

Оценка эффективности применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях автомобильных дорог

Н.А. Слободчикова¹, А.А. Степаненко¹, С.В. Ключев²

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия,

²Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, г. Белгород, Россия

²Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия

Аннотация: Применение золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях дорожных одежд автомобильных дорог позволяет значительно увеличить объемы их повторного использования. Одним из перспективных направлений является их использование в составах укрепленных грунтов. Для оценки эффективности применения этих материалов используются такие показатели, как стоимость строительства и общая толщина конструкции дорожной одежды. По результатам проведенных исследований установлено, что снижение общей толщины дорожной одежды со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по сравнению со слоями из традиционных материалов составило до 48 %, снижение стоимости строительства конструкций дорожных одежд с применением золошлаковых смесей составляет до 21%.

Ключевые слова: укрепленные грунты, золошлаковые смеси, дорожная одежда, основание дорожной одежды.

Введение. В России каждый год сжигается более 123 млн. т. угля и образуется 18-25 млн. тонн золошлаковых отходов, объем повторного использования составляет 12-17% [1-3]. Основным объемом золошлаковых отходов представлен золошлаковыми смесями.

Согласно энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035, года доля утилизированных и обезвреженных отходов сжигания твердого топлива в отраслях топливно-энергетического комплекса к 2035 году должна составлять 50 %. Одной из наиболее интересных сфер повторного применения этих отходов является строительство автомобильных дорог.

Золошлаковые смеси можно применять в качестве техногенного грунта в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, для возведения слоев дорожной одежды. Исследованиями укрепленных грунтов занимались различные ученые [4-6].

На целесообразность и эффективность применения золошлаковых смесей в дорожном строительстве влияет много факторов: удаленность объекта строительства от золоотвала, наличие каменных материалов и грунтов, техническая категория автомобильной дороги, интенсивность движения транспортных средств, состав потока и т. д. [7-9].

Наиболее общим показателем эффективности применения этих материалов может являться стоимость строительства, общая толщина конструкции и транспортно-эксплуатационные характеристики автомобильной дороги [10].

Материалы и методы. В исследовании использованы пробы:

- №1 золошлаковая смесь Усть-Илимской ТЭЦ.
- №2 золошлаковая смесь Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский уч.).

Определение физико-механических характеристик выполнено в соответствии со стандартными методами ГОСТ 12536, ГОСТ 23558, ГОСТ 25100, ОДМ 218.2.031, ГОСТ 26423. Физико-механические характеристики приведены в табл. 1.

Таблица №1

Результаты определения физико-механических свойств золошлаковых смесей

Наименование показателя	№1	№2
Классификация	песок пылеватый	песок пылеватый
Тип золошлаковой смеси	среднезернистый	мелкозернистый
Полный остаток на сите № 008, %	22,7	67,3
Удельная поверхность, м ² /кг	247,4	212,3
Потери массы при прокаливании, %	1,13	0,75
pH	9,71	8,18
Насыпная плотность, кг/м ³	1000	610
Максимальная плотность, г/см ³	1,58	1,03
Оптимальная влажность, %	19,9	36,92
Влажность на границе текучести, %	–	–
Влажность на границе раскатывания, %	не раскатывается в жгут диаметром 3 мм	не раскатывается в жгут диаметром 3 мм

В лабораторных условиях подобраны составы золошлаковых смесей, укрепленных портландцементом (табл. 2).

Таблица №2

Результаты подбора состава грунтов, укрепленных портландцементом

Наименование грунта	№1	№2	
Содержание вяжущего, %	6	8	
Прочность на сжатие в сухом состоянии в возрасте 7 сут., МПа	1,64	-	
Прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии в проектном возрасте 28 сут., МПа	7,96	5,27	
Прочность на растяжение при изгибе в водонасыщенном состоянии в проектном возрасте 28 сут., МПа	1,80	1,12	
Марка по прочности	M40	M40	
Водостойкость	0,79	0,99	
Прочность на сжатие после замораживания/ оттаивания	25 циклов	9,33	4,24
	50 циклов	5,73	3,43
	Марка	F50	F50

Для оценки эффективности применения золошлаковых смесей, укрепленных портландцементом, разработаны и рассчитаны конструкции дорожных одежд с использованием золошлаковых смесей и с использованием традиционных материалов. Конструкции дорожной одежды разработаны на основе расчетов, выполненных по трем критериям прочности:

- по допускаемому упругому прогибу;
- по условию сдвигоустойчивости подстилающего грунта и малосвязных конструктивных слоев;
- на сопротивление монолитных слоев покрытия усталостному разрушению от растяжения при изгибе.

