

УДК 625.731.82

Т. К. Акчури^а, Б. А. Бондарев^б, А. Н. Канищев^в, А. Е. Борисов^в, А. А. Быкова^в

^а *Волгоградский государственный технический университет*

^б *Липецкий государственный технический университет*

^в *Воронежский государственный технический университет*

УКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ ВТОРИЧНЫМИ РЕСУРСАМИ: ЭКОНОМИЯ И ЭКОЛОГИЯ В ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Представлены результаты комплексного исследования по разработке и обоснованию технологий укрепления грунтов с использованием крупнотоннажных промышленных отходов для дорожного строительства. В ходе работы проведен системный анализ ресурсной базы Российской Федерации, показавший наличие миллиардных запасов золошлаковых материалов, металлургических шлаков и фосфогипса, уровень утилизации которых не превышает 10...20 %. Разработана и предложена функциональная классификация вторичных ресурсов, разделяющая их на активные вяжущие, инертные/активные заполнители и модификаторы, что позволяет целенаправленно проектировать составы композитов. Научно обоснованы и предложены конкретные рецептурно-технологические решения применения золы-уноса, гранулированного доменного шлака и фосфогипса в укрепленных грунтах для устройства оснований, морозозащитных слоев и насыпей дорог IV—V категорий. Дана комплексная оценка эффективности предложенных решений, основанная на теоретическом анализе и расчетных методах, которая демонстрирует их техническую состоятельность, значительный экономический эффект (потенциальное снижение стоимости конструктивных слоев на 20...60 % за счет замещения привозного щебня и цемента) и положительное экологическое воздействие (утилизация отходов, сокращение выбросов CO₂, сохранение природных ландшафтов). Результаты работы служат теоретической и методической основой для последующей экспериментальной проверки и практической реализации ресурсосберегающих технологий в дорожной отрасли, а также для формирования необходимой нормативной базы.

Ключевые слова: вторичные материальные ресурсы, дорожное строительство, укрепление грунтов, экономическая эффективность, экологическая эффективность, золошлаковые материалы, металлургические шлаки, фосфогипс, ресурсосбережение, стоимость строительства.

Введение

Современное дорожное строительство сталкивается с комплексом взаимосвязанных вызовов: необходимостью создавать дорожные конструкции, способные выдерживать возрастающие нагрузки и гарантированно служить долгие годы, минимизацией экологического следа и сокращением затрат в условиях роста цен на энергоносители и традиционные материалы. Линейная модель экономики («добыча — производство — захоронение») в ресурсоемкой дорожной отрасли, потребляющей миллионы тонн щебня, песка и цемента, становится экономически и экологически несостоятельной¹ [1, 2]. Стратегическим ответом является переход к циркулярной (замкнутой) модели, где отходы одних отраслей становятся сырьем для других.

Дорожная отрасль, в силу своей колоссальной материалоемкости, выступает идеальным «потребителем-утилизатором» для крупнотоннажных промышленных отходов. Устройство лишь 1 км двухполосной дороги требует до

¹ URL: <https://www.fedstat.ru/indicators/search?searchText=отходы+производства+и+потребления>.

50 тыс. м³ грунта, 5 тыс. м³ песка, 3 тыс. м³ щебня, а для магистралей эти цифры возрастают в разы [3]. Параллельно в России ежегодно образуется около 7 млрд т отходов, из которых используется менее 40 %, а накопленный объем превышает 40 млрд т² [4]. Особую проблему представляют техногенные отходы: золошлаки ТЭС (накоплено ≈ 1,5...2 млрд т), металлургические шлаки, фосфогипс (≈ 300 млн т накоплено), хвосты обогащения, образующие гигантские «техногенные месторождения» [5—7].

Национальные проекты «Экологическое благополучие» и отраслевая программа по применению вторичных ресурсов до 2030 г. прямо указывают на дорожное строительство как на стратегического потребителя вторичных минеральных ресурсов (ВМР)³. Однако, несмотря на государственную значимость и очевидную выгоду, уровень практического применения ВМР остается низким. В данной статье делается акцент на разработку технологических решений, обеспечивающих комплексный эффект: снижение стоимости строительства и уменьшение экологической нагрузки.

