

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

2026, Том 13, № 2 / 2026, Vol. 13, Iss. 2 <https://t-s.today/issue-2-2026.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/27SATS226.pdf>

DOI: 10.15862/27SATS226 (<https://doi.org/10.15862/27SATS226>)

2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Рябых, Д. М. Оценка эффективности применения карбидного ила совместно с золошлаковой смесью для укрепления грунтов автомобильных дорог / Д. М. Рябых, С. В. Ключев, Н. А. Слободчикова, А. В. Ключев // Транспортные сооружения. — 2026. — Т. 13. — № 2. — URL: <https://t-s.today/PDF/27SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/27SATS226.

For citation:

Ryabykh D.M., Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Klyuev A.V. Evaluation of the effectiveness of using carbide sludge in conjunction with an ash and slag mixture to strengthen the soil of highways. *Russian Journal of Transport Engineering*. 2026;13(2): 27SATS226. Available at: <https://t-s.today/PDF/27SATS226.pdf>. DOI: 10.15862/27SATS226. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 625.7

Рябых Дмитрий Михайлович

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа, Россия
Аспирант

E-mail: 89273452615@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0188-1718>

Ключев Сергей Васильевич

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

ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», Москва, Россия
Профессор

Доктор технических наук, профессор

E-mail: klyuyev@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-8414>

Слободчикова Надежда Анатольевна

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

Кандидат технических наук

E-mail: NSlobodchikova@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=518380

Ключев Александр Васильевич

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

Доктор технических наук, доцент

E-mail: Klyuyevav@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-8414>

**Оценка эффективности применения
карбидного ила совместно с золошлаковой смесью
для укрепления грунтов автомобильных дорог**

Аннотация. Различными исследованиями доказана эффективность применения карбидного ила для укрепления грунтов автомобильных дорог. Наибольший эффект достигается при укреплении глинистых грунтов. Исследования применения карбидного ила для укрепления золошлаковых смесей от сжигания угля практически отсутствуют. Золошлаковые смеси от сжигания угля содержат в своем составе оксиды алюминия и кремния, которые могут вступать в реакцию с гидроксидом кальция и образовывать новые соединения, повышающие прочностные характеристики укрепленного грунта. В статье приведены результаты исследования свойств карбидного ила, а также результаты разработки состава укрепленного грунта на основе применения золошлаковой смеси, карбидного ила и портландцемента. Укрепление золошлаковой смеси карбидным илом не позволяет получить высокие прочностные характеристики. При введении в составы портландцемента в количестве 3 % от массы сухого грунта прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии увеличивается до 1,5 МПа, прочность на сжатие после 25 циклов замораживания и оттаивания составляет 1,2 МПа. Составы можно использовать для строительства дополнительного слоя основания дорожной одежды и слоев земляного полотна автомобильных дорог низких технических категорий. Применение разработанного состава золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и карбидным илом в конструкции дорожной одежды приводит к увеличению общей толщины конструкции дорожной одежды на 10 % в сравнении с конструкциями дорожной одежды с применением традиционных материалов. Снижение стоимости строительства конструкции дорожной одежды с применением разработанных составов в сравнении с конструкцией дорожной одежды с применением традиционных материалов составило 3-5 % (9400–18 215 тыс. руб.).

Ключевые слова: карбидный ил; золошлаковая смесь; укрепление грунтов; техногенный грунт

Введение

Развитие отрасли дорожного хозяйства невозможно без разработки новых дорожно-строительных материалов. Особенно важна разработка новых строительных материалов на основе техногенных отходов для строительства и ремонта автомобильных дорог общего пользования. Т. к. в условиях ограниченного финансирования строительства и ремонта автомобильных дорог крупнотоннажное применение техногенных отходов позволит снизить затраты на производство этих материалов и утилизировать техногенные отходы.

Годовой экономический ущерб от загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления по разным оценкам составляет около 10 % валового внутреннего продукта Российской Федерации. Проблема их переработки — приоритетная экологическая и экономическая задача Российской Федерации, так как накопление в больших количествах техногенных отходов свидетельствует о нерациональном использовании первичных природных ресурсов, запасы большинства которых ограничены и исчерпаемы.

Одним из перспективных направлений повторного использования техногенных отходов в дорожно-строительных материалах в условиях ограниченного финансирования отрасли дорожного хозяйства является укрепление и стабилизация грунтов, неорганическими вяжущими материалами. В частности, в составах укрепленных грунтов можно применять золошлаковые отходы тепловых электростанций и известьсодержащие отходы (карбидный ил).

Карбидный ил представляет собой многотоннажный порошкообразный известьсодержащий отход (рис. 1), образующийся в результате переработки карбида кальция CaC_2 в ацетилен C_2H_2 .

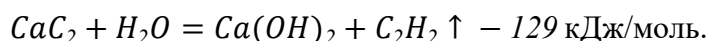


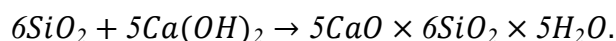


Рисунок 1. Карбидный ил (разработано авторами)

Ежегодно образуются от 18 до 70 млн литров карбидного ила [1; 2]. Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов карбидный ил относится к отходам 4–5-го класса опасности [3].

Различными учеными доказана эффективность применения карбидного ила в качестве вяжущего (компонента комплексного вяжущего) для укрепления и стабилизации грунтов автомобильных дорог.

