

УДК 625.7

Модифицированные композиты на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений

Д. М. Рябых¹, С. В. Ключев^{1, 2}, А. В. Ключев², Н. А. Слободчикова^{1, 3}

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Россия, 125319, Москва, Ленинградский просп., 64,

² Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, 46

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83

Для цитирования: Рябых Д. М., Ключев С. В., Ключев А. В., Слободчикова Н. А. Модифицированные композиты на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 3. С. 743–753. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-743-753

Аннотация

Цель: разработка составов модифицированных композитов на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений. В мировой практике имеется большое количество исследований применения различных видов отходов для укрепления и стабилизации грунтов. Наиболее интересными с точки зрения крупнотоннажного использования в земляных сооружениях являются золошлаковые отходы от сжигания угля и карбидный ил. **Методы:** формирование матрицы планирования эксперимента. Проведение эксперимента, в который входят определение характеристик исходных материалов, изготовление образцов с различным содержанием вяжущих, выдерживание образцов и определение качественных характеристик. Анализ полученных результатов. **Результаты:** исследованная проба золошлаковой смеси является техногенным пылеватым песком. По модулю основности золошлаковая смесь является сверхкислой. По минеральному составу к основным компонентам золошлаковой смеси относятся кварц и полевой шпат. Карбидный ил содержит значительное количество активного гидроксида кальция, который может реагировать с углекислым газом, образуя карбонат кальция. По результатам выполненной работы определены свойства исходных компонентов и разработаны составы золошлаковой смеси, укрепленной вяжущим на основе карбидного ила и портландцемента. Определена зависимость прочностных характеристик золошлаковой смеси, укрепленной карбидным илом, от содержания карбидного ила. **Практическая значимость:** разработанные составы можно использовать для строительства дополнительного слоя основания дорожной одежды и слоев земляного полотна автомобильных дорог низких технических категорий, подстилающих слоев и оснований под полы.

Ключевые слова: зологрунтовые смеси, золошлаковые смеси, золошлаковые смеси, укрепленные карбидным илом и портландцементом, грунты

Введение

В мире ежегодно наблюдается рост накопления техногенных отходов. Многие виды отходов можно эффективно применять для возведения земляных сооружений. Наиболее интересными с точки зрения крупнотоннажного использования в земляных сооружениях являются золошлаковые отходы от сжигания угля и карбидный ил.

Золошлаковые отходы тепловых электростанций — это твердые продукты сгорания углей, образующиеся в результате термообработки исходной минеральной части топлив.

В работах [1–10] приведены исследования результатов применения:

- золы уноса в качестве стабилизаторов или компонентов стабилизаторов глинистых грунтов;
- золы уноса в сочетании с золой гидроудаления в составах композиций для засыпки горных выработок;
- золы уноса бурого угля в сочетании с твердыми биологическими отходами для использования в качестве дорожного покрытия;
- шлака, образующегося при сжигании угля;
- золы в смеси с опилками для стабилизации грунтов.

Наибольший интерес представляют золошлаковые смеси, так как они являются основным видом отходов, накопленным в золоотвалах Российской Федерации.

Карбидный ил представляет собой многотоннажный порошкообразный известьсодержащий отход, образующийся в результате переработки карбида кальция CaC_2 в ацетилен C_2H_2 . По разным оценкам, ежегодно образуется от 18 до 70 млн л карбидного ила [11].

В работах [12–14] доказана эффективность использования карбидного шлама в качестве активной добавки. Внесение карбидного шлама

в глинистый грунт повышает прочность, водостойкость и морозостойкость грунта. Применение вяжущего вещества на основе карбидного ила значительно повышает удельное сцепление и снижает влажность грунта, что делает его пригодным для использования в строительстве автомобильных дорог.

Исследования совместного применения золошлаковых смесей и карбидного ила в земляных сооружениях практически отсутствуют. В связи с чем в работе поставлена цель — разработка составов модифицированных композитов на основе применения золошлаковых смесей и карбидного ила для строительства земляных сооружений.

Материалы и методы

Для разработки композитов применены следующие материалы: карбидный ил (рис. 1), золошлаковая смесь (рис. 2), портландцемент, вода.