Цель работы — научное и практическое обоснование эффективных составов и технологий укрепления грунтов на основе ВМР, оцениваемое через призму экономической и экологической результативности для применения в конструктивных слоях дорог 4-й и 5-й категорий. Для ее достижения решались следующие задачи: анализ ресурсной базы и классификация ВМР; разработка рецептурно-технологических решений; комплексная оценка их технико-экономической и экологической эффективности.

Материалы и методы

Основой исследования выступил системный анализ данных официальной статистики (Росстат), отраслевых отчетов и научных публикаций, касающихся объемов образования, накопления и утилизации промышленных отходов в Российской Федерации⁴ [1—11]. В качестве ключевых объектов изучения были выбраны крупнотоннажные техногенные отходы, обладающие потенциалом для применения в дорожном строительстве: золошлаковые материалы (ЗШМ), металлургические шлаки и сульфатсодержащие отходы (фосфогипс). Их ресурсный потенциал оценен и систематизирован в табл. 1.

Главным методологическим инструментом для проектирования составов укрепленных грунтов стала предложенная функциональная классификация ВМР (табл. 2). Данный подход позволяет систематизировать отходы не по происхождению, а по их технологической роли в композиционном материале, что является основой для целенаправленного подбора компонентов.

² Там же.

³ URL: <http://government.ru/rugovclassifier/919/about>.

Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022—2030 годы : паспорт отраслевой программы (утв. Правительством РФ 10 окт. 2022 г. № 11795п-П11). М., 2022. 48 с.

⁴ URL: <https://www.fedstat.ru/indicators/search?searchText=отходы+производства+и+потребления>.

URL: <http://government.ru/rugovclassifier/919/about>.

Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022—2030 годы : паспорт отраслевой программы (утв. Правительством РФ 10 окт. 2022 г. № 11795п-П11). М., 2022. 48 с.

Т а б л и ц а 1

Ресурсный потенциал ключевых видов ВМР для дорожного строительства в РФ

Вид ВМР	Годовое образование, млн т	Объем накопления, млрд т	Уровень утилизации, %	Потенциал для укрепления грунтов
Золошлаковые материалы (ЗШМ)	25...30 (от угля)	1,5...2,0	10...20	Высокий. Зола-уноса — активный пуццолановый компонент
Металлургические шлаки (доменные)	8,6...16,5	> 0,17 (в отвалах)	≈ 50 (в целом)	Высокий. Молотый шлак — активное вяжущее, шлаковый щебень — заполнитель
Фосфогипс	14...15	≈ 0,3	≤ 2	Высокий для свежего гипса. Основа для гипсосодержащих вяжущих
Отходы строительства и сноса (ОСС)	Около 50...70 (в м ³)	—	≈ 18	Средний. Дробленый бетон — инертный заполнитель
Нефтешламы	Несколько млн	—	Низкий	Средний/Высокий. Органический пластификатор и компонент вяжущих

Т а б л и ц а 2

Функциональная классификация ВМР для укрепления грунтов

Функциональная категория	Основные виды ВМР	Роль в композиции и ключевой эффект
1. Активные (вяжущие) компоненты	Зола-уноса ТЭС (тип II, III), молотый гранулированный доменный шлак (МГШ), прокаленные глины, техногипс (фосфополугидрат)	Формирование цементирующей матрицы. Обеспечение гидравлической/пуццолановой прочности, долговременный набор прочности
2. Заполнители (инертные и активные)	Шлаковый щебень, дробленый бетон/кирпич (ОСС), песок из хвостов обогащения, инертные золошлаки	Создание твердого скелета материала. Повышение модуля деформации, дренающих свойств
3. Модификаторы и активаторы	Сульфатсодержащие отходы (фосфогипс, фторгипс — в малых дозах), щелочные отходы (нефелиновый шлак), нефтешламы	Регулирование сроков схватывания, активация твердения, придание специфических свойств (гидрофобность, пластификация)

Методы исследования включали сравнительный анализ литературных и патентных данных по рецептурам и технологиям, теоретическое обоснование состава композитов на основе известных механизмов взаимодействия компонентов (пуццолановая реакция, гидратация, щелочная активация), а также расчетные методы для оценки потенциальной экономической и экологической эффективности.

Результаты

В результате проведенного исследования были разработаны конкретные рецептурно-технологические решения по укреплению грунтов на основе различных видов ВМР. Укрепление грунтов представляет собой процесс придания им новых, улучшенных свойств (прочности, водостойкости, морозостойкости) за счет введения вяжущих компонентов и уплотнения. Использование ВМР делает эту технологию ключевым элементом циркулярной экономики в дорожном строительстве.