Введение карбидного ила в количестве до 9 % от массы сухого грунта повышает прочность, водостойкость и морозостойкость грунта [2; 4; 5]. Наибольшая эффективность достигается при укреплении глинистых грунтов т. к. глинистые грунты характеризуются пуццолановой активностью, которая заключается в способности активных глинистых и коллоидных частиц взаимодействовать с гидроксидом кальция карбидного ила [6]. Гидроксид кальция вступает в химическое взаимодействие (пуццолановая реакция) с активными кремнистыми и глиноземистыми компонентами грунта с образованием вяжущих составов или гелей — гидрата силиката кальция [5; 6]



Имеются исследования применения карбидного ила в сочетании с золой уноса и красным шламом для укрепления лессовых грунтов [7], в сочетании с золой уноса и глиноземистого цемента для укрепления грунтов обратной засыпки [8].

Исследования укрепления карбидным илом техногенных грунтов практически отсутствуют. Имеются исследования применения золошлаковых смесей в составах укрепленных грунтов [9; 10].

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года объемы добычи угля должны увеличиться с 448–530 млн тонн (2024 год) в диапазоне 485–668 млн тонн. до 2035 года. Объем поставок на внутренний рынок к 2035 году составит 170–196 млн тонн.

В работе [11] приведены результаты исследования золы уноса в качестве частичной замены цемента в строительных смесях, в работе [12] приведены результаты применения золы уноса в сочетании с золой гидроудаления в составах композиций для засыпки горных выработок.

В работе [13] приведены результаты применения золы уноса бурого угля в сочетании с твёрдых биологических отходов для использования в качестве дорожного покрытия.

В исследовании [14] приведены результаты стабилизации органических грунтов бентонитом и золами уноса.

В исследованиях [15; 16] приведены результаты стабилизации грунтов золами совместно с опилками.

Между тем, например, золошлаковые смеси от сжигания угля содержат в своем составе оксиды алюминия и кремния, которые могут вступать в реакцию с гидроксидом кальция и образовывать новые соединения, повышающие прочностные характеристики укрепленного грунта.

В связи с чем, в работе поставлена цель — оценка эффективности применения карбидного ила и золошлаковой смеси тепловых электростанций при строительстве дорожных одежд автомобильных дорог.

Методы

В работе использованы следующие материалы: карбидный ил, техногенный грунт — золошлаковая смесь от сжигания угля на тепловых электростанциях, портландцемент ЦЕМ П/А-3 32,5Б.

Выбор данного класса портландцемента обоснован тем, что цементы высоких классов при твердении слоев из грунтов, укрепленных портландцементом, приводят к образованию усадочных трещин. Характеристики портландцемента приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики портландцемента ЦЕМ П/А-3 32,5Б (ГОСТ 31108-2016)

Наименование показателя	Единицы измерения	Значение
Класс прочности	—	32,5
Минеральная добавка — зола-уноса	%	11
Нормальная густота цементного теста	%	25,7
Значение удельной эффективной активности естественных радионуклидов	Бк/кг	111 ± 16

Разработано авторами

Химический состав карбидного ила и золошлаковой смеси приведен в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав пробы золошлаковой смеси и карбидного ила

	Содержание, %											
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	TiO ₂	MgO	CaO	Ca(OH) ₂	K ₂ O	Na ₂ O	MnO ₂	P ₂ O ₃
Золошлаковая смесь (разработано авторами)	28,8	12,5	50,4	0,92	0,77	1,3	5,8	—	0,8	0,16	0,11	0,12
Карбидный ил [11]	0,72	0,41	0,21	1,83	—	0,74	—	69,5	0,063	—	0,074	—

Разработано авторами [11]

Для определения физико-механических свойств золошлаковой смеси и их классификации использованы стандартные методы лабораторных испытаний, приведенные в таблице 3.

Рентгенофазовый анализ выполнен методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре.

Подбор состава золошлаковой смеси укрепленной карбидным илом выполнен стандартным методом. Качественные характеристики укрепленного грунта определены в возрасте 56 суток.

Таблица 3

Методы лабораторных испытаний золошлаковой смеси

№ п.п.	Определяемый показатель	Нормативный документ
1	Гранулометрический состав	ГОСТ 12536 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава»
2	Максимальная плотность, оптимальная влажность	ГОСТ 22733 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности»
3	Влажность	ГОСТ 5180 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»
4	Классификация	ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация»
5	Потеря массы при прокаливании	ГОСТ 8269.1 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы химического анализа»

Разработано авторами

Для оценки эффективности применения разработанных материалов применены два показателя:

1. Общая толщина конструкции дорожной одежды.
2. Стоимость.

Для этого выбрана автомобильная дорога регионального значения III технической категории с типичными эксплуатационными условиями. Технические параметры автомобильной дороги приведены в таблице 4.

Таблица 4

Параметры автомобильной дороги

Дорожно-климатическая зона	I ₃	Срок службы дорожной одежды	24 года
Категория автомобильной дороги	IV	Заданная надежность K_n	0,85
Тип дорожной одежды	Усовершенствованный облегченный	Расчетная нагрузка	AK-11,5
Минимальный требуемый модуль упругости	228 МПа	Расчетное суточное число приложений на полосу приведенной нагрузки на последний год службы, ед./сут.	364,61

Разработано авторами

Расчет дорожной одежды выполнен с учетом требований и положений ГОСТ Р 71404 «Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования».

