

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ/CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2>

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ГРУНТОВ, УКРЕПЛЕННЫХ НЕОРГАНИЧЕСКИМИ ВЯЖУЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ

Научная статья

Слободчикова Н.А.^{1,*}, Плют К.В.², Горелов А.В.³, Ключев С.В.⁴, Леонов Д.И.⁵

¹ORCID : 0000-0002-7845-2969;

^{1, 2, 5} Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

³ООО «Стройблотехнология», Санкт-Петербург, Российская Федерация

⁴Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация

⁴Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (nslobodchikova[at]rambler.ru)

Аннотация

Укрепление грунтов неорганическими вяжущими материалами является одной из эффективных технологий строительства земляных сооружений, которая позволяет использовать большое количество техногенных отходов, в том числе, золошлаковых смесей ТЭЦ. По результатам выполненных исследований разработаны составы грунтов и золошлаковых смесей, укрепленных портландцементом и известью, для строительства земляных сооружений в условиях континентального и полярного климата. Разработанные составы имеют хорошие прочностные характеристики и обладают высокой морозостойкостью. Применение золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях земляных сооружений позволит увеличить объемы их повторного использования и тем самым снизить экологическую нагрузку.

Ключевые слова: укрепленные грунты, золошлаковые смеси, разработка составов.

DEVELOPMENT OF SOIL COMPOSITIONS REINFORCED WITH INORGANIC BINDING MATERIALS

Research article

Slobodchikova N.A.^{1,*}, Plyuta K.V.², Gorelov A.V.³, Klyuev S.B.⁴, Leonov D.I.⁵

¹ORCID : 0000-0002-7845-2969;

^{1, 2, 5} Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

³LLC Stroybloktechnologiya, Saint-Petersburg, Russian Federation

⁴Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation

⁴Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (nslobodchikova[at]rambler.ru)

Abstract

Soil reinforcement with inorganic binders is one of the effective technologies for the construction of earthworks, which allows the use of large amounts of man-made waste, including ash slag mixtures from TPPs. Based on the results of the research, soil compositions and ash slag mixtures reinforced with Portland cement and lime have been developed for the construction of earthworks in continental and polar climates. The developed compositions have good strength characteristics and high frost resistance. The use of ash slag mixtures from TPPs in earth structures will increase the volume of their reuse and thus reduce the environmental impact.

Keywords: reinforced soils, ash slag mixtures, formulation development.

Введение

Укрепление грунтов неорганическими вяжущими материалами является одной из эффективных технологий строительства земляных сооружений, в частности полов промышленных предприятий, строительных площадок и автомобильных дорог.

При укреплении грунтов можно эффективно применять различные виды техногенных отходов:

- золошлаковые отходы ТЭЦ;
- известьсодержащие отходы;
- гипсодержащие (фторгипс, фосфогипс и т.п.);
- золы от сжигания отходов потребления (багассы сахарного тростника, кофейной шелухи, кокосовой шелухи и т.п.);
- порошок яичной скорлупы;
- стеклобой;
- отходы пластика.

Наиболее интересным с точки зрения объемов утилизации является применение в составах укрепленных грунтов золошлаковых смесей ТЭЦ т. к. объемы их накопления на территории Российской Федерации на 2025 г. составляют более 11 млрд. т.

Исследованиями золошлаковых смесей ТЭЦ занимались различные ученые [1], [2], [3], [4], [5], а также [6], [7], [8], [9], [10].

Наиболее широко исследовано применение зол-уноса в качестве вяжущего материала или компонента комплексного вяжущего для укрепления различных видов грунтов. Золошлаковые смеси исследованы мало. Исследования применения золошлаковых смесей в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, в условиях континентального и полярного климата практически отсутствуют.

Учитывая изложенное выше в работе поставлена *цель* – разработка эффективных составов грунтов и золошлаковых смесей, укрепленных портландцементом, для строительства земляных сооружений в условиях континентального и полярного климата.