Для определения физико-механических свойств грунтов и золошлаковых смесей использованы стандартные методы лабораторных испытаний ГОСТ.

Разработка составов композитов сводится к следующей последовательности:

1. Определение переменных.

Независимые переменные (факторы): количество карбидного ила (%), количество портландцемента (%), количество воды (%).

Зависимые переменные: прочность на сжатие (кг/см^2), водостойкость, морозостойкость.

2. Выбор типа экспериментального плана. Для достижения поставленной в работе цели для исследования взаимодействия всех факторов выбран полный факторный эксперимент.

3. Формирование матрицы планирования эксперимента (табл. 1).

4. Проведение эксперимента. Каждый опыт проводится согласно плану.



Рис. 1. Карбидный ил



Рис. 2. Золошлаковая смесь

• Изготовление образцов (проведено с использованием стандартных методов ГОСТ 23558–94).

• Выдерживание образцов. Твердение изготовленных образцов осуществлялось в нормальных условиях при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $95 \pm 5\%$ (рис. 3).

• Определение прочностных характеристик полученных композитов. Для анализа результа-

тов набора прочности использованы значения прочности на сжатие. Определение прочности на сжатие выполнено на гидравлическом прессе с предварительным насыщением образцов водой (рис. 4).

• Исследование фазового состава. Рентгенофазовый анализ позволяет оценить физико-химическое состояние укрепленного грунта. Исследование выполнено методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре.

ТАБЛИЦА 1. Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Грунт	Карбидный ил, %	Портландцемент, %	Вода, %	Проектный возраст, сут.
1	Золошлаковая смесь	—	4	$W_{\text{опт}}$	28
2		—	6	$W_{\text{опт}}$	28
3		—	8	$W_{\text{опт}}$	28
4		9	1	$W_{\text{опт}}$	56
5		9	2	$W_{\text{опт}}$	56
6		9	3	$W_{\text{опт}}$	56
7		10	—	$W_{\text{опт}}$	56
8		12	—	$W_{\text{опт}}$	56
9		16	—	$W_{\text{опт}}$	56

Примечание: $W_{\text{опт}}$ — значение оптимальной влажности, %.



Рис. 3. Хранение образцов в камере нормального твердения

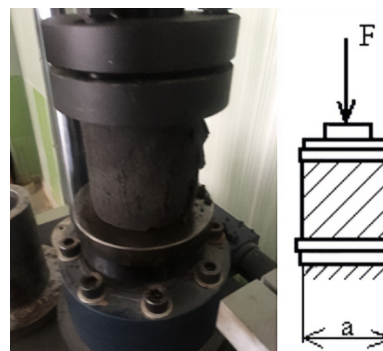


Рис. 4. Определение прочности на сжатие

Результаты

По результатам выполненных лабораторных исследований получены физико-механические характеристики золошлаковой смеси (табл. 2

и 3) и выполнена ее классификация согласно ГОСТ 25100-2020.

Химический состав золошлаковой смеси приведен в табл. 4.

ТАБЛИЦА 2. Гранулометрический состав золошлаковой смеси

	Размер сит, мм							
	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Полные остатки, %	0,27	0,55	0,86	1,19	1,73	6,85	47,35	100,00

ТАБЛИЦА 3. Физико-механические характеристики золошлаковой смеси

Наименование показателя	Ед. изм.	Результаты испытаний
Естественная влажность грунта	%	16,94
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	0,86
Влажность на границе текучести	%	—
Влажность на границе раскатывания	%	не раскат. в жгут диаметром 3 мм
Число пластичности	%	—
Показатель текучести	д. е.	—
Разновидность грунта	—	песок пылеватый
Максимальная плотность	г/см ³	1,03
Оптимальная влажность	%	10,34
Потеря массы при прокаливании	%	5,6

ТАБЛИЦА 4. Химический состав пробы золошлаковой смеси

Наименование		Содержание, %	Модуль основности
Оксид алюминия	Al ₂ O ₃	28,8	$M_0 = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3} =$ $= \frac{8,06}{79,2} = 0,1$
Оксид железа	Fe ₂ O ₃	12,5	
Оксид кремния	SiO ₂	50,4	
Триоксид серы	SO ₃	0,92	
Оксид титана	TiO ₂	0,77	
Оксид магния	MgO	1,3	
Оксид кальция	CaO	5,8	
Оксид калия	K ₂ O	0,8	
Оксид натрия	Na ₂ O	0,16	
Оксид марганца	MnO ₂	0,11	
Оксид фосфора	P ₂ O ₃	0,12	