Сметная стоимость в локальных сметных расчетах определена в ценах 2001 года (по состоянию на 01.01.2000 г.) с индексацией на 3 квартал 2025 года, с использованием сметно-нормативной базы ГЭСН-2020, ФЕР-2020 (с Изм. 1–9).

Расчеты выполнены с применением программного обеспечения ГРАНД-Смета, версия 2025.3.

Результаты

Фазовый состав карбидного ила определен с помощью рентгенофазового анализа (табл. 5).

Рентгенограмма карбидного ила приведена на рисунке 2.

Таблица 5

Количественный фазовый анализ карбидного ила и золошлаковой смеси

Наименование	Содержание, %	
	Карбидный ил	Золошлаковая смесь
Карбонат кальция, кальцит	88,6	—
Гидроксид кальция Портландит	9,1	—
Кварц с низким содержанием оксида кремния	2,3	20,9
Муилит 3:2	—	57,2
Полевой шпат (альбит)	—	21,9
Неопределенные	6,4	4,4

Разработано авторами

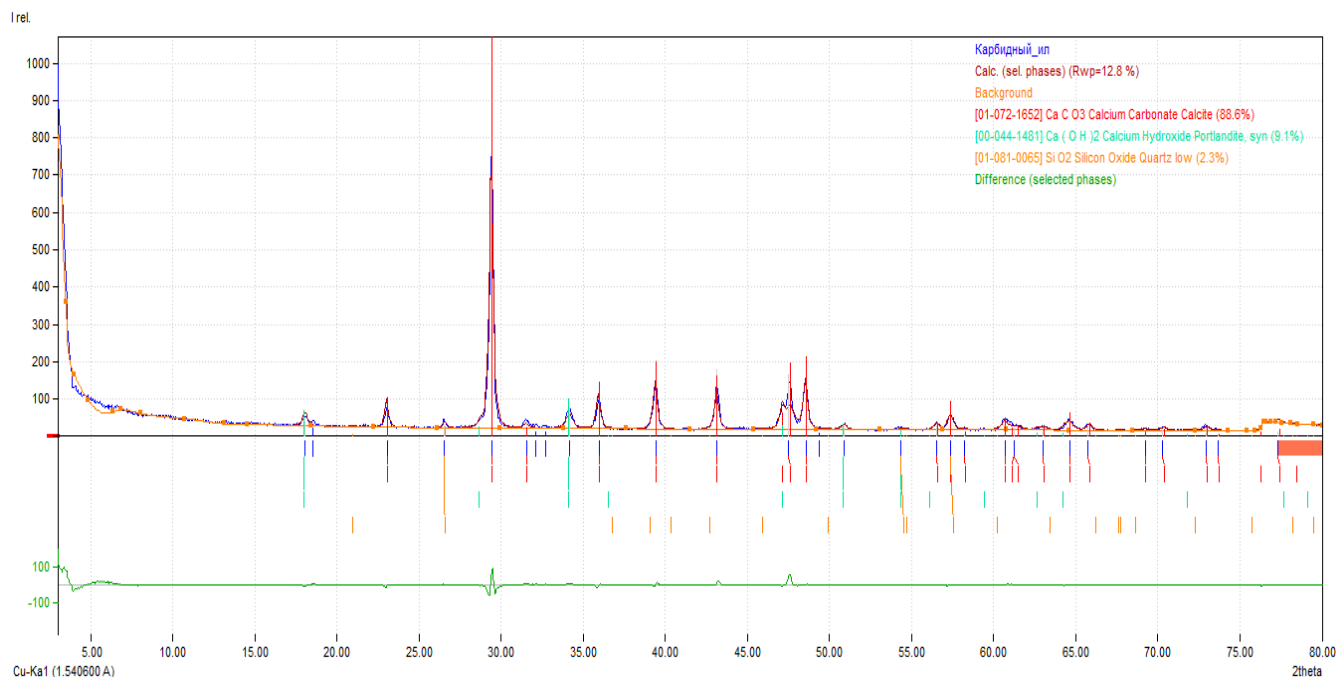


Рисунок 2. Рентгенограмма карбидного ила (разработано авторами)

Высокие пики (особенно в диапазоне $2\theta \approx 25-30^\circ$) соответствуют характерным рефлексам кальцита (CaCO_3). Это подтверждает доминирование этой фазы в исследуемом материале.

Мелкие пики и фон указывают на наличие аморфной составляющей и/или мелкокристаллических фаз.

Разброс интенсивности пиков говорит о полидисперсности кристаллитов (различие в размерах и степени совершенства кристаллической решетки).

Аморфный фон на рентгенограмме указывает на наличие стеклофазы (некристаллизованных силикатов), очень мелких кристаллитов (размер < 100 нм), не дающих четких пиков и органических примесей или адсорбированной воды.

По результатам рентгенофазового анализа можно сделать следующие выводы:

- Карбидный ил имеет преимущественно кальцитовый состав (88,6 %).
- Аморфная составляющая может повышать реакционную способность карбидного ила, но также вызывать неравномерность свойств в композициях.

Рентгенограмма золошлаковой смеси приведена на рисунке 3.