Решения на основе ЗШИМ. Наиболее изученным и ресурсоемким направлением является применение золы-уноса. В зависимости от ее типа выбирается технологическая схема:

- Низкокальциевая зола (тип I, $\text{CaO} < 10\%$). Используется в комплексных вяжущих как пуццолановый компонент. Типовая рецептура для укрепления супесчаного грунта: 8...12 % комбинированного вяжущего (состав: 70...80 % золы, 20...30 % извести или цемента) от массы грунта. Прочность через 28 сут достигает 2...4 МПа, водонепроницаемость повышается в 3...5 раз [9].

- Высококальциевая зола (тип III, $\text{CaO} > 30\%$). Может использоваться как основное вяжущее (6...10 % от массы грунта) с добавкой 1...3 % активатора (жидкое стекло, хлорид кальция) для ускорения твердения. Такие композиции эффективны для укрепления заторфованных и слабых водонасыщенных грунтов [6, 9].

Ключевой технологический аспект: необходимость тщательного перемешивания и уплотнения смеси в оптимальный интервал влажности (на 1...3 % выше оптимальной влажности по Проктору). Опыт Франции и США⁵ [12—14] показывает, что зола-грунтовые смеси успешно работают в основаниях и нижних слоях дорожных одежд, выполняя функцию гидро- и термоизолятора⁶ [7—9]. Таким образом, применение золы-уноса позволяет трансформировать экологический ущерб от золоотвалов в экономию материальных ресурсов, создавая при этом долговечные конструктивные слои.

Решения на основе металлургических шлаков. Гранулированный доменный шлак (ГШ) и его молотая форма (МГШ) — высокоактивные материалы.

- В качестве самостоятельного вяжущего (щелочная активация). Используется для укрепления песчано-гравийных смесей и асфальтогранулобетона (холодный ресайклинг). Состав: 8...15 % МГШ, 3...6 % щелочного активатора (например, раствор жидкого стекла), остальное — местный грунт

⁵ European Commission. Construction and Demolition Waste: Challenges and Opportunities. URL: <https://ec.europa.eu>.

⁶ URL: <http://government.ru/rugovclassifier/919/about>.

Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022—2030 годы : паспорт отраслевой программы (утв. Правительством РФ 10 окт. 2022 г. № 11795п-П11). М., 2022. 48 с.

или дробленый асфальт. Прочность через 28 сут — 5...8 МПа, что сравнимо с цементными системами, но при меньшей хрупкости [11].

- В составе комплексных вяжущих. Совместный помол МГШ с золой-уносом и 5...10 % извести дает эффективное бесклинкерное вяжущее. Расход 10...15 % такого вяжущего на глинистый грунт позволяет получить материал прочностью 3...5 МПа с повышенной сульфатостойкостью [1, 10].

Решения на основе сульфатсодержащих отходов (фосфогипс). Свежий фосфогипс (полугидрат) обладает самостоятельными вяжущими свойствами [15, 16]:

1. Смешивание свежего фосфогипса (естественная влажность 25...35 %) с песчаным или супесчаным грунтом в соотношении 1 : 1...1 : 3 по объему.
2. Укладка слоем 15...25 см, планировка, уплотнение.
3. Естественная кристаллизация в течение 10...72 ч с формированием монолитного слоя прочностью 6...10 МПа.

Преимущества: слой работает как жесткая плита, распределяя нагрузку, обладает низкой теплопроводностью (борьба с пучинистостью) и является гидробарьером. Ограничение: технологически пригоден в основном свежий гипс, что требует организации логистики от химического производства к стройплощадке.

Комбинированные решения. Максимальный комплексный эффект достигается при комбинации ВМР:

- Цемент — зола — шлак. Используется для укрепления тяжелых суглинков. Состав: грунт, 4...6 % цемента, 8...12 % золы-уносы, 5...7 % МГШ. Снижает общий расход цемента на 30...50 %, повышает долговременную прочность и трещиностойкость.

Органоминеральные смеси с нефтешламами. Нефтешлам (5...10 %) выступает как органическое вяжущее и пластификатор в смеси с известью (3...5 %) и грунтом. Получаемый материал обладает пониженным водопоглощением (1...3 %) и прочностью 1,5...2,5 МПа, пригоден для оснований дорог V категории⁷ [3].