ТАБЛИЦА 5. Количественный фазовый анализ золошлаковой смеси

Наименование	Формула	Содержание, %
Кварц	SiO ₂	20,9
Муллит 3:2	от 3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ до 2Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	57,2
Полевой шпат (альбит)	Na(AlSi ₃ O ₈)	21,9
Неопределенные	–	4,4

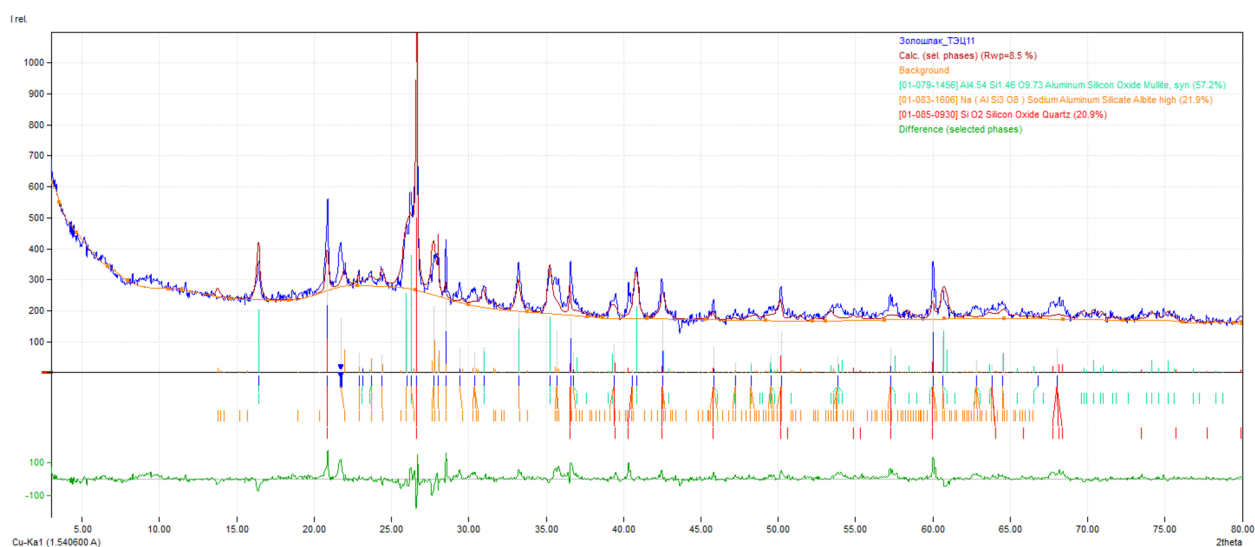


Рис. 5. Рентгенограмма золошлаковой смеси

Также к основным компонентам золошлаковой смеси относятся кварц и полевой шпат. Наличие кварца положительно сказывается на процессах структурообразования грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, так как в присутствии портландцемента и воды запускается сложный физико-химический процесс гидратации, приводящий к образованию прочных кристаллических структур, таких как кальцит, гидроксид кальция и кремнеземистые соединения.

Фазовый состав карбидного ила определен с помощью рентгенофазового анализа, который выявил преобладающие пики, соответствующие $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и CaCO_3 , как показано на рис. 6 и в табл. 6.

Результаты анализа показывают, что карбидный ил содержит значительное количество активного гидроксида кальция, который может реагировать с углекислым газом, образуя карбонат кальция.

В лабораторных условиях подобраны составы грунтов, укрепленных портландцементом и карбидным илом (табл. 7). Определены их физико-механические характеристики. Составы укрепленных грунтов № 1, № 2, № 3, № 6 соответствуют марке М10 по прочности, марке F25 по морозостойкости согласно требованиям ГОСТ 23558-94. Составы можно использовать для строительства автомобильных дорог низких технических категорий, подстилающих слоев и оснований под полы.

