір складу експериментальним шляхом з врахуванням властивостей матеріалів та погодно-кліматичних умов.

Суміші модифіковані золою та укріплені в’яжучим повинні мати оптимальну вологість, але для глинистих ґрунтів не більше 0,55 WT, для інших – не більше 0,75 WT (WT – вологість на межі текучості). Дослідження показали, що глини та суглинки з вмістом золи потрібно додатково обробляти вапном для поліпшення властивостей [7].

Показники пластичності та ущільнення покращуються при застосуванні золи разом з вапном. Існують переконливі дослідження які вказують ефективність застосування золи в поєднанні з вапном, для досягнення кращого результату [8]. В такому випадку кальцій із золи та вапна взаємодіє з вільним глиноземом та силіцієм ґрунту та золи утворюючи стабільні сполуки (C–S–H/ C–A–H) сприяючи довготривалому зміцненню. При цьому утворюється більш компактна мікроструктура, що покращує механічні властивості ґрунту. В даному випадку цементація відбувається повільніше ніж з портландцементом, але з більшою довговічністю. Найкращі показники досягаються при тривалості до 90діб, проте і далі відбувається незначне зростання міцності [9,10].

Випробування показують, що зола впливає на зміну оптимальної к-сті вологи та на максимальну суху щільність. При збільшенні вмісту золи потреба оптимального вмісту вологи зростає, а щільність зменшується. Якщо зола не є висококальцієвою то ефекту укріплення від застосування однієї золи недостатньо, кращі якості досягаються при поєднанні з малою кількістю цементу, при цьому формується тоберморит і утворюється більш щільна та стійка структура [11]. Використання золи в поєднанні з цементом сприяє утворенню піни, яка і заповнює пустоти формуючи більш надійну кристалічну структуру [12].

Стабілізація слабких ґрунтів є важливим аспектом дорожнього будівництва і є необхідною для підвищення ефективності роботи дорожнього одягу, а також для зменшення витрат на обслуговування. До слабких ґрунтів відносяться набухаючі ґрунти які хімічно активні і дуже залежні від вологи, що спричиняє їх зміну об'єму, сюди відносяться глинисті ґрунти. Значне набухання та усадка призводить до фізичних перетворень: у сухому стані вони стають крихкими й жорсткими, а у вологому — повністю втрачають міцність, внаслідок чого стійкість конструкцій порушується. Також цикли заморожування та відтавання несуть негативний та руйнуючий вплив на дорожній одяг. Тому потрібне досягнення меншого водонасичення та збільшення морозостійкості ґрунту шляхом збільшення коефіцієнту фільтрації. Враховуючи наявність великої кількості слабких ґрунтів на території України, дослідження впливу золи на них є досить актуальним. Зола виносу через наявність склоподібних сферичних частинок не утримує воду так як глина. Це означає, що вона знижує капілярність і здатність ґрунту утримувати воду. При змішуванні з глинистим (набухаючим) ґрунтом зола розриває суцільну глиняну структуру внаслідок чого менше утворюються тонкі пори, які утримують вологу. А завдяки пуцолановим реакціям і цементації зменшується вільна волога. Тому ґрунт із золою менш чутливий до змін вологості і менше набухає та осідає. Але важливою умовою є кількість, тому що при надлишковому вмісті золи вона працює як інертний пилоподібний матеріал що збільшує водопроникність. Дослідження що описані в роботі [13] свідчать про зниження пластичності та показнику вільного набухання. Проте отримання однорідної суміші на практиці стало однією з ключових проблем. Для кращого ефекту запропоновано пошарове укладання із застосуванням принципу дискової борони.

Крім того, було встановлено, що використання золи зменшує високу стисливість ґрунтів і забезпечує достатню зсувну міцність для стабільності схилів [14].

В роботі [15] для визначення впливу золи на ґрунт проводилися такі тести –

- Визначення питомої ваги
- Визначення оптимальної вологості та максимальної щільності
- Випробування на одновісне стискання
- Тест CBR