Методы и принципы исследования

Отбор проб грунтов и золошлаковых смесей ТЭЦ проведен с карьеров и золоотвалов Иркутской области. Всего отобрано 7 проб грунтов и 2 пробы золошлаковой смеси. Определение физико-механических характеристик грунтов и золошлаковой смеси проведено стандартными методами ГОСТ 12071-2014, ГОСТ, ГОСТ 5180-2015, ГОСТ 25100-2020, ГОСТ 22733-2016.

Для разработки составов укрепленных грунтов использованы портландцемент, известь и вода.

Приготовление смеси укрепленного грунта осуществлено с разным процентным содержанием вяжущих материалов. Количество воды назначено по значению оптимальной влажности. Хранение и твердение образцов производится стандартным методом при относительной влажности воздуха $95 \pm 5\%$ и температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

К качественным характеристикам относятся прочность, водостойкость, морозостойкость, плотность. Определение данных характеристик производится стандартными методами ГОСТ 23558-94 в проектном возрасте: 28 и 90 сут. в зависимости от вида вяжущего (рисунки 1 и 2).



Рисунок 1 - Водонасыщение образцов
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.1>



Рисунок 2 - Определение прочности при сжатии
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.2>

Основные результаты

2.1. Результаты определения физико-механических характеристик грунтов и золошлаковой смеси

По результатам лабораторных испытаний проб золошлаковых смесей и местных грунтов определены их гранулометрический состав и физико-механические характеристики (таблица 1, 2).

Таблица 1 - Гранулометрический состав по ГОСТ 25100

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.3>

№ пробы грунта	Размер сит, мм								Классификация
	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1	
	Полные остатки, %								
1	9,13	19,57	26,64	36,20	44,38	52,29	60,91	100,00	Суглинок
2	4,64	12,53	21,29	30,20	42,70	56,26	70,71	100,00	Суглинок
3	0,00	0,00	3,25	5,87	11,51	50,05	82,78	100,00	Супесь
4	56,63	68,78	76,88	82,14	87,49	94,31	96,94	100,00	Галечниковый
5	51,77	59,16	62,63	64,41	68,05	85,42	96,18	100,00	Галечниковый, заполнитель – песок гравелистый
6	0,00	0,00	8,49	12,86	21,77	64,29	90,64	100,00	Песок средней крупности
7	40,35	50,49	54,88	57,17	64,08	85,34	94,00	100,00	Гравийный, заполнитель – песок гравелистый

Таблица 2 - Физико-механические характеристики грунтов

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.4>

Наименование показателя	Един. изм.	Результаты испытаний						
		Проб № 1	Проб № 2	Проб № 3	Проб № 4	Проб № 5	Проб № 6	Проб № 7
		суглинок тяжёлый песчанистый твёрдый	суглинок лёгкий песчанистый твёрдый	супесь песчанистая твёрдая	крупнообломочный галечниковый	крупнообломочный галечниковый, заполнитель – песок гравелистый	песок средней крупности	гравийный, заполнитель – песок гравелистый
Влажность на границе текучести	%	31,45	25,78	19,75	–	–	–	–
Влажность на границе раскатывания	%	17,78	16,43	14,32	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм	не раскатывается в жгут Ø 3 мм
Число пластичности	%	13,67	9,35	5,43	–	–	–	–
Показатель текучести	д.е.	–0,93	–1,4	–2,40	–	–	–	–
Максимальная плотность	г/см ³	1,91	1,99	1,83	–	1,83	1,83	1,86

Наименование показателя	Един. изм.	Результаты испытаний						
		Проб № 1	Проб № 2	Проб № 3	Проб № 4	Проб № 5	Проб № 6	Проб № 7
		суглинок тяжёлый песчанистый твердый	суглинок легкий песчанистый твердый	супесь песчанистая твердая	крупнообломочный галечниковый	крупнообломочный галечниковый, заполнитель песок крупности	песок средней крупности	гравийный, заполнитель песок гравелистый
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	13,17	9,83	0,00	–	4,75	–	5,13
pH	–	6,01	6,90	8,53	–	–	–	–

В соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100 золошлаковые смеси ТЭЦ классифицируются:

- класс — техногенный грунт;
- тип — дисперсный несвязный;
- вид — отходы производств, бытовые отходы;
- подвид — отвалы и гидроотвалы шлаков, золошлаков и шламов.

