

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» / Russian Journal of Transport Engineering <https://t-s.today>

2024, Том 11, № 3 / 2024, Vol. 11, Iss. 3 <https://t-s.today/issue-3-2024.html>

URL: <https://t-s.today/PDF/11SATS324.pdf>

DOI: 10.15862/11SATS324 (<https://doi.org/10.15862/11SATS324>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

УДК 625.7

Исследование свойств золошлаковых смесей тепловых электростанций с позиции их применения в дорожном строительстве

¹Слободчикова Н.А., ¹Плюта К.В., ²Клюев С.В.

¹ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет», Иркутск, Россия

²ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический
университет имени В.Г. Шухова», Белгород, Россия

Автор, ответственный за переписку: Плюта Ксения Викторовна, e-mail: kv_plyuta@mail.ru

Аннотация. Существующая сеть автомобильных дорог регионального и местного значения характеризуется относительно невысоким транспортно-эксплуатационным состоянием. Учитывая большую протяженность сети автомобильных дорог, для приведения их в нормативное состояние необходимо применение эффективных и экономичных технологий. Такие технологии должны подразумевать использование техногенных отходов и, в частности, золошлаковых отходов тепловых электростанций. Несмотря на многочисленные исследования возможность широкомасштабного применения золошлаковых отходов в конструкциях автомобильных дорог в условиях континентального и полярного климата изучена недостаточно. Количество объектов дорожного хозяйства, построенных с применением этих материалов в Российской Федерации незначительно. В связи с чем в работе поставлена цель — исследовать возможность крупнотоннажного применения золошлаковых смесей в конструкциях автомобильных дорог. В работе исследованы химические и

физико-механические характеристики различных золошлаковых смесей Иркутской области. Установлено, что в объеме выполненных исследований с точки зрения применения золошлаковых смесей в дорожном строительстве, строительные-технические свойства золошлаковых смесей примерно одинаковы в пределах золоотвалов. Наиболее перспективные направления применений золошлаковых смесей в дорожном строительстве: в земляном полотне в качестве укрепленного и неукрепленного цементом техногенного грунта; в дорожной одежде в качестве техногенного грунта, укрепленного портландцементом, для возведения слоев оснований и в качестве компонента зологрунтовых и золоминеральных композиций в сочетании с щебнем, песком, местными грунтами.

Ключевые слова: зологрунтовые смеси; золошлаковые смеси тепловых электростанций; укрепление грунтов автомобильных дорог

Study of the properties of ash-slag mixtures from thermal power plants in the context of their application in road construction

¹Nadezhda A. Slobodchikova, ¹Ksenia V. Plyuta, ²Sergey V. Klyuev

¹Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

²Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov Belgorod, Russia

Corresponding author: Ksenia V. Plyuta, e-mail: kv_plyuta@mail.ru

Abstract. The existing network of regional and local roads is characterized by a relatively low transport and operational condition. Given the extensive length of the road network, the application of effective and economical technologies is necessary to bring these roads to standardized condition. Such technologies should involve the use of technogenic waste, particularly ash-slag waste from thermal power plants. Despite numerous studies, the potential for large-scale application of ash-slag waste in road construction under continental and polar climate conditions has been insufficiently explored. The number of road infrastructure projects constructed using these materials in the Russian Federation is minimal. Therefore, this study aims to investigate the feasibility of large-scale application of ash-slag mixtures in road construction. The research examines the chemical and physicommechanical

characteristics of various ash-slag mixtures from the Irkutsk region. It has been established that, within the scope of this research regarding the use of ash-slag mixtures in road construction, the construction and technical properties of these mixtures are approximately uniform across ash-disposal areas. The most promising applications for ash-slag mixtures in road construction include their use in embankments as both cement-stabilized and unstabilized technogenic soils; in road surfaces as cement-stabilized technogenic soils for the construction of base layers; and as components of ash-soil and ash-mineral compositions combined with gravel, sand, and local soils.

Keywords: ash-soil mixtures; ash-slag mixtures from thermal power plants; reinforcement of highways soils

Данная статья доступна по лицензии Creative Commons “Attribution” («Атрибуция») 4.0 Всемирная

This article is available under the Creative Commons “Attribution” 4.0 Global License



Введение

Introduction

Существующая сеть автомобильных дорог регионального и местного значения характеризуется относительно невысоким транспортно-эксплуатационным состоянием. По данным РОССТАТА автомобильные дороги регионального и местного значения соответствуют нормативным требованиям в среднем на 52 %. Учитывая большую протяженность сети автомобильных дорог, для приведения их в нормативное состояние необходимо применение эффективных и экономичных технологий. Согласно Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года для повышения эффективности строительных работ необходимо развитие производства материалов повторного использования в целях снижения расхода невозобновляемых природных ресурсов. В частности, представляет интерес применение золошлаковых отходов тепловых электростанций.

В России каждый год сжигается более 123 млн т угля и образуется 18–25 млн тонн золошлаковых отходов. Объем повторного использования составляет 12–17 % [1; 2].

В тоже время в отдельных странах Мира объемы утилизации достигают 100 % [1] (рис. 1).



Рисунок 1. Доля утилизированных золошлаковых отходов в общем объеме образованных в разных странах (составлено авторами на основе данных [1])

Figure 1. Share of recovered ash-slag wastes in total amount generated in different countries (Compiled by the authors on the basis of data [1])

Повторное применение золошлаковых отходов имеет важное экономическое и экологическое значение, т. к. накопление и увеличение объемов золошлаковых отходов приводит к росту экологической и экономической нагрузки. Согласно Энергетической стратегии № 1523-р до 2035 г. РФ объемы повторного использования должны значительно увеличиться.¹

Дорожное строительство является наиболее материалоемким с точки зрения крупнотоннажного повторного использования золошлаковых отходов [3–9].