Дослідження проводилися з різним вмістом золи виносу. Було встановлено що зі збільшенням вмісту золи у суміші значення межі текучості та межі пластичності зростають. Подальше збільшення вмісту золи-винесення у ґрунті сприяє зменшенню значень індексу пластичності, що вказує на зниження стисливості суміші. Зола впливає на зниження ступеня набухання ґрунтової суміші і ця залежність є обернено пропорційною. Вплив на щільність є непостійним, спочатку щільність зростає, а потім зменшується це свідчить про зниження міжчастинного зсувного опору. Також при різних значеннях вмісту золи змінюється оптимальна вологість. При пікових значеннях сухої щільності зростає коефіцієнт міжчастинного зсувного опору, що збільшує загальні механічні властивості ґрунтового масиву. Тести CBR які проводилися на зразках при максимальній сухій щільності та оптимальній вологості показали що додавання золи-винесення спричиняє підвищення значень CBR до певного моменту, після чого відбувалося зниження. Це свідчить про зниження міцності, що й було отримано в результаті випробувань на одновісне стискання. Існують закономірності зміни міцності зразків аналогічні до закономірностей несучої здатності. Фактично ці показники взаємопов'язані і один показник характеризує інший. Якщо показники міцності зростають то відповідно і несуча здатність збільшується та навпаки. Дані демонструють типову залежність — спочатку зростання, потім спад міцності з надмірним вмістом золи. Це є ознакою залежності міцності від значення щільності. За результатами лабораторних випробувань було встановлено, що значення міцності зразків прямо-пропорційне до вмісту золи, але тільки до певного моменту, так званої оптимальної кількості. Після перевищення оптимальної кількості тенденція впливу змінюється на обернено-пропорційну. Враховуючи попередню інформацію виникає залежність зміни міцності через вплив коефіцієнту міжчастинного зсувного опору (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив вмісту золи-винесення на інженерні властивості ґрунту
Table 1 – Influence of fly fsh content on the engineering properties of soil

Властивості	Вміст золи				
	0%	5%	10%	15%	20%
Показник диференційного вільного набухання (DFS), %	69	59,7	52,5	41	34
Значення показника CBR, %	2,189	2,043	2,335	2,262	1,265
Межа міцності при стиску,	0,1688	0,125	0,333	0,1779	0,1692

Подібні випробування проводилися також в роботі [16], де було встановлено що межа текучості зменшується, а межа пластичності збільшується зі збільшенням вмісту золи. Коефіцієнт фільтрації зменшується зі збільшенням вмісту золи. Це зниження гідравлічної провідності добре корелює зі збільшенням максимальної сухої питомої маси зі збільшенням вмісту золи. Різні результати в порівнянні з попереднім дослідженням вказують що вплив на одні й ті ж показники може бути різний, залежно від виду золи. На це впливає не тільки хімічний склад золи, а й її гранулометрія. Показники консолідації та набухання в даному дослідженні зменшувалися при збільшенні вмісту золи. Як наслідок також знижується потенціал та тиск набухання. Слід відзначити що значний вплив відбувається при початковому введенні золи, а при подальших збільшеннях вплив стає менш суттєвим. Досліди показали, що при зростанні кількості золи зменшується показник оптимальної вологості, а показник щільності зростає. Навіть при однаковій кількості вологи при збільшенні вмісту золи зростає щільність, це означає що суміш стає більш стійкою і частинки в структурі розміщуються ближче один до одного. Дані тенденції показані й в іншій роботі [17], де описано, що з підвищенням вмісту золи в ґрунтах знижується їх гідравлічна провідність, зменшується оптимальна вологість і зростає максимальна суха щільність. Збільшується енергія ущільнення, що позитивно впливає на стабільність ґрунту. Це в свою чергу впливає на опір проникнення, який також зростає при збільшенні вмісту золи. Міцність на зсув зменшується зі зростанням вологості, проте збільшується при зростанні вмісту золи в суміші. Така тенденція простежується для всіх значень вологості і це пов'язано із зростанням щільності, яке описано вище (табл. 2).

Експерементальні дослідження [17] також показали, що зола в набухаючих ґрунтах сприяє зниженню пластичності та набухання. Оптимальна кількість золи при цьому становить 20%, корисний ефект досягається завдяки модифікації гранулометричного складу та хімічним реакціям. Хімічні реакції спричиняють флокуляцію глинистих частинок, що в подальшому призводить до прояву пуцоланових твердіючих ефектів.