Золошлаковые смеси по зерновому составу согласно классификации ГОСТ 25100 представляют собой техногенные пески гравелистые, мелкие и пылеватые (таблицы 3).

Таблица 3 - Гранулометрический состав золошлаковой смеси по ГОСТ 25100-2020

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.5>

Размер сит, мм Полные остатки, %	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок)	0,00	0,27	0,55	0,86	1,19	1,73	6,85	47,35	100,00
Усть-Илимской ТЭЦ	0,00	5,52	13,96	30,28	57,80	68,03	73,22	82,94	100,00

По результатам анализа результатов лабораторных исследований золошлаковых смесей ТЭЦ установлено, что они характеризуются показателями, указанными в таблице 4.

Таблица 4 - Результаты испытаний физико-механических свойств золошлаковых смесей

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.6>

Наименование показателя	Усть-Илимская ТЭЦ	Ново-Иркутская (Шелеховский участок)
Классификация ГОСТ 25100	песок пылеватый	песок пылеватый
Содержание частиц <0,002 мм, %	5,00	4,90
Степень неоднородности по гранулометрическому составу C_u	26,5	6,8
	неоднородные	неоднородные
Потери массы при прокаливании, %	5,50	1,49

Наименование показателя	Усть-Илимская ТЭЦ	Ново-Иркутская (Шелеховский участок)
Содержание горючих веществ (Гор)	среднее	низкое
Насыпная плотность, кг/м ³	1000,29	832,10
Максимальная плотность, г/см ³	1,58	1,11
Оптимальная влажность, %	18,59	36,92

Графики стандартного уплотнения характеризуются низкими значениями плотности сухого грунта при значениях влажности около 10%, практически неизменными значениями плотности сухого грунта при промежуточных значениях влажности и резко увеличенной плотностью сухого грунта при значениях влажности, близких к оптимальной.

2.2. Результаты разработки составов грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами

2.2.1. Укрепление портландцементом

В лабораторных условиях подобраны составы грунтов, укрепленных портландцементом:

- 1) суглинок легкий песчанистый твердый, укрепленный портландцементом;
- 2) золошлаковая смесь, укрепленная портландцементом;
- 3) песок средней крупности, укрепленный портландцементом;
- 4) супесь, укрепленная портландцементом;
- 5) гравийный грунт, укрепленный портландцементом.
- 6) зологрунтовые смеси, укрепленные портландцементом.

Расход цемента составляет 4–10% общей массы и зависит от гранулометрического состава.

Результаты лабораторных испытаний этих составов укрепленных грунтов отражены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты подбора состава грунтов, укрепленных портландцементом

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.7>

Наименование грунта	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие в сухом состоянии в возрасте 7 сут., МПа	Прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии в проектном возрасте 28 сут., МПа	Прочность на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии в проектном возрасте 28 сут., МПа	Водостойкость	Прочность на сжатие после замораживания/ оттаивания		
						25 циклов	50 циклов	Марка
Суглинок легкий песчанистый	4	2,58	4,58	1,93	0,51	3,25	0,63	F25
	6	2,62	—	—	—	—	—	—
	8	2,02	—	—	—	—	—	—
	10	1,75	—	—	—	—	—	—
	12	2,89	—	—	—	—	—	—
ЗШС Усть-Илимской ТЭЦ	4	0,96	—	—	—	—	—	—
	6	1,64	7,96	1,80	0,79	9,33	5,73	F50
	8	2,09	—	—	—	—	—	—
Песок средней крупности	4	—	6,45	—	0,64	—	—	—
	6	—	5,23	0,56	0,81	5,46	—	F25
	8	—	7,83	—	0,87	—	—	—
Супесь	4	2,39	2,85	—	0,79	—	—	—
	6	3,26	3,84	0,72	0,81	3,98	—	F25
	8	3,24	4,76	—	0,84	—	—	—
Крупнообломочный	4	1,49	—	—	—	—	—	—
	6	2,37	5,79	1,40	0,66	4,48	4,17	F50