В российской практике дорожного строительства принято классифицировать золошлаковые отходы следующим образом:

1. Зола-уноса это частицы размером 0,005–0,1 мм. Зола-уноса выносятся дымовыми газами из топки котлового агрегата с осаждением частиц в циклонах и электрофильтрах, либо вместе с водой и шлаком удаляется на золоотвал.
2. Топливные шлаки — это частицы минерального остатка угля размером до 40 мм, которые образуются при плавлении минеральной части топлива.
3. Золошлаковая смесь — это гидратированная смесь золы и шлака, которая образуются в котле и в виде пульпы направляется в золоотвал.

Наиболее важным является использование золошлаковых смесей т. к. площадь золоотвалов в Российской Федерации составляет около 20 тыс. га.

Направления использования золошлаковых отходов в дорожном строительстве определяются их свойствами и, соответственно, классификацией. Для оценки их пригодности при выполнении дорожно-строительных работ необходимо учитывать химические и физические свойства отходов.

Одними из основных характеристик химического состава является модуль основности M_o , кремнеземистый модуль M_c и коэффициент качества K .

Модуль основности M_o — отношение суммы основных оксидов к сумме кислотных оксидов:

$$M_o = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3}. \quad (1)$$

¹ Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

Кремнеземистый модуль M_c показывает отношение оксида кремния, вступающего в реакцию с другими оксидами, к суммарному содержанию оксидов алюминия и железа:

$$M_c = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}. \quad (2)$$

По значению модуля основности золошлаковые отходы принято подразделять согласно таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Классификация зол-уноса по модулю основности
Classification of fly ash by basicity modulus

Вид золы-уноса <i>Fly ash type</i>	Значение модуля основности M_o <i>Basicity modulus value M_o</i>	Характеристика зол-уноса <i>Fly ash characteristics</i>
Основные <i>Basic</i>	> 0,9	Золы, проявляющие явные или латентные гидравлические свойства <i>Ashes showing obvious or latent hydraulic properties</i>
Кислые <i>Acidic</i>	0,6–0,9	Золы, богатые SiO_2 и проявляющие пуццолановые свойства (содержание $CaO + MgO$ составляет 12 %) <i>Ashes rich in SiO_2 and showing pozzolanic properties ($CaO + MgO$ content is 12 %)</i>
Сверхкислые <i>Super-acidic</i>	< 0,6	

Источник² / Source²

Коэффициент качества K показывает отношение оксидов, повышающих гидравлическую активность к оксидам, снижающим ее:

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + MnO_2}. \quad (3)$$

По содержанию оксида кальция CaO золы-уноса принято подразделять в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 / Table 2

Классификация зол-уноса по содержанию оксида кальция
Fly ash classification by calcium oxide content

Наименование золы-уноса <i>Fly ash name</i>	Содержание CaO , % по массе <i>CaO content, % by mass</i>
Основные — бурого угольные <i>Basic — brown coal fly ashes</i>	> 10
Кислые — антрацитовые, каменноугольные и бурого угольные <i>Acidic — anthracite, coal and brown coal fly ashes</i>	< 10

Источник² / Source²

К основным физическим свойствам зол-уноса относятся: дисперсность, содержание несгоревших углеродистых частиц, гранулометрический состав, насыпная плотность и др.

² Русина, В.В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов: учебное пособие. — Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. — 224 с.

Золошлаковые смеси по виду шлаковой составляющей подразделяются на смеси с плотным и пористым шлаком.

Гранулометрический состав. Золошлаковые смеси в зависимости от зернового состава в соответствии с классификацией ОДМ 218.2.031-2013 делятся на крупнозернистые, среднезернистые и мелкозернистые.

К шлаковой составляющей в золошлаковых смесях относят шлаковый щебень (частицы размером более 5 мм) и шлаковый песок (частицы размером от 0,315 до 5 мм).

Несгоревшие остатки. Несгоревшие частицы угля представлены, в основном, в виде остатков кокса и полукокса. Эти продукты стойки к окислению на воздухе, поглощают мало воды и мало подвержены объемным изменениям при попеременном увлажнении и замораживании. Поэтому их негативное влияние на качество золошлаковой смеси незначительно.

Влажность. Влажность является одним из важнейших показателей при строительстве дорожных одежд и земляного полотна т. к. она напрямую влияет на качество уплотнения.

Исследованиями золошлаковых смесей в т. ч. исследованиями их применения в дорожном строительстве занимались различные ученые [3–17].

Несмотря на многочисленные исследования возможность широкомасштабного применения золошлаковых отходов тепловых электростанций (ТЭС) в конструкциях автомобильных дорог в условиях континентального и полярного климата изучена недостаточно. Количество объектов дорожного хозяйства, построенных с применением этих материалов в Российской Федерации незначительно.

В связи с чем в работе поставлена цель — исследовать возможность крупнотоннажного применения золошлаковых смесей ТЭС в конструкциях автомобильных дорог.

Методы

Methods

Для проведения исследования осуществлен отбор проб золошлаковой смеси с золоотвалов Иркутской области (табл. 3), общий объем накопленных золошлаковых материалов в которых составляет более 87 млн т.

Отбор проб осуществлен в разные годы с разных карт золоотвалов.