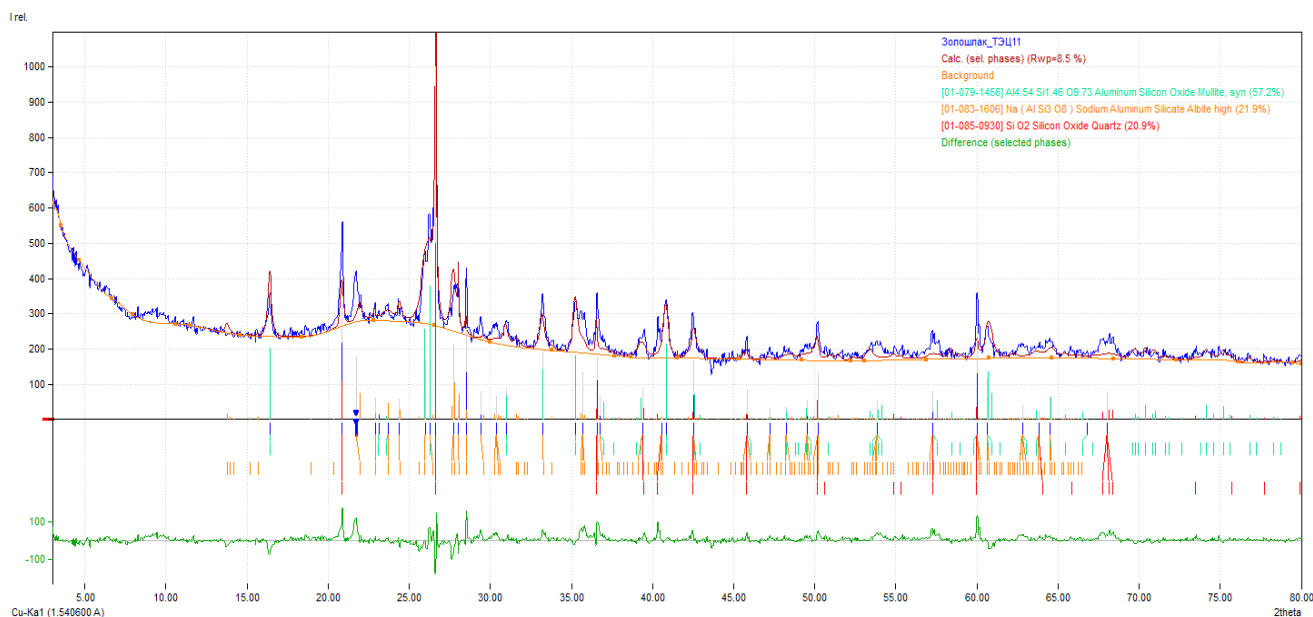


Рисунок 3. Рентгенограмма золошлаковой смеси (разработано авторами)

По результатам рентгенофазового анализа установлено, что золошлаковая смесь на 57 % состоит из муллита.

Наличие алюмосиликатов обеспечивает пуццолановую активность (способность связывать $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с образованием гидросиликатов).

Кристаллическая фаза представлена преимущественно кварцем (SiO_2) и алюмосиликатными соединениями.

Пики на графике относительно чёткие, но невысокие, что указывает на смешанный характер материала.

Аморфная фаза присутствует в значительном количестве, особенно в диапазоне углов 2θ 14–30°.

Гранулометрический состав золошлаковой смеси приведен на рисунке 4.

Золошлаковая смесь неоднородная по гранулометрическому составу, степень неоднородности 6,8.

Определены физико-механические показатели золошлаковой смеси и выполнена классификация в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100.2020.

- Естественная влажность грунта — 16,94 %.
- Содержание частиц более 2 мм, по массе — 0,86 %.
- Максимальная плотность — 1,03 г/см³.
- Оптимальная влажность — 10,34 %.
- Потеря массы при прокаливании — 5,6 %.
- Разновидность грунта — песок пылеватый.

В соответствии с классификацией ГОСТ 25100 золошлаковая смесь является техногенным пылеватым песком.

В лабораторных условиях подобраны составы золошлаковой смеси от сжигания угля, укрепленной карбидным илом. Определены их физико-механические характеристики (табл. 6).

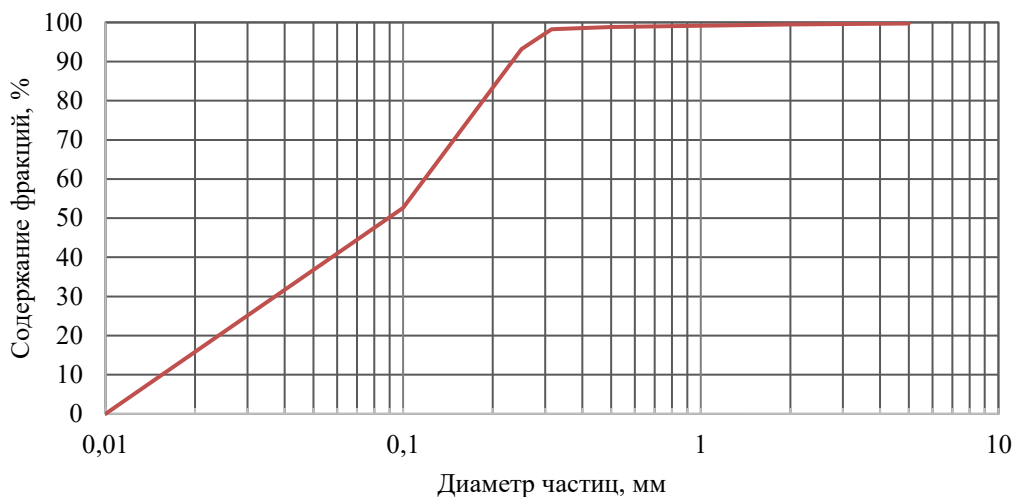


Рисунок 4. График неоднородности
гранулометрического состава золошлаковой смеси (разработано авторами)