Наименование грунта	Содержание вяжущего, %	Прочность на сжатие в сухом	Прочность на	Прочность на	Водостойкость	Прочность на сжатие после замораживания/оттаивания		
						25 циклов	50 циклов	Марка
гравийный ЗПС	8	3,01	—	—	—	—	—	—
Ново-Иркутской ТЭЦ Шел. уч.	8	—	5,27	1,12	0,99	4,24	3,43	F50

По результатам анализа полученных результатов можно сделать выводы.

1. Золошлаковые смеси, укрепленные портландцементом, в процессе твердения проявляют гидравлическую активность. В процессе структурообразования выделяется оксид кальция, который вступает в реакцию с кремнеземом и глиноземом золошлаковой смеси и образует новые соединения, которые повышают прочностные характеристики и морозостойкость укрепленного грунта. При этом следует отметить, что при испытании на морозостойкость золошлаковой смеси, укрепленной цементом, в первые 25 циклов замораживания/оттаивания наблюдался прирост прочности на сжатие. Увеличение значения составило 17%.

2. Грунты, укрепленные портландцементом, обладают значительной водостойкостью.

3. Оптимальное рекомендуемое значение содержания портландцемента в составе при укреплении кислых грунтов составляет 4–7%. При введении извести это значение может быть снижено. В зависимости от технологии производства работ указанное значение может быть увеличено. В частности, смешение компонентов укрепленного грунта на дороге (ресайклинг или грунтовыми фрезами) не позволяет обеспечить такую же высокую однородность смеси как при смешении в смесительной установке. На расход вяжущих материалов также оказывает влияние способ распределения вяжущих при смешении на дороге.

4. Разработанные составы можно применять для устройства слоев земляных сооружений в условиях континентального и полярного климата.

2.2.2. Укрепление известью

В лабораторных условиях произведен подбор составов грунтов, укрепленных известью с различным процентным содержанием извести:

- 1) суглинок легкий, укрепленный известью;
- 2) золошлаковая смесь Усть-Илимской ТЭЦ, укрепленная известью;
- 3) песок средней крупности, укрепленный известью;
- 4) супесь, укрепленная известью.

Результаты лабораторных испытаний этих составов укрепленных грунтов отражены в таблице 6.

По результатам анализа полученных результатов можно сделать выводы:

1. Укрепленные золошлаковые смеси, так же как и при укреплении портландцементом, проявляют в процессе твердения гидравлическую активность, что позволяет увеличить прочность на сжатие и морозостойкость.

2. Структурообразование грунтов, укрепленных известью, протекает относительно медленно (по сравнению с грунтами, укрепленными цементом), поэтому физико-механические характеристики целесообразно оценивать через 90 и 180 сут. твердения.

3. Составы имеют марку по морозостойкости менее F25, поэтому применение извести как самостоятельного вяжущего материала для укрепления местных грунтов в условиях континентального и полярного климата нецелесообразно (рисунок 3).



Рисунок 3 - Испытание образцов на морозостойкость
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.8>

Для оценки эффективности применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях дорожных одежд по показателю «Стоимость строительства» выполнен расчет конструкций дорожных одежд (таблица 6) с применением разработанных составов.

Выполнен расчет стоимости строительства конструкций дорожных одежд в базисном уровне цен (по состоянию на 1.01.2000 г.) на основе локальных смет. Стоимость материалов включает доставку автотранспортом на расстояние до 30 км. Стоимость указана без НДС.