Конструкции дорожных одежд рассчитаны для следующих условий:

- Дорожно-климатическая зона – I₃.
- Срок службы дорожной одежды – 24 года.
- Категория автомобильной дороги – IV.
- Расчетная нагрузка – АК-10,0; Р 0,6 МПа.

Всего рассчитано 66 конструкций дорожных одежд. Примеры расчета конструкций приведены в табл. 3-4.

Таблица №3

Конструкции дорожной одежды облегченного типа

Заданная надежность $K_n = 0,85$ Требуемый коэффициент прочности $K_{пр}^{ТР}$ по критерию упругого прогиба – 1,06 Минимальный требуемый модуль упругости – 180 МПа Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды $0,86 \cdot 10^6$								
Конструктивный слой	Вариант 1.1		Вариант 1.2		Вариант 1.3		Вариант 1.4	
	Материал слоя	h, см	Материал слоя	h, см	Материал слоя	h, см	Материал слоя	h, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Покрытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	10	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	13	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	13	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по способу заклинки	13
Покрытие	Щебень, обработанный органическим вяжущим, уложенный по пропитки	14	-	-	-	-	-	-
Основание	Смеси щебеночно-песчаные, гравийно-песчаные обработанные вязким, жидким или эмульгированным органическим вяжущим по ГОСТ Р 70454	15	Гравийно-песчаная смесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558), соответствующие марке М20	13	Легкая песчаная супесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558), соответствующие марке М20	13	Золошлаковая смесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558), соответствующие марке М20	13

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Основание	Гравийно-песчаные смеси для оснований по ГОСТ Р 70458	17	Гравийно-песчаные смеси для оснований по ГОСТ Р 70458	25	Гравийно-песчаные смеси для оснований по ГОСТ Р 70458	25	Гравийно-песчаные смеси для оснований по ГОСТ Р 70458	25
Дополнительный слой основания	Песок средний по ГОСТ 32824	25	Песок средний по ГОСТ 32824	35	Песок средний по ГОСТ 32824	35	Песок средний по ГОСТ 32824	35
Грунт земляного полотна	Тяжелый песчанистый суглинок	-	Тяжелый песчанистый суглинок	-	Тяжелый песчанистый суглинок	-	Тяжелый песчанистый суглинок	-
Общая толщина, см	81		86		86		86	
Стоимость, руб.	27 444		21 205		21 958		21 551	

Таблица №4

Конструкции дорожной одежды переходного типа

Заданная надежность $K_n = 0,82$ Требуемый коэффициент прочности $K_{пр}^{ТР}$ по критерию упругого прогиба – 1,02 Минимальный требуемый модуль упругости – 110 МПа Суммарное расчетное число приложений расчетной нагрузки за срок службы дорожной одежды $4,6 \cdot 10^4$								
Конструктивный слой	Вариант 2.1		Вариант 2.2		Вариант 2.3		Вариант 2.4	
	Материал слоя	h, см	Материал слоя	h, см	Материал слоя	h, см	Материал слоя	h, см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Покрытие	-	-	Защитный слой: АБ А11ВЛ на БНД 100/130	4	Защитный слой: АБ А11ВЛ на БНД 100/130	4	Защитный слой: АБ А11ВЛ на БНД 100/130	4
Покрытие	Крупнообломочный грунт укрепленный жидким или	15	Гравийно-песчаная смесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ	10	Легкая песчанистая супесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ	10	Золошлаковая смесь, обработанная цементом 6 % (ГОСТ 23558),	10