Таблиця 2 – Відомість зміни інженерно-геотехнічних показників ґрунту під впливом золи
Table 2 – Record of changes in the engineering and geotechnical properties of soil under the influence of fly ash

Властивості	Вміст золи				
	0%	5%	10%	15%	20%
Межа текучості, %	80	77	75	73	70
Межа пластичності, %	28	31	35	40	44
Індекс вільного набухання	250	200	165	140	125
Потенціал набухання, %	10,8	8,75	7,2	6,0	5,5
Тиск набухання, кПа	90	72	60	50	45
Оптимальний вміст вологи, %	40	38	35	33	31
Максимальна суха густина, г/см^3	1,375	1,391	1,405	1,419	1,430
Гідравлічна провідність, см/с	9,70x10^{-7}	–	6,02x10^{-7}	–	3,95x10^{-7}
Опір проникненню, МПа	1,753	1,822	1,911	2,103	2,302
Міцність на зсув, МПа	147	154	161	176	186

Інші дослідження, які опубліковані в роботі [18]. показують вплив активної та неактивної золи на показник CBR глинистих ґрунтів. У випробуваннях вміст золи змінювався від 0 до 100%, спочатку показник CBR зростав зі збільшенням вмісту золи після чого досягав максимуму і йшов на спад. В точці максимуму і є оптимальний вміст золи. При подальшому збільшенні вмісту золи відбувався спад і знову зростання до другого оптимуму. Зростання досягається завдяки збільшенню тертя між частинками, та додатковою когезією з ґрунтом.

За дослідженнями [19] встановлено наступні закономірності: вплив на межу текучості, індекс пластичності та усадку ґрунту обернено пропорційний вмісту золи. Зменшення усадки пояснюється тим що зола має меншу властивість усадки та когезії. Зменшення лінійної усадки може пояснюватися надходженням відносно меншої кількості води, що підтверджується значеннями межі текучості. Показник питомої ваги зменшується по мірі збільшення введення кількості золи. Це пояснюється тим, що зола має меншу питому вагу через пустотність частинок то вона й зменшує питому вагу суміші в яку вводиться. Але суха густина збільшується при ущільненні через поліпшення гранулометрії та щільнішому розміщенню частинок в структурі масиву. При внесенні золи відбувається зростання оптимальної вологості завдяки явищу флокуляції та агломерації. Однією з причин збільшення оптимальної вологості є схильність ґрунтово-зольної суміші поглинати більше вологи для завершення реакцій катіонного обміну. Значення показника CBR зростає до певного моменту так званої оптимальної кількості золи. Після перевищення оптимального показника вмісту золи відбувається спад.

Проаналізувавши результати багатьох досліджень можна побудувати схематичні графіки впливу на основні параметри. Вони схематичні тому що показують принципи та закономірності впливу на показники, але для конкретних значень потрібні індивідуальні випробування. Це пояснюється різними фізичними і хімічними властивостями як зол так і ґрунтів. Тому степінь впливу та оптимальний вміст золи буде різний залежно від поєднання виду компонентів.