Таблица 6 - Конструкции дорожных одежд

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.65.2.9>

Вариант 1		Вариант 2	
Материал слоя дорожной одежды	Толщина, см	Материал слоя дорожной одежды	Толщина, см
Защитный слой: АБ А11ВЛ на БНД 100/130	4	Защитный слой: АБ А11ВЛ на БНД 100/130	4
Легкая песчанис- тая супесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558), соответствующая марке М20	10	Золошлаковая смесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558), соответствующая марке М20	10
Щебеночно-гравийно- песчаные смеси для оснований	15	Щебеночно-гравийно- песчаные смеси для оснований	15
Песчано-гравийные смеси по ГОСТ 23735	27	Песчано-гравийные смеси по ГОСТ 23735	27
Супесь легкая	—	Супесь легкая	—
Стоимость, руб.	16 875	Стоимость, руб.	16559

Заключение

По результатам выполненной работы сформулированы выводы:

1. Разработаны составы грунтов и золошлаковых смесей, укрепленных портландцементом и известью, для строительства земляных сооружений в условиях континентального и полярного климата.
2. Оптимальное рекомендуемое значение содержания портландцемента в составе при укреплении кислых грунтов составляет 4–7%. При введении извести это значение может быть снижено.
3. Снижение стоимости строительства дорожной одежды при применении золошлаковой смеси взамен местного грунта составило 2%.
4. Применение золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях земляных сооружений позволит увеличить объемы их повторного использования и тем самым снизить экологическую нагрузку.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Putilova I.V. Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy / I.V. Putilova // International Journal of Hydrogen Energy. — 2023. — № 1. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.230
2. Золотова И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС / И.Ю. Золотова // Инновации и инвестиции. — 2020. — № 7. — С. 123–128.
3. Klyuev S.V. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads / S.V. Klyuev // Construction Materials and Products. — 2024. — № 7. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-6-3
4. Лофлер М. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства / М Лофлер, Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2017. — № 2. — С. 62–66.

5. Зубова О.В. Использование в лесном дорожном строительстве зологрунтовых смесей, обработанных вяжущими материалами : дис. ...канд. технические науки: 05.21.01 : защищена 2015-07-04 : утв. 2015-07-04 / О.В. Зубова. — Санкт-Петербург: 2015. — 20 с.
6. Слободчикова Н.А. Возможности применения твердых коммунальных отходов в дорожном строительстве / Н.А. Слободчикова, С.В. Ключев, А.М. Исмаилов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2025. — № 15. — С. 12–17.
7. Куйвашева А.В. Применение золоминеральных смесей в основаниях дорожной одежды при реконструкции ул. Ленина / А.В. Куйвашева, В.Г. Степанец // Молодой ученый. — 2016. — № 12. — С. 27–34.
8. Bahadur R. An investigation of waste glass powder with the substitution of sand on concrete mix / R. Bahadur, A.K. Parashar // Materials Today: Proceedings. — 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.123
9. Yu M. Performance evaluation of surface treatment waste glass as aggregate in asphalt mixture / M. Yu, D. Jin, Y. Liu [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03767
10. Cheng M. Effect of waste glass aggregate on performance of asphalt micro-surfacing / M. Cheng, M. Chen, S. Wu [et al.] // Construction and Building Materials. — 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125133
11. Zhangabay N. Analysis of the effect of porosity on thermal conductivity with consideration of the internal structure of arbolite / N. Zhangabay // Construction Materials and Products. — 2024. — № 7. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-4
12. Sinitsin D.A. Study of the characteristics of pavement elements made of rein-forced soil with the use of secondary resources / D.A. Sinitsin, A.E.M.M Elrefaei, A.O. Glazachev [et al.] // Construction Materials and Products. — 2023. — № 6. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-6-2
13. Bratchun V.I. Hydraulic activity of crushing screenings of waste open-hearth slag / V.I. Bratchun, V.L. Bespalov, A. Ahmed [et al.] // Construction Materials and Products. — 2024. — № 7. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-3