Таблица 3 / Table 3

Золошлаковые смеси ТЭС Иркутской области
Ash-slag mixtures from thermal power plants of the Irkutsk region

ТЭС <i>Thermal power plant</i>	Складировано, тыс. т <i>Stored, thousand tons</i>	Местоположение <i>Location</i>	Класс опасности <i>Hazard class</i>
ТЭС-6 <i>Thermal power plant-6</i>	3 978,365	г. Братск <i>Bratsk</i>	V
Участок ТИиТС ТЭС-6 <i>Section of heat sources and heating networks of Thermal power plant-6</i>	1 129,776	г. Братск <i>Bratsk</i>	V
ТЭС-9 <i>Thermal power plant-9</i>	27 737,030	г. Ангарск <i>Angarsk</i>	V
ТЭС-10 <i>Thermal power plant-10</i>	20 104,545	г. Ангарск <i>Angarsk</i>	V
ТЭС-11 <i>Thermal power plant-11</i>	9 249,944	г. Усолье-Сибирское <i>Usolye-Sibirskoye</i>	V
ТЭС-12 <i>Thermal power plant-12</i>	1 044,771	г. Черемхово <i>Cheremkhovo</i>	V
Ново-Иркутская ТЭС <i>Novo-Irkutskaya Thermal power plant</i>	10 166,432	г. Иркутск <i>Irkutsk</i>	V
Шелеховский участок Ново-Иркутской ТЭС <i>Shelekhovsky section of Novo-Irkutskaya Thermal power plant</i>	1 352,025	г. Шелехов <i>Shelekhov</i>	V
Усть-Илимская ТЭС <i>Ust-Ilimskaya Thermal power plant</i>	3 162,791	г. Усть-Илимск <i>Ust-Ilimsk</i>	V
Ново-Зиминская ТЭС <i>Novo-Ziminskaya Thermal power plant</i>	3 619,661	г. Саянск <i>Sayansk</i>	V
ИТОГО: <i>Results</i>	88 332,890		

Составлено авторами на основе данных ООО «Иркутскзолопродукт» / Compiled by the authors on the basis of data of ООО «Irkutskzoloproduct»

Химический анализ выполнен с применением методов:

- ГОСТ Р 59592 «Топливо твердое. Методы определения химического состава золы»;
- ПНД Ф 16.1:2.3.11 «Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой».

Для определения физико-механических свойств золошлаковых материалов и их классификации использованы следующие методы лабораторных испытаний:

- ГОСТ 12536 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»;
- ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация»;

- ГОСТ 28622 «Грунты. Метод лабораторного определения степени пучинистости»;
- ГОСТ 310.2 «Цементы. Методы определения тонкости помола»;
- ОДМ 218.2.031 «Методические рекомендации по применению золы-уноса и золошлаковых смесей от сжигания угля на тепловых электростанциях в дорожном строительстве»;
- ГОСТ 25584 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации;
- ГОСТ 12248 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

Сопротивление сдвигу определено на образцах, уплотненных до максимальной плотности при оптимальной влажности.

Для статистической обработки данных использованы формулы.

Среднее арифметическое.

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4)$$

где:

n — число наблюдений;

x_i — реализация случайной величины в каждом наблюдении.

Дисперсия.

$$D = (X - x_i)^2, \quad (5)$$

Среднее квадратическое (стандартное) отклонение случайной величины.

$$\sigma = \sqrt{D}. \quad (6)$$

Результаты

Results

По содержанию оксидов кальция почти все пробы золошлаковых смесей относятся к кислым.

По значениям модуля основности M_o все пробы золошлаковых материалов относятся к сверхкислым характеризуются низкой гидравлической активностью.

Коэффициент качества не превышает единицы.

Таблица 4 / Table 4

Химический состав золошлаковых смесей ТЭС
Chemical composition of Thermal power plant ash-slag mixtures

ТЭС Thermal power plant	Год отбора проб Year of sample taking	Наименование Name													
		Оксид алюминия Aluminum oxide	Оксид железа Iron oxide	Оксид кремния Silicon oxide	Триоксид серы Sulfur trioxide	Оксид титана Titanium oxide	Оксид марганца Manganese oxide	Оксид фосфора Phosphorus oxide	Оксид магния Magnesium oxide	Оксид кальция Calcium oxide	Оксид калия Potassium oxide	Оксид натрия Sodium oxide	Модуль основности M_o Basicity modulus M_o	Коэффициент качества К Quality factor K	Кремнеземистый модуль Мс Silica coefficient M_c
		Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	SO_3	TiO_2	Mn_3O_4	P_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O			
ТЭС-9 уч. № 1 Thermal power plant-9 section № 1	2019	26,8	5,6	62,5	0,056	0,56	0,032	0,068	1,9	2,7	1,8	0,23	0,1	0,5	1,9
	2020	24	6,4	59,7	0,1	0,54	0,041	0,083	1,9	3,1	1,4	0,17	0,1	0,5	2,0
	2021	23	5,1	61	0,23	0,47	—	—	2,1	2,9	1,2	0,19	0,1	0,5	2,2
	2022	27	6,8	59,2	0,22	0,5	—	—	1,9	4	1,5	0,24	0,1	0,6	1,8
	2023	22	6	59,7	0,18	0,49	—	—	2	4,7	1,4	0,37	0,1	0,5	2,1
	2024	22	6,3	62,4	0,18	0,47	—	—	1,8	3,3	1,4	0,21	0,1	0,4	2,2
	X	24,13	6,03	60,75	0,16	0,51	0,04	0,08	1,93	3,45	1,45	0,24	0,08	0,49	2,03
	D	4,29	0,31	1,74	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,48	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03
σ	2,07	0,56	1,32	0,06	0,03	0,05	0,11	0,09	0,69	0,18	0,06	0,01	0,04	0,16	
ТЭС 9 Thermal power plant-9	2019	21	13,8	51,6	0,26	0,66	0,1	0,09	1,3	4,4	0,71	0,14	0,1	0,5	1,5
	2020	25	6,1	57,8	0,14	0,63	0,067	0,14	1,8	5,4	0,9	0,2	0,1	0,6	1,9
	2021	24	6,3	56,3	0,11	0,65	0,073	0,11	1,6	4,6	0,76	0,17	0,1	0,5	1,9
	2022	29	8,2	55,5	0,2	0,6	—	—	1,4	4,8	1	0,18	0,1	0,6	1,5
	2023	24	6,7	55,3	0,19	0,7	—	—	1,5	5	0,73	0,24	0,1	0,6	1,8
	2024	23	6,5	60,1	0,19	0,65	—	—	1,2	3	0,78	0,064	0,1	0,5	2,0
	X	24,33	7,93	56,10	0,18	0,65	0,08	0,11	1,47	4,53	0,81	0,17	0,09	0,54	1,75
	D	5,89	7,35	6,70	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,57	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04
σ	2,43	2,71	2,59	0,05	0,03	0,08	0,12	0,20	0,75	0,10	0,05	0,01	0,05	0,20	