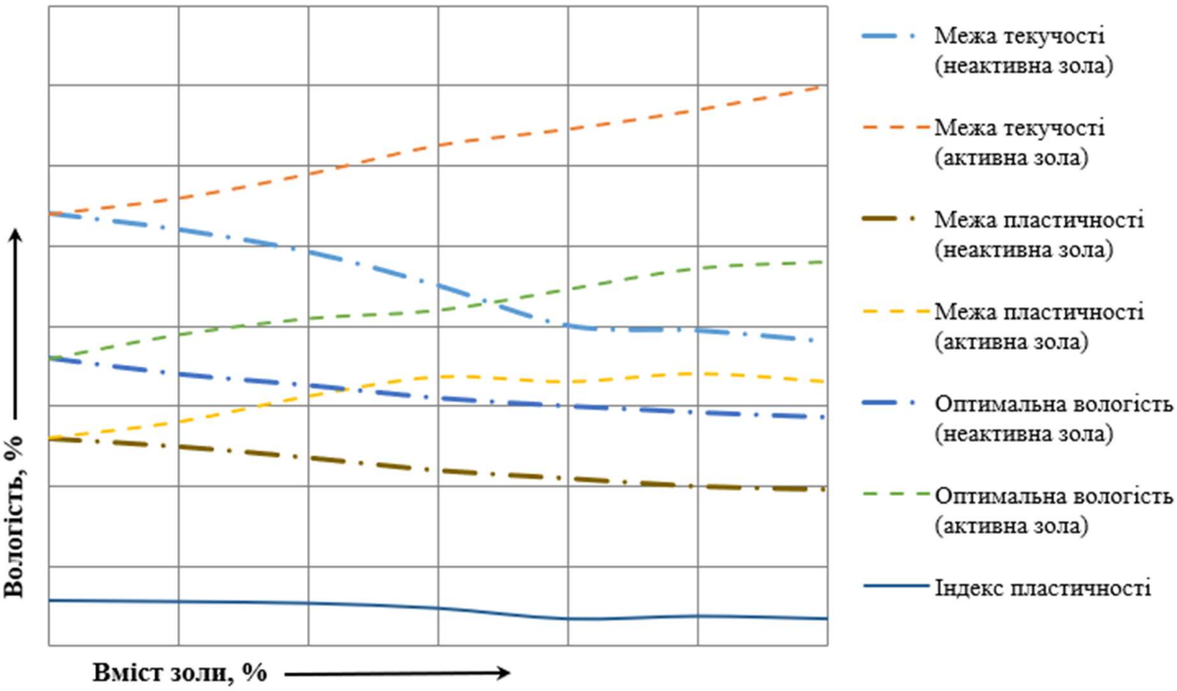
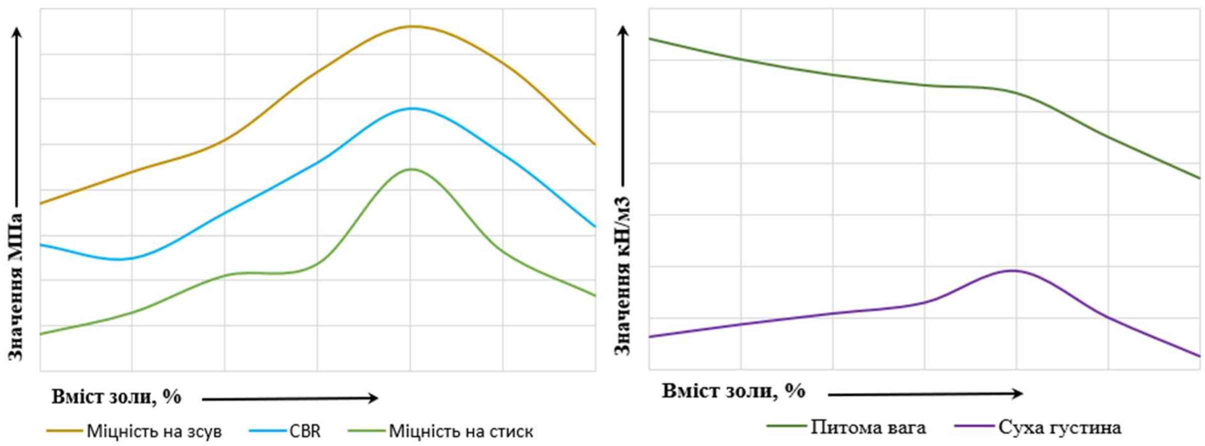


Рисунок 1 – Графік впливу золи на зміну вологоємних інженерних показників
Figure 1 – Graph of the influence of fly ash on the change of moisture-related engineering parameters



а) б)

Рисунок 2 – Графік впливу золи на інженерно-геологічні показники; (а) – вплив на міцнісні показники; (б) – вплив на об'ємно-вагові показники.
Figure 2 – Graph of the influence of fly ash on engineering and geological parameters: (a) influence on strength parameters; (b) influence on volumetric-weight parameters.

Висновки

Зола виносу теплоелектростанцій є перспективним вторинним матеріалом для стабілізації слабких ґрунтів у дорожньому будівництві.

Її ефективність зумовлена пуцолановими та гідравлічними властивостями, що забезпечують цементацію частинок ґрунту та формування міцної структури.

Зі збільшенням вмісту золи відбувається зростання межі текучості та межі пластичності, однак індекс пластичності та показники набухання зменшуються. Однак вплив на межу текучості і межу пластичності не завжди сталий і його зміна не характеризується однаковими тенденціями. На це впливає хімічний склад золи та ґрунту.

Оптимальна кількість золи забезпечує підвищення щільності, міцності та показника CBR, після перевищення оптимуму ці параметри починають знижуватися.

Використання золи у поєднанні з цементом або вапном підвищує міцність, морозостійкість і водостійкість укріплених ґрунтів.

Застосування зол у будівництві сприяє реалізації принципів сталого розвитку, знижує екологічне навантаження від золошлакових відвалів і скорочує витрати на природні ресурси.

Враховуючи надану інформацію виникають певні протирічні твердження щодо тенденцій зміни певних параметрів. Вони виникають на основі того що в різних дослідженнях використовувались різні матеріали із своїми хімічними властивостями. Тому існує потреба подальших досліджень з використанням різних типів ґрунтів і зол України, для встановлення чіткого впливу, тенденцій та взаємозв'язків при поєднанні цих матеріалів.