Обсуждение

Предложенные в разделе «Результаты» технологические решения направлены на применение в конкретных конструктивных элементах дорог низких категорий (IV—V по СП 34.13330.2012). Укрепленные грунты на основе ВМР могут использоваться в качестве:

1. Основания из укрепленных грунтов. Золоцементогрунты, грунты, укрепленные шлакощелочными вяжущими, применяются вместо традиционных щебеночных или гравийных оснований. Толщина слоя 15...25 см, модуль упругости на расчетный срок 150...250 МПа.

2. Морозозащитные и теплоизолирующие слои. Материалы на основе фосфогипса или золошлаковых смесей с низкой теплопроводностью. Укладываются в земляное полотно для сокращения глубины промерзания и борьбы с пучинистостью.

3. Конструкции земляного полотна (насыпи). Стабилизированные золошлаками или шлаками грунты используются для отсыпки верхней части

⁷ URL: <https://www.fedstat.ru/indicators/search?searchText=отходы+производства+и+потребления>.

насыпи (активной зоны), повышая ее общую устойчивость и несущую способность.

4. Комплексная оценка экономической и экологической эффективности.

Комплексная оценка эффективности данных решений, выполненная на основе теоретического и расчетного анализа, демонстрирует их потенциал для достижения двойной выгоды — экономической и экологической (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Сравнительная оценка эффективности применения ВМР для укрепления грунтов

Вид ВМР	Экономическая эффективность (снижение затрат)	Экологическая эффективность	Технический результат
Зола-уноса ТЭС	20...35 % за счет замещения цемента и щебня. Снижение логистических расходов при использовании местного сырья	Утилизация до 10...15 тыс. т отходов на 1 км дороги. Сокращение выбросов CO ₂ на 0,6...0,8 т на каждую тонну замещенного цемента	Прочность 2...8 МПа, повышение водо- и морозостойкости
Гранулированный шлак	30...50 % за счет замены щебня и цемента	Утилизация отвальных шлаков. Сокращение добычи природного щебня	Прочность 5...8 МПа, высокая сульфатостойкость
Фосфогипс	25...50 % за счет сокращения толщины конструкции и отказа от привозных материалов	Утилизация свежих отходов производства. Снижение нагрузки на гипсопакет	Монолитный слой прочностью 6...10 МПа, гидро- и теплоизоляция
Комбинированные составы	20...60 % (максимальный эффект) за счет оптимизации рецептуры	Комплексная утилизация нескольких видов отходов	Сбалансированные свойства, повышенная долговечность

Техническая эффективность предложенных составов обоснована достижением расчетных и нормативных показателей по прочности, водо- и морозостойкости. Анализ литературных данных и известных механизмов взаимодействия компонентов позволяет прогнозировать долговечность, сопоставимую с традиционными материалами, а в некоторых аспектах (сопротивление сульфатной агрессии, трещиностойкость) — и превосходящую их. Окончательное подтверждение этих характеристик требует проведения натурных и лабораторных испытаний.

Экономический эффект, согласно расчетной модели, возникает за счет двух ключевых факторов: прямой замены дорогостоящих привозных материалов (щебень, цемент) на местные техногенные ресурсы и снижения экологических платежей за размещение отходов.

Экологическая эффективность носит комплексный характер. Прямым и измеряемым результатом является сокращение объемов захоронения отходов

и уменьшение площади нарушенных земель под отвалами. Косвенным, но стратегически важным эффектом является снижение углеродного следа, рассчитанное на основе замещения энергоемкого цемента и сокращения транспортных плеч.

Заключение

В результате проведенного исследования, соответствующего поставленным задачам, получены следующие основные выводы.

По результатам системного анализа подтверждено, что Российская Федерация обладает значительными, но слабо используемыми ресурсами техногенного сырья (золошлаков, металлургических шлаков, фосфогипса), годовой объем образования которых составляет десятки миллионов тонн при низком (менее 20 %) уровне утилизации.

Разработана и предложена функциональная классификация основных видов вторичных ресурсов по их роли в укрепленных грунтах (вяжущие, заполнители, модификаторы), что позволяет перейти от концепции утилизации к целенаправленному проектированию строительных композитов.