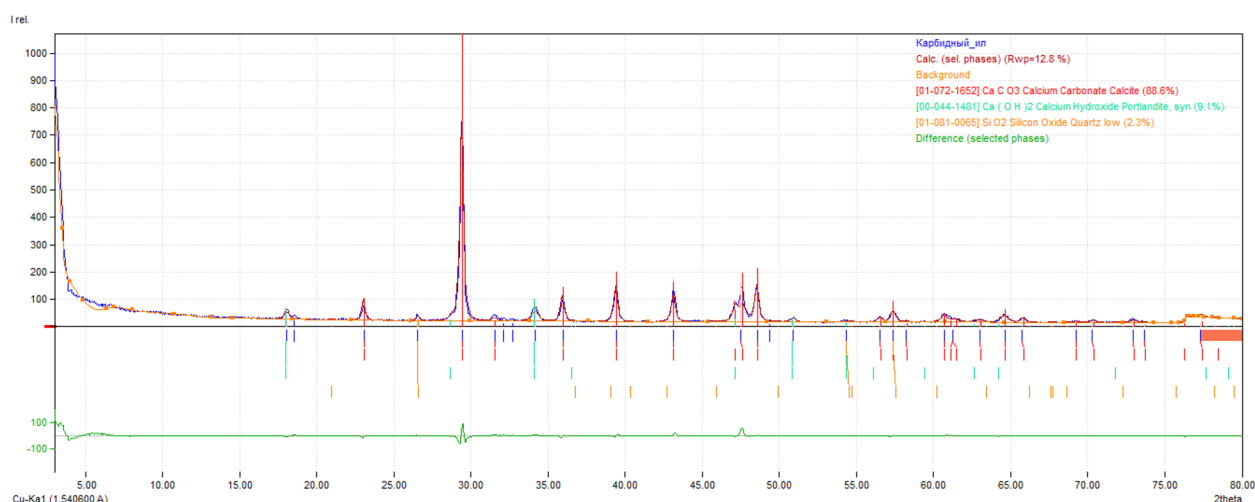


Рис. 6. Рентгенограмма карбидного ила

ТАБЛИЦА 6. Количественный фазовый анализ карбидного ила

Наименование	Формула	Содержание, %
Карбонат кальция, кальцит	CaCO_3	27,6
Гидроксид кальция, портландит	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	60,4
Кварц с низким содержанием оксида кремния	SiO_2	10,6
Неопределенные	—	1,4

ТАБЛИЦА 7. Физико-механические характеристики составов укрепленного грунта

№ опыта	Содержание вяжущего		Прочность на сжатие в возрасте				Прочность на растяжение при изгибе в проектном возрасте (в водонасыщенном состоянии)	Водоустойчивость	Прочность на сжатие после 25 циклов замораживания и оттаивания
	Карбидный ил	Портландцемент	28 сут. (в водонасыщенном состоянии)	28 сут. (в сухом состоянии)	56 сут. (в водонасыщенном состоянии)	56 сут. (в сухом состоянии)			
1	–	4	0,9	1,2	–	–	0,2	0,7	0,7
2	–	6	1,0	1,5	–	–	0,2	0,7	0,9
3	–	8	1,1	1,7	–	–	0,2	0,7	0,9
4	9	1	–	–	1,1	1,6	0,1	0,7	–
5	9	2	–	–	1,3	1,8	0,1	0,7	–
6	9	3	–	–	1,5	2,0	0,2	0,8	1,2
7	10	–	–	–	0,3	0,4	0,0	0,7	–
8	12	–	–	–	0,4	0,5	0,0	0,8	–
9	16	–	–	–	0,5	0,6	0,1	0,8	–

На рис. 7 приведена зависимость прочностных характеристик золошлаковой смеси, укрепленной карбидным илом, от содержания карбидного ила.

Золошлаковая смесь, укрепленная карбидным илом, имеет низкие прочностные характеристики, что вызвано отсутствием обломочной фракции (более 2 мм) в зерновом составе золошлаковой смеси и относительно невысоким содержанием гидроксида кальция в карбидном иле. Введение в составы портландцемента позволяет повысить прочностные характеристики (рис. 8).

Заключение

Золошлаковые смеси и карбидный ил можно применять при строительстве земляных сооружений (автомобильные дороги, подсыпки, площадки и др.).