ТЭС Thermal power plant	Год отбора проб Year of sample taking	Наименование Name													
		Оксид алюминия Aluminum oxide	Оксид железа Iron oxide	Оксид кремния Silicon oxide	Триоксид серы Sulfur trioxide	Оксид титана Titanium oxide	Оксид марганца Manganese oxide	Оксид фосфора Phosphorus oxide	Оксид магния Magnesium oxide	Оксид кальция Calcium oxide	Оксид калия Potassium oxide	Оксид натрия Sodium oxide	Модуль основности M_o Basicity modulus M_o	Коэффициент качества К Quality factor K	Кремнеземистый модуль Мс Silica coefficient M_c
		Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	SO_3	TiO_2	Mn_3O_4	P_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O			
Н-З ТЭС Novo-Ziminskaya Thermal power plant	2024	29	6,3	51,1	0,95	0,74	—	—	1,2	4,9	0,69	0,039	0,1	0,7	1,4
ТЭС 6 Thermal power plant 6	2019	10,7	12,7	46	1,7	0,5	0,24	0,037	7,1	23,5	0,39	0,34	0,6	0,9	2,0
	2020	9,7	19	57,1	0,15	0,38	0,36	0,041	3,4	9,4	0,61	0,14	0,2	0,4	2,0
	2021	9,3	11	50,3	0,28	0,43	0,19	0,038	4,3	13	0,42	0,16	0,3	0,5	2,5
	2022	12	16	57,8	0,25	0,39	—	—	3,2	12	0,54	0,21	0,2	0,5	2,1
	2023	10	11	43,8	0,75	0,52	—	—	7,8	21	0,32	0,32	0,5	0,9	2,1
	2024	8,9	18	56,3	0,24	0,37	—	—	2,9	11	0,44	0,14	0,2	0,4	2,1
	X	10,10	14,62	51,88	0,56	0,43	0,26	0,04	4,78	14,98	0,45	0,22	0,34	0,60	2,11
	D	1,04	10,40	30,70	0,30	0,00	0,07	0,00	3,78	28,10	0,01	0,01	0,02	0,05	0,03
	σ	1,02	3,23	5,54	0,54	0,06	0,27	0,04	1,94	5,30	0,10	0,08	0,15	0,21	0,17
ТЭС 6 (ТИиТС) Thermal power plant 6 (TI&TS)	2019	19,5	8,4	53,7	0,65	0,76	0,15	0,08	3,4	6,8	1,5	0,2	0,2	0,6	1,9
	2020	10,5	13	58	0,9	0,45	0,22	0,053	3	11	0,8	0,15	0,2	0,4	2,5
	2021	10,2	9,6	61	0,5	0,42	0,18	0,048	2,6	7,4	0,68	0,14	0,2	0,3	3,1
	2022	13	14	57,4	0,6	0,46	—	—	2,3	11	0,76	0,17	0,2	0,5	2,1
	2023	13	10	57,9	0,82	0,47	—	—	4,1	12	0,9	0,32	0,2	0,5	2,5
	2024	14	12	65,1	0,49	0,53	—	—	2	6,7	0,97	0,094	0,1	0,3	2,5
	X	13,37	11,17	58,85	0,66	0,52	0,18	0,06	2,90	9,15	0,94	0,18	0,18	0,44	2,44
	D	9,42	3,93	12,32	0,02	0,01	0,03	0,00	0,49	4,93	0,07	0,00	0,00	0,01	0,13
	σ	3,07	1,98	3,51	0,15	0,11	0,19	0,06	0,70	2,22	0,27	0,07	0,04	0,08	0,36