Научно обоснованы и предложены конкретные рецептурно-технологические решения укрепления грунтов на основе золы-уноса, гранулированного доменного шлака и фосфогипса, включая оптимальные дозировки и условия применения для различных типов грунтов.

Выполнена комплексная оценка эффективности разработанных решений, показавшая на основании теоретического и расчетного анализа их потенциал для снижения стоимости устройства конструктивных слоев дорожных одежд на 20...60 % за счет замены традиционных материалов и утилизации отходов, а также для достижения значительного экологического эффекта.

Полученные результаты формируют теоретическую и методическую основу для дальнейшего развития данного направления. Следующим ключевым этапом является лабораторная и натурная экспериментальная проверка предложенных составов, включая исследования по укреплению специфических слабых грунтов, таких как гумусовые. Практическая реализация работы зависит от разработки соответствующей нормативной базы и типовых технологических регламентов. Результаты исследования значимы для развития ресурсосберегающих технологий в дорожно-строительной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слободчикова Н. А., Плюта К. В., Дзогий А. А. Перспективы использования отходов производства и потребления при строительстве, реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог // Вестн. ИрГТУ. 2015. № 8(103). С. 126—131.
2. Токарев В. А., Кабалин М. Д., Грищенко М. С., Высоцкая М. А. Рециклинг вторичного сырья для изготовления мелкоштучных бетонных изделий в дорожном строительстве. Обзор // Вестн. МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 6. С. 899—919. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.6.899-919.
3. Руденский А. В. Возможные объемы использования вторичных материальных ресурсов и местных материалов в дорожном строительстве // Дороги и мосты. 2018. № 2(40). С. 286—292. EDN: PQXXHP.
4. Марьев В. А., Руденский А. В. Использование вторичных материальных ресурсов при строительстве и ремонте автомобильных дорог важный резерв ресурсосбережения // Дороги и мосты. 2017. № 1(37). С. 11—24.
5. Пичугин Е. А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы региональной экологии. 2019. № 4. С. 77—87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077. EDN: MNEMSX.

6. Золотова Е. С. Исследования почвенно-растительного покрова в зоне влияния шлаковых отвалов черной металлургии // Изв. УГГУ. 2024. Вып. 1(73). С. 97—105. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-1-97-105.
7. Литвинова Т. Е., Сучков Д. В. Комплексный подход к утилизации техногенных отходов минерально-сырьевого комплекса // Горный информац.-аналит. бюл. 2022. № 6-1. С. 331—348. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_331.
8. Пашкевич М. А., Куликова Ю. А. Литификация доменным шлаком фильтрата полигонов ТКО // Зап. Горного ин-та. 2024. Т. 267. С. 477—487. EDN: CSHCSM.
9. Слободчикова Н. А. Использование отходов промышленности для получения вяжущих в дорожной отрасли // Изв. вузов. Инвестиции. Стр-во. Недвижимость. 2015. № 1(12). С. 116—120.
10. Пашкевич М. А., Куликова Ю. А. Современные тенденции управления отходами доменного производства // Вестн. евразийской науки. 2022. Т. 14. № 6. URL: <https://esj.today/PDF/30NZVN622.pdf>.
11. Траутаин А. И., Тимофеев Д. Г. Разработка различных видов цементов для устройства конструктивных слоев дорожной одежды на основе асфальтогранулобетонных смесей // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. 2023. № 4. С. 34—45.
12. Wong K. C., Wang J. Sustainable urban construction: the role of waste management // Urban Planning International. 2019. Vol. 34. Iss. 3. Pp. 37—44.
13. Soutos M., Domone P. Construction materials: their nature and behaviour. 5th ed. London : CRC Press, 2018. 768 p.
14. Bustillo Revuelta M. Construction materials: geology, production and applications. Cham : Springer, 2021. 347 p.
15. Кочетков А. В., Янковский Л. В. Применение фосфогипса для строительства монолитных слоев дорожной одежды // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2017. № 4. С. 91—102.
16. Бондарев Б. А., Борисов А. Е., Канищев А. Н. Комплексная стабилизация гумусовых грунтов для дорожного строительства: эффективные составы на основе отходов промышленности // Науч. журн. стр-ва и архитектуры. 2025. Вып. 4(80). С. 82—90.