В лабораторных условиях разработаны составы золошлаковой смеси, укрепленной вяжущим на основе карбидного ила и портландцемента. Разработанные составы соответствуют марке М10 по прочности, марке F25 по морозостойкости согласно требованиям ГОСТ 23558-94. Составы можно использовать для строительства автомобильных дорог низких технических категорий, подстилающих слоев и оснований под полы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-19-00426 (<https://rscf.ru/project/25-19-00426/>).

Список источников

1. Application of Coal Fly Ash in Pavement Subgrade Stabilisation: A Review / Z. Zimar [et al.] // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 312.

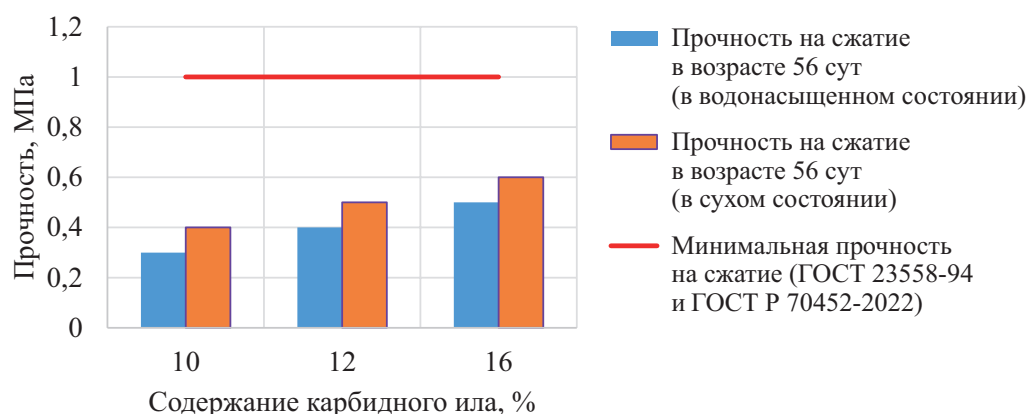


Рис. 7. Зависимость прочностных характеристик золошлаковой смеси, укрепленной карбидным илом, от содержания карбидного ила

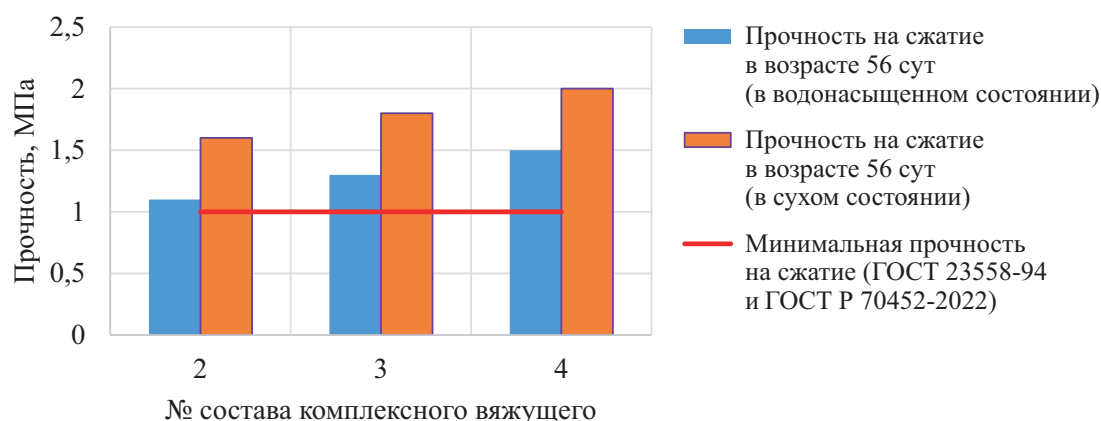


Рис. 8. Зависимость прочностных характеристик золошлаковой смеси, укрепленной комплексным вяжущим

2. Development of Alkali-Activated Binders Based on Technogenic Fibrous Materials / A. V. Klyuev [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (1). Pp. 60–73.

3. Experimental Studies of the Processes of Structure Formation of Composite Mixtures with Technogenic Mechanoactivated Silica Component / A. V. Klyuev [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (2). Pp. 5–18.