ТЭС Thermal power plant	Год отбора проб Year of sample taking	Наименование Name													
		Оксид алюминия Aluminum oxide	Оксид железа Iron oxide	Оксид кремния Silicon oxide	Триоксид серы Sulfur trioxide	Оксид титана Titanium oxide	Оксид марганца Manganese oxide	Оксид фосфора Phosphorus oxide	Оксид магния Magnesium oxide	Оксид кальция Calcium oxide	Оксид калия Potassium oxide	Оксид натрия Sodium oxide	Модуль основности M_o Basicity modulus M_o	Коэффициент качества К Quality factor K	Кремнеземистый модуль Mc Silica coefficient M_c
		Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	SO_3	TiO_2	Mn_3O_4	P_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O			
Н-И ТЭС Novo-Irkutskaya Thermal power plant	2019	25,9	11	47,5	1	0,71	0,17	0,18	2	8,1	0,77	0,1	0,1	0,8	1,3
	2020	15	33	40,8	0,62	0,51	0,23	0,12	1,4	6,7	0,66	0,09	0,2	0,6	0,9
	2021	22	5,2	59,4	0,55	0,5	—	—	1,6	6,7	0,5	0,094			
	2022	27	9,3	50,2	0,61	0,59	—	—	0,81	5	0,98	0,13	0,1	0,7	1,4
	2023	22	8,8	53,3	0,49	0,68	—	—	3	10	0,8	0,21	0,2	0,7	1,7
	2024	21	5,7	60,1	0,21	0,79	—	—	1,4	4,3	1,3	0,046	0,1	0,4	2,3
	X	22,18	13,56	50,38	0,59	0,66	0,13	0,10	1,72	6,82	0,90	0,12	0,13	0,61	1,50
	D	18,01	97,41	40,62	0,06	0,01	0,02	0,01	0,55	4,29	0,05	0,00	0,00	0,01	0,22
	σ	4,24	9,87	6,37	0,25	0,10	0,15	0,11	0,74	2,07	0,22	0,05	0,04	0,10	0,47
Н-И ТЭС Шел. уч. Novo- Irkutskaya Thermal power plant Shelekhovsky section	2019	28,8	9,4	54,3	0,6	0,78	0,08	0,03	1,3	0,7	0,72	0,15	0,0	0,6	1,4
	2020	29	9,3	52,5	0,26	0,83	0,07	0,11	1	4,4	0,8	0,11	0,1	0,7	1,4
	2021	28	6,8	50,8	0,44	0,81	0,11	0,17	1,1	5,5	0,56		0,1	0,7	1,5
	2022	28	9,6	50,8	0,63	0,59	—	—	0,88	5,3	1	0,13	0,1	0,7	1,4
	2023	25	7,8	52,3	0,28	1	—	—	1,2	5,5	0,9	0,25	0,1	0,6	1,6
	2024	25	10,3	52,1	0,61	0,67	—	—	1,1	4,4	0,62	0,046	0,1	0,6	1,5
	X	27,30	8,87	52,13	0,47	0,78	0,09	0,10	1,10	4,30	0,77	0,11	0,08	0,63	1,45
	D	2,78	1,41	1,40	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	2,81	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01
	σ	1,67	1,19	1,18	0,15	0,13	0,09	0,12	0,13	1,68	0,15	0,08	0,02	0,04	0,08
ТЭС 10 Thermal power plant 10	2019	29,3	7,6	56	0,145	0,72	0,07	0,15	1,45	4,5	1	0,28	0,1	0,6	1,5
	2020	22	7,4	60,8	0,23	0,5	0,071	0,097	2	4,4	1,4	0,24	0,1	0,5	2,1
	2021	20	7,5	56,8	0,13	0,56	0,068	0,091	1,6	4,1	1,1	0,23	0,1	0,5	2,1
	2022	28	6,2	57,9	0,34	0,58	—	—	1,9	4,7	1,6	0,24	0,1	0,6	1,7
	2023	22	17	48,8	0,29	0,61	—	—	1,4	5,3	0,8	0,24	0,1	0,6	1,3
	2024	19	6,7	61,2	0,19	0,47	—	—	1,6	3,5	1,2	0,15	0,1	0,4	2,4
	X	23,38	8,73	56,92	0,22	0,57	0,07	0,11	1,66	4,42	1,18	0,23	0,09	0,52	1,83
	D	15,13	13,91	16,85	0,01	0,01	0,00	0,01	0,05	0,30	0,07	0,00	0,00	0,01	0,14

ТЭС Thermal power plant	Год отбора проб Year of sample taking	Наименование Name													
		Оксид алюминия Aluminum oxide	Оксид железа Iron oxide	Оксид кремния Silicon oxide	Триоксид серы Sulfur trioxide	Оксид титана Titanium oxide	Оксид марганца Manganese oxide	Оксид фосфора Phosphorus oxide	Оксид магния Magnesium oxide	Оксид кальция Calcium oxide	Оксид калия Potassium oxide	Оксид натрия Sodium oxide	Модуль основности M_o Basicity modulus M_o	Коэффициент качества К Quality factor K	Кремнеземистый модуль Мс Silica coefficient M_c
		Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	SO_3	TiO_2	Mn_3O_4	P_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O			
	σ	3,89	3,73	4,11	0,08	0,08	0,07	0,12	0,22	0,55	0,26	0,04	0,01	0,09	0,38
ТЭС 11 Thermal power plant 11	2019	28,8	12,5	50,4	0,92	0,77	0,11	0,12	1,3	5,8	0,8	0,16	0,1	0,7	1,2
	2024	12	41	36,8	0,45	0,56	—	—	1,2	3,9	0,58	0,028	0,1	0,5	0,7
	X	20,40	26,75	43,60	0,69	0,67			1,25	4,85	0,69	0,09	0,11	0,59	0,96
	D	70,56	203,06	46,24	0,06	0,01			0,00	0,90	0,01	0,00	0,00	0,02	0,07
	σ	8,40	14,25	6,80	0,24	0,11			0,05	0,95	0,11	0,07	0,01	0,12	0,26
ТЭС 12 Thermal power plant 12	2019	23,6	51,7	47,8	1,68	0,52	0,066	0,03	1,2	3,5	0,84	0,22	0,1	0,6	0,6
	2024	14	26	48,1	0,94	0,35	—	—	1,5	5,6	1,6	0,15	0,1	0,4	1,2
	X	18,80	38,85	47,95	1,31	0,44			1,35	4,55	1,22	0,19	0,11	0,51	0,92
	D	23,04	165,12	0,02	0,14	0,01			0,02	1,10	0,14	0,00	0,00	0,01	0,08
	σ	4,80	12,85	0,15	0,37	0,09			0,15	1,05	0,38	0,04	0,03	0,08	0,28
У-И ТЭС Ust-Ilimskaya Thermal power plant	2019	20,8	10,5	50,6	0,062	0,92	0,23	0,04	1,4	6	0,55	0,2	0,1	0,6	1,6
	2020	10,7	8,3	54,2	0,72	0,55	0,24	0,27	5,5	18	0,9	0,53	0,4	0,6	2,9
	2021	18	9,6	50,1	0,25	0,64	0,23	0,14	2,1	8,7	0,68	0,3	0,2	0,6	1,8
	2022	25	8,1	47,2	0,11	0,76	—	—	1,7	13	0,68	0,2	0,2	0,8	1,4
	2023	10,5	5,9	47,3	1,5	0,63	—	—	4,5	20	1,7	0,9	0,5	0,7	2,9
	2024	18	8,9	53,5	0,3	0,73	—	—	1,7	11	0,86	0,24	0,2	0,6	2,0
	X	17,17	8,55	50,48	0,49	0,71	0,23	0,15	2,82	12,78	0,90	0,40	0,26	0,65	2,10
	D	27,04	2,05	7,33	0,25	0,01	0,05	0,03	2,51	24,20	0,14	0,06	0,02	0,01	0,33
	σ	5,20	1,43	2,71	0,50	0,12	0,23	0,18	1,58	4,92	0,38	0,25	0,13	0,10	0,57