Перелік посилань

1. Крайнюк О., Буц Ю., Лоцман П., Барбашин В. Використання золошлаків у дорожньому будівництві з позиції екологічної безпеки. Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 39. 2022. С.41-50.
2. Дерев'янко В. М., Мосьпан 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, № 1 (007), 2022. С.38-44.
3. Ambarish G. Utpal D. Bearing ratio of reinforced fly ash overlying soft soil and deformation modulus of fly ash. Geotextiles and Geomembranes Volume 27, Issue 4, August 2009. P.313-320.
4. A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, B. García, E. Prieto. The use of non-conventional additives in Marls stabilization. Applied Clay Science Volume 51, Issue 4, March 2011. P.419-423.
5. O. Ignatova, I. Sebelev, A. Dyatchina.. Use of Heat Power Plants' Ash in Road Construction. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 953, 2020. P.8.
6. Lahtinen P. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads : dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki, 2001. 102 p.
7. Звіт щодо проведення аналізу ситуації з золошлаковими відвалами на території Львівської та Івано-Франківської областей в рамках реалізації Проекту Програми Транскордонного Співробітництва Польща-Білорусь-Україна 2007 – 2013 «Розвиток підприємництва шляхом покращення доступу до інвестиційних ділянок у місті Любачів та ґміні Любачів, а також відновлення деградованих земель Яворівського району та м.Новий Розділ», Частина 2. Львів: «Спільнота Соціально Відповідальний Бізнес», 2015. 73 с.
8. U. S. Army, U. S. Navy, U. S. Air Force, Soil Stabilization for Pavements, InUniversity Press of the Pacific. Honolulu, Hawaii, 2005.
9. S. Kolias, V. Kasselouri-Rigopoulou, A. Karahalios. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. Cement and Concrete Composites Volume 27, Issue 2, February 2005. P.301-313.
10. T.A. Kumar, T. Thyagaraj, R.G. Robinson. Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement 2022. P.160-171.
11. F. Khan, B. Das, N. Dewanga. Determination of geotechnical properties and stability of expansive soil using fly ash. Walailak Journal of Science and Technology (WJST) 2021. P.18.
12. M. F. Noaman, M.A. Khan, Kausar Ali, Amer Hassan. A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. Cleaner Materials 6(3):100151, 2022. P.14.

13. B. Kumar, R. Sharma. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 2004. P.7.

14. S. Bhuvaneshwari, R.G. Robinson, S.R. Gandhi, Stabilization Of Expansive Soils Using Fly ash. Tunnelling and Underground Space Technology 16, 2006.

15. P. G. Kumar, H.Sesetti. Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash. Materials Today Proceedings 45(6), 2020. P.4.

16. 13. B. Kumar, R. Sharma. Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering asce / july 2004. P. 764-767.

17. Pandian N., Krishna K. California Bearing Ratio Behavior of Cement-Stabilized Fly Ash-Soil Mixes.Journal of Testing and Evaluation 30, 2002. P.6.

18. Phanikumar B., Sharma R. Volume Change Behavior of Fly Ash-Stabilized Clays. Journal of Materials in Civil Engineering 19:1, 2007. P.67-74.

19. A. Dixit, M. Nigam, R. Mishra. Effect of fly ash on geotechnical properties of soil. International Journal of Engineering Technologies and Management Research Volume 3, Issue 5, 2016. P.7-14.

PATTERNS AND TRENDS OF THE EFFECT OF FLY ASH ON SOILS

Savenko Vyacheslav Ya, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Construction and Property Management at the National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: svi1310@ukr.net, https://orcid.org/0000-0001-8174-7728.
Skoropadskyi Viktor V., PhD student of the Department of Transport Construction and Property Management at the National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: viktorap333@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4404-7447.

Summary. The article examines the potential for the reuse of fly ash from thermal power plants in road construction to promote energy conservation and resource efficiency. The influence of fly ash on the main engineering and geotechnical properties of soils—such as liquid limit, plastic limit, density, optimum moisture content, hydraulic conductivity, penetration resistance, shear strength, and cbr index—has been analyzed. It was found that fly ash can improve the properties of weak clay soils due to its pozzolanic and hydraulic characteristics. The addition of fly ash reduces plasticity, swelling, and water saturation, while increasing compaction and bearing capacity up to a certain optimal content, beyond which the indicators tend to decrease. The optimal amount of fly ash depends on its chemical composition, particle-size distribution, and soil type. The use of fly ash is considered environmentally and economically feasible, as it reduces industrial waste, decreases the consumption of natural materials, and enhances the sustainability of transport structures.