4. Application of Ash and Slag Waste From Coal Combustion in the Construction of the Earth Bed of Roads / S. V. Klyuev [et al.] // Construction Materials and Products. 2024. No. 7 (6). P. 3.

5. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Parametric Equations of the Strength Surface) / O. G. Novoselov [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (2). Pp. 104–120.

6. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Kinematic Method) / O. G. Novoselov [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (3). Pp. 5–17.

7. Specifics of Information Model Development for Functional Conversion of Offshore Oil Platforms /

S. G. Abramyan [et al.] // Construction Materials and Products. 2023. No. 6 (4). Pp. 42–57.

8. Influence of Electric Current on the Mineral Matrix of Technogenic Anhydrite / A. N. Gumeniuk [et al.] // Magazine of Civil Engineering. 2025. Vol. 18, no. 1 (133). Art. 13302.

9. Слободчикова Н. А., Лофлер М., Плюта К. В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства. Известия вузов // Инвестиции. Строительство. Недвижимость: научный журнал. 2017. Т. 7, № 2. С. 62–67.

10. Слободчикова Н. А., Лофлер М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства. Известия вузов // Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2018. Т. 8, № 2. С. 141–147.

11. Efficient Machine Learning Method for Evaluating Compressive Strength of Cement Stabilized Soft Soil / C. Zhang [et al.] // Construction and Building Materials. 2023. P. 392.

12. Finely Dispersed Composite Binder for Soil Fixation by Injection Method / A. N. Grishin [et al.] // Vestnik MGSU. 2017. No. 12 (110). Pp. 1289–1298.

13. Rodygin K. S., Gyrdaymova Yu. V., Ananikov V. P. Carbide Sludge as a Key Inorganic Component of a Sustainable Carbon Cycle // Advances in Chemistry. 2022. Vol. 91, no. 7. P. 38.

14. Potentiometric Method for Assessing Pozzolanic Activity of Highly Dispersed Materials. Nanotechnology in Construction / Yu. V. Sokolova [et al.] // Scientific Internet Journal. 2023. Vol. 15, no. 4. Pp. 349–358.

Дата поступления: 11.05.2026

Решение о публикации: 29.06.2026

Информация об авторах:

РЯБЫХ Дмитрий Михайлович — аспирант;
89273452615@yandex.ru

КЛЮЕВ Сергей Васильевич — доктор
техн. наук, профессор; klyuyev@yandex.ru

КЛЮЕВ Александр Васильевич — инженер
кафедры сопротивления материалов и строитель-
ной механики; Klyuyevav@yandex.ru

СЛОБОДЧИКОВА Надежда Анатольевна —
кандидат техн. наук, доцент;
NSlobodchikova@rambler.ru

Modified Composites Based on the Use of Ash and Slag Mixtures and Carbide Sludge for the Construction of Earthworks

D. M. Ryabikh¹, S. V. Klyuev^{1,2}, A. V. Klyuev², N. A. Slobodchikova^{1,3}

¹ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 64 Leningradskij ave., Moscow, 125319, Russia

² Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 46 Kostyukova st., Belgorod, 308012, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov st., Irkutsk, 664074, Russia

For citation: Ryabikh D. M., Klyuev S. V., Klyuev A. V., Slobodchikova N. A. Modified Composites Based on the Use of Ash and Slag Mixtures and Carbide Sludge for the Construction of Earthworks // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 3. Pp. 743–753. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-3-743-753 (In Russian)

Abstract

Objective: to develop compositions of modified composites based on the use of ash and slag mixtures and carbide sludge for the construction of earthworks. There is a large amount of research on the use of various types of waste for strengthening and stabilizing soils in the world practice. The most interesting from the point of view of large-tonnage use in earthworks are ash and slag waste from coal combustion and carbide sludge. **Methods:** formation of an experiment planning matrix. Conducting an experiment that includes: determining the characteristics of the starting materials, making samples with different binder contents, holding samples, and determining quality characteristics. Analysis of the obtained results. **Results:** the studied sample of the ash and slag mixture is technogenic powdery sand. According to the modulus of basicity, the ash and slag mixture is super-rich. In terms of mineral composition, the main components of the ash and slag mixture include quartz and feldspar. The carbide sludge contains a significant amount of active calcium hydroxide, which can react with carbon dioxide to form calcium carbonate. Based on the results of the work performed, the properties of the initial components were determined and the compositions of the ash and slag mixture reinforced with a binder based on carbide sludge and Portland cement were developed. The dependence of the strength characteristics of the ash and slag mixture reinforced with carbide sludge on the content of carbide sludge is determined. **Practical significance:** the developed compositions can be used for the construction of an additional layer of the base of the road surface and layers of the roadbed of low technical categories, underlying layers and foundations for floors.