Составлено авторами на основе данных ООО «Иркутскзоллопродукт» / Compiled by the authors on the basis of data of ООО Irkutskzoloproduct

Таблица 5 / Table 5

Физико-механические характеристики золошлаковых смесей ТЭС
Physical and mechanical characteristics of Thermal power plant ash-slag mixtures

Наименование <i>Name</i>	Полный остаток на сите № 008, % <i>Total residue on sieve No. 008, %</i>	Удельная поверхность, м ² /кг <i>Specific surface, m²/kg</i>	Потери массы при прокаливании, % <i>Loss of mass during calcination, %</i>	Относительная деформация морозного пучения, д.е. <i>Relative deformation of frost heaving, decimal quantity</i>	Насынная плотность, кг/м ³ <i>Bulk density, kg/m³</i>	Максимальная плотность, г/см ³ <i>Maximum density, g/cm³</i>	Оптимальная влажность, % <i>Optimal moisture content, %</i>	Коэффициент фильтрации <i>Filtration coefficient</i>	Модуль деформации, МПа <i>Strain modulus, MPa</i>	Угол внутреннего трения, ° <i>Internal friction angle, °</i>	Истинная плотность, г/см ³ <i>True density, g/cm³</i>	Средняя плотность, г/см ³ <i>Average density, g/cm³</i>	Пористость, % <i>Porosity, %</i>	Содержание засоряющих включений <i>Content of clogging inclusions</i>
ТЭС 6 <i>Thermal power plant 6</i>	21	246	3,7–15,4	0	680–692	1,1–1,7	15–37	0	—	—	2	1	41	отсут. <i>absent</i>
ТЭС 7 <i>Thermal power plant 7</i>	—	—	1	0	1060	1	27	0	14	17	—	—	—	—
ТЭС 9 <i>Thermal power plant 9</i>	37-57	201-266	0,5–4,7	0	740–1190	1,17–1,19	26–29	0	—	—	2	1	43	отсут. <i>absent</i>
ТЭС 10 <i>Thermal power plant 10</i>	32	200	0–3,0	—	955–1010	1,17–1,8	24–28	0	—	—	2	1	43	отсут. <i>absent</i>
ТЭС 11 <i>Thermal power plant 11</i>	23	221	0–14,4	0,0005–0,039	950–1365	1,21–1,6	10–17	0	10	22	2	2	30	отсут. <i>absent</i>

Наименование Name	Полный остаток на сите №008, % Total residue on sieve No. 008, %	Удельная поверхность, м²/кг Specific surface, m²/kg	Потери массы при прокаливании, % Loss of mass during calcination, %	Относительная деформация морозного пучения, д.е. Relative deformation of frost heaving, decimal quantity	Насынная плотность, кг/м³ Bulk density, kg/m³	Максимальная плотность, г/см³ Maximum density, g/cm³	Оптимальная влажность, % Optimal moisture content, %	Коэффициент фильтрации Filtration coefficient	Модуль деформации, МПа Strain modulus, MPa	Угол внутреннего трения, ° Internal friction angle, °	Истинная плотность, г/см³ True density, g/cm³	Средняя плотность, г/см³ Average density, g/cm³	Пористость, % Porosity, %	Содержание засоряющих включений Content of clogging inclusions
Ново-Иркутская ТЭС Novo-Irkutskaya Thermal power plant	50	237	0	0	880–1430	1,30–1,73	20–30	0	14	23	2	2	66	отсут. absent
Усть-Илимская ТЭС Ust-Ilimskaya Thermal power plant	40	247	1,1–5,5	0,0015–0,028	1000–1170	1,58–1,88	11–18	0	2	1	2	1	60	отсут. absent
Ново-Ирк. (Шел. уч.) Novo-Irkutskaya (Shelekhovsky section)	67	212	0,75–1,4	0	610–832	1,0–1,11	36–46	0	11	14	—	—	—	—
Ново-Зиминская ТЭС Novo-Ziminskaya Thermal power plant	43	340	3	—	740	1	36	—	—	—	2	1	62	отсут. absent

Разработано авторами / Developed by the authors

Страница 14 из 19

11SATS324

Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» <http://izd-mn.com>

Все пробы в пределах одного золоотвала имеют незначительные значения среднего квадратического отклонения. Это позволяет сделать вывод, что золошлаковые смеси в пределах выполненных измерений относительно однородны по химическому составу.

Физико-механические характеристики золошлаковых смесей приведены в таблице 5.

По гранулометрическому составу золошлаковые смеси в соответствии с классификацией ГОСТ 25100 представляют собой пески пылеватые.

По величине деформации морозного пучения золошлаковые смеси относятся к практически непучинистым и слабопучинистым, что позволяет применять их в конструкциях земляного полотна автомобильных дорог практически без ограничений.

В объеме выполненных исследований по результатам анализа таблиц 1 и 2 можно сделать вывод, что с точки зрения применения золошлаковых смесей ТЭС в дорожном строительстве, строительнотехнические свойства золошлаковых смесей примерно одинаковы в пределах золоотвалов. При производстве работ по возведению слоев автомобильных дорог не требуется предварительное перемешивание золошлаковых смесей с целью усреднения их свойств.