Таблица 6

Физико-механические характеристики составов укрепленного грунта

Содержание карбидного ила, %	Прочность на сжатие		Прочность на растяжение при изгибе (в водонасыщенном состоянии)	Водостойкость
	в водонасыщенном состоянии	в сухом состоянии		
10	0,3	0,4	0,0	0,7
12	0,4	0,5	0,0	0,8
16	0,5	0,6	0,1	0,8

Разработано авторами

Укрепление золошлаковой смеси карбидным илом не позволяет получить высокие прочностные характеристики.

Однако, полученные в таблице 6 значения свидетельствуют об образовании структурных связей, улучшающих качество укрепленного грунта.

При введении в составы портландцемента в количестве 3 % от массы сухого грунта прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии увеличивается до 1,5 МПа, прочность на сжатие после 25 циклов замораживания и оттаивания составляет 1,2 МПа, что соответствует марке М10 по прочности, марке F25 по морозостойкости согласно требованиям ГОСТ 23558-94.

Составы можно использовать для строительства дополнительного слоя основания дорожной одежды и слоев земляного полотна автомобильных дорог низких технических категорий.

Согласно статистическим данным большая часть автомобильных дорог регионального или межмуниципального и местного значения относится к дорогам низких технических категорий. Для автомобильных дорог низких технических категорий одной из эффективных технологий с позиции стоимости строительных работ при приведении отдельных участков или сетей автомобильных дорог в нормативное состояние (капитальный ремонт, ремонт) является технология холодной регенерации (укрепление грунтов / каменных материалов).

Наиболее предпочтительной технологией с точки зрения стоимости является приготовление смесей смешением на месте с использованием однопроходных грунтосмесительных машин. Технология включает следующие технологические операции:

1. Профилирование и предварительное уплотнение обрабатываемого слоя.

Техногенный грунт вывозится на автомобильную дорогу, профилируется автогрейдером с учетом проектной толщины слоя и уплотняется легкими и средними катками. Коэффициент уплотнения должен составлять более 0,85–0,9.

2. Дозирование и распределение вяжущих материалов.

Перед проходом грунтосмесительной машины по поверхности грунта распределителем сыпучих веществ или вручную распределяется карбидный ил.

3. Перемешивание грунта с добавками, вяжущими и водой.

Перемешивание смеси производится за один проход машины.

Минимальная ширина перекрытия смежных полос должна быть не менее 15 см.

Вяжущие материалы (портландцемент и карбидный ил) должны быть распределены на поверхности устраиваемого слоя на всю ширину прохода ресайклера на колесном ходу без учета его перекрытия следующим проходом.

4. Профилирование и уплотнение смеси.

Уплотнение смеси до максимальной плотности должно быть завершено не позднее чем через 3 ч, а при пониженных температурах (ниже 10°C) — не позднее чем через 5 ч после введения в смесь воды.

В процессе уплотнения катки должны двигаться от краев к оси дороги, а затем в обратной последовательности с перекрытием каждого следа.

Уплотнение смеси звеном катков следует производить до достижения максимальной плотности.

Вибраторы на катке следует включать и выключать только в движении во избежание появления следов от вальца.

5. Уход за устроенным основанием.

Уход состоит в обеспечении твердения материала при благоприятном термовлажностном режиме в течение 7–14 суток до достижения им 70 % проектной прочности.