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	эмульгированным органическим вяжущим по ГОСТ Р 70453		23558), соответствующие марке М20		23558), соответствующие марке М20		соответствующие марке М20	
Основание	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси для оснований по ГОСТ Р 70458	22	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси для оснований по ГОСТ Р 70458	15	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси для оснований по ГОСТ Р 70458	15	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси для оснований по ГОСТ Р 70458	15
Дополнительной слой основания	Песчано-гравийные смеси	30	Песчано-гравийные смеси	27	Песчано-гравийные смеси	27	Песчано-гравийные смеси	27
Грунт земляного полотна	Супесь легкая песчанистая	-	Супесь легкая песчанистая	-	Супесь легкая песчанистая	-	Супесь легкая песчанистая	-
Общая толщина, см	67		52		52		52	
Стоимость, руб.	18 271		16 294		16 875		16 559	

Для оценки эффективности применения золошлаковых смесей ТЭЦ в конструкциях дорожных одежд по показателю «стоимость строительства» проведен расчет стоимости типовых конструкций, указанных в табл. 3-4.

Для определения стоимости строительных работ использованы стандартные методики МДС 81-35.2004, МДС 81-34.2004, МДС 81-25.2001, Сборники федеральных единичных расценок.

Стоимость определена в базисном уровне цен (по состоянию на 01.01.2000 г.) на основе локальных смет. Стоимость материалов включает

доставку автотранспортом на расстояние до 30 км. Стоимость указана без НДС. Расчет сметной стоимости приведен в табл. 3-4.

Результаты. Для оценки эффективности применения конструкций дорожных одежд с золошлаковыми смесями ТЭЦ используются значение уменьшения общей толщины конструкции дорожной одежды. Сопоставление общей толщины конструкций дорожных одежд с применением золошлаковых смесей и дорожных одежд без применения золошлаковых смесей приведено в табл. 5.

Таблица 5

Оценка эффективности применения дорожных одежд со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по показателю толщина конструкции

Категория автомобильной дороги	Тип дорожной одежды	Вариант конструкции	Общая толщина для схемы увлажнения		Снижение толщины конструкции для схемы увлажнения, %	
			1,2	3	1,2	3
1	2	3	4	5	6	7
V	Переходный	1	42	43	11,9	11,6
		2	37	38	-	-
		3	40	42	7,5	9,5
	Облегченный	4	38	38	7,9	7,9
		5	35	35	-	-
		6	36	37	2,8	5,4
IV	Переходный	1	56	56	48,2	48,2
		2	29	29	-	-
		3	33	33	12,1	12,1
	Переходный	4	60	60	46,7	46,7
		5	32	32	-	-
		6	37	37	13,5	13,5
	Переходный	7	50	50	14,0	14,0
		8	43	43	-	-
		9	46	46	6,5	6,5
	Облегченный	10	74	74	27,0	27,0
		11	54	54	-	-
		12	58	58	6,9	6,9
	Облегченный	13	66	66	18,2	18,2
		14	54	54	-	-



1	2	3	4	5	6	7
	Облегченный	15	57	57	5,3	5,3
		16	55	55	41,8	41,8
		17	32	32	-	-
		18	35	35	8,6	8,6
	Облегченный	19	23	23	21,7	21,7
		20	18	18	-	-
		21	18	18	0,0	0,0
	Облегченный	22	56	56	42,9	42,9
		23	32	32	-	-
		24	36	36	11,1	11,1
	Облегченный	25	25	25	28,0	28,0
		26	18	18	-	-
		27	21	21	14,3	14,3
	Капитальный	28	78	81	28,2	29,6
		29	56	57	-	-
		30	69	73	18,8	21,9
	Капитальный	31	67	69	10,4	8,7
		32	60	63	-	-
		33	68	62	11,8	-1,6
	Облегченный	34	52	52	48,1	48,1
25		27	27	-	-	
36		36	36	25,0	25,0	
III	Капитальный	1	85	87	11,8	10,3
		2	75	78	-	-
		3	86	89	12,8	12,4
	Капитальный	4	81	85	12,3	12,9
		5	71	74	-	-
		6	76	76	6,6	2,6
	Капитальный	7	70	74	5/14/13	14/17
		8	65/56/57	60/57	-	-
		9	67	69	2/11/10	9/12
	Облегченный	10	63/66	66	11/14	16,7
		11	52	55	-	-
		12	57/61	59	5/9	6,8
	Капитальный	13	76	78	7,9	9,0
		14	70	71	-	-
		15	82	83	14,6	14,5
II	Капитальный	1	81	83	4,9	6,0
		2	77	78	-	-
		3	77	80	0,0	2,5