Keywords: fly ash, soil stabilization, road construction, pozzolanic properties, plasticity index, optimum moisture content, physical and mechanical properties, energy efficiency, waste utilization.

References

1. Krainiuk O., Buts Yu., Lotsman P., Barbashyn V. Use of Ash and Slag in Road Construction from the Perspective of Environmental Safety. Collection of Scientific Papers of the State University of Infrastructure and Technologies. Series “Transport Systems and Technologies”. Issue 39, 2022. P.41–50.

2. Derevyanko V. M., Mospan V. I., Kolokhov V. V., Dzyuban O. V., Maltsev S. V. Main Research Directions on the Use of TPP Ash in the Production of Building Materials. Ukrainian Journal of Construction and Architecture, No. 1 (007), 2022. P.38–44.

3. Ambarish G. Utpal D. Bearing ratio of reinforced fly ash overlying soft soil and deformation modulus of fly ash. Geotextiles and Geomembranes Volume 27, Issue 4, August 2009. P.313-320.

4. A. Seco, F. Ramírez, L. Miqueleiz, B. García, E. Prieto. The use of non-conventional additives in Marls stabilization. Applied Clay Science Volume 51, Issue 4, March 2011. P.419-423.

5. O. Ignatova, I. Sebelev, A. Dyatchina.. Use of Heat Power Plants' Ash in Road Construction. XIII International Scientific Conference Architecture and Construction 2020. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 953, 2020. P.8.

6. Lahtinen P. Fly ash mixtures as flexible structural materials for low-volume roads : dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Helsinki, 2001. 102 p.

7. Report on the Analysis of the Situation with Ash and Slag Dumps in the Territories of Lviv and Ivano-Frankivsk Regions within the Framework of the Poland–Belarus–Ukraine Cross-Border Cooperation Programme 2007–2013 “Development of Entrepreneurship by Improving Access to Investment Sites in the City and Commune of Lubaczów, and Restoration of Degraded Lands in Yavoriv District and the City of Novyi Rozdil.” Part 2. Lviv: “Socially Responsible Business Community,” 2015. 73 p.

8. U. S. Army, U. S. Navy, U. S. Air Force, Soil Stabilization for Pavements, InUniversity Press of the Pacific. Honolulu, Hawaii, 2005.

9. S. Kolias, V. Kasselouri-Rigopoulou, A. Karahalios. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. Cement and Concrete Composites Volume 27, Issue 2, February 2005. P.301-313.

10. T.A. Kumar, T. Thyagaraj, R.G. Robinson. Swell–shrink behaviour of fly ash-stabilised expansive soils. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement 2022. P.160-171.

11. F. Khan, B. Das, N. Dewanga. Determination of geotechnical properties and stability of expansive soil using fly ash. Walailak Journal of Science and Technology (WJST) 2021. P.18.

12. M. F. Noaman, M.A. Khan, Kausar Ali, Amer Hassan. A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil. Cleaner Materials 6(3):100151, 2022. P.14.

13. B. Kumar, R. Sharma. Effect of fly ash on engineering properties of expansive soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 130, 2004. P.7.

14. S. Bhuvaneshwari, R.G. Robinson, S.R. Gandhi, Stabilization Of Expansive Soils Using Fly ash. Tunnelling and Underground Space Technology 16, 2006.

15. P. G. Kumar, H.Sesetti. Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash. Materials Today Proceedings 45(6), 2020. P.4.

16. 13. B. Kumar, R. Sharma. Effect of Fly Ash on Engineering Properties of Expansive Soils. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering asce / july 2004. P.764-767.

17. Pandian N., Krishna K. California Bearing Ratio Behavior of Cement-Stabilized Fly Ash-Soil Mixes.Journal of Testing and Evaluation 30, 2002. P.6.

18. Phanikumar B., Sharma R. Volume Change Behavior of Fly Ash-Stabilized Clays. Journal of Materials in Civil Engineering 19:1, 2007. P.67-74.

19. A. Dixit, M. Nigam, R. Mishra. Effect of fly ash on geotechnical properties of soil. International Journal of Engineering Technologies and Management Research Volume 3, Issue 5, 2016. P.7-14.