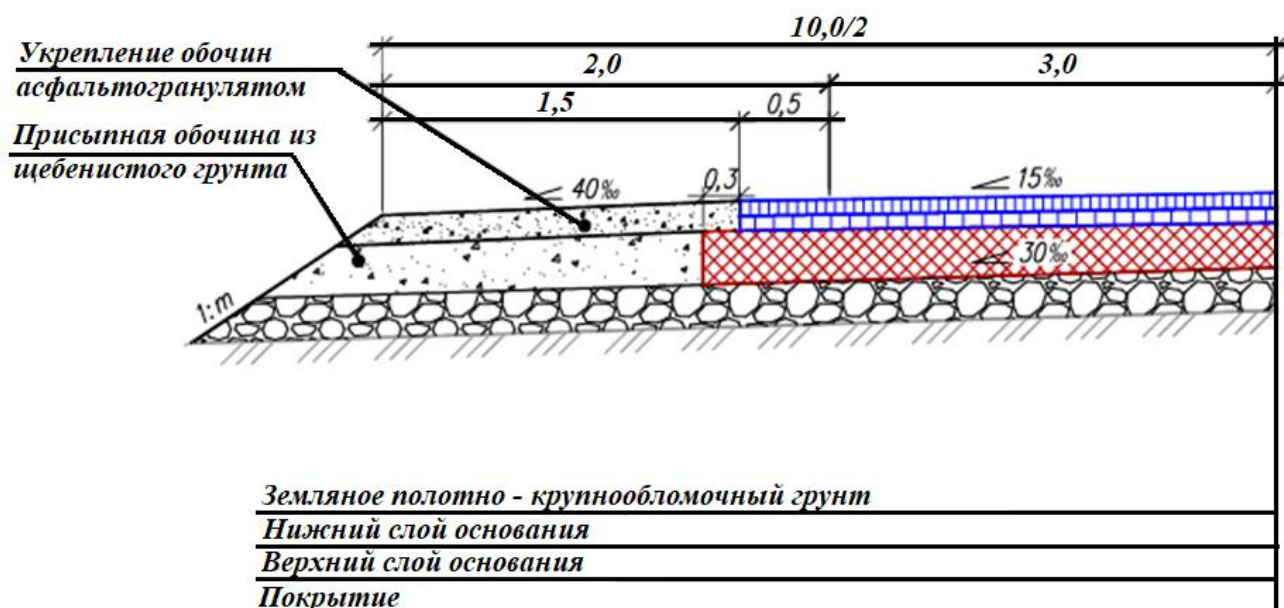


Рисунок 5. Конструкция дорожной одежды (разработано авторами)

Обеспечение термовлажностного режима твердения целесообразно проводить путем:

- Укрытия слоя паронепроницаемой пленкой (например, «Дорнит») с поливкой его водой.
- Устройства песчаного слоя толщиной не менее 5 см.
- Розлива пленкообразующих материалов (битумной эмульсии в количестве от 0,8 до 1,5 л/м²).

Движение построечного транспорта по слою укрепленного основания разрешается через 7 сут. после его устройства.

Выполнен расчет 3 вариантов конструкций дорожных одежд автомобильной дороги с применением разработанных составов и традиционных материалов (табл. 7, рис. 5).

Таблица 7

Конструкции дорожных одежд автомобильной дороги

Наименование слоя	Конструкция дорожной одежды № 1		Конструкция дорожной одежды № 2		Конструкция дорожной одежды № 3	
	наименование материала	толщина слоя, см	наименование материала	толщина слоя, см	наименование материала	толщина слоя, см
Покрытие	Щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-16 по ГОСТ Р 58406.1 на БНД 100/130 по ГОСТ 33133	5,0	Щебеночно-мастичный асфальтобетон ЦМА-16 по ГОСТ Р 58406.1 на БНД 100/130 по ГОСТ 33133	5,0	Щебеночно- мастичный асфальтобетон ЦМА- 16 по ГОСТ Р 58406.1 на БНД 100/130 по ГОСТ 33133	5,0
Верхний слой основания	Асфальтобетон А22Он по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 100/130 по ГОСТ 33133	8,0	Асфальтобетон А22Он по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 100/130 по ГОСТ 33133	8,0	Асфальтобетон А22Он по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 100/130 по ГОСТ 33133	8,0
Нижний слой основания	Песчано-гравийная смесь, укрепленная портландцементом	12,0	Золошлаковая смесь, укрепленная портландцементом и карбидным илом	15,0	Щебеночно-песчаная смесь, обработанная цементом по ГОСТ Р 70455-2022	12,0
—	Общая толщина дорожной одежды	25	Общая толщина дорожной одежды	28	Общая толщина дорожной одежды	25

Грунт земляного полотна — крупнообломочный дресвяный

Разработано авторами

Конструкция дорожной одежды № 2 с применением разработанного состава золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и карбидным илом, имеет большую толщину, чем конструкции дорожной одежды № 1 и № 3 с применением традиционных материалов. Увеличение толщины конструкции дорожной одежды составило 10 %.

Разработанные составы предназначены для возведения слоев основания дорожной одежды автомобильной дороги. В состав работ по содержанию автомобильных дорог не входят работы по содержанию слоев основания дорожной одежды. Поэтому сопоставительный анализ стоимости выполнен на основе расчета стоимости строительства конструкций автомобильных дорог.

Результаты расчета стоимости строительства дорожных одежд за 1 м² площади дорожной одежды приведены в таблице 8.

Снижение стоимости строительства конструкции дорожной одежды с применением разработанных составов в сравнении с конструкцией дорожной одежды с применением традиционных материалов составило 3–5 % (9400–18 215 тыс. руб.) (табл. 9).

Таблица 8

Результаты расчета стоимости строительства дорожных одежд

Наименование показателя	Конструкция дорожной одежды № 1	Конструкция дорожной одежды № 2	Конструкция дорожной одежды № 3
Стоимость строительства конструкции дорожной одежды с НДС на 3 квартал 2025 года	330 692 тыс. руб.	321 291 тыс. руб.	339 507 тыс. руб.
Стоимость за 1 м ² с НДС на 3 квартал 2025 года	4,6 тыс. руб.	4,4 тыс. руб.	4,7 тыс. руб.

Разработано авторами

Таблица 9

Снижение стоимости строительства конструкции дорожной одежды

Конструкция дорожной одежды	Снижение стоимости строительства конструкции дорожной одежды с применением разработанных составов в сравнении с конструкцией дорожной одежды с применением традиционных материалов, %	Снижение стоимости строительства конструкции дорожной одежды с применением разработанных составов в сравнении с конструкцией дорожной одежды с применением традиционных материалов, тыс. руб.
Конструкция дорожной одежды № 1	3	9 400
Конструкция дорожной одежды № 3	5	18 215

Разработано авторами

В результате проведенного сравнения вариантов конструкций дорожных одежд наиболее лучший эффект с позиции стоимости строительства достигается за счет применения разработанного состава золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и карбидным илом.