Наиболее перспективные направления применений золошлаковых смесей в дорожном строительстве:

В земляном полотне в качестве техногенного грунта для отсыпки слоев земляного полотна и в качестве техногенного грунта, укрепленного портландцементом, для возведения рабочего слоя земляного полотна.

В дорожной одежде в качестве техногенного грунта, укрепленного портландцементом, для возведения слоев оснований и в качестве компонента зологрунтовых и золоминеральных композиций в сочетании с щебнем, песком, местными грунтами.

Заключение

Conclusion

Повторное применение золошлаковых отходов имеет важное экономическое и экологическое значение. С точки зрения крупнотоннажного повторного использования золошлаковых отходов наиболее перспективным направлением является дорожное строительство.

Направления использования золошлаковых отходов определяются их химическими и физико-механическими свойствами.

Золошлаковые смеси ТЭС Иркутской области в пределах выполненных измерений относительно однородны по химическому составу.

По физико-механическим свойствам с точки зрения применения золошлаковых смесей ТЭС в дорожном строительстве, строительнотехнические свойства золошлаковых смесей примерно одинаковы в пределах золотвалов.

Наиболее перспективные направления применений золошлаковых смесей в дорожном строительстве: в земляном полотне в качестве укрепленного и неукрепленного цементом техногенного грунта; в дорожной одежде в качестве техногенного грунта, укрепленного портландцементом, для возведения слоев оснований и в качестве компонента зологрунтовых и золоминеральных композиций в сочетании с щебнем, песком, местными грунтами.

ЛИТЕРАТУРА

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. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.230> // International Journal of Hydrogen Energy. — 2023. — Т 48. — № 80. — С. 31040–31048. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923020359>. (дата обращения: 16.08.2024).
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. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43831822>. — EDN TGKIVS. (дата обращения: 16.08.2024).
3. **Минаев, А.Н.** Применение золополимерных смесей в строительстве лесовозных дорог / А. Н. Минаев, О.В. Зубова, Д.М. Кулик [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-106-116> // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. — 2020. — № 3. — С. 106–116. — URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42916018>. — EDN IZIMTO. (дата обращения: 16.08.2024).
4. **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. 306–311. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26422968>. — EDN WGFOHZ. (дата обращения: 16.08.2024).
5. **Kotlyar, V.D.** Molding properties of clay mixtures in the soft mud brick manufacture / V.D. Kotlyar, Yu.I. Nebezsko, M.Yu. Semenova. — DOI <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-1-5> // Construction Materials and Products. — 2024. — Т 7. — № 1. — URL: <https://bstu-journals.ru/wp-content/uploads/2024/02/5-kotlyar.pdf>. (дата обращения: 16.08.2024).
6. **Muzalev, S.V.** Recycling of municipal solid waste in construction / S.V. Muzalev, E.V. Nikiforova, O.A. Petrova, O.V. Antonova, L.A. Melnikova. — DOI <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-5-7> // Construction Materials and Products. — 2023. — Т 6. — № 5. — URL: <https://bstu-journals.ru/wp-content/uploads/2023/10/7-muzalev.pdf>. (дата обращения: 16.08.2024).
7. **Vakili, A.H.** A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure / A.H. Vakili, M. Salimi, İ. Keskin, M. Jamalimoghadam. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036> // Soil and Tillage Research. — 2024. — Т 239. — № 106036. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198724000370>. (дата обращения: 16.08.2024).

8. **Лофлер, М.** Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производств / М. Лофлер, Н.А. Слободчикова, К.В. Плюта // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2017. — Т 7. — № 2. — С. 62–66. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29409352>. — EDN YTORPF. (дата обращения: 16.08.2024).
9. **Лофлер, М.** Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства / М. Лофлер, Н.А. Слободчикова. — DOI <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-141-147> // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2018. — Т 8. — № 2. — С. 141–147. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35173180>. — EDN GNBZIF. (дата обращения: 16.08.2024).
10. **Tanyildizi, M.** Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review / M. Tanyildizi, V.E. Uz, İ. Gökalp. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435> // Construction and Building Materials. — 2023. — Т 398. — С. 132435. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061823021517>. (дата обращения: 16.08.2024).
11. **Ahmad, S.** Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review / S. Ahmad, M.S.A. Ghazi, M. Syed, M.A. Al-Osta. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102079> // Results in Engineering. — 2024. — Т 22. — С. 102079. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024003335>. (дата обращения: 16.08.2024).
12. **Laguna-Torres, C.A.** Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks / C.A. Laguna-Torres, J.R. González-López, M.Á. Guerra-Cossío, L. F. Guerrero-Baca [и др.]. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135449> // Construction and Building Materials. — 2024. — Т 419. — С. 135449. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061824005907>. (дата обращения: 16.08.2024).
13. **Safi, W.** Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials / W. Safi, S. Singh. — DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.333> // Materials Today: Proceedings. — 2022. — Т 51. — С. 947–955. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478532104726X>. (дата обращения: 16.08.2024).
14. **Ibragimov, R.A.** Evaluation of the influence of an aggressive environment on the durability of the cement stone / R.A. Ibragimov, F.R. Shakirzyanov, R.A. Kayumov, E.V. Korolev. — DOI <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-2-4> // Construction Materials and Products. — 2024. — Т 7. — № 2. — URL: <https://bstu-journals.ru/wp-content/uploads/2024/05/4-ibragimov.pdf>. (дата обращения: 16.08.2024).
15. **Kabirova, A.I.** Research trends in the mechanoactivation of clay minerals used in obtaining geopolymers / A.I. Kabirova, R.A. Ibragimov, B. Genç, E.V. Korolev. — DOI <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-5-3> // Construction Materials and Products. — 2023. — Т 6. — № 5. — URL: <https://bstu-journals.ru/wp-content/uploads/2023/10/3-ibragimov.pdf>. (дата обращения: 16.08.2024).
16. **Ватин, Н.И.** Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н. И. Ватин, Д.В. Петросов, А.И. Калачев, П. Лахтинен // Инженерно-строительный журнал. — 2011. — № 4. — С. 16–21. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16448498>. — EDN NVYMZJ. (дата обращения: 16.08.2024).
17. Патент № 2153554 С2 Российская Федерация, МПК E01C 21/00, E01C 3/04, E01C 7/36. Способ строительства оснований дорожных одежд автомобильных дорог, площадок, тротуаров на основе золоминеральных смесей: № 98114383/03: заявл. 21.07.1998: опубл. 27.07.2000 / В.Я. Симонов. — EDN OGHEEQ.