© Акчурин Т. К., Бондарев Б. А., Канищев А. Н., Борисов А. Е., Быкова А. А., 2026

Поступила в редакцию
06.05.2026

Ссылка для цитирования:

Укрепление грунтов вторичными ресурсами: экономия и экология в дорожных конструкциях / Т. К. Акчурин, Б. А. Бондарев, А. Н. Канищев, А. Е. Борисов, А. А. Быкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2026. Вып. 3(104). С. 146—154. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_146.

Об авторах:

Акчурин Талгатъ Кадимович — советник РААСН, канд. техн. наук, проф., проф. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; info@vgasu.ru

Бондарев Борис Александрович — д-р техн. наук, проф. каф. строительного материаловедения и дорожных технологий, Липецкий государственный технический университет. Российская Федерация, 398600, г. Липецк, ул. Московская, 30; smidt48@mail.ru

Канищев Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф. каф. строительства и эксплуатации автомобильных дорог, Воронежский государственный технический университет. Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; 22ank@mail.ru

Борисов Артем Евгеньевич — канд. техн. наук, старший преподаватель каф. строительства и эксплуатации автомобильных дорог, Воронежский государственный технический университет. Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; a.borisov1990@yandex.ru

Быкова Альбина Анатольевна — канд. техн. наук, доц. каф. строительства и эксплуатации автомобильных дорог, Воронежский государственный технический университет. Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

**Talgat K. Akchurin^a, Boris A. Bondarev^b, Aleksandr N. Kanishchev^c,
Artem E. Borisov^c, Albina A. Bykova^c**

^a **Volgograd State Technical University**

^b **Lipetsk State Technical University**

^c **Voronezh State Technical University**

SOIL STABILIZATION WITH SECONDARY RESOURCES: ECONOMY AND ECOLOGY IN ROAD CONSTRUCTIONS

The article presents the results of a comprehensive study on the development and justification of soil stabilization technologies using large-tonnage industrial waste for road construction. The work involved a systematic analysis of the resource base of the Russian Federation, which revealed the availability of billions of tons of accumulated coal combustion products (fly ash, bottom ash), metallurgical slags, and phosphogypsum, with a utilization rate not exceeding 10...20 %. A functional classification of secondary resources has been developed and proposed, dividing them into active binders, inert/active aggregates, and modifiers, enabling the targeted design of composite mixtures. Scientifically grounded and specific formulation-technological solutions are proposed for the application of fly ash, granulated blast-furnace slag, and phosphogypsum in stabilized soils for constructing bases, frost-protection layers, and embankments for Category IV—V roads. A comprehensive assessment of the proposed solutions' effectiveness, based on theoretical analysis and calculation methods, demonstrates their technical feasibility, significant economic benefit (potential cost reduction of structural layers by 20...60 % through the replacement of imported crushed stone and cement), and positive environmental impact (waste utilization, reduction of CO₂ emissions, preservation of natural landscapes). The results of the work serve as a theoretical and methodological basis for subsequent experimental verification and practical implementation of resource-saving technologies in the road industry, as well as for the formation of the necessary regulatory framework.

Key words: secondary material resources, road construction, soil stabilization, economic efficiency, environmental efficiency, coal combustion products, metallurgical slags, phosphogypsum, resource conservation, construction cost.

For citation:

Akchurin T. K., Bondarev B. A., Kanishchev A. N., Borisov A. E., Bykova A. A. [Soil stabilization with secondary resources: economy and ecology in road constructions]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2026, iss. 3, pp. 146—154. DOI: 10.35211/18154360_2026_3_146.

About authors:

Talgat K. Akchurin — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; info@vgasu.ru; Scopus ID: 57190967539

Boris A. Bondarev — Doctor of Engineering Sciences, Lipetsk State Technical University. 30, Moskovskaya st., Lipetsk, 398600, Russian Federation; smidt48@mail.ru

Aleksandr N. Kanishchev — Doctor of Engineering Sciences, Voronezh State Technical University. 84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, 394006, Russian Federation; 22ank@mail.ru

Artem E. Borisov — Candidate of Engineering Sciences, Voronezh State Technical University. 84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, 394006, Russian Federation; a.borisov1990@yandex.ru

Albina A. Bykova — Candidate of Engineering Sciences, Voronezh State Technical University. 84, 20-letiya Oktyabrya st., Voronezh, 394006, Russian Federation