Заключение

Для автомобильных дорог низких технических категорий одной из эффективных технологий с позиции стоимости строительных работ является технология укрепления грунтов. Кроме традиционных материалов, грунтов и вяжущих материалов для укрепления грунтов автомобильных дорог применяются различные техногенные отходы, что имеет особенно важное значение т. к. количество образования и накопления отходов в Мире постоянно растет.

Различными учеными доказана эффективность применения карбидного ила в качестве вяжущего (компонента комплексного вяжущего) для укрепления и стабилизации грунтов. Исследования укрепления карбидным илом техногенных грунтов практически отсутствуют.

Укрепление золошлаковой смеси карбидным илом не позволяет получить высокие прочностные характеристики. Повышение значения качественных характеристик можно добиться путем введения в составы портландцемента.

По результатам выполненной работы разработаны составы укрепленного грунта. Составы укрепленной золошлаковой смеси на основе карбидного ила и портландцемента можно использовать для строительства дополнительного слоя основания дорожной одежды и слоев земляного полотна автомобильных дорог низких технических категорий.

Для автомобильных дорог низких технических категорий одной из эффективных технологий с позиции стоимости строительных работ при приведении отдельных участков или сетей автомобильных дорог в нормативное состояние является технология холодной регенерации (укрепление грунтов / каменных материалов).

Применение разработанного состава золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и карбидным илом в конструкции дорожной одежды приводит к увеличению общей толщины конструкции дорожной одежды на 10 % в сравнении с конструкциями дорожной одежды с применением традиционных материалов.

Снижение стоимости строительства конструкции дорожной одежды с применением разработанных составов в сравнении с конструкцией дорожной одежды с применением традиционных материалов составило 3–5 % (9400–18 215 тыс. руб.).

В результате проведенного сравнения вариантов конструкций дорожных одежд наиболее лучший эффект с позиции стоимости строительства достигается за счет применения разработанного состава золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом и карбидным илом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang D.F. Cyclic CO₂ capture performance of carbide slag / D.F. Zhang, S.G. Li, W.L. Song, W.G. Lin // Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects. — 2016. — Т. 38, № 4. — С. 577–582. — DOI: [10.1080/15567036.2013.820234](https://doi.org/10.1080/15567036.2013.820234). (дата обращения: 17.05.2026).
2. Соколова Ю. В. Структурообразование в дисперсной системе "глинистый грунт" / Ю. В. Соколова, М. А. Фролова, А. М. Айзенштадт, Е. В. Королёв // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. — 2024. — Т. 16, № 4. — С. 375–382. — DOI: [10.15828/2075-8545-2024-16-4-375-382](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-4-375-382). — EDN: [HXVOGO](https://www.edn.net/HXVOGO). (дата обращения: 17.05.2026).
3. Бутовский М. Э. Утилизация карбидного ила / М. Э. Бутовский // Строительные материалы. — 2008. — № 11. — С. 52–53. — EDN: [EJYGAI](https://www.edn.net/EJYGAI). (дата обращения: 21.05.2026).
4. Grishin A. N. Finely dispersed composite binder for soil fixation by injection method / A. N. Grishin, A. I. Panchenko, I. Ya. Kharchenko, M. I. Bazhenov // Vestnik MGSU. — 2017. — Т. 12, № 11(110). — С. 1289–1298. — DOI: [10.22227/1997-0935.2017.11.1289-1298](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.11.1289-1298). — EDN: [YMEBTP](https://www.edn.net/YMEBTP). (дата обращения: 21.05.2026).
5. Sokolova Yu.V. Potentiometric method for assessing pozzolanic activity of highly dispersed materials / Yu.V. Sokolova, A.M. Aizenstadt, M.A. Frolova [et al.] // Nanotechnology in Construction: Scientific Internet Journal. — 2023. — Т. 15, № 4. — С. 349–358. — DOI: [10.15828/2075-8545-2023-15-4-349-358](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-4-349-358). — EDN: [EPOVXX](https://www.edn.net/EPOVXX). (дата обращения: 21.05.2026).
6. Sokolova Yu.V. Rheology of soil concrete mixtures based on polymer-organic binder with mineral modifier / Yu.V. Sokolova, V.V. Nelyubova, A.M. Aizenstadt, V.V. Strokova // Building materials. — 2022. — № 12. — С. 26–32. — DOI: [10.31659/0585-430X-2022-809-12-26-32](https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-809-12-26-32). — EDN: [ADWNLR](https://www.edn.net/ADWNLR). (дата обращения: 21.05.2026).
7. Bai Y.Y. Utilization of municipal solid waste incineration fly ash with red mud-carbide slag for eco-friendly geopolymers preparation / Y.Y. Bai, W.C. Guo, X.L. Wang [et al.] // Journal of Cleaner Production. — 2022. — Т. 340. — DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.130820](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130820). — EDN: [KKGXIS](https://www.edn.net/KKGXIS). (дата обращения: 27.05.2026).