Сведения об авторах:

Слободчикова Надежда Анатольевна — кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия, e-mail: nslobodchikova@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=518380

Плюта Ксения Викторовна — эксперт, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия, e-mail: kv_plyuta@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7028-7427>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1124352

Клюев Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова», Белгород, Россия,
e-mail: klyuyev@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>
РИНЦ: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=529053

Статья получена: 19.08.2024. Принята к публикации: 29.11.2024. Опубликовано онлайн: 05.12.2024.

Авторы выражают благодарность ООО «Иркутскзолотпродукт» за предоставление данных о химическом составе золошлаковых смесей

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. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023;48(80): 31040–31048. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.230>.
2. Zolotova I.Yu. Benchmarking Best Practices of Coal Combustion Product Utilization. *Innovacii i investitsii*. 2020;(7): 123–128. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43831822> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
3. Minaev A.N., Zubova O.V., Kulik D.M., Siletskiy V.V., Lugovov V.I. Application of Ash-Polymer Mixtures in the Construction of Forest Roads. *Lesnoy Zhurnal [Russian Forestry Journal]*. 2020;(3): 106–116. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-3-106-116>.
4. Kuyvasheva A.V., Stepanets V.G. [Application of ash-mineral mixtures in road bases during reconstruction of Lenin Street]. *Young scientist*. 2016;(12): *Young scientist*. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26422968> (accessed 16th August 2024). (In Russ.).
5. Kotlyar V.D., Nebezsko Yu.I., Semenova M.Yu. Molding properties of clay mixtures in the soft mud brick manufacture. *Construction Materials and Products*. 2024;7(1). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-1-5>.
6. Muzalev S.V., Nikiforova E.V., Petrova O.A., Antonova O.V., Melnikova L.A. Recycling of municipal solid waste in construction. *Construction Materials and Products*. 2023;6(5). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-5-7>.
7. Vakili A.H., Salimi M., Keskin İ., Jamalimoghdam M. A systematic review of strategies for identifying and stabilizing dispersive clay soils for sustainable infrastructure. *Soil and Tillage Research*. 2024;239: 106036. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106036>.
8. Lofler M., Slobodchikova N.A., Plyuta K.V. Getting the Cement on The Basis of Wastes of Industrial Production. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction*. 2017;7(2): 62–66. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29409352> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
9. Lofler M., Slobodchikova N.A. Methods for reinforcing soil compositions with lime for road construction. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction*. Real estate. 2018;8(2): 141–147. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-141-147>.
10. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review. *Construction and Building Materials*. 2023;398: 132435. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132435>.
11. Ahmad S., Ghazi M.S.A., Syed M., Al-Osta M.A. Utilization of fly ash with and without secondary additives for stabilizing expansive soils: A review. *Results in Engineering*. 2024;22: 102079. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102079>.
12. Laguna-Torres C.A., González-López J.R., Guerra-Cossío M.Á., Guerrero-Baca L.F. et al. Effect of physical, chemical, and mineralogical properties for selection of soils stabilized by alkaline activation of a natural pozzolan for earth construction techniques such as compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*. 2024;419: 135449. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135449>.

13. Safi W., Singh S. Efficient & effective improvement and stabilization of clay soil with waste materials. *Materials Today: Proceedings*. 2022;51: 947–955. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.333>.
14. Ibragimov R.A., Shakirzyanov F.R., Kayumov R.A., Korolev E.V. Evaluation of the influence of an aggressive environment on the durability of the cement stone. *Construction Materials and Products*. 2024;7(2). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-2-4>.
15. Kabirova A.I., Ibragimov R.A., Genç B., Korolev E.V. et al. Research trends in the mechanoactivation of clay minerals used in obtaining geopolymers. *Construction Materials and Products*. 2023;6(5). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2023-6-5-3>.
16. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtinen P. Use of ashes and ash-and-slag wastes in construction. *Magazine of Civil Engineering*. 2011;(4): 16–21. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16448498> (accessed 16th August 2024). (In Russ., abstract in Eng.).
17. Simonov V.Ja. *Method of Constructing Pavement Bases of Motor Roads, Platforms, Sidewalks Based on Ash-Mineral Mixtures*. RU 2153554 C2 (Patent) 1998. (accessed 16th August 2024).

Information about the authors:

Nadezhda A. Slobodchikova — Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia,
e-mail: nslobodchikova@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_items.asp?authorid=518380

Ksenia V. Plyuta — Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, e-mail: kv_plyuta@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7028-7427>
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=1124352

Sergey V. Klyuev — Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia,
e-mail: klyuyev@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1995-6139>
RSCI: https://www.elibrary.ru/author_profile.asp?authorid=529053

Submitted: 19th August 2024. Revised: 29th November 2024. Published online: 5th December 2024.

The authors would like to thank OOO «Irkutskzoloproduct» for providing data on the chemical composition of ash-slag mixtures