Keywords: zologrunt mixtures, ash and slag mixtures, ash and slag mixtures reinforced with carbide sludge and Portland cement, soils

References

1. Zimar Z., et al. Application of Coal Fly Ash in Pavement Subgrade Stabilisation: A Review, *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 312.
2. Klyuev A. V., et al. Development of Alkali-Activated Binders Based on Technogenic Fibrous Materials, *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (1), pp. 60–73.
3. Klyuev A. V., et al. Experimental Studies of the Processes of Structure Formation of Composite Mixtures with Technogenic Mechanoactivated Silica Component, *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (2), pp. 5–18.
4. Klyuev S. V., et al. Application of Ash and Slag Waste from Coal Combustion in the Construction of the Earth Bed of Roads, *Construction Materials and Products*, 2024, no. 7 (6), p. 3.
5. Novoselov O. G., et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Parametric Equations of the Strength Surface), *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (2), pp. 104–120.
6. Novoselov O. G., et al. Method for Calculating the Strength of Massive Structural Elements in the General Case of Their Stress-Strain State (Kinematic Method), *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (3), pp. 5–17.
7. Abramyan S. G., et al. Specifics of Information Model Development for Functional Conversion of Offshore Oil Platforms, *Construction Materials and Products*, 2023, no. 6 (4), pp. 42–57.
8. Gumeniuk A. N., et al. Influence of Electric Current on the Mineral Matrix of Technogenic Anhydrite, *Magazine of Civil Engineering*, 2025, vol. 18, no. 1 (133), art. no. 13302.
9. Slobodchikova N. A., Lofler M., Plyuta K. V. Poluchenie neorganicheskogo vyazhushchego na osnove otkhodov promyshlennogo proizvodstva [Production of Inorganic Binder Based on Industrial Waste], *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost [Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real Estate: scientific journal]*, 2017, vol. 7, no. 2, pp. 62–67. (In Russian)
10. Slobodchikova N. A., Lofler M. Metodiki podbora sostavov gruntov, ukreplennykh izvestyu,

dlya dorozhnogo stroitelstva [Methods for Selecting Soil Compositions Stabilized with Lime for Road Construction], *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost* [Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real Estate], 2018, vol. 8, no. 2, pp. 141–147. (In Russian)

11. Zhang C., et al. Efficient Machine Learning Method for Evaluating Compressive Strength of Cement Stabilized Soft Soil, 2023, p. 392.

12. Grishin A. N., et al. Finely Dispersed Composite Binder for Soil Fixation by Injection Method, *Vestnik MGSU* [Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering], 2017, no. 12 (110), pp. 1289–1298.

13. Rodygin K. S., Gyrdaymovaya Yu. V., Ananikov V. P. Carbide Sludge as a Key Inorganic Component of a Sustainable Carbon Cycle, *Advances in Chemistry*, 2022, vol. 91, no. 7, p. 38.

14. Sokolova Yu. V., et. al. Potentiometric Method for Assessing Pozzolanic Activity of Highly Dispersed Materials. Nanotechnology in Construction, *Scientific Internet Journal*, 2023, vol. 15, no. 4, pp. 349–358.

Received: May 11, 2026

Accepted: June 29, 2026

Author's information:

Dmitrij M. RYABYKH — Postgraduate Student;
89273452615@yandex.ru

Sergej V. KLYUEV — Dr. Sci. in Engineering,
Professor; klyuyev@yandex.ru

Aleksandr V. KLYUEV — Engineer of the
“Resistance of Materials and Structural Mechanics”
Department; Klyuyevav@yandex.ru

Nadezhda A. SLOBODCHIKOVA — PhD in Engineering,
Associate Professor; NSlobodchikova@rambler.ru