8. Sun X. Sustainable production of liquefied stabilized soil using waste clay, fine incineration bottom ash, carbide sludge, and GGBS for backfilling applications / X. Sun, M.Z.Y. Ting, J. Qin, Yaolin Yi // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. — 2025. — С. 13. — DOI: [10.1016/j.jrmge.2025.04.006](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.04.006). — EDN: [NHIOAW](https://www.edn.net/NHIOAW). (дата обращения: 27.05.2026).
9. Лофлер М. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства / М. Лофлер, Н. А. Слободчикова, К. В. Плюта // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2017. — Т. 7, № 2. — С. 62–66. — URL: item.asp?id=29409352. — EDN: [YTORPF](https://www.edn.net/YTORPF). (дата обращения: 24.06.2026).
10. Лофлер М. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства / М. Лофлер, Н. А. Слободчикова // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2018. — Т. 8, № 2. — С. 141–147. — URL: item.asp?id=35173180. — DOI: [10.21285/2227-2917-2018-2-141-147](https://doi.org/10.21285/2227-2917-2018-2-141-147). — EDN: [GNBZIF](https://www.edn.net/GNBZIF). (дата обращения: 24.06.2026).
11. Juanir R.G. Class-C fly ash from coal as a partial substitute in cement-based paste and mortar design mix — A case in the Philippines / R.G. Juanir, S.E.L. Gudia, A.W. Go [et al.] // Sustainable Materials and Technologies. — 2024. — Т. 39. — DOI: [10.1016/j.susmat.2023.e00813](https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00813). — EDN: [UGMCMU](https://www.edn.net/UGMCMU). (дата обращения: 17.05.2026).
12. Cheng B. Effects of fly and coal bottom ash ratio on backfill material performance / B. Cheng, R. Liu, X. Li [et al.] // Construction and Building Materials. — 2022. — Т. 319. — DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2021.125831](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125831). — EDN: [MPYUVQ](https://www.edn.net/MPYUVQ). (дата обращения: 17.05.2026).
13. Mohajerani A. Physical, mechanical and chemical properties of biosolids and raw brown coal fly ash, and their combination for road structural fill applications / A. Mohajerani, S. Lound, G.K. Liassos [et al.] // Journal of Cleaner Production. — 2017. — С. 1–11. — DOI: [10.1016/j.jclepro.2017.07.250](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.250). (дата обращения: 21.05.2026).
14. Pokharel B. Effect of calcium bentonite clay and fly ash on the stabilization of organic soil from Alberta, Canada / B. Pokharel, S. Siddiqua // Engineering Geology. — 2021. — Т. 293. — DOI: [10.1016/j.enggeo.2021.106291](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106291). — EDN: [HYYXVC](https://www.edn.net/HYYXVC). (дата обращения: 21.05.2026).
15. Kim B. Geotechnical Properties of Fly and Bottom Ash Mixtures for Use in Highway Embankments / B. Kim, M. Prezzi, R. Salgaro // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. — 2021. — № 7. — С. 914–924. — DOI: [10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:7\(914\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:7(914)). (дата обращения: 27.05.2026).
16. Макаренко С. В. Зольная керамика и силикатный кирпич на основе золошлаковых отходов ТЭЦ Иркутской области / С. В. Макаренко, А. Б. Гонжитов, К. О. Вабищевич [и др.] // Качество. Технологии. Инновации: материалы VII международной научно-практической конференции, Новосибирск, 13–15 февраля 2024 года. — Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2024. — С. 218–228. — EDN: [EVRCLQ](https://www.edn.net/EVRCLQ). (дата обращения: 27.05.2026).

Ryabykh Dmitrii Mikhailovich

Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia
E-mail: 89273452615@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0188-1718>

Klyuev Sergey Vasilevich

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Moscow, Russia
Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Belgorod, Russia
E-mail: klyuyev@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-8414>

Slobodchikova Nadezhda Anatolyevna

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
E-mail: NSlobodchikova@rambler.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7845-2969>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=518380

Klyuev Aleksandr Vasilyevich

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Moscow, Russia
E-mail: Klyuyevav@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0845-8414>

Evaluation of the effectiveness of using carbide sludge in conjunction with an ash and slag mixture to strengthen the soil of highways

Abstract. Various studies have proven the effectiveness of using carbide sludge to strengthen the soils of highways. The greatest effect is achieved when strengthening clay soils. There are practically no studies on the use of carbide sludge to strengthen ash and slag mixtures from coal combustion. Ash and slag mixtures from coal combustion contain aluminum and silicon oxides, which can react with calcium hydroxide and form new compounds that increase the strength characteristics of reinforced soil. The article presents the results of a study of the properties of carbide sludge, as well as the results of the development of the composition of reinforced soil based on the use of ash and slag mixture, carbide sludge and Portland cement. Reinforcement of the ash and slag mixture with carbide sludge does not allow to obtain high strength characteristics. When Portland cement is added to the compositions in an amount of 3 % by weight of dry soil, the compressive strength in the water-saturated state increases to 1,5 MPa, and the compressive strength after 25 cycles of freezing and thawing is 1,2 MPa. The compositions can be used to build an additional layer of pavement and roadbed layers of low technical categories. The use of the developed composition of the ash and slag mixture reinforced with Portland cement and carbide sludge in the construction of the pavement leads to an increase in the total thickness of the pavement structure by 10 % in comparison with the structures of the pavement using traditional materials. The reduction in the cost of building a road surface structure using the developed compounds in comparison with the construction of a road surface using traditional materials amounted to 3–5 % (9400–18 215 thousand rubles).

Keywords: carbide sludge; ash and slag mixture; soil reinforcement; technogenic soil