Список литературы на английском языке / References in English

1. Putilova I.V. Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy / I.V. Putilova // International Journal of Hydrogen Energy. — 2023. — № 1. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.230
2. Zolotova I.Yu. Benchmarking zarubezhnogo opita utilizatsii produktov szhiganiya tverdogo topliva ugolnikh TES [Benchmarking of foreign experience in the disposal of solid fuel combustion products from coal-fired thermal power plants] / I.Yu. Zolotova // Innovatsii i investitsii [Innovation and investment]. — 2020. — № 7. — P. 123–128. [in Russian]
3. Klyuev S.V. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads / S.V. Klyuev // Construction Materials and Products. — 2024. — № 7. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-6-3
4. Lofler M Poluchenie neorganicheskogo vyazhushchego na osnove otkhodov promishlennogo proizvodstva [Production of an inorganic binder based on industrial waste] / M Lofler, N.A. Slobodchikova, K.V. Plyuta // Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost [University News. Investments. Construction. Real Estate]. — 2017. — № 2. — P. 62–66. [in Russian]
5. Zubova O.V. Ispolzovanie v lesnom dorozhnom stroitelstve zologruntovikh smesei, obrabotannikh vyazhushchimi materialami [Use of ash-soil mixtures treated with binding materials in forest road construction] : dis....of PhD in engineering : 05.21.01 : defense of the thesis 2015-07-04 : approved 2015-07-04 / O.V. Zubova. — Saint Petersburg: 2015. — 20 p. [in Russian]
6. Slobodchikova N.A. Vozmozhnosti primeneniya tverdkh kommunalnikh otkhodov v dorozhnom stroitelstve [Opportunities for using municipal solid waste in road construction] / N.A. Slobodchikova, S.V. Klyuev, A.M. Ismailov // Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost [University News. Investments. Construction. Real Estate]. — 2025. — № 15. — P. 12–17. [in Russian]
7. Kuivasheva A.V. Primenenie zolomineralnikh smesei v osnovaniyakh dorozhnoi odezhdi pri rekonstruktsii ul. Lenina [Application of ash-mineral mixtures in road pavement bases during the reconstruction of Lenin Street] / A.V. Kuivasheva, V.G. Stepanets // Molodoi uchenii [Young Scientist]. — 2016. — № 12. — P. 27–34. [in Russian]
8. Bahadur R. An investigation of waste glass powder with the substitution of sand on concrete mix / R. Bahadur, A.K. Parashar // Materials Today: Proceedings. — 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.02.123
9. Yu M. Performance evaluation of surface treatment waste glass as aggregate in asphalt mixture / M. Yu, D. Jin, Y. Liu [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2024. DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03767
10. Cheng M. Effect of waste glass aggregate on performance of asphalt micro-surfacing / M. Cheng, M. Chen, S. Wu [et al.] // Construction and Building Materials. — 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125133
11. Zhangabay N. Analysis of the effect of porosity on thermal conductivity with consideration of the internal structure of arbolite / N. Zhangabay // Construction Materials and Products. — 2024. — № 7. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-4
12. Sinitsin D.A. Study of the characteristics of pavement elements made of rein-forced soil with the use of secondary resources / D.A. Sinitsin, A.E.M.M Elrefaei, A.O. Glazachev [et al.] // Construction Materials and Products. — 2023. — № 6. DOI: 10.58224/2618-7183-2023-6-6-2
13. Bratchun V.I. Hydraulic activity of crushing screenings of waste open-hearth slag / V.I. Bratchun, V.L. Bespalov, A. Ahmed [et al.] // Construction Materials and Products. — 2024. — № 7. DOI: 10.58224/2618-7183-2024-7-3-3