1	2	3	4	5	6	7
	Капитальный	4	75	76	9,3	7,9
		5	68	70	-	-
		6	82	83	17,1	15,7
	Капитальный	7	59	59	32,2	32,2
		8	40	40	-	-
		9	47	47	14,9	14,9

Как видно из табл. 5, снижение общей толщины дорожной одежды со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по сравнению со слоями из традиционных материалов составило до 48 %.

Снижение стоимости строительства конструкций дорожных одежд с применением золошлаковых смесей составляет до 21%.

Применение золошлаковых отходов в дорожном строительстве позволяет сократить площади земель, занимаемые золоотвалами и снизить экологическую нагрузку. Для более эффективной оценки применения золошлаковых смесей необходимо также понимать влияние этих материалов в конструкциях дорожной одежды на окружающую среду.

Заключение. Золошлаковые смеси можно применять в качестве техногенного грунта в составах грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, для возведения слоев дорожной одежды.

Снижение общей толщины дорожной одежды со слоями из золошлаковых смесей ТЭЦ по сравнению со слоями из традиционных материалов составило до 48 %.

Снижение стоимости строительства конструкций дорожных одежд с применением золошлаковых смесей составляет до 21%.

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 // International Journal of Hydrogen Energy. 2023. pp. 31040-31048.

2. Золотова И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС // Инновации и инвестиции. 2020. №7. URL: cyberleninka.ru/article/n/benchmarking-zarubezhnogo-opyta-utilizatsii-produktov-szhiganiya-tverdogo-topliva-ugolnyh-tes.

3. Ватин, Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 4. С. 16–21.

4. 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). P. 4.

5. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhidov D.A., Khezhev T.A. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads // Construction Materials and Products. 2024. 7 (6). P. 3.

6. Лофлер М., Слободчикова Н.А., Плюта К.В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. №2 (21). С. 62-67.

7. Мартьянов В.И., Степаненко А.А. Проектирование баз данных автомобильной отрасли на основе теоретико-множественного анализа сложных систем // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 2 (41). С. 214-223.

8. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Соотношение размера частиц в полидисперсных структурах как первый шаг к оптимизации составов композиционных вяжущих // Инженерный вестник Дона, 2013. №2 (25). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596.



9. Хмелевцов А.А. Формирование структурных связей в аргиллитоподобных глинах сочинской свиты в г. Сочи // Инженерный вестник Дона, 2013. №4 (27). URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037.

10. Жуков Е.А. Модернизация дорожного хозяйства России на основе инновационных технологий МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). 2017. Т. 8. № 2 (30). С. 196–202.

References

1. Putilova I.V. International Journal of Hydrogen Energy, 2023. pp. 31040-31048.

2. Zolotova I.Yu. Innovacii i investicii. 2020. №7. URL: cyberleninka.ru/article/n/benchmarking-zarubezhnogo-opyta-utilizatsii-produktov-szhiganiya-tverdogo-topliva-ugolnyh-tes.

3. Ibragimov R.A., Shakirzyanov F.R., Kayumov R.A., Korolev E.V. Construction Materials and Products. 2024. 7 (2). P. 4.

4. Vatin, N.I. Inzhenerno-stroitel'ny' zhurnal. 2011. № 4. pp. 16–21.

5. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhidov D.A., Khezhev T.A. Construction Materials and Products. 2024. 7 (6). P. 3.

6. Lofler M., Slobodchikova N.A., Pljuta K.V. Izvestija vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2017. №2 (21). pp. 62-67.

7. Mart'yanov V.I., Stepanenko A.A. Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. 2022. Т. 12. № 2 (41). pp. 214-223.

8. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596.

9. Hmelevcov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037.

10. Zhukov E.A. MIR (Modernizaciya. Innovacii. Razvitie). 2017. Т. 8. № 2 (30). pp. 196–202.

Дата поступления: 17.12.2024 Дата публикации: 3